

6th

Конфронси байналхалқии Шашум
"Селхӯ: Фалокатхӯ, Хатар, Пешгӯи,
Муҳофизат"
Душанбе - Хоруғ, Тоҷикистон

6-я
международная конференция
СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: КАТАСТРОФЫ,
РИСК, ПРОГНОЗ, ЗАЩИТА
Душанбе-Хорог, Таджикистан

International Conference **DEBRIS FLOWS:** DISASTERS, RISK, FORECAST, PROTECTION

Dushanbe-Khorog, Tajikistan



Volume 1

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 6th International Conference

(Dushanbe – Khorog, Tajikistan)

Volume 1



Edited by
S.S. Chernomorets, K.S. Viskhadzhieva

“Promotion” LLC
Dushanbe
2020

СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
6-й Международной конференции

(Душанбе – Хорог, Таджикистан)

Том 1



Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева

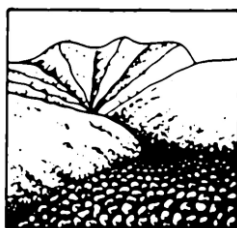
ООО «Промоушн»
Душанбе
2020

СЕЛҲО: фалокатҳо, хатар, пешгӯи, муҳофизат

Маводи
Конфронси 6-уми байналмилалӣ

(Душанбе-Хоруғ, Тоҷикистон)

Ҷилди 1



Муҳаррирон С.С. Черноморетс, К.С. Висхаджиева

ҶДММ «Промоушн»
Душанбе
2020

УДК 551.311.8
ББК 26.823
С29

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. – Ed. by S.S. Chernomorets, K.S. Viskhadzhieva. – Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, 610 p.

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, 610 с.

Селҳо: фалокатҳо, хатар, пешгӯи, муҳофизат. Маводи Конфронси 6-уми байналмилалӣ. (Душанбе–Хорог, Тоҷикистон). Ҷилди 1. – Муҳаррирон С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ҶДММ «Промоушн», 2020, 610 с.

ISBN 978-99975-309-4-3

Ответственные редакторы С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В.Ломоносова)
Edited by S.S. Chernomorets, K.S. Viskhadzhieva (M.V. Lomonosov Moscow State University)

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).
Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman’s book on Debris Flows (Moscow: Geografgiz, 1951, p. 51).

© Селевая ассоциация
© Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат
в Республике Таджикистан

© Debris Flow Association
© Branch of Aga Khan Agency for Habitat
in the Republic of Tajikistan

© Ассотсиатсияи сел
© Филиали Агентии Оғо Хон оид ба макони зист
дар Ҷумҳурии Тоҷикистон

Conference organizers and partners



National Academy of Sciences of Tajikistan



Aga Khan Agency for Habitat



Debris Flow Association



Committee for Emergency Situations and Civil Defense under the Government of the Republic of Tajikistan



Committee for Environmental Protection under the Government of the Republic of Tajikistan



Head Department for Geology under the Government of the Republic of Tajikistan



Hydrometeorology Agency of the Republic of Tajikistan



University of Central Asia



Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography



Laboratory of Physical Geography, National Center for the Scientific Research, University Panthéon-Sorbonne



High Mountain Geophysical Institute



Research Center for Ecology and Environment of Central Asia (Dushanbe)



Chongqing Institute of Green and Intelligent Technologies and Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences

Financial support



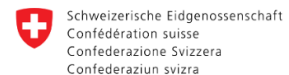
Aga Khan Development Network



Aga Khan Agency for Habitat



UNESCO



Swiss Agency for Development and Cooperation SDC

Main information partner

Geomarketing Publishing Center, Russia (The Georisk World journal)

Организаторы и партнеры конференции



Национальная академия наук
Таджикистана



Агентство Ага Хана по Хабитат



Селевая ассоциация



Комитет по чрезвычайным
ситуациям и гражданской
обороне при Правительстве
Республики Таджикистан



Комитет по охране окружающей
среды при Правительстве
Республики Таджикистан



Главное управление геологии
при Правительстве
Республики Таджикистан



Агентство по
гидрометеорологии Республики
Таджикистан



Университет
Центральной Азии



Московский государственный
университет имени М.В.
Ломоносова, географический
факультет



Лаборатория физической географии Национального
научно-исследовательского центра Франции



Высокогорный геофизический институт
Росгидромета



Научно-исследовательский центр экологии и
окружающей среды Центральной Азии (Душанбе)



Чунцинский институт зеленых и
интеллектуальных технологий и Институт
горных опасностей и окружающей среды КАН

Финансовая поддержка



Организация Ага Хана
по развитию



Агентство Ага Хана по
Хабитат



Организация
Объединенных Наций по
вопросам образования,
науки и культуры
ЮНЕСКО



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Agency for Development
and Cooperation SDC

Швейцарское агентство по
развитию и сотрудничеству

Главный информационный партнер

Издательский центр ООО «Геомаркетинг» (журнал «Геориск»)

Organizing Committee of the Conference

Co-Chairmen of the Organizing Committee

- Farkhod Rakhimi** (National Academy of Sciences of Tajikistan)
Sergey Chernomorets (Debris Flow Association and Lomonosov Moscow State University, Russia)
Ruslan Bobov (Aga Khan Development Network, Tajikistan)
Fangqiang Wei (Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, and Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, China)
Sven Fuchs (BOKU University, Austria)
Xi Chen (Xinjiang Branch, Chinese Academy of Sciences, China)

Vice-Chairman of the Organizing Committee

- Vincent Jomelli** (Laboratory of Physical Geography, CNRS and Pantheon-Sorbonne University Paris 1, France)

Members of the International Organizing Committee

- Mukhtar Bekkiev** (High-Mountain Geophysical Institute, Russia)
Peng Cui (Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, China)
Sergey Erokhin (Institute of Water Problems and Hydropower Engineering, National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, Kyrgyzstan)
Givi Gavardashvili (Tsoetne Mirtskhulava Water Management Institute of the Georgian Technical University, Georgia)
Rinaldo Genevois (University of Padova, Italy)
Yuriy Gensiorovskiy (Sakhalin Department of Far East Geological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Russia)
Ben Jarihani (University of Central Asia, Tajikistan)
Nikolay Kazakov (Special Design Bureau for Marine Research Automation Tools, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Russia)
Zainulobiddin Kobuliev (Institute of Water Problems, Hydropower Engineering and Ecology, National Academy of Sciences of Tajikistan)
Elena Kozireva (Institute of Earth Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Russia)
Andrey Lukashov (Lomonosov Moscow State University, Russia)
Dyushen Mamatkanov (National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, Kyrgyzstan)
Akhmetkal Medeu (Institute of Geography and Water Security, Almaty, Kazakhstan)
Khikmat Muminov (National Academy of Sciences of Tajikistan)
Maxim Petrov (Abdullaev Institute of Geology and Geophysics, State Committee for Geology and Mineral Resources of the Republic of Uzbekistan)
Abdusattor Saidov (National Academy of Sciences of Tajikistan)
Alexandr Shnyparkov (Lomonosov Moscow State University, Russia)
Roy Sidle (University of Central Asia, Tajikistan)
Aleksandr Strom (Hydroproject, Russia)

Kristine Tovmasyan (UNESCO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)

Alexey Vinogradov (Gidrotechproject, Russia)

Eduard Zaporozhchenko (Debris Flow Association, Russia)

Members of the National Organizing Committee

Pulod Aminzoda (Institute of Geology, Seismological Construction and Seismology, National Academy of Sciences of Tajikistan)

Rakhmonbek Bakhdavlatov (Head Department for Geology under the Government of the Republic of Tajikistan)

Ali Fazylov (Institute of Water Problems, Hydropower Engineering and Ecology, National Academy of Sciences of Tajikistan)

Majid Gulayozov (Research Center for Ecology and Environment of Central Asia (Dushanbe), Tajikistan)

Abdulhamid Kayumov (Center of Research of Glaciers, National Academy of Sciences of Tajikistan)

Zainura Khudoyorbekova (Aga Khan Agency for Habitat, Tajikistan)

Working Group of the Organizing Committee

Elena Savernyuk (Lomonosov Moscow State University, Russia)

Viktoriya Kurovskaya (Lomonosov Moscow State University, Russia)

Mamurjon Mirvaisov (National Academy of Sciences of Tajikistan)

Tokhir Sabzaliev (Aga Khan Agency for Habitat, Tajikistan)

Lailo Shogunbekova (Aga Khan Agency for Habitat, Tajikistan)

Vasila Sulaymonova (University of Central Asia, Tajikistan)

Maqsad Suriev (University of Central Asia, Tajikistan)

Karina Viskhadzhieva (Lomonosov Moscow State University, Russia)

Оргкомитет конференции

Сопредседатели Оргкомитета

- Рахими Фарход Кодир** (Национальная академия наук Таджикистана)
- Черноморец Сергей Семенович** (Селевая ассоциация и Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Россия)
- Бобов Руслан Абдураимович** (Организация Ага Хана по развитию, Таджикистан)
- Вэй Фанцян** (Чунцинский институт зеленых и интеллектуальных технологий и Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук, Китай)
- Фукс Свен** (Университет природных ресурсов и естественных наук, Австрия)
- Чэнь Си** (Филиал Китайской академии наук в Синьцзян-Уйгурском автономном районе, Китай)

Заместитель председателя Оргкомитета

- Джомелли Винсент** (Лаборатория физической географии Национального научно-исследовательского центра и Университет Париж-1 Пантеон-Сорбонна, Франция)

Члены международного Оргкомитета

- Беккиев Мухтар Юсубович** (Высокогорный геофизический институт, Россия)
- Виноградов Алексей Юрьевич** (НПО «Гидротехпроект», Россия)
- Гавардашвили Гиви Валерианович** (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета, Грузия)
- Генсиоровский Юрий Витальевич** (Сахалинский филиал Дальневосточного геологического института ДВО РАН, Россия)
- Джарихани Бен** (Университет Центральной Азии, Таджикистан)
- Ерохин Сергей Александрович** (Институт водных проблем и гидроэнергетики Национальной академии наук Кыргызской Республики, Кыргызстан)
- Женева Риналдо** (Падуанский университет, Италия)
- Запорожченко Эдуард Валентинович** (Селевая ассоциация, Россия)
- Казakov Николай Александрович** (Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, Россия)
- Кобулиев Зайнуллобидин Валиевич** (Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана)
- Козырева Елена Александровна** (Институт земной коры СО РАН, Россия)
- Лукашов Андрей Александрович** (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия)
- Маматканов Дюшен Маматканович** (Национальная академия наук Кыргызской Республики, Кыргызстан)
- Медеу Ахметкал Рахметуллаевич** (АО «Институт географии и водной безопасности», Казахстан)
- Муминов Хикмат Халимович** (Национальная академия наук Таджикистана)
- Петров Максим Анатольевич** (Институт геологии и геофизики им. Х.М. Абдуллаева Государственного комитета по геологии и минеральным ресурсам Республики Узбекистан)
- Саидов Абдусаттор Самадович** (Национальная академия наук Таджикистана)

Сидл Рой (Университет Центральной Азии, Таджикистан)

Стром Александр Леонидович (Гидропроект, Россия)

Товмасын Кристинэ (ЮНЕСКО – Организация Объединённых Наций по вопросам образования, науки и культуры)

Цуй Пэн (Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук, Китай)

Шныпарков Александр Львович (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия)

Члены национального Оргкомитета

Аминзода Пулод (Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана)

Бахдавлатов Рахмонбек Давлатбекович (Главное управление геологии при Правительстве Республики Таджикистан)

Гулаёзов Маджид Шоназарович (Научно-исследовательский центр экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе), Таджикистан)

Каюмов Абдулхамид Каюмович (Центр изучения ледников Национальной академии наук Таджикистана)

Фазылов Али Рахматджанович (Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана)

Худоёрбекова Зайнура Наврузбековна (Агентство Ага Хана Хабитат, Таджикистан)

Рабочая группа Оргкомитета

Савернюк Елена Александровна (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Россия)

Висхаджиева Карина Сайдовна (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Россия)

Куровская Виктория Антоновна (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Россия)

Мирвайсов Мамурджон Суфиевич (Национальная академия наук Таджикистана)

Сабзалиев Тохир Зокирович (Агентство Ага Хана по Хабитат, Таджикистан)

Сулаймонова Васида (Университет Центральной Азии, Таджикистан)

Суриев Максад (Университет Центральной Азии, Таджикистан)

Шогунбекова Лайло (Агентство Ага Хана по Хабитат, Таджикистан)



Preface

This volume contains the Proceedings of the **6th conference "Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection" (Dushanbe-Khorog, Tajikistan)**.

Debris flows in mountainous regions cause significant damage to the economy, and often lead to casualties among the population. To solve the debris flow problem, the cooperation of experts from different countries is required. One of the forms of such cooperation is the holding of conferences on "Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection". The conference in Tajikistan is the sixth and continues the series of conferences under the indicated name, held in Pyatigorsk (2008), Moscow (2012), Yuzhno-Sakhalinsk (2014), Irkutsk and Arshan (2016), Tbilisi (2018).

The initiator of the conferences is the Debris Flow Association, founded in 2005 in Pyatigorsk. The Debris Flow Association continues the traditions established by the Commissions for the study of the Kazbek blockages in the 19th century and the Debris Flow Commission of the USSR Academy of Sciences, which worked from 1948 to the end of the 1980s. At present, the Debris Flow Association is the world's largest association of specialists in debris flows and debris flow protection, which includes more than 170 experts from 23 countries. The Debris Flow Association has professional awards – the Fleischman medals, which are awarded to outstanding scientists in the field of debris flow management. By the decision of the Debris Flow Association, since 2018, an annual professional holiday has been established - Selevik Day (Day of the Debris Flow Specialist), which is celebrated on July 19.

The conference in Tajikistan was organized by the Debris Flow Association, the National Academy of Sciences of Tajikistan and the Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, with the participation of government departments of Tajikistan (Committee on Emergency Situations and Civil Defense under the Government of the Republic of Tajikistan, Committee on Environmental Protection under the Government of the Republic of Tajikistan, Main Department of Geology under the Government of the Republic of Tajikistan, Agency for Hydrometeorology of the Republic of Tajikistan), UNESCO, the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University, the Aga Khan Development Network, the University of Central Asia, the High-Mountain Geophysical Institute of Roshydromet, the Scientific Research Center for Ecology and Environment of Central Asia (Dushanbe), the Chongqing Institute of Green and Intelligent Technologies and the Institute of Mountain Hazards and Environment of the Chinese Academy of Sciences, the Laboratory of Physical Geography of the CNRS (France), and the Swiss Agency for Development and Cooperation.

The conference is dedicated to the discussion of such issues as global and regional analysis of debris flows, debris flow disasters of recent years, debris flow risk and forecast, modeling, debris flow hazard of glacial lakes, the role of glacier movements in the formation of debris flows, debris flow protection measures, regulatory documents on forecasting debris flows and mitigation measures.

The conference was scheduled for September 2020, however, due to the epidemiological situation in the world, the Organizing Committee decided to postpone the conference until September 20-26, 2021. The conference venue is the National Library of Tajikistan (Dushanbe) and the University of Central Asia (Khorog). An important element of the international event is a field workshop with a visit to debris flow basins in Tajikistan.

Conference website: www.debrisflow.ru/en/df20.

Here we publish the **Volume 1** of the Proceedings of the conference. It includes 56 articles, the authors of which are experts from Australia, Austria, Azerbaijan, Brazil, Georgia, Italy, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Pakistan, Russia, Tajikistan, Switzerland, and United Kingdom.

Titles of articles, surnames of authors, abstracts and key words are given in Russian and English, the main text is written in one of the indicated languages. The main information partner

of the conference is Geomarketing LLC, which publishes part of the articles selected by the Organizing Committee in the Georisk World journal (No. 2 and 3 for 2020).

The publications of the conference participants provide a state of the art in the theory and methods for debris flow studies. The publications are intended for decision-makers on debris flow mitigation, researchers, and practitioners. Also, the published materials can be used by university lecturers and students in the study of debris flow phenomena.

*Sergey Chernomorets
Karina Viskhadzhieva*

*Debris Flow Association
and
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*



Предисловие

В настоящем сборнике публикуются труды **6-й конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита» (Душанбе-Хорог, Таджикистан)**.

Селевые потоки в горных регионах наносят значительный ущерб хозяйству и нередко приводят к жертвам среди населения. Для решения селевой проблемы требуется сотрудничество экспертов из различных стран. Одной из форм такой кооперации является проведение конференций «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». Конференция в Таджикистане является шестой и продолжает серию конференций под указанным названием, проводившихся в Пятигорске (2008), Москве (2012), Южно-Сахалинске (2014), Иркутске и Аршане (2016), Тбилиси (2018).

Инициатором конференций является Селевая ассоциация, основанная в 2005 г. в Пятигорске. Селевая ассоциация продолжает традиции, заложенные Комиссиями по изучению Казбекского завала в XIX веке и Селевой комиссией Академии наук СССР, работавшей с 1948 г. до конца 1980-х годов. В настоящее время Селевая ассоциация является самым крупным в мире объединением специалистов по селям и защите от них, в котором состоят более 170 экспертов из 23 стран. Селевая ассоциация присуждает профессиональные награды – медали имени Флейшмана, которые вручаются выдающимся ученым в области селеведения. По решению Селевой ассоциации, с 2018 года учрежден ежегодный профессиональный праздник – День селевика, который отмечается 19 июля.

Конференция в Таджикистане организована Селевой ассоциацией, Национальной Академией наук Таджикистана и Филиалом Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан при участии государственных ведомств Таджикистана (Комитет по чрезвычайным ситуациям и гражданской обороне при Правительстве Республики Таджикистан, Комитет по охране окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан, Главное управление геологии при Правительстве Республики Таджикистан, Агентство по гидрометеорологии Республики Таджикистан), ЮНЕСКО, географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Организации Ага Хана по развитию, Университета Центральной Азии, Высогогорного геофизического института Росгидромета, Научно-исследовательского центра экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе), Чунцинского института зеленых и интеллектуальных технологий и Института горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук, Лаборатории физической географии Национального научно-исследовательского центра Франции, Швейцарского агентства по развитию и сотрудничеству.

Конференция посвящена обсуждению таких вопросов, как глобальный и региональный анализ селевых потоков, селевые катастрофы последних лет, риск и прогноз селей, моделирование, селевая опасность ледниковых озер, роль подвижек ледников в формировании селей, селезащитные мероприятия, нормативные документы по прогнозированию селевых потоков и проектированию противоселевых конструкций и сооружений.

Конференция была запланирована на сентябрь 2020 года, однако из-за эпидемиологической ситуации в мире Оргкомитет принял решение о переносе конференции на 20-26 сентября 2021 г. Место проведения заседаний конференции – Национальная библиотека Таджикистана (Душанбе) и Университет Центральной Азии (Хорог). Важным элементом международного мероприятия является полевой семинар с посещением селевых бассейнов Таджикистана.

Сайт конференции: www.debrisflow.ru/df20.

Предлагаем вниманию читателя **первый том** сборника трудов конференции. В него вошли 56 статей, авторами которых являются специалисты из Австралии, Австрии, Азербайджана, Бразилии, Великобритании, Грузии, Италии, Казахстана, Кыргызстана, Пакистана, России, Таджикистана и Швейцарии.

Названия статей, фамилии авторов, резюме и ключевые слова приведены на русском и английском языках, основной текст – на одном из указанных языков. Главным информационным партнером конференции является ООО «Геомаркетинг», которое публикует часть статей, отобранных Оргкомитетом, в журнале «ГеоРиск» (№2 и 3 за 2020 год).

Публикации участников конференции дают срез современного состояния теории и методов, используемых в селеведении – науке о селевых потоках. Публикации предназначены для лиц, принимающих решения по защите от селей, научных сотрудников, специалистов-практиков. Также опубликованные материалы могут быть использованы преподавателями и студентами университетов при изучении селевых явлений.

*Сергей Черноморец
Карина Висхаджиева*

*Селевая ассоциация
и
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*



Риск и последствия прорывов высокогорных озёр Таджикистана

У.Р. Пирмамадов¹, Р.А. Бобов², Ю.Х. Раимбеков¹, Ф.О. Мародасейнов¹,
И.И. Зикиллобеков¹, С.С. Черноморец³, Е.А. Савернюк³, В.М. Кидяева³,
И.В. Крыленко³, И.Н. Крыленко³, К.С. Висхаджиева³

¹Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, Душанбе,
Таджикистан, ubaidullo.pirmamadov@akdn.org

²Организация Ага Хана по развитию, Душанбе, Таджикистан,
ruslan.bobov@akdn.org

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия, sc@geogr.msu.ru

Аннотация. Рассматривается опыт совместных работ филиала Агентства Ага Хана по Хабитат (АКАН) в Республике Таджикистан и специалистов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (Россия) по оценке состояния и степени риска прорывов высокогорных озёр, проводившихся в рамках проекта «Батиметрическая съёмка и моделирование возможных прорывов высокогорных озёр на территории Западного Памира, Таджикистан». Показаны результаты исследований, которые позволили изучить ледниковые и высокогорные озёра бассейнов рек Гунт, Шахдара, Бартанг, а также верхней части бассейна р. Пяндж и разработать перечень мер по снижению риска прорывов этих озёр и смягчению последствий таких прорывов.

Ключевые слова: высокогорные озера, изменение климата, прорывоопасность, сель, наводок, Таджикистан, Горно-Бадахшанская автономная область, батиметрическая съёмка, моделирование, снижение риска

Ссылка для цитирования: Пирмамадов У.Р., Бобов Р.А., Раимбеков Ю.Х., Мародасейнов Ф.О., Зикиллобеков И.И., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Кидяева В.М., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Висхаджиева К.С. Риск и последствия прорывов высокогорных озёр Таджикистана. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 1–24.

Risk and consequences of high-mountain lake outbursts in Tajikistan

U.R. Pirmamadov¹, R.A. Bobov², Yu.Kh. Raimbekov¹, F.O. Marodaseinov¹,
I.I. Zikillobekov¹, S.S. Chernomorets³, E.A. Savernyuk³, V.M. Kidyaeva³,
I.V. Krylenko³, I.N. Krylenko³, K.S. Viskhadzhieva³

¹Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, Dushanbe,
Tajikistan, ubaidullo.pirmamadov@akdn.org

²Aga Khan Development Network, Dushanbe, Tajikistan, ruslan.bobov@akdn.org

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, sc@geogr.msu.ru

Abstract. The experience of joint work of the Aga Khan Agency for Habitat (AKAH) in Tajikistan and specialists of the Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Russia on assessment of the current state and the risk level of high-mountain lakes conducted within the framework of the project “Bathymetric survey and modelling of possible high-mountain lake outbursts in the territory of the Western Pamir, Tajikistan” is considered. In the article, it’s shown the results of these researches that allowed studying glacial and high-mountain lakes in the Gunt, Shakhdara, and Bartang river basins, as well

as the upper part of the Panj River basin and developing a list of measures to reduce the risk of these lake outbursts and mitigate its consequences.

Key words: *high mountain glacial lakes, climate change, outburst-prone lakes, debris flows, floods, Tajikistan, Gorno-Badakhshan Autonomous Region, bathymetric survey, modelling, risk reduction*

Cite this article: Pirmamadov U.R., Bobov R.A., Raimbekov Yu.Kh., Marodaseinov F.O., Zikillobekov I.I., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A., Kidyayeva V.M., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Viskhadzhieva K.S. Risk and consequences of high-mountain lake outbursts in Tajikistan. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 1–24.

Введение

В Таджикистане насчитывается 1449 озёр общей площадью 716 км² (0,5% территории страны). Площадь большинства из них не превышает 1 км². Важно отметить, что 78% озёр расположено в горных областях на абсолютных высотах 3500-5000 м [Мухаббатов, 2016].

На территории таджикского Памира, в Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО), по бассейнам основных притоков реки Пяндж – Гунт, Шахдара, Бартанг – и бассейну самого Пянджа насчитывается более 300 озёр, больших и маленьких по объёму. Самые крупные – озёра Каракуль, Рангуль, Зоркуль, Сарез, Яшилькуль.

По результатам дешифрирования данных дистанционного зондирования, полученным в 2018 г., только в бассейне реки Гунт было выявлено 644 горных озера площадью более 500 м², что значительно превышает предыдущие оценки [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1971]. В соответствии с классификацией озёр мира по величинам площадей их водной поверхности П.В. Иванова [Мякишева, 2009], водоёмы в бассейне Гунта распределяются по классам следующим образом: 602 – озёрки (площадь менее 0,1 км²), 31 – очень малые (0,1–1 км²), 10 – малые (1–10 км²), 1 – среднее (10,1–100 км²).

В течение предыдущих десятилетий прорывы ледниковых озёр в высокогорьях ГБАО неоднократно приводили к катастрофическим последствиям. Примерами таких событий являются прорывы ледниковых озёр в верховьях рек Хидоржеводара в 1991 г., Даштдара в 2002 г. (Рошткалинский район), Кофарендара (Ишкашимский районе) в 2008 г. которые привели к формированию селевых потоков, нанесших значительный ущерб населению, хозяйству и инфраструктуре ниже по долине. Селевой поток 2002 г. по Даштдаре привел и к человеческим жертвам [Шнайдер, 2005; Яблоков, 2009; Пирмамадов, 2013; Шафиев, 2013, 2014; Докукин и др., 2020].

В целом, селевые потоки и паводки, образующиеся в результате прорывов горных озёр, относятся к одним из самых разрушительных среди опасных природных процессов. В зоне их поражения (в днищах и низовьях долин) зачастую находятся населенные пункты, инфраструктурные и социальные объекты. Подобная ситуация характерна для многих горных областей мира, в том числе и для ГБАО.

Именно поэтому специалистами АКАН совместно с организациями-партнёрами (в том числе географическим факультетом МГУ имени М.В. Ломоносова) на протяжении уже нескольких лет проводятся исследования высокогорных озёр Западного Памира, цель которых – обратить внимание государственных структур и населения, проживающего в долинах рек этого региона, на существующие проблемы, связанные с прорывоопасностью озёр, разработать меры по снижению рисков, вызванных непосредственно прорывами, а также другими опасными природными процессами и явлениями, которые эти прорывы инициируют.

Материалы и методы исследований

Поскольку изучаемые озёра расположены в труднодоступной высокогорной зоне, прямые измерения (батиметрическая съёмка самих озёр, топографическая съёмка нижележащих долин и т.д.) здесь затруднены. В связи с этим основными методами работы становятся рекогносцировочные обследования, анализ данных дистанционного зондирования и сценарное гидродинамическое моделирование. Актуальность исследования прорывоопасных высокогорных озёр в последние годы возрастает в связи с быстрыми климатическими изменениями, наиболее сильно проявляющимися в областях современного горного оледенения, к которым относится в том числе территория Западного Памира.

В рамках проекта «Батиметрическая съёмка и моделирование возможных прорывов высокогорных озёр на территории Западного Памира, Таджикистан» специалистами АКАН (Таджикистан) совместно со специалистами географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (Россия) были проведены батиметрическая съёмка (рис. 1) и моделирование (с использованием специализированных программ) 21 прорывоопасного озера (таблица 1, рис. 2.) с последующей оценкой отдалённых угроз в пределах долин рек Тогузбулок, Гунт, Шахдара, Бартанг, Пяндж и их водосборных бассейнов. Кроме того, применялись методы полевых маршрутных обследований (рис. 3-5) и анализа космоснимков, проводилась съёмка с БПЛА. Последующая обработка собранных данных и формирование баз данных осуществлялись в ГИС-программах: Reef Master Sonar Viewer, GPS Utility, Global Mapper, ArcGIS, Google Earth.

Результаты батиметрических съёмок озёр приведены в таблице 1.



Рис. 1. Процесс проведения батиметрической съёмки озера в верховьях р. Шазуддара (бассейн р. Гунт), 2019 г.

Fig. 1. Bathymetric survey of the lake in the Shazuddara River upper reaches (Gunt River basin), 2019



Рис. 2. Схема расположения высокогорных озёр Памира, для которых были проведены или в будущем планируются батиметрические съёмки с последующим моделированием прорывных селевых и водных потоков

Fig. 2. Location scheme of high-mountain Pamir lakes, for which bathymetric surveys have been carried out or are planned in the future, with subsequent modeling of outburst-triggered debris flows and floods



Рис. 3. Транспортировка грузов через реку Шазуддара для проведения батиметрической съёмки

Fig. 3. Transportation of cargoes across Shazuddara River for bathymetric survey



Рис. 4. Полевой лагерь экспедиции к высокогорному прорывоопасному озеру

Fig. 4. Field camp of expedition to the high-mountain outburst-prone lake



Рис. 5. Совместная экспедиция специалистов МГУ и АКАН к озеру Варшезкуль, 25.07.2018

Fig. 5. Joint expedition of MSU and AKAH specialists to Varshedzkul Lake, 25 July 2018

Результаты исследований

В ходе батиметрических съёмок (рис. 1) и моделирования прорывных паводков и селей проводилась также инвентаризация высокогорных озёр, оценка их состояния, степени устойчивости плотин и характеристика долин рек ниже по течению до населенных пунктов, находящихся в потенциально опасной зоне. Было установлено, что в пределах деградирующих моренно-ледниковых комплексов расположены наиболее опасные группы озёр, для которых характерны большие объёмы содержащейся в них воды, каскадное расположение, неустойчивые плотины, а также нестабильное состояние берегов и ложа. Кроме того, наблюдаются: сокращение площадей ледников, сопровождающееся появлением новых озёр у их краевых частей; формирование эрозионных врезов в местах впадения притоков и стока воды из озера; просадки по краям озёрных запруд на участках стока и в нижнем бьефе. Данные факторы свидетельствуют о возможности постепенного или быстрого перехода исследуемых озёр от безопасного к прорывоопасному состоянию. Данная тенденция, очевидно, будет усиливаться в связи с

наблюдающимися в данном регионе изменениями климата. Приведем некоторые результаты исследования озёр, расположенных в долинах рек Западного Памира.

Безымянное озеро в верховьях р. Шорипдара (левый приток р. Гунт)

Река Шорипдара является левым притоком Гунта. В ее приустьевой зоне находится село Колхозобод, расположенный на берегу озера Барсемкуль, сформировавшегося в июле 2015 г. вследствие схода селя по долине реки Барсемдара [Черноморец и др., 2015]. Бассейн Шорипдары состоит из бассейнов двух ее составляющих, сливающихся примерно в 2 км выше впадения реки в Гунт. Это бассейн правой составляющей – реки Колхозобод (Зиздара) – и собственно бассейн реки Шорипдара (левой составляющей).

Бассейн реки Колхозобод довольно компактный (площадь – 54,4 км²), длина основного русла реки составляет 15 км. В верховьях развито оледенение, а у краев наиболее крупных карово-долинных ледников находятся 3 приледниковых озера (19, 20 и 21, рис. 6).

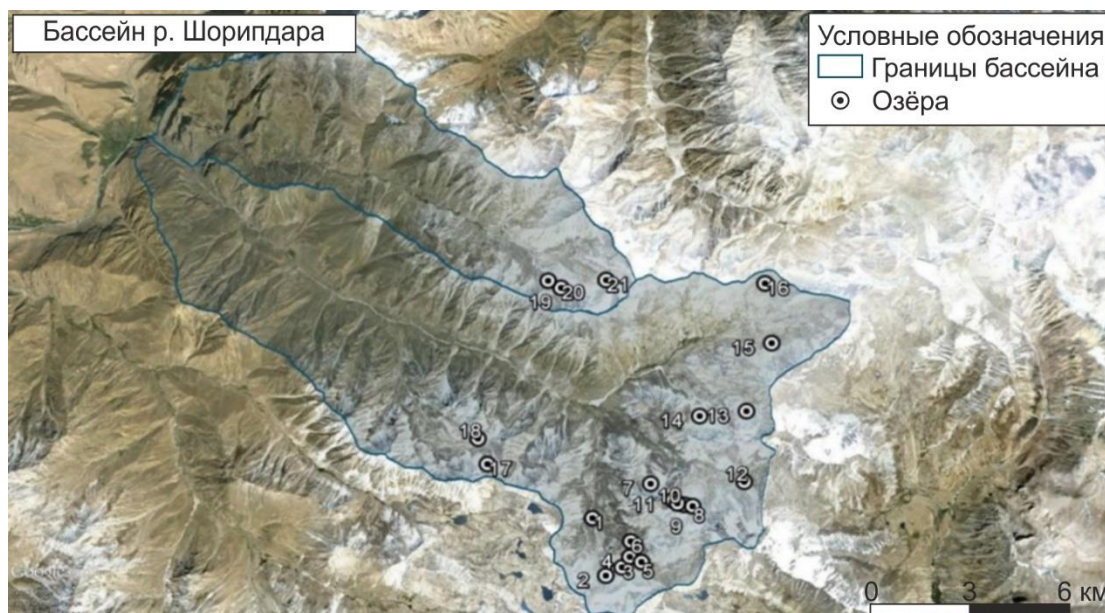


Рис. 6. Космоснимок (Google Earth) водосборного бассейна р. Шорипдара с отмеченными на нём высокогорными приледниковыми озёрами (всего – 21 озеро)

Fig. 6. Satellite image (Google Earth) of the Shoripdara River catchment with marked high-mountain glacial lakes (21 lakes)

Площадь бассейна реки Шорипдара на участке до слияния с рекой Колхозабад значительно больше - она составляет 133 км², длина основного русла (от истока до впадения в Гунт) - 23 км. У Шорипдары речная сеть более развита, имеется несколько боковых притоков, как по левому, так и по правому борту. В верховьях как основной реки, так и ее притоков имеются ледники, ниже которых расположены 4 больших и 14 более мелких ледниковых озера (рис. 6-8).

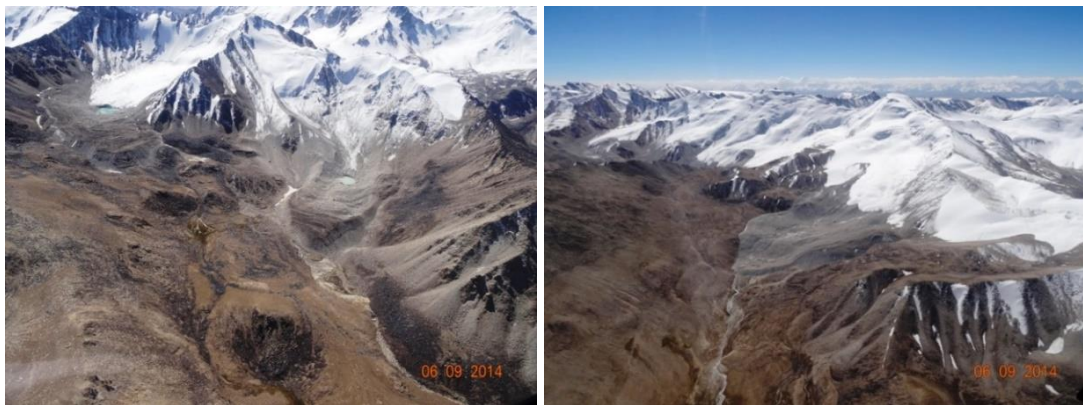


Рис. 7. Каменные глетчеры и приледниковые озера в верховьях реки Шорипдара, исследованные специалистами АКАН в ходе аэровизуальных наблюдений в сентябре 2014 г.

Fig. 7. Rock glaciers and glacial lakes in the upper reaches of the Shoripdara River, studied by АКАН specialists during aerial observations in September 2014



Рис. 8. Одно из приледниковых озёр в верховьях реки Шорипдара

Fig. 8. One of the glacial lakes in the Shoripdara River upper reaches

По руслу Шорипдары уже отмечались сходы селевых потоков и паводков, связанных с прорывами отдельных небольших озёр в верховьях реки, которые приводили к приостановке движения по Памирскому тракту, соединяющему Таджикистан, Кыргызстан и Китай.

В этом бассейне наблюдаются увеличение объёмов и площадей озёр, отступление ледников, снижение устойчивости плотин, удерживающих озёра, исчезновение ранее существовавших мелких озёрных образований. Наличие в приустьевой части реки Шорипдара подпрудного озера Барсемкуль увеличивает уровень риска в этом районе. Так, вероятный прорыв каскадно расположенных в верховьях Шорипдары высокогорных озёр может усилить неустойчивость озера Барсемкуль, поскольку в результате такого прорыва велика вероятность формирования катастрофического селя, аналогичного по объёмам Барсемскому селю (т.е. около 4 млн м³).

Время добегания пика такого селевого потока с максимальным расходом более 600 м³/с до села Колхозобод составит 0,8 ч. Максимальный расход потока у села

Колхозобод составит $515 \text{ м}^3/\text{с}$, при этом само село затоплено не будет. Селевой материал может частично занести озеро Барсемкуль в районе, что приведет к дополнительному подпору этого водоёма и может стать причиной его прорыва. Объём прорывного селевого потока из озера Барсемкуль в этом случае оценивается в $2,2 \text{ млн м}^3$ с максимальным расходом $250 \text{ м}^3/\text{с}$ [Кидяева и др., 2018].



Рис. 9. Приостановка движения по Памирскому тракту на участке его пересечения рекой Шоришдара в паводковый период 17.08.2016

Fig. 9. Temporary stop of traffic on the Pamir Highway at the site of its intersection by the Shoripdara River during the flood period on 17 August 2016

Озёра в верховьях р. Патхур-Чандара (правый приток р. Гунт)

Река Патхур является правым притоком Гунта и впадает в него в 89 км выше устья последнего на абсолютной отметке 3000 м. На конусе выноса по обоим берегам реки расположен крупный кишлак Патхур. Долина реки Патхур выработана крупным древним долинным ледником и днище её находится почти на одном высотном уровне с днищем долины р. Гунт (в отличие от большинства других притоков, имеющих приустьевую ступень). В верховьях Патхура и в настоящее время сохранился один из крупнейших ледников Рушанского хребта – долинный ледник Штеклозар. В пределах морен и малоподвижных массивов льда в верховьях долины имеются 2–3 потенциально прорывоопасных озера, однако они относительно небольшие (площадь – 15–17 тыс. м^2) и расположены среди обширных выположенных моренно-ледовых массивов. Вследствие этого при потенциальном прорыве значительная часть воды будет поглощена рыхлой толщей, а сам паводок – сглажен. Формированию селевого потока препятствуют также небольшие уклоны дна долины (20–30%) и наличие двух протяжённых внутридолинных расширений в 12 и 13 км выше устья.

Одно из наиболее прорывоопасных озёр (Чапкуль) бассейна реки Патхур находится в верховьях левой составляющей (реки Чападара Разломная) её левого притока (реки Чапдара). Первые работы по оценке состояния приледникового озера Чапдара были проведены еще в 2010 г. и отражены в отчёте «Отдаленные геологические угрозы в высокогорных регионах Таджикистана» [Шнайдер, Мергили, 2010].

Общая характеристика состояния приледниковых озер бассейна р. Чапдара была выполнена в 2018 г. [Черноморец и др., 2018]. В августе 2019 г. было проведено дообследование долины р. Чапдара Разломная. Целью работ стало уточнение параметров крупного прорывоопасного озера в её верховьях (в первую очередь, измерение глубин и определение объёмов воды), состояния плотины и особенностей строения долины по пути движения возможного прорывного паводка/сея. Обследование имело неожиданный результат: выяснилось, что в период с конца лета 2018 г. по начало лета 2019 г. произошёл спуск большей части воды из озера (рис. 10) и её уровень к моменту обследования 6 августа 2019 г. понизился на 6,6 м относительно максимального. При этом плотина озера не имела никаких признаков разрушения, а ниже по долине не отмечалось следов прохождения сколько-нибудь заметного паводка. Наряду с возникающим вопросом: как было спущено озеро, – напрашивается вывод о том, что угроза его прорыва и возможного выдающегося паводка/сея по долине миновала.

Морфометрические характеристики озера Чапкуль, согласно проведенной в 2019 г. батиметрической съёмке, приведены в таблице 1.

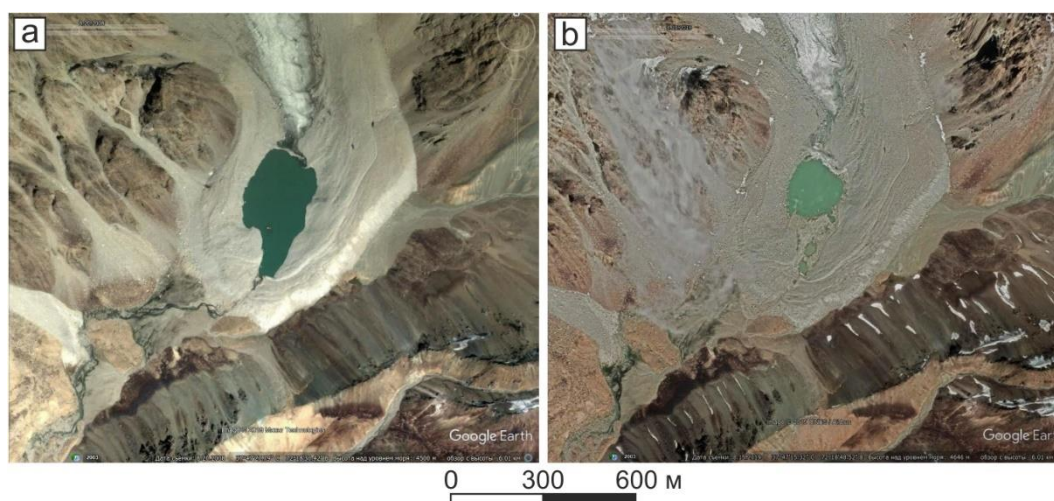


Рис. 10. Озеро Чапкуль 20.08.2008 (a) и 15.08.2019 (b). Снимки с сервиса Google Earth

Fig. 10. Chapkul Lake on 20 August 2008 (a) and 15 August 2019 (b). Images from Google Earth service

Озёра в верховьях ручья Пишдара

Долина ручья Пишдара выходит к долине р. Гунт с юга (слева) в 96 км выше устья последнего. Эта долина примечательно тем, что из нее в долину Гунта выдвинута внушительная, с несколькими ярусами, бугристо-западинной поверхностью лопасть старого, возможно, пульсирующего ледника. Она полностью перекрыла днище долины Гунта и отжала его к правому борту. Ширина стесненного, врезанного русла Гунта местами не превышает 25 м. Озеро Пишкуль расположено у южной оконечности Шугнанского хребта в 100 км от г. Хорога, в 15 км от центра джамоата Ванкала, и более чем в 10 км от кишлака Пиш.

Первые работы по оценке состояния приледникового озера Пишкуль приведены в отчёте Ж.Ф. Шнайдера и М. Мергили [2010]. Первое наземное обследование было выполнено 14 июня 2014 г. специалистами АКАН в рамках проекта COSE I (Creating Opportunities in a Safe Environment. Phase I). Основное внимание уделялось прилегающим к озеру склонам, которые могут создать предпосылки для активизации опасных процессов.

Последние пешие маршрутные обследования долины ручья и озера проводились в августе 2019 г. специалистами АКАН. Эти результаты приведены в отчёте

«Батиметрическая съёмка озёр Кофарендара, Пиш, Чарсемдара, Шитхарв и Чапдара и моделирование возможных прорывов» [Черноморец и др., 2019].

В последние годы отмечается быстрый рост ближайшего к краю активного ледника озера (условное название – Пишкуль Верхнее) и имеются предпосылки к его спуску, в том числе с образованием прорывного паводка (рис. 11).



Рис. 11. Космоснимок с сервиса Google Earth, на котором показано местоположение ледникового озера Пишкуль Верхнее (жёлтая метка) в верхней части бассейна ручья Пишдара (границы бассейна показаны красной линией)

Fig. 11. Google Earth satellite image, which shows the location of Pishkul Upper glacial lake (yellow mark) in the upper reaches of the Pishdara Stream (catchment boundaries are shown with red line)

После 2008 г. рост размеров озера Пишкуль Верхнее продолжился. В период рекогносцировочного обследования 8 августа 2014 г. сотрудниками АКАН было установлено, что обособленные плёсы озера уже соединились между собой, а отступление высоких обрывистых ледовых стенок левого берега озера продолжилось.

К августу 2019 г., в период наивысших летних уровней воды, площадь акватории озера Пишкуль Верхнее увеличилась вдвое по сравнению с 2008 г. – до 84500 м². Максимальная длина озера выросла до 530 м (с 440 м в 2008 г.), ширина северного плёса – до 240 м (со 170 м в 2008 г.), южного – до 170 м (со 130 м в 2008 г.). Кромка активного льда практически отступила от озера – под языком ледника образовалась отмель шириной 25–40 м, притапливаемая при максимальном наполнении водоёма и обсыхающая при падении уровней. Чаша водоёма увеличилась за счет протайки мертвых льдов левого берега и образования здесь округлых заливов с ледовыми стенками. Также были затоплены мелководья на месте каменных высыпок, разделявших отдельные плёсы озера в 2008 г., и отмель у юго-восточного края озера Пишкуль Верхнее.

Питание озера происходит за счет таяния ледника. Сброс воды с верхнего озера (рис. 12), осуществляется по выработанному тальвегу в восточном направлении, где расположено нижнее, более мелкое озеро, находящееся в стадии развития. Образование верхнего озера связано с отступлением языковой части ледника и сокращением фирновых полей. До 2014 г. за данным озером наблюдения не велись.



Рис. 12. Верхнее ледниковое озеро в верховьях ручья Пишдара

Fig. 12. Upper glacial lake in the upper reaches of the Pishdara Stream

9–10 августа 2019 г. в ходе проведения батиметрической съёмки озер долины р. Гунт была организована разведочная экспедиция с целью обследования доступности вьючной тропы и места для полевого лагеря при проведении батиметрической съёмки ледниковых озер в верховьях ручья Пишдара.

В результате полевого маршрута специалистами АКАН было выявлено, что долина ручья Пишдара является очень труднодоступной, и заброска оборудования для батиметрических работ на вьючном транспорте является невозможной.

Группа провела визуальную оценку состояния озера в верховьях ручья Пишдара на момент 10 августа 2019 г. и выявила 5 каскадно расположенных ледниковых озер.

Наиболее опасным по результатам визуальных наблюдений считается озеро Пишкуль Верхнее (рис. 12). В ходе маршрутного обследования наблюдалось интенсивное таяния ледника, на котором расположено озеро, особенно в районе плотины. При неблагоприятном сценарии по долине Пишдары может пройти крупный селевой поток с объёмами выноса до 500 тыс. м³. На выходе в долину р. Гунт есть угроза значительного ущерба: при отклонении селевого потока влево пострадает кишлак Ванкала, при прохождении его по центру селевого русла возможно перекрытие на некоторое время Гунта, что вызовет приостановку автомобильного сообщения по Памирскому тракту.

Озёра в верховьях руч. Чарсемдара

Озёра Чарсемкуль расположены в бассейне реки Гунт, в верховьях ручья Чарсемдара, в 18 км к юго-западу от села Чарсем. 12–14 августа 2019 г. этот бассейн был обследован в ходе пешего маршрута в рамках проекта «Батиметрическая съёмка и моделирование высокогорных озёр Западного Памира» специалистами географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (Россия) и АКАН (Таджикистан) (рис. 13). Продолжительность маршрута составила 3 дня. Изучалась долина ручья и прилегающие

склоны, активизация процессов на которых может привести неблагоприятным последствиям.



Рис. 13. Озеро Чарсемкуль нижнее, расположенное в верховьях ручья Чарсемдара (левый приток р. Гунт). Участники батиметрической съемки озера. Август 2019 г.

Fig. 13. Charsemkul Lower Lake, located in the upper reaches of Charsemdara Stream (left tributary of Gunt River). Participants of bathymetric survey of the lake. August 2019

Количество озёр в верховьях ручья Чарсемдара – 4. Группой были изучены 2 озера – нижнее и среднее, а 2 озера не обследовались, так как расположены непосредственно в ледниковом каре. Батиметрическая съёмка проводилась на одном озере (Чарсемкуль нижнее), являющемся самым большим по объёму и площади (таблица 1).

Озёра Кофаренкуль в верховьях долины р. Гармчашма (правый приток р. Пяндж)

По долине руч. Кофарендара (левый приток Чуржа – истока Гармчашмы) в августе 2008 г. сошел селевой поток (рис. 14), сформировавшийся в результате прорыва ледникового озера, расположенного в верховьях этого водотока. В ходе пешего маршрутного обследования, проведенного специалистами АКНА, было установлено, что прорыв озера происходил через грот, расположенный в тыловой части водоёма (рис. 15). Развитию такого сценария способствовало повышение температурного режима и откол ледника в чашу озера. Селевые отложения перегородили основную долину Гармчашмы образовав подпрудное озеро. Спуск воды из него спровоцировал прорывной сель, унесший часть пасшегося в долине скота, смывший мосты, автодорогу, головные части оросительных сетей. Существовала также угроза для жилых зон и населения, проживающего ниже по долине Гармчашмы.

В настоящее время в верховьях ручья Кофарендара, а также в соседних бассейнах притоков Гармчашмы существует ряд ледниковых озёр. Они расположены преимущественно на языках ледников или в пределах льдосодержащих морен. Некоторые из озёр имеют стабильный поверхностный сток, а другие – систему подземных каналов стока, проходящих под телом ледников или моренных массивов. Визуально прорывоопасных форм ледниковых озёр в долине Гармчашмы не обнаруживается. Тем не менее, объём сведений о состоянии ледников и погребенных льдов, на которых расположены озера, а также о наличии внутриледниковых и

внутриморенных водоёмов крайне ограничен. Кроме того, будущая динамика моренно-ледниковых комплексов и особенности развития других геологических процессов в верхних частях долин могут способствовать увеличению степени прорывоопасности. Поэтому, сравнительно большое озеро в верховьях ручья Кофарендара и другие озёра, выявленные в верховьях Гармчашмы, требуют повышенного внимания и мониторинга.

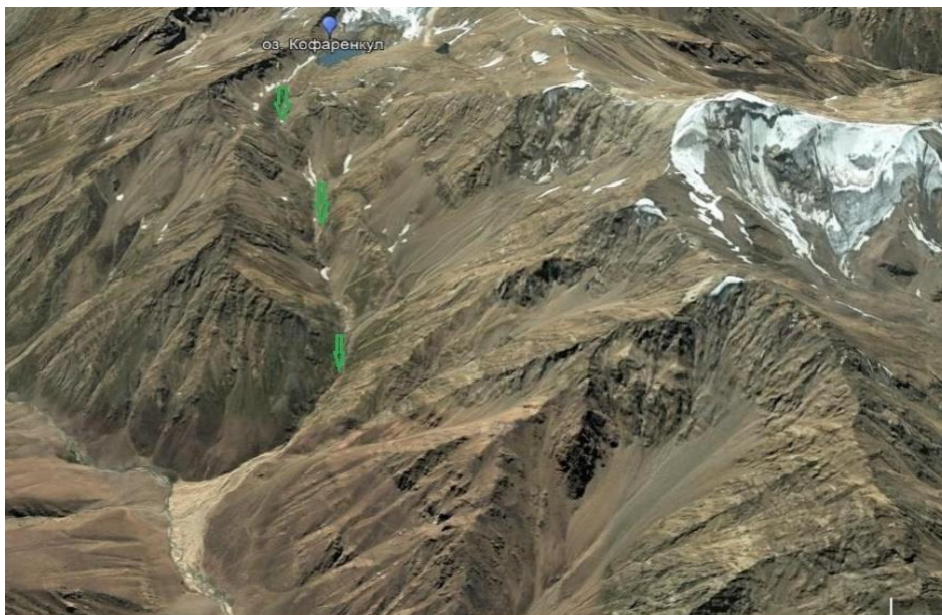


Рис. 14. Отложение селевого потока, сошедшего в августе 2008 г. по боковому притоку р. Гармчашма. Снимок с сервиса Google Earth

Fig. 14. Deposit of debris flow descended in August 2008 along side tributary of Garmchashma River. Images from Google Earth service



Рис. 15. Грот, образовавшийся в теле ледника в результате прорыва озера Кофаренкуль в августе 2008 г.

Fig. 15. Grotto formed in the body of the glacier as a result of the Kofarenkul Lake outburst in August 2008

В связи с этим в августе 2019 г. специалистами АКАН была проведена батиметрическая съёмка озера Кофаренкуль (рис. 16) с последующим моделированием паводков и селей в случае его прорыва (моделирование осуществлялось совместно со специалистами географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова). Состояние плотины этого водоёма оценивается как крайне неустойчивое в связи с интенсивным таянием ледника и, как следствие, её разрушением. Наблюдается образование провалов, обвалов, трещин закола и протекание термокарстовых процессов на теле ледника. Морфометрические характеристики озера приведены в таблице 1.



Рис. 16. Процесс проведения батиметрической съёмки озера Кофаренкуль в августе 2019 г.

Fig. 16. Bathymetric survey of Kofarenkul Lake in August 2019

Озёра в верховьях р. Даштдара (левый приток р. Шахдара)

Площадь бассейна реки Даштдара составляет 31,5 км² (без учёта селевого конуса выноса), длина основного русла – 10,2 км, суммарная площадь ледников в верховьях реки ~1 км².

Днище ледникового цирка в верховьях долины р. Даштдара заполнено льдосодержащей моренной массой, которая представлена двумя крупными каменными глетчерами. На этих глетчерах до 2002 г. располагалось 2 сравнительно крупных термокарстовых озера. 7 августа 2002 г. произошёл прорыв одного из них, расположенного правее. В результате сформировался катастрофический селевой поток, приведший к гибели 24 человек и значительным разрушениям ниже по долине самой Даштдары и далее по долине Шахдары [Mergili, Schneider, 2011].

Прорыв озера, вероятнее всего, был связан с активизацией каменного глетчера, приведшей сначала к блокировке каналов подземного стока, которая в свою очередь привела к наполнению котловины озера до максимального уровня. Последовавшая затем разблокировка каналов стала причиной прорыва озера подземным путём [Докукин и др., 2020].

В настоящее время каменные глетчеры сохраняют свою активность. Об этом свидетельствуют многочисленные трещины, термокарстовые воронки и западины на их поверхности, активное осыпание на их уступах. Ледник, расположенный выше глетчеров, сверху покрыт четвертичным чехлом (обвальными-осыпными и делювиальными отложениями).

Общая площадь каменноглетчерного тела составляет 1 216 702 м², объём – ~97 336 160 м³. Вся масса талой воды из расположенного выше ледника проходит через тело каменного глетчера. Также наблюдается продвижение левого каменного глетчера вниз по долине реки. Сток из озера Дашт, существующего в настоящее время на теле этого каменного глетчера, осуществляется преимущественно подземным путём (рис. 17). Тыловая часть глетчерного тела сильно просела, там происходит формирование термокарстовых воронок и западин, что в будущем будет способствовать образованию озёр и накоплению в них воды.



Рис. 17. Совместная экспедиция сотрудников АКАН и представителей Хукумата Рошткалинского района на озеро Дашт в верховьях реки Даштдара

Fig. 17. Joint expedition of АКАН specialists and representatives of Roshtkala District Khukumat to Dasht Lake in the Dashtdara River upper reaches

Увеличение летних температур и закономерное повышение увлажненности тела каменного глетчера тальми снеговыми и ледниковыми водами будет усиливать его пульсации. Такие случаи представляют реальную угрозу повторения событий 2002 г., то есть прорыва сохранившегося озера Дашт с последующей трансформацией прорывного потока в селевой. При это вновь возникнет угроза для кишлака Дашт, а кроме того, для населенных пунктов и объектов инфраструктуры, расположенных в долине реки Шахдара при ее перекрытии и формировании подпрудного озера. К сожалению, после

катастрофы 2002 г. вновь началось освоение и строительство жилых домов и социальных объектов на селевом конусе выноса р. Дашт, что, безусловно, является недопустимым в условиях нависающей над кишлаком угрозы. В целом угроза будущих прорывных селей для кишлака Дашт оценивается как очень высокая.

Обобщённые характеристики исследованных озёр

По результатам анализа проведённых в 2015–2019 гг. батиметрических съёмок озёр Западного Памира (ГБАО, Таджикистан) были составлены диаграммы распределения их площадей, объёмов и максимальных глубины (рис. 18–20).

Изменение количества и размеров высокогорных озёр, состояния их плотин, а также постепенный или быстрый переход от безопасного непрорывоопасного режима к прорывоопасному возможны и в других долинах ГБАО. Такие примеры приведены ниже.

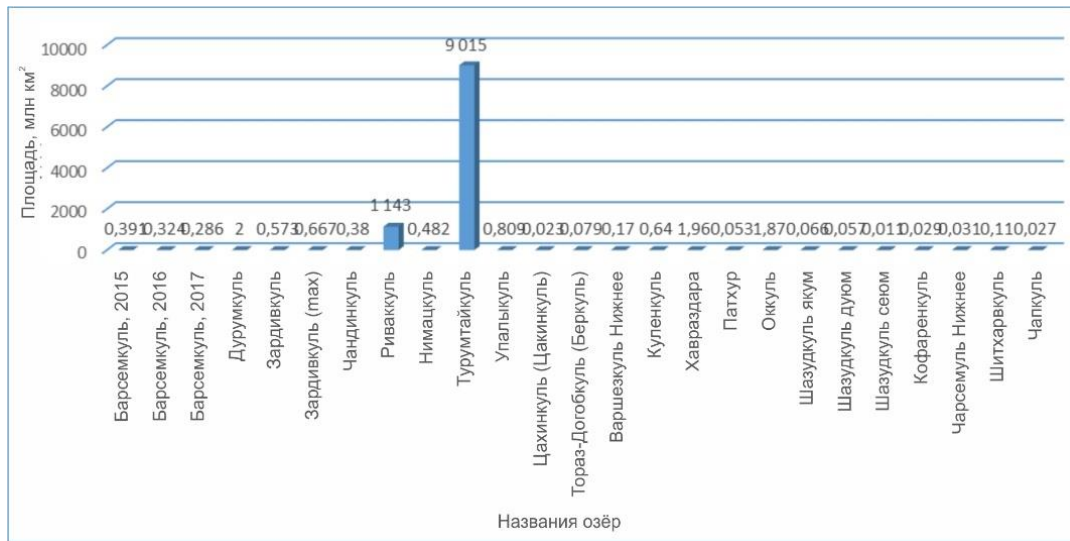


Рис. 18. Диаграмма распределения площадей исследованных озёр

Fig. 18. Diagram of the area distribution of the investigated lakes

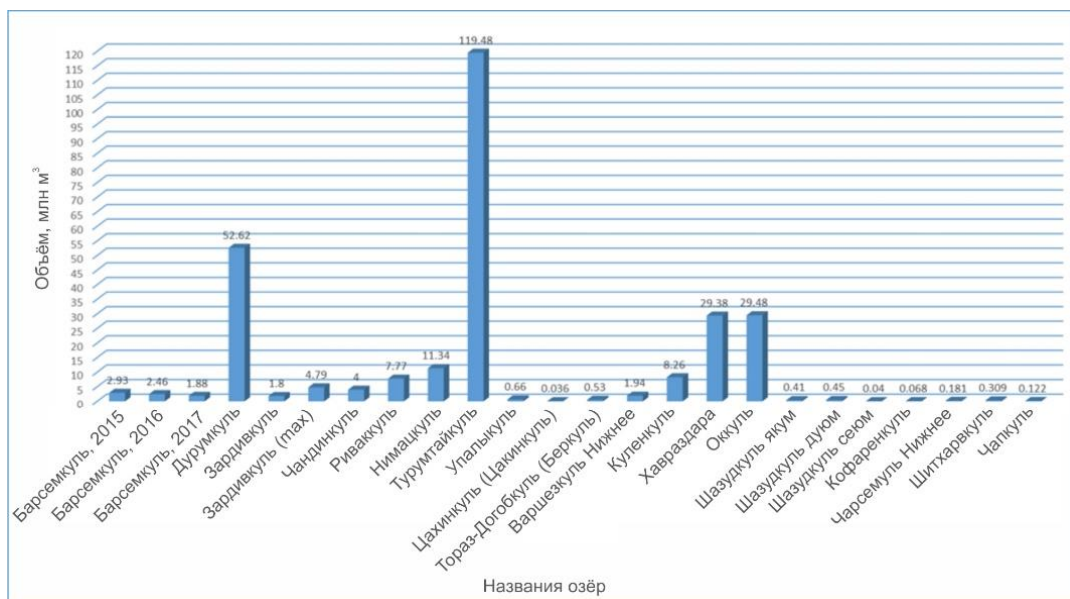


Рис. 19. Диаграмма распределения объёмов исследованных озёр

Fig. 19. Diagram of the volume distribution of the investigated lakes

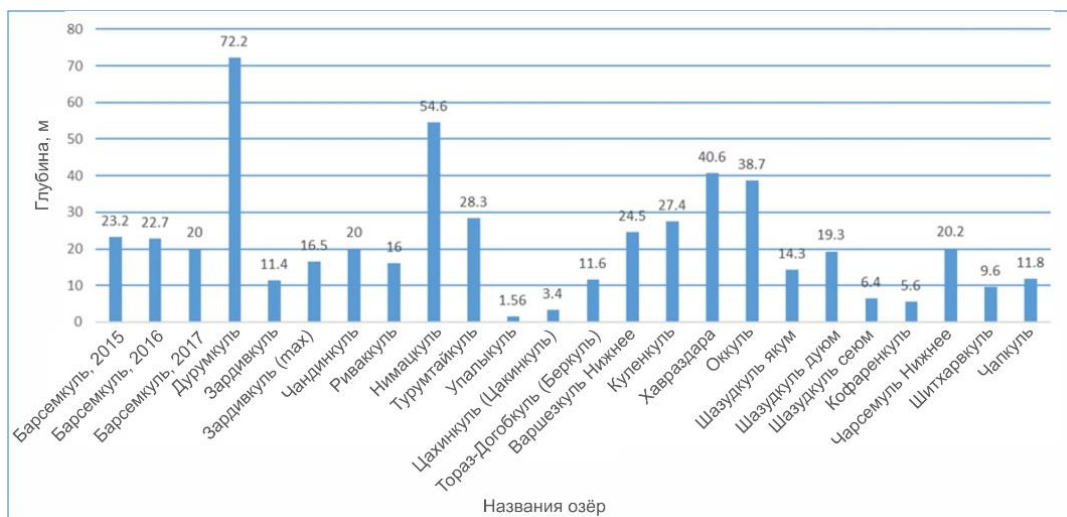


Рис. 20. Диаграмма распределения максимальных глубин исследованных озёр

Fig. 20. Diagram of the maximum depth's distribution of the investigated lakes

Озёра в бассейне р. Пяндж (Ишкашимский район)

К прорывоопасным относятся озёра Хозгуни Верхнее и Нижнее в верховьях левого притока реки Гармчашма (правый приток р. Пяндж), озеро Сист в верховьях реки Дарасист (правый приток р. Пяндж), Рачивдара (правый приток р. Памир – правой составляющей Пянджа).

Значительная опасность, связанная с селевыми потоками прорывного генезиса, существует также в следующих бассейнах правых притоков Пянджа и Памира (у слияния Памира с Вахандарьёй): Нишгар, Дриж, Зугванд и Киштиджароб. Все они начинаются у языков одноименных ледников, характеризующихся периодическими пульсациями [Долгушин, 1993]. Их быстрые подвижки могут привести к формированию ледниковых подпруд с последующим образованием прорывоопасных озёр.

Озёра в долине р. Шахдара (Рошткалинский район)

Здесь к прорывоопасным относятся озёра в верховьях следующих рек и ручьёв: Хидорджевдара, Тусиёндара, Нимацдара, Бодомдара, Чандиндара (озёра Мурикуль и Ойкуль).

Озёра в долине р. Гунт (Шугнанский район)

К прорывоопасным озёрам в долине р. Гунт, помимо перечисленных выше, относятся также озёра Куленкуль (расположено в верховьях р. Дузахдара), озёра в верховьях основного истока р. Патхур (оз. Ростовдара), в верховьях рек Упальсой (правый приток р. Тогузбулок, оз. Чукуркуль), верховья р. Баччор (Зорташкуль) и т.д.

Озёра в долине р. Бартанг (Рушанский район)

Здесь хотелось бы отметить озеро в верховьях р. Девлохдара (Басиддара) – левого притока Бартанга.

Кроме того, отмечается появление новых прорывоопасных озёр в языковых частях и на теле причисленных ниже ледников в долине р. Ванч (Ванчский район):

- левый борт р. Ванч: Дарай Рог, Гумаяк, Гиджоваст, Рованд, Сумгад, Шогадо, Дастирост, Федченко;
- правый борт р. Ванч: Абдукагор, РГО, Медвежий, Дарай Мазор, Мургутта, Ширговад, Сед, Арнавад, Бунай, Техарвдара, Рохарв.

Озёра в долине р. Хостроги (Дарвазский район)

В верховьях реки Хостроги расположены 2 прорывоопасных озера: Хостроги 1 и Хостроги 2.

Безусловно, приведенный выше список не исчерпывающий. Как уже было сказано, ситуация в верховьях рек крайне динамична и озёра здесь активно формируются и исчезают.

Риски, связанные с прорывами высокогорных озёр и рекомендуемые инженерные защитные мероприятия

В ходе проводимых в течение нескольких лет работ для речных долин Западного Памира была адаптирована двумерная модель движения водных и селевых потоков FLO-2D. С её помощью выполнялись сценарные расчёты характеристик затопления, потенциальной опасности и времени добега прорывных селей и паводков в случае прорывов озёр. Согласно полученным данным, был сформулирован перечень рекомендованных инженерных мероприятий с целью снижения рисков при прорывах высокогорных ледниковых озёр (таблица 2).

Заключение

С учетом результатов моделирования селевых потоков и паводков, связанных с прорывами высокогорных озёр, и оценки отдалённых угроз на территории Горной Бадахшанской автономной области Таджикистана рекомендуется:

- Проводить регулярный мониторинг высокогорных озёр, ледников и в целом водосборных бассейнов, где эти озёра расположены, с использованием методов дистанционного зондирования, аэровизуальных наблюдений с вертолёта и пеших маршрутных обследований.
- Провести батиметрическую съёмку и моделирование ещё не исследованных прорывоопасных озёр.
- Рассмотреть вариант строительства защитных селеотбойных стенок по берегам селеопасных русел, а также их расчистки, выпрямления и углубления в районе конусов выноса.
- Установить системы раннего оповещения населения в селеопасных долинах.
- Проводить измерения расходов рек и собирать в базы данных информацию о текущих опасных природных процессах и явлениях.
- Продолжать работу по повышению информированности и уровня подготовки населения в кишлаках, расположенных ниже по течению от прорывоопасных озёр. Обучать их принципам поведения в случае возникновения стихийных бедствий.
- По возможности осуществить проект контролируемого опорожнения озёр, характеризующихся высоким риском прорыва.
- Приступить к изучению ледников, многолетней мерзлоты и других водных ресурсов территории Таджикистана.

В целом, правильный выбор и реализация мероприятий по предотвращению и смягчению последствий стихийных бедствий может сократить до минимума риски от селевых потоков и паводков, формирующихся в результате прорывов высокогорных озёр.

Климатические изменения, активно проявляющиеся в Центральной Азии (в т.ч. на Западном Памире), приводят к целой серии неблагоприятных и опасных процессов и явлений (деградации ледников, формированию и исчезновению горных озёр), а кроме того оказывают отрицательное влияние на разные сферы жизни: здравоохранение (меняются условия окружающей среды), сельское хозяйство (происходит потеря пастбищ и вывод из обращения плодородных земель), водное управление, транспортную инфраструктуру, энергетику. Для успешного существования местных сообществ в таких быстро меняющихся условиях крайне необходимо увеличивать уровень информированности населения и его готовности к действиям в случае чрезвычайных ситуаций.

Таблица 2. Риски, связанные с прорывами высокогорных озёр Западного Памира, их последствия и рекомендуемые инженерные мероприятия

Table 2. Risks associated with high-mountain lake outbursts in the Western Pamir, their consequences and recommended engineering measures

Приток	Прорывоопасное озеро	Населённые пункты в зоне затопления	Минимальное время добегаания до населённых пунктов, ч	Максимальные скорости селевого потока, м/с	Глубины затопления в районе населённого пункта, м	Рекомендуемые инженерные мероприятия
Ишкашимский район, бассейн р. Пяндж						
Сарышитхарв	Шитхарвкуль	кишлак Шитхарв	0,5	3-5	3-4	Строительство селеотбойных стенок по берегам селеопасного русла, его расчистка, выпрямление и углубление в районе конуса выноса
Гармчашма	Кофаренкуль	кишлаки Гармчашма, Сниб, Андароб	1,3	5-6	1-4	Мониторинг озера и установка систем раннего оповещения. Строительство селеотбойных стенок по берегам селеопасного сая в районе кишлака Гармчашма
Шугнанский район, бассейн р. Гунт						
Южный Тогузбулок, Тогузбулок	Турумтайкуль	автодорога, мост, кишлак Джелонди	4	1,5	1	Мониторинг озера и установка систем раннего оповещения
Упальсой, Тогузбулок	Оккуль	автодорога, мост, кишлак Джелонди	4	1,5	1	Мониторинг озера и установка систем раннего оповещения.
	Упалькуль	автодорога, мост, кишлак Джелонди	4	1,5	1	Мониторинг озера и установка систем раннего оповещения.

Приток	Прорывоопасное озеро	Населённые пункты в зоне затопления	Минимальное время добегаания до населённых пунктов, ч	Максимальные скорости селевого потока, м/с	Глубины затопления в районе населённого пункта, м	Рекомендуемые инженерные мероприятия
Шазуддара	Каскад озёр Шазудкуль	кишлак Шазуд (8 строений), кишлак Сардем	1,4	8	5	Строительство селеотбойных стенок по берегам селеопасного русла в районе конуса выноса. Мониторинг озёр и установка систем раннего оповещения
Варшездара	Варшезкуль Верхнее и Нижнее	кишлак Варшез, автомобильная дорога на левом берегу р. Гунт	0,1	5-7	4	Строительство селеотбойных стенок по берегам селеопасного русла, его расчистка, выпрямление и углубление в районе конуса выноса. Мониторинг озёр и установка систем раннего оповещения
Ривакдара	Риваккуль	кишлак Ривак, частично кишлак Сижд и автомобильная дорога на левому берегу р. Гунт, ГЭС Памир-1	1,8	14-15	1	Строительство селеотбойных стенок по берегам селеопасного русла, его расчистка, выпрямление и углубление в районе конуса выноса. Мониторинг озёр и установка систем раннего оповещения

Приток	Прорывоопасное озеро	Населённые пункты в зоне затопления	Минимальное время добегания до населённых пунктов, ч	Максимальные скорости селевого потока, м/с	Глубины затопления в районе населённого пункта, м	Рекомендуемые инженерные мероприятия
Нимацдара	Нимацкуль-	кишлаки Нимац и Шитам, автомобильная дорога на левом берегу р. Гунт и ниже по р. Гунт	1	4-5, до 14	2-3	Строительство селеотбойных стенок по берегам селеопасного русла, его расчистка, выпрямление и углубление в районе конуса выноса. Мониторинг озера и установка систем раннего оповещения
Чапдара, Патхур	Чапкуль	кишлак Патхур (2 строения)	1	5	2	Строительство селеотбойных стенок по берегам селеопасного русла. Мониторинг озера и установка систем раннего оповещения
Пишдара	Пишкуль Верхнее и Нижнее	кишлаки Пиш и Ванкала, автомобильная дорога, на левом берегу р. Гунт и ниже по р. Гунт	0,2-0,3	1,5-3	3-4	Строительство селеотбойных стенок по берегам селеопасного русла, его расчистка, выпрямление и углубление в районе конуса выноса. Мониторинг озера и установка систем раннего оповещения

Приток	Прорывоопасное озеро	Населённые пункты в зоне затопления	Минимальное время добегания до населённых пунктов, ч	Максимальные скорости селевого потока, м/с	Глубины затопления в районе населённого пункта, м	Рекомендуемые инженерные мероприятия
Чарсемдара	Чарсемкуль	кишлак Чарсем, автомобильная дорога, на левом берегу р. Гунт и ниже по р. Гунт (10 строений)	1,5	7	3	Строительство селеотбойных стенок по берегам селеопасного русла, его расчистка, выпрямление и углубление в районе конуса выноса. Мониторинг озера и установка систем раннего оповещения
-	Барсемкуль	автодорога, кишлаки Бердикобод, Манем, Питодашт, Богев, Даштак, Сангов, Бидурд, отдельные строения в восточной части Хорога	2	до 7	до 2	Мониторинг озера и установка систем раннего оповещения. Снижение уровня озера при его максимальном наполнении
Шорипдара	каскад озёр	кишлаки Колхозобод, Барсем, Бердикобод, автомобильный мост и автодорога	0,8	8-15	10-15	Мониторинг озёр и установка систем раннего оповещения. Организация гидрологического поста для наблюдений за динамикой уровня воды в р. Шорипдара. Строительство автомобильного моста с учётом максимальных селей
Рошткалинский район, бассейн р. Шахдара						
Дирумдара	Дурумкуль	строения и пастбища в пойме р. Шахдара,	2	3-5	1	Мониторинг озера и установка систем раннего оповещения

Приток	Прорывоопасное озеро	Населённые пункты в зоне затопления	Минимальное время добегаания до населённых пунктов, ч	Максимальные скорости селевого потока, м/с	Глубины затопления в районе населённого пункта, м	Рекомендуемые инженерные мероприятия
Зардивдара	Зардивкуль	пос. Сежд до г. Хорог вниз по течению реки	1,1	до 2	3	Мониторинг озера и установка систем раннего оповещения
Чандиндара	Чандинкуль	автодорога, автомобильный мост, кишлак Бидеч на правом берегу р. Шахдара и ниже по течению р. Шахдара	2,4	до 12	2	Мониторинг озер и установка систем раннего оповещения
Рушанский район, бассейн р. Бартанг						
Хавраздара	Хавраздара	кишлак Пасор	0,8	5-8	7,5	Строительство селеотбойных стенок по берегам селеопасного русла в районе конуса выноса. Мониторинг озера и установка систем раннего оповещения
Джизевдара	каскад озёр Джизев	кишлак Джизев	2,3	3-5	2	Строительство селеотбойных стенок по берегам селеопасного русла. Мониторинг озер и установка систем раннего оповещения

Список литературы

- Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Каменные глетчеры – очаги формирования катастрофических селей // ГеоРиск. 2020. Том XIV. № 2. С. 52–65. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-2-52-65>.
- Долгушин Л.Д. Пульсирующие ледники // Оледенение Памиро-Алая. М.: Наука, 1993. С. 219-226.
- Кидяева В.М., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.Н., Докукин М.Д., Висхаджиева К.С., Бобов Р.А., Пирмамадов У.Р., Мародасейнов Ф.О., Раимбеков Ю.Х., Курбонмамадов Д.А. Моделирование прорывов горных озер и селевых потоков в Горно-Бадахшанской автономной области, Таджикистан // Международная научно-практическая конференция Третьи Виноградовские Чтения. Грани гидрологии памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова. СПб.: СПбГУ, 2018. С. 897–902.

- Мухаббатов Х.М. Водные ресурсы Таджикистана и проблемы водопользования в Центральной Азии // Проблемы постсоветского пространства. 2016. № 3. С. 29-45.
- Мякишева Н.В. Многокритериальная классификация озер. СПб.: РГТМУ, 2009. 160 с.
- Пирмамадов У.Р. Селевые потоки в результате прорывов высокогорных гляциальных озёр на территории Горно-Бадахшанской автономной области Таджикистана (из опыта работ международной организации «Фокус гуманитарная помощь») // Геориск. 2013. № 2. С. 20–23.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 14. Средняя Азия. Выпуск 3. Бассейн р. Амударьи. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 472 с. Режим доступа: <http://www.cawater-info.net/library/rus/hist/resources-amudarya/>
- Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Бобов Р., Асматов Н., Мавлоназаров О., Мирмамадов Д., Пирмамадов У., Шафиев Г. Селевые потоки в долине реки Барсемдара в июле 2015 г. и подпрудное озеро Барсемкуль на реке Гунт (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан) // Международная научно-практическая конференция «Вторые Виноградовские Чтения. Искусство гидрологии». СПб.: СПбГУ, 2015. С. 261-264.
- Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Кидяева В.М., Рудой А.Н., Висхаджиева К.С., Аршинова М.А., Куровская В.А. Батиметрическая съемка озёр Куленкуль (Дузахдара), Варшезкуль, Патхур (Чапдара), Джизев, Хавраздара и моделирование возможных прорывов. Отчет. М.: Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2018. 278 с.
- Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Кидяева В.М., Лукашов А.А., Висхаджиева К.С., Аршинова М.А., Куровская В.А. Батиметрическая съемка озёр Кофарендара, Пиш, Чарсемдара, Шитхарв и Чапдара и моделирование возможных прорывов. Отчёт. М.: Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2019. 265 с.
- Шафиев Г.В. Особенности проявлений селевых процессов и опыт международной организации «Фокус Гуманитарная Помощь» в разработке современных методов защиты от них в условиях Горного Бадахшана (Таджикистан) // Геориск. 2013. № 1. С. 53–59.
- Шафиев Г.В. Природные угрозы, связанные с прорывоопасными озерами Горного Бадахшана в бассейне реки Шахдара (Таджикистан) // Геориск. 2014. № 1. С. 40–45.
- Шнайдер Ж.Ф. Удалённые геологические угрозы на Юго-Западном Памире, ГБАО, Таджикистан: краткий отчёт, составленный Швейцарским Управлением по Развитию и Сотрудничеству (SDC) для МЧС Республики Таджикистан. 2005. 139 с.
- Шнайдер Ж.Ф., Мергили М. Отдаленные геологические угрозы в высокогорных регионах Таджикистана. Душанбе, 2010.
- Яблоков А.А. Сели Таджикистана // Сборник научных трудов. Вып. 18. Пятигорск: ОАО «Севкавгипроводхоз», 2009. С. 88-102.
- Mergili M., Schneider J.F. Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011. Vol. 11. P. 1447–1462. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1447-2011>.



Хвостохранилища – объекты повышенной селевой опасности

М.Д. Докукин¹, Э.В. Запорожченко², Д.В. Знаменский³

¹Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, inrush@bk.ru

²Селевая ассоциация, Пятигорск, Россия, ednad17@mail.ru

³Независимый консультант, CBDB – CT-11, Бразилиа, Бразилия,
dvzname@gmail.com

Аннотация. Приводятся данные о техногенных катастрофах с человеческими жертвами, произошедшими на хвостохранилищах Фундан и Фейхао в Бразильском штате Минас-Жерайс в 2015 и 2019 гг., их основные параметры и последствия. На этом предупредительном фоне описываются особенности обстановки, складывающейся вокруг Тырнаузского хвостохранилища (Россия), не функционирующего с 1997 г. и содержащего тонкодисперсные и токсичные продукты обогащения вольфрамо-молибденовых руд. Характеризуются возможные, ранее не учитываемые, результаты воздействия схода селевых и наносоводных потоков на объекты хвостохранилища. Анализируются критические ситуации 2002 и 2014 гг. Оценивается состояние водоотводящих гидротехнических сооружений, не адаптированных к текущему положению. Даются рекомендации по предотвращению вероятной экологической катастрофы. Подчеркивается возможность более значительных последствий для населения и инфраструктуры подкомандной территории (долина р. Баксан ниже устья р. Гижигит) в сравнении с бразильскими событиями 2015 и 2019 гг. Сопоставляются аналогичные аварии в Болгарии в 1966 г., в Италии в 1985 г., в Кабардино-Балкарской Республике, Магаданской области и Красноярском крае России в 2017, 2009 и 2019 гг. соответственно, Индии и Мьянме в 2019 г.

Ключевые слова: экологический риск, хвостохранилища, плотины, тоннель, селевой режим, обводной канал

Ссылка для цитирования: Докукин М.Д., Запорожченко Э.В., Знаменский Д.В. Хвостохранилища – объекты повышенной селевой опасности. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 25–38.

Tailings dams - facilities of increased debris-flow hazard

M.D. Dokukin¹, E.V. Zaporozhchenko², D.V. Znamensky³

¹High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, inrush@bk.ru

²Debris Flow Association, Pyatigorsk, Russia, ednad17@mail.ru

³CBDB-CT 11 Head, and Independent Consulting Engineer, Brasília, Brazil,
dvzname@gmail.com

Abstract. The article provides data on man-made disasters with human losses that occurred at the Fundao and Corrego do Feijao tailings dams in the Brazilian state of Minas Gerais in 2015 and 2019 and gives their main parameters and consequences. On this background specific features are described of the situation developing around the Tyrnauz tailings dam (Russia), which has not been functioning since 1997 and contains finely dispersed and toxic tungsten-molybdenum ore dressing products. The possible, but not previously taken into account results of the impact of debris flow and flow with suspended materials on the tailings dam facilities are characterized. Analysis of the critical situations of 2002 and 2014 is conducted. The condition of hydraulic structures not adapted to the current state is assessed. Recommendations on the prevention of a probable

ecological catastrophe are given. The possibility of more significant consequences for the population and infrastructure of the lower territory (the Baksan River valley, below the Gizhgit River mouth) in comparison with the Brazilian events of 2015 and 2019 is underlined. Similar accidents in Bulgaria in 1966, in Italy in 1985, in the Kabardino-Balkarian Republic, the Magadan Region and the Krasnoyarsk Territory of Russia in 2017, 2009 and 2019, respectively, in India and Myanmar in 2019 are compared.

Key words: *ecological risk, tailings dams, tunnel, debris flow regime, by-pass channel*

Cite this article: Dokukin M.D., Zaporozhchenko E.V., Znamensky D.V. Tailings dams – facilities of increased debris-flow hazard. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 25–38.

Введение

Во всем мире в хранилища отходов черных и цветных металлов ежегодно поступает около 3 млрд м³. Общий объем складированием продуктов передела только железорудных предприятий России составил к началу XXI века около 1 млрд. м³. До последнего времени отношение к хвостохранилищам, как к своеобразным свалкам горного производства, не способствовало проведению представительных исследований этих специфических геотехнических систем. Между тем рукотворные свалки относятся к объектам повышенной экологической опасности не только из-за известного их негативного воздействия на воздушные бассейны, почвенный покров, поверхностные и подземные воды, но и как источник стремительного развития катастрофического процесса, связанного с особенностями состояния масс, складированного в хвостохранилищах материала, удерживающих его дамб и плотин, как правило, сооружаемых в долинах боковых притоков главных речных артерий бассейна. Естественный сток при этом переводится в обход созданной рукотворной емкости. По завершению разработок месторождений или по исчерпанию объемных возможностей хвостохранилищ последние обычно не удостоиваются должного эксплуатационного внимания – искусственные обводные тракты и дренажные системы перестают нормально функционировать. Прорывы дамб обвалования или подпорных плотин в паводочные периоды приводят к потокам разрушительной энергетики. Такие катастрофы на фоне планетарного климатического тренда происходят все чаще: меняется природный гидрологический режим, ухудшаются параметры прочности комплекса гидротехнических сооружений, гидрогеологические (фильтрационные) условия (истечению разжиженных дисперсных продуктов из хвостохранилищ при недостаточной сейсмостойчивости удерживающих составляющих подпорного комплекса могут способствовать и землетрясения). В связи с вышеизложенным, показательна ситуация, складывающаяся вокруг крупнейшего на Северном Кавказе хвостохранилища бывшего Тырныузского горно-обогатительного комбината (ГОКа). Поэтому крайне важны уроки трагических событий, связанных с хвостохранилищами Бразилии последних лет (2015, 2019 гг.), с другими аналогичными бедствиями.

Сравнительный анализ обстоятельств и последствий аварий реальных объектов складирования отходов горных производств

Россия – Бразилия: Тырныуз – Минас-Жерайс

Поступление отходов обогащения вольфрамо-молибденовых руд в Тырныузское хвостохранилище (рис. 1) прекратилось в 1997 г. и более не возобновлялось.

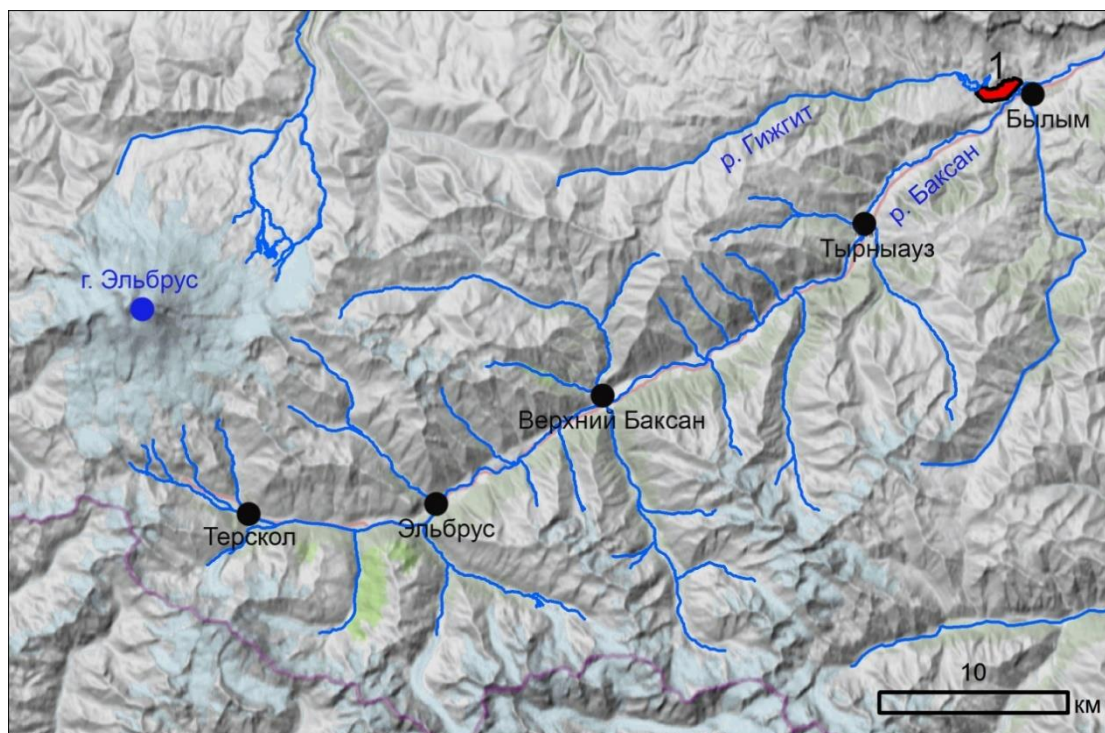


Рис. 1. Схема расположения Тырнаузского хвостохранилища (Эльбрусский район Кабардино-Балкарской Республики, Россия): 1 – хвостохранилище, красный контур

Fig. 1. Layout of the Tyrnauz tailings dam (Elbrus district of the Kabardino-Balkarian Republic, Russia): 1 – tailings dam, red outline

К этому времени было накоплено (путем транспортировки по 15 км пульпопровода) 118 млн. м³ мелко- и тонкозернистых масс, содержащих соединения высокой степени опасности. Высота наращиваемого подпорного сооружения по схеме «вверх по долине» («upstream») достигла 168 м. В 2002 и 2014 гг. к участку водоемостойника (рис. 2) в неожиданном селевом режиме подошли волны потоков, расходы которых до двух раз (140 м³/с) превышали пропускную способность ориентированного чисто на водную составляющую обводного тоннельного тракта (65 м³/с). Система, предусматривавшая недопущение речных вод к пляжной зоне намывных (до 1998 г.) хвостов, оказалась к такому повороту событий не готовой. В результате до уровня прорыва (перелива) невысоких дамб обвалования в 2002 г. оставались считанные сантиметры [Запорожченко, Докукин, 2019a]. После 1997 г. у сухого пляжа хвостотвалов сформировалось два водоема общим объемом около 1,5 млн. м³, способные быть вовлеченными в пополнение триггерного (под развитие прорывного процесса) расхода очередного водного или селевого паводка (рис. 3).

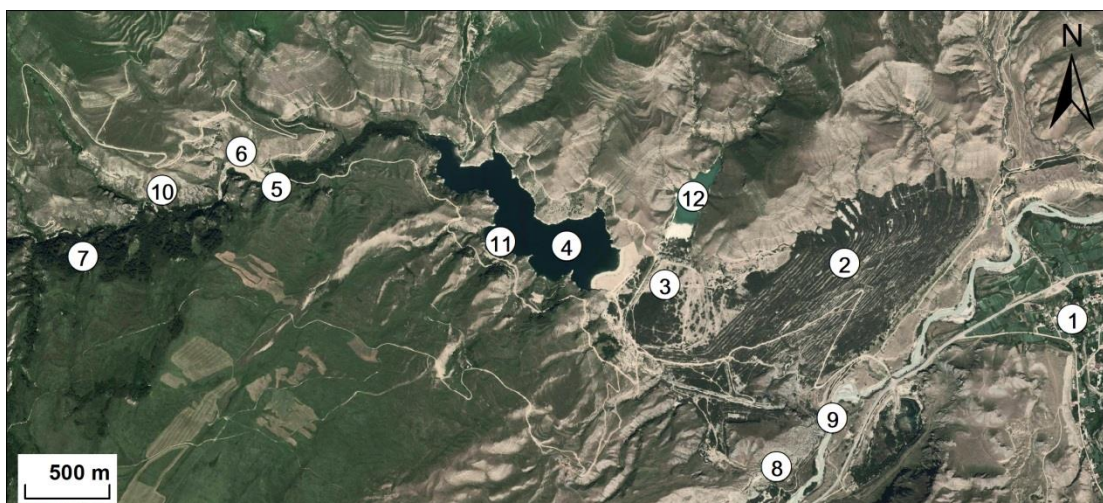


Рис. 2. Кабардино-Балкарская Республика. Россия. Участок нижнего течения р. Гижгит. Космоснимок (Google Earth): 1 – пос. Былым; 2 – основная плотина Тырнаузского хвостохранилища; 3 – пляж намывных масс; 4 – водоем-отстойник; 5 – входной портал тоннеля 2; 6 – селевые отложения 2002 и 2014 гг.; 7 – входной портал тоннеля 3; 8 – выходной портал тоннеля 2 – устье р. Гижгит; 9 – р. Баксан; 10 – р. Гижгит между тоннелями 2 и 3; 11 – входной портал тоннеля 1 (затоплен); 12 – левобережный водоем

Fig. 2. Kabardino-Balkarian Republic. Russia. Section of the Gizhgит River downstream. Satellite image (Google Earth): 1 – Bylym Village; 2 – the main dam of the Tyrnyauz tailings dam; 3 – beach of washed-in masses; 4 – sedimentation reservoir; 5 – entrance portal of tunnel 2; 6 – debris flow deposits of 2002 and 2014; 7 – entrance portal of the tunnel 3; 8 – exit portal of the tunnel 2 – Gizhgит river mouth; 9 – Baksan river; 10 – Gizhgит river between tunnels 2 and 3; 11 – entrance portal of tunnel 1 (flooded); 12 – left bank reservoir

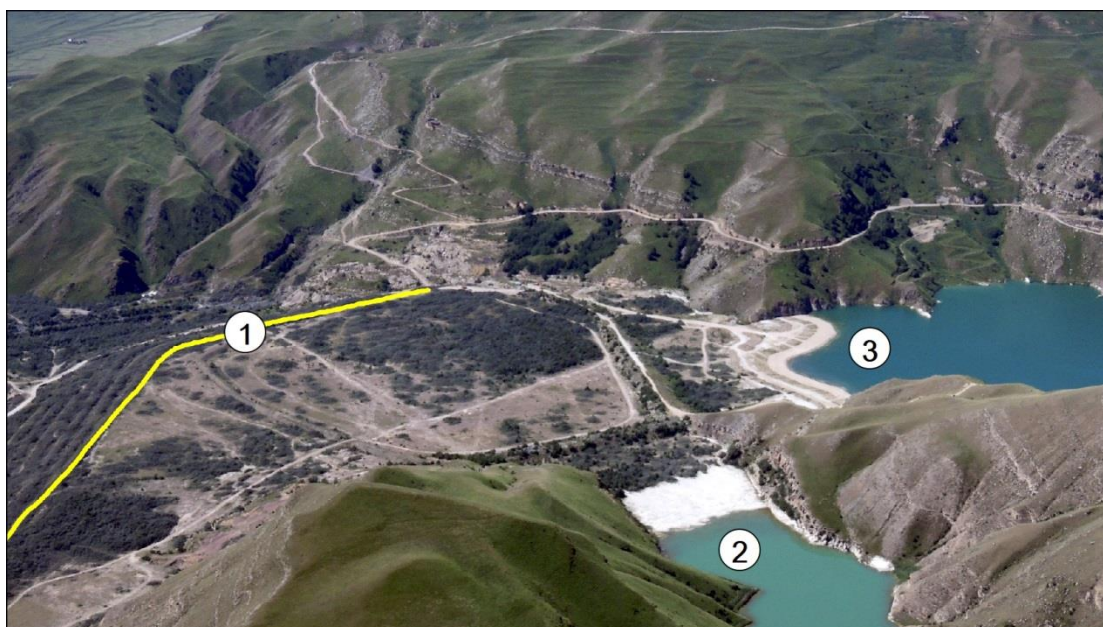


Рис. 3. Тырнаузское хвостохранилище. 10 июля 2018 г. Вид с вертолета: 1 – гребень плотины; 2 – левобережный водоем; 3 – водоем-отстойник. Фото М.Д. Докукина

Fig. 3. Tyrnyauz tailings dam. July 10, 2018. View from a helicopter: 1 – the crest of the dam; 2 – left-bank reservoir; 3 – sedimentation reservoir. Photo by M.D. Dokukin

С тех пор, особенно после повторения селевого события в 2014 г. (рис. 4), ситуация на заброшенном комплексе производства прошлых лет сохраняется угрожающей.

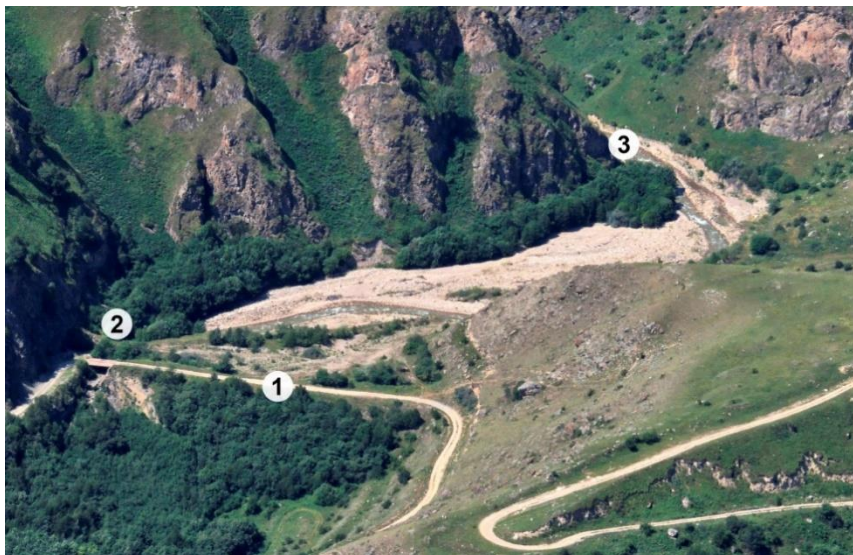


Рис. 4. Отложения селевых масс 2002 и 2014 гг. у тоннеля 2 Тырнаузского хвостохранилища: 1 – подпорная плотина; 2 – входной портал; 3 – русло р. Гижгит. Вертолетный снимок М.Д. Докукина 15.07.2016 г.

Fig. 4. Deposits of 2002 and 2014 debris flow masses near tunnel 2 of the Tyrnauz tailings dam: 1 – retaining dam; 2 – entrance portal; 3 – bed of the Gizhgit River. Photo from helicopter by M.D. Dokukin July 15, 2016

Сценарий, подобный ожидаемому с Тырнаузским хвостохранилищем, был реализован в случае с хвостохранилищем Фундан (Бразилия) в паводочный период ноября 2015 г. Около 43 млн. м³ материала железорудного передела грязевым валом высотой в 10 м поступило в близко расположенное (к транзитному руслу) водохранилище, и все 7 млн. м³ водной массы последнего влились в подошедший селевой поток, резко повысив его разрушительные возможности. Погибло 19 человек. Отложения твердого материала по руслу основной реки-приемника распространились на 120 км, а взвешенные токсичные наносы на расстояние более 650 км. Плотина хвостохранилища на момент разрушения её гребня имела высоту 110 м [Запорожченко, Докукин, 2019b].

В паводочный период января 2019 г. в результате роста фильтрационного давления была разрушена плотина выведенного из эксплуатации комплекса хвостохранилища Фейхао (Бразилия, разработчик месторождения – та же железорудная компания Vale SA) высотой 86 м (рис. 5).

Исход разжиженного материала хвостов – 11,7 млн м³, дальность выноса твердой составляющей возникшего селевого потока – 9,4 км, число погибших - около 270 человек. К счастью (рис. 6), плотина расположенного ниже водохранилища (в устье бокового притока третьего порядка), устояла [Запорожченко, Докукин, 2019c].



Рис. 5. Фейхао. Бразилия. 25 января 2019 г. Через 20 сек после первых деформаций плотины хвостохранилища. Кадр видеоролика <https://www.youtube.com/watch?v=SZ8ma4XOgow>

Fig. 5. Corrego do Feijao. Brazil. January 25, 2019. 20 seconds after the first deformations of the tailings dam. Video frame <https://www.youtube.com/watch?v=SZ8ma4XOgow>



Рис. 6. Фейхао. Бразилия. 28 марта 2019 г. Вертолетный снимок участка нижнего бьефа разрушенной плотины хвостохранилища и сохранившегося правобережного водоема (спущен после января 2019 г.). Фото Вашингтон Алвес (Reuters)

Fig. 6. Corrego do Feijao. Brazil. March 28, 2019. Helicopter image of the lower pool section of destroyed tailings dam and the preserved right-bank reservoir (drained after January 2019). Photo by Washington Alves (Reuters)

Катастрофы - аналоги

Заброшенное с 1994 г. хранилище золоторудных отходов Карамкенского ГОКа (Магаданская обл., Россия), было частично опустошено в 2009 г. при непредвиденном поступлении на поверхность сухого пляжа вод дождевого паводка руч. Туманный (рис. 7), сформировавшего разрушительный селевой поток, сопровождаемый

человеческими жертвами, токсичным загрязнением основного водотока, гибелью гидробиоты. Высота дамбы хвостохранилища около 27 м, общий объем хвостов 4,6 млн м³, участие в потоке приняло лишь меньшая их часть - менее 1 млн м³ [Запорожченко, 2019d].

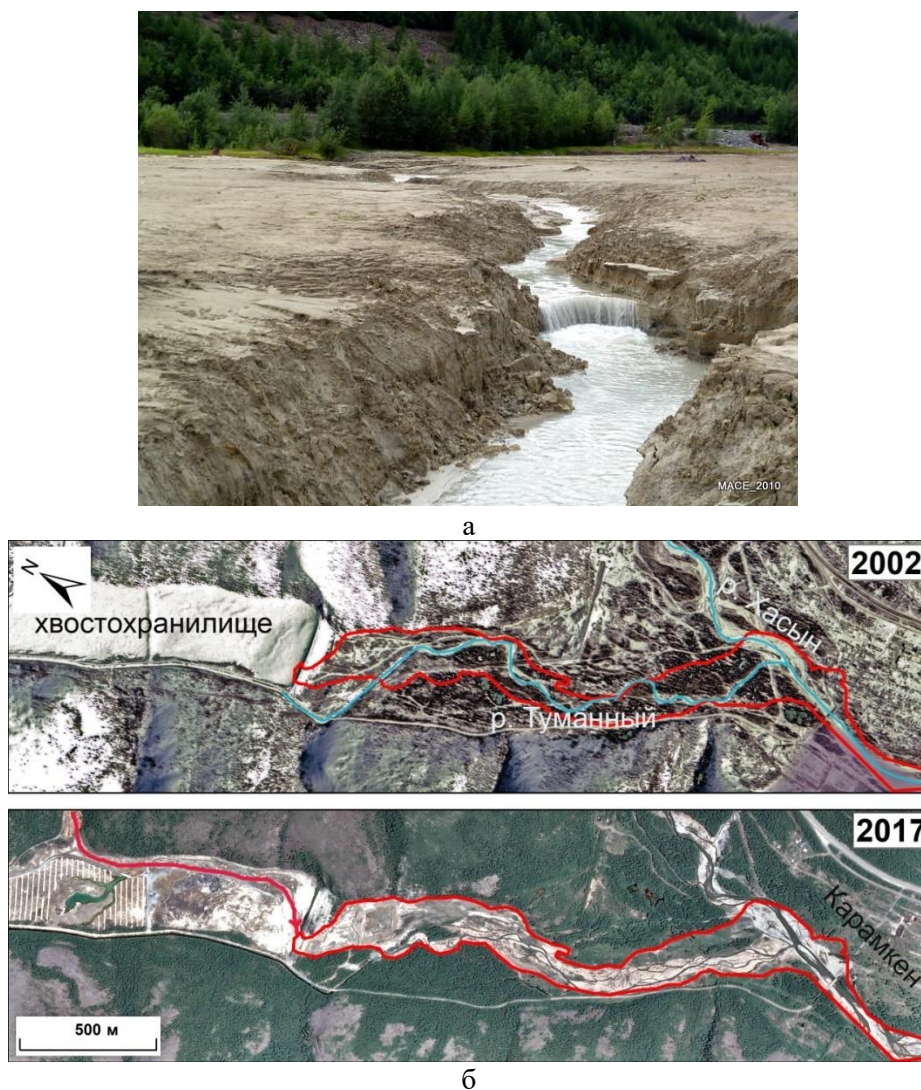


Рис. 7. Магаданская область. Россия. Посёлок Карамкен 29 августа 2009 г.: а – по водоему-отстойнику пролегло русло руч. Туманного, который продолжает размывать токсичные отложения продуктов обогащения, складированных в хвостохранилище бывшего Карамкенского ГОКа <https://primamedia.ru/news/132326/>; б – космоснимки Google Earth до и после прорыва дамбы. Красный контур – зона воздействия селевого потока

Fig. 7. Magadan region. Russia. The Karamken settlement, August 29, 2009: a – the bed of the Tumanny stream runs along the sedimentation water body, which continues to erode toxic deposits of enrichment products stored in the tailings dam of the former Karamken GOK <https://primamedia.ru/news/132326/>; б – Google Earth satellite images before and after the dam break. Red outline – debris flow impact area

1 сентября 2017 г. интенсивные дожди в верховьях р. Адыл-Суу (Северный Кавказ, Россия) вызвали прорыв перемычки озера Башкара – естественного водоема в кармане конечной морены отступающего одноименного ледника [Черноморец и др., 2018]. Сценарий возникшего при этом селевого потока не отличался от связанного с разрушением дамб и плотин хвостохранилищ (значительный перепад отметок верхнего и нижнего бьефов). Разница состояла в параметрах твердой фазы обрушившихся в транзитный тракт селевых масс. В случае с Башкаринской катастрофой она определялась

составом новейшей морены (значительное количество крупного обломочного материала) и окатанным характером (галька, валуны) флювиогляциальных отложений, поступавших в основной поток от его эрозионной деятельности. События 1 сентября 2017 г. сопровождалось значительными разрушениями существующей инфраструктуры и человеческими жертвами (рис. 8).



а



б

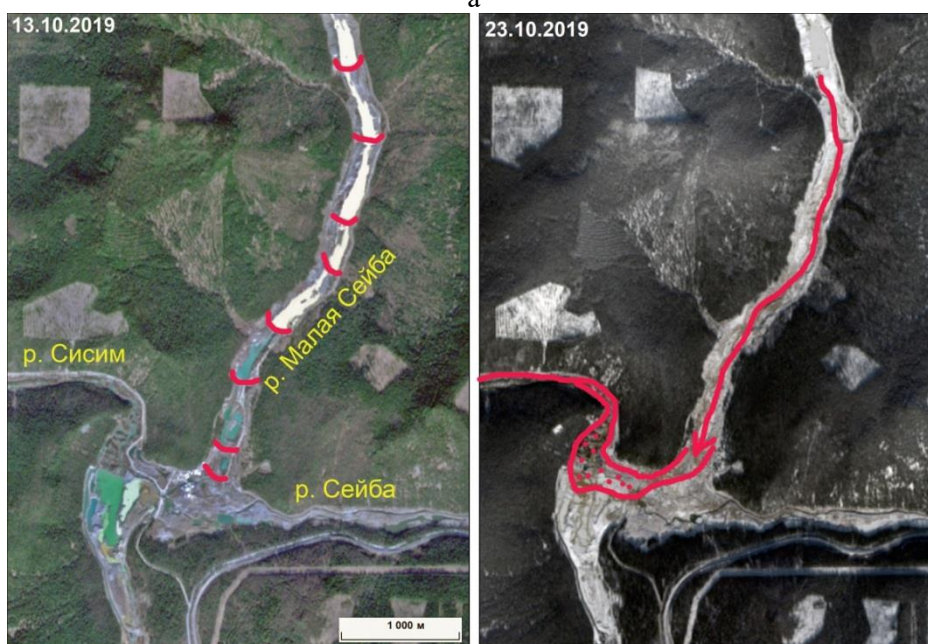
Рис. 8. Верховья р. Адыл-Суу, Кабардино-Балкарская Республика, Россия. После прорыва озера Башкара. Сентябрь 2017 г.: а – бывший жилой блок контейнерного типа базы отдыха «Джантуган», б – автомобиль с территории базы в селевых отложениях. Фотографии Э.В. Запорожченко

Fig. 8. Upper reaches of the Adyl-Suu River, Kabardino-Balkarian Republic, Russia. After the Bashkara Lake breakthrough. September 2017: а – former container-type residential unit of the Dzhantugan recreation center, б – a car from recreation center territory in debris flow deposits. Photos by E.V. Zaporozhchenko

19 октября 2019 г. прорывы каскада дамб обвалования из вскрышных крупнообломочных пород разрабатываемого золоторудного рассыпного месторождения в долине р. Малая Сейба (Красноярский край, Россия) образовал селевой поток по складуемым продуктам гидромониторного перемыва, унесший жизни 17 человек расположенного под дамбой рабочего поселка [Мильман, 2019] (рис. 9). Высота селевых валов достигала 4-5 м.



а



б

Рис. 9. Р. Малая Сейба. Красноярский Край, Россия. Прорыв каскада дамб золоторудного месторождения 19 октября 2019 г: а – 25 октября 2019 г. размывается верхняя дамба каскада искусственных запруд [https://imag.one/news/rosprirrodnadzor-razrabotku-mestorozhdeniya-z/1351115.](https://imag.one/news/rosprirrodnadzor-razrabotku-mestorozhdeniya-z/1351115), б – космоснимки Sentinel 2A до и после прорыва запруд. Красный контур – зона поражения селевым потоком

Fig. 9. Malaya Seiba River. Krasnoyarsk Territory, Russia. Breakthrough of a cascade of gold ore deposit dams October 19, 2019: а – October 25, 2019, the upper dam of cascade of artificial barrages erodes [https://imag.one/news/rosprirrodnadzor-razrabotku-mestorozhdeniya-z/1351115.](https://imag.one/news/rosprirrodnadzor-razrabotku-mestorozhdeniya-z/1351115), б – Sentinel 2A satellite images before and after breakthrough of barrages. Red outline – area affected by debris flow

1 мая 1966 г. в Болгарии в г. Згориград в долине Лева погибло 488 человек (в том числе 12 детей), около 2000 получили ранения, а более 150 домов были разрушены от обрушения дамбы хвостохранилища свинцово-цинкового рудника «Мир» и схода селевого потока с объёмом отложений около 0,5 млн м³ (рис. 10).



Рис. 10. Болгария. Згориград. 1 мая 1966 г. Отложения от прорыва хвостохранилища свинцово-цинкового рудника «Мир». Фото <http://blog.arhivatora.com>

Fig. 10. Bulgaria. Zgorigrad. May 1, 1966. Sediments from the breakthrough of the of the «Mir» lead-zinc mine tailings dam. Photo <http://blog.arhivatora.com>

19 июля 1985 г. в Италии (Тренто) произошла катастрофа на двухкаскадном хвостохранилище Валь-ди-Ставе. Около 180 тыс. м³ (всего лишь!) отходов флюоритового обогащения было вынесено на 4,2 км вниз по течению, но при высокой урбанизации подкомандной территории это привело к гибели 268 человек в г. Става и г. Тесеро, потери 62-х зданий [Genevois R., Tecca P.R., 2018]. Разрушение плотины верхней ступени системы хвостохранилищ вызвало переполнение и прорыв нижней. Образовавшаяся волна грязеподобных масс («шлама») со скоростью до 100 км/ч достигла главной водной артерии р. Авизио (рис. 11).

9 апреля 2019 г. в городе Мури в индийском штате Джаркханд красноцветный шлам разработки (компания Hindalco Industries Limited) месторождения бокситов хлынул на прилегающую к оползшей дамбе обвалования территорию (площадь зоны поражения 146 тыс. м²) с проходящей по ней железной дорогой (рис. 12). В результате 1 человек погиб и было много раненых.



Рис. 11. Италия. г. Става. 19 июля 1985 г. Фрагменты аэрофотоснимков до и после обрушения дамб хвостохранилищ (а, б), фрагмент космического снимка WorldView2 от 07.10.2017 (в); фото г. Тесеро и долины р. Авизио до и после катастрофы, фото П. Треттель, обработка М.Д. Докукина (г, д)

Fig. 11. Italy. Stava. July 19, 1985. Fragments of satellite images before and after the collapse of the tailings dams (a, б), a fragment of the WorldView2 satellite image dated 07.10.2017 (в); photo of Tesero and the Avisio River valley before and after the disaster, photo by P. Trettel, photo manipulation by M.D. Dokukin (г, д)

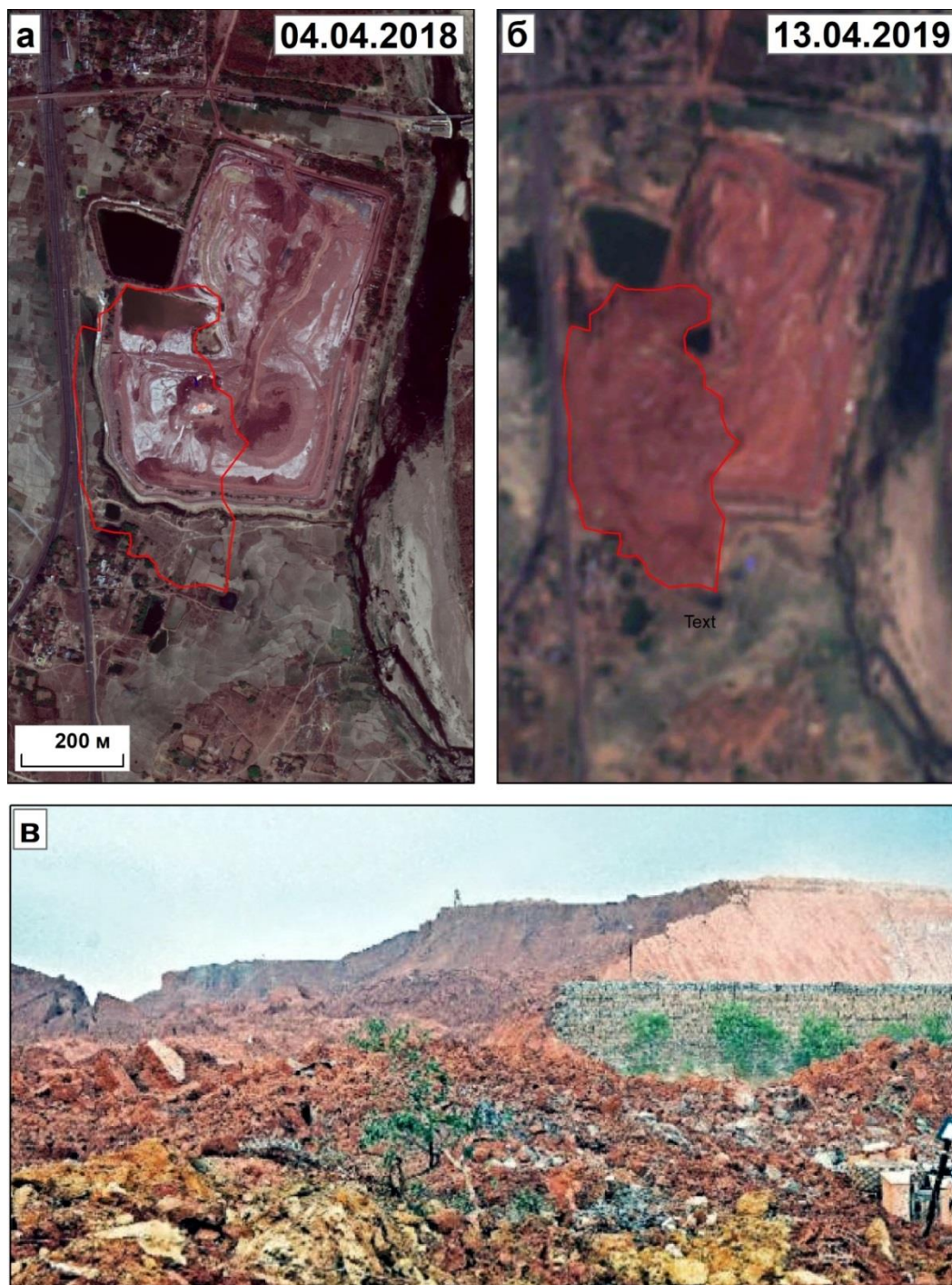


Рис. 12. Мури. Штат Джаркханд, Индия. 9 апреля 2019 г. Оползень на хвостохранилище месторождения бокситов. Космические снимки: а – Google Earth, б – Sentinel 2A, в – фото Bhaskar.com

Fig. 12. Muri. Jharkhand State, India. April 9, 2019 Landslide on the tailings dam of the bauxite deposit. Sattelite images: a – Google Earth, б – Sentinel 2A, в – photo by Bhaskar.com

22 апреля 2019 г. произошедший размыв дамбы хранилища отходов обогащения нефритового месторождения в штате Качин на севере Мьянмы стал причиной смерти 57 работников горнодобывающей компании (рис. 12). Подобная катастрофа в том же штате 21 ноября 2015 г. унесла 113 жизней. Там же, и по той же причине, 14 декабря 2015 г. погибло еще 21 человек.



Рис. 13. Качин. Мьянма. 23 апреля 2019 г. Селевые отложения в нижнем бьефе прорванной дамбы хвостохранилища, накрывшей выработки нефритового месторождения. Image from Zaw Moe Htat via AP and Pressfrom.info.<https://blogs.agu.org/landslideblog/2019/04/25/balakh-village-1/>

Fig. 13. Kachin. Myanmar. April 23, 2019. Debris flow deposits in the lower pool of the broken tailings dam, which covered the workings of the jade deposit. Image from Zaw Moe Htat via AP and Pressfrom.info.<https://blogs.agu.org/landslideblog/2019/04/25/balakh-village-1/>

В Тырнаузском хвостохранилище накоплено около 120 млн м³ тиксотропного материала при высоте удерживающего эти массы сооружения около 170 м. Функционируют два водоема объемом около 1,5 млн м³, непосредственно примыкающих к массиву хвостов и тоннельный обводной тракт (безремонтный период около 30 лет) пропускной способностью ≤ 65 м³/с при уже проходивших в XXI веке селевых паводков с расходом существенно большим 65 м³/с. Сход новых селевых (наносоводных) паводков в сложившейся ситуации грозит масштабной катастрофой расположенному в нижнем бьефе плотины населенному пункту (с. Былым), инфраструктуре Приэльбрусья, возникновением разрушительного паводка по главной реке (Баксан). Необходимо безотлагательное строительство обводного открытого (действующие нормативы запрещают прием селевых расходов в тоннельные выработки) инженерного водного тракта на расходы, существенно превышающие существующие возможности. Учитывая класс требуемого защиты комплекса сооружений (I-й), характер и водонасыщенность хвостовых масс, эти расходы ориентировочно оцениваются цифрами: $P_{0,1\%} = 270$ м³/с и $P_{0,01\%} = 430$ м³/с.

Заключение

Очевидное планетарное потепление климата отражается увеличением частоты и энергетической мощности паводочных расходов ливневого происхождения на реках северного склона Главного Кавказского хребта, повышая, в частности, риск возникновения экологической катастрофы на Тырнаузском хвостохранилище, являющимся, видимо, самым опасным объектом такого рода в России.

Этому обстоятельству способствуют:

- большой объем материалов захоронения дисперсных и токсичных отходов обогащения, находящихся в водонасыщенном состоянии при неработающей дренажной системе;
- несоответствие идеологии и параметров тоннельной схемы обводного речного тракта реально складывающимся природно-техногенным условиям;
- командование над урбанизированной территорией, непосредственно примыкающей к нижнему бьефу плотины хвостохранилища;
- бесконтрольность сооружений комплекса, уже подвергшихся негативному воздействию селевых потоков и капитально (с 1998 г.) не ремонтировавшихся.
- потенциально высокая фоновая сейсмическая опасность участка размещения плотины и чаши хвостохранилища; при землетрясениях расчетной балльности плотина, с её классом, высотой и существующими параметрами, необходимой устойчивостью не обладает.

Кроме того, гидрохимические характеристики выходов фильтрационных вод и вод устьевой части искусственного русла реки не отвечают нормам безопасности.

После 1960 г. в мире произошло порядка 120 трагических событий, связанных с такими специфическими геотехническими объектами, как хранилища отходов разработок полезных ископаемых (в Бразилии, Англии, Китае, Перу, Чили, Болгарии, США, Японии, Испании, Южной Африке, Германии, Югославии, Зимбабве, Канаде, Филиппинах, Италии, Австрии, Гвиане, Новой Зеландии, Боливии, Румынии, Швеции, Венгрии, Финляндии, Армении, Мексике, Индии, Израиле, Мьянме и России). Около 65 катастроф приходится на 40 лет XX века, около 55 – на 20 лет XXI века, из них 8 случились в 2019 г., в т.ч. 3 – в Бразилии. Прогноз всегда основан на экстраполяции. Главное видеть тенденции, имеющие будущее. Игнорировать уроки прошлого при этом недопустимо.

Список литературы

- Запороженко Э.В., Докукин М.Д. (2019а). Об угрозе разрушения Тырнаузского хвостохранилища на р. Гижгит в Кабардино-Балкарской Республике. Геориск, Том XIII, 1: 72-85.
- Запороженко Э.В., Докукин М.Д. (2019б). Хвостохранилище на р. Гижгит в Кабардино-Балкарской Республике (Россия) и его проблемы. IX International scientific and technical conference “Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction”. Tbilisi, Georgia: pp 301-310.
- Запороженко Э.В., Докукин М.Д. (2019с). Тырнаузское хвостохранилище – объект повышенного экологического риска. Устойчивое развитие горных территорий Кавказа. Коллективная монография. Том II. РАН, Москва: 224-237.
- Запороженко Э.В., (2019d). Вглядываясь в прошедшее. РИА – КМВ, 212 с.: ил. Пятигорск: 30-60.
- Мильман З. (2019). Плотины слепоты. Российская газета, №236 (7994) от 21 октября 2019 г.
- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М. (2018). Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года. Криосфера земли, Том XXII, №2: 70-80.
- Genevois R., Tecca P.R. (2018). The mud/debris flow of the Stava (Italy) tailings dams break. Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 5th International Conference. Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018. Ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili. Tbilisi: Publishing House “Universal”, P. 87-95.
- Robertson Peter K. et al. (2019). Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam. <http://www.b1technicalinvestigation.com>



Система противоселевых мероприятий в Заилийском Алатау

А.Р. Медеу¹, В.П. Благовещенский¹, С.У. Ранова¹, Н.Е. Касаткин¹, М.К. Касенов²,
Ж.Т. Раймбекова³

¹АО «Институт географии и водной безопасности» МОН РК, Алматы, Казахстан, ingeo_2009@mail.ru, victor.blagov@mail.ru, sandu2004@mail.ru, kastkinne@mail.ru

²ГУ «Казселезащита» КЧС МВД РК, Алматы, Казахстан, kasenov-1968@mail.ru

³Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан, t58ray@mail.ru

Аннотация. Система противоселевых мероприятий в Заилийском Алатау включает в себя: оценку и картографирование селевой опасности и селевого риска, превентивное опорожнение прорывоопасных озер, мониторинг и раннее предупреждение о селевой опасности, строительство селезащитных сооружений. На картах селевой опасности показаны границы распространения селей разной мощности и повторяемости. Карты селевого риска составлялись отдельно для социального, экономического и экологического рисков. На картах, построенных по результатам расчетов среднего годового ущерба от селей, показаны участки с низким, умеренным и высоким уровнями риска. Превентивное опорожнение озер проводится с 1964 г. За весь период работы выполнены более чем на 20 озерах. В последние годы проводится регулярное опорожнение семи моренных озер. Опорожнение озер проводится прокладкой поверхностных каналов стока и откачкой воды насосами и сифонами. При работах используются мини-бульдозеры и мини-экскаваторы. Мониторинг и раннее предупреждение о селях включает в себя: 30 автоматических станций мониторинга (8 станций на моренных озерах, 6 станций в селевых очагах, 9 станций в селевых руслах, 5 станции на селезащитных дамбах), два диспетчерских пункта. Развертывание сети мониторинга будет завершено в 2020 году. Для защиты от селевых потоков построены две селенаправляющие дамбы и 14 селезадерживающих дамб. В двух селевых руслах установлены тросово-сетчатые барьеры. Намечено строительство еще двух сплошных селезадерживающих дамб.

Ключевые слова: мониторинг и раннее предупреждение селей, опорожнение моренных озер, оценка и картографирование селевой опасности и селевого риска, противоселевые мероприятия, селезащитные сооружения

Ссылка для цитирования: Медеу А.Р., Благовещенский В.П., Ранова С.У., Касаткин Н.Е., Касенов М.К., Раймбекова Ж.Т. Система противоселевых мероприятий в Заилийском Алатау. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 39–48.

System of the debris flow protection in the Zailiyskiy Alatau range

A.R. Medeu¹, V.P. Blagoveshchenskiy¹, S.U. Ranova¹, N.E. Kasatkin¹, M.K. Kasenov²,
Zh.T. Raymbekova³

¹JSC “Institute of Geography and Water Safety” MES RK, Almaty, Kazakhstan, ingeo_2009@mail.ru, victor.blagov@mail.ru, sandu2004@mail.ru, kastkinne@mail.ru

²SI “Kazselesashchita” CES MI RK, Almaty, Kazakhstan, kasenov-1968@mail.ru

³Al-Faraby Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, t58ray@mail.ru

Abstract. The system of anti-mudflow measures in Zailiyskiy Alatau includes: assessment and mapping of mudflow hazard and mudflow risk, preventive emptying of moraine lakes,

monitoring and early warning of mudflow hazard, construction of mudflow protection dams. The mudflow hazard maps show the borders of mudflows with different power and frequency. Mudflow risk maps were compiled separately for social, economic and environmental risks. Maps based on the results of the average annual damage from mudflows show areas with low, moderate and high-risk levels. Preventive emptying of lakes has been carried out since 1964. Over the entire period of work, emptying has been done on more than 20 lakes. In recent years, seven moraine lakes have been regularly emptied. Lakes are emptied by laying surface runoff channels and pumping water with pumps and siphons. During the work, mini-bulldozers and mini-excavators are used. Monitoring and early warning of mudflows includes: 30 automatic monitoring stations (8 stations on moraine lakes, 6 stations in mudflow formation sites, 9 stations in mudflow channels, 5 stations on mudflow dams), and two control centers. The deployment of the monitoring network will be completed in 2020. To protect against mudflows 14 dams were built. In two mudflow channels, cable-mesh barriers are installed. It is planned to build two new dams.

Key words: *monitoring and early warning of mudflows, emptying of moraine lakes, assessment and mapping of mudflow hazard and mudflow risk, mudflow protection measures, mudflow protection dams.*

Cite this article: Medeu A.R., Blagovechshenskiy V.P., Ranova S.U., Kasatkin N.E., Kasenov M.K., Raymbekova Zh.T. System of the debris flow protection in the Zailiyskiy Alatau range. In: Chernomoretz S.S., Viskhadzhiya K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 39–48.

Введение

Заилийский Алатау является одним из самых селеопасных горных районов Казахстана. Объемы селей могут достигать нескольких миллионов м³. В то же время этот район отличается высоким социально-экономическим развитием. На селевых конусах выноса северного склона Заилийского Алатау расположена крупная городская агломерация с центром в городе Алматы с населением более 2,5 млн человек. Селевые потоки представляют большую угрозу для населения и экономики района. Селевые катастрофы с многочисленными жертвами и большим материальным ущербом происходили в 1921, 1963 и 1973 годах [Medeu et al., 2019]. Поэтому задача защиты от селей является очень актуальной.

Систематические научные исследования селей в Заилийском Алатау проводятся с 1950-х годов, когда в гидрометеорологической службе была создана селевая партия и научно-исследовательский институт (КазНИГМИ). Исследования селей проводились «Казселезащитой», а также в Институте географии и Институте геологических наук АН КазССР. «Казселезащита» была создана в 1973 г. специально для обеспечения защиты от селей.

На Чемолганском полигоне проведена серия уникальных полномасштабных экспериментов по моделированию селей. Прошли успешные испытания радиооповестителей селей, которые можно считать прообразом системы раннего оповещения. Были разработаны методы прогноза ливневых и гляциальных селей, а также опорожнения прорывоопасных моренных озер [Безопасность..., 1998]. Материалы наблюдений за селевыми явлениями систематизированы в работе [Medeu и др., 2016], в которой приведены сведения более чем о 2000 селевых проявлениях. На селеопасные бассейны северного склона Заилийского Алатау составлены карты селевой опасности и селевого риска М 1: 350 000 и 1:100 000.

В статье рассматривается современное состояние системы противоселевых мероприятий. В настоящее время система защиты от селей в Заилийском Алатау включает в себя следующие мероприятия:

- оценка и картографирование селевой опасности и селевого риска,

- превентивное опорожнение прорывоопасных озер,
- строительство селезащитных сооружений.
- мониторинг и раннее предупреждение о селевой опасности.

Карты селевой опасности

В 2018–2019 годах Институтом географии по заданию Департамента по чрезвычайным ситуациям города Алматы были составлены карты селевой опасности и селевого риска М 1:25 000 на бассейны рек Киши и Улкен Алматы, Каргалы и Аксай. Карты составлены с использованием ГИС-технологий по материалам многолетних наблюдений, полевых исследований и дешифрирования космических снимков.

На картах селевой опасности показаны пути движения и границы распространения селей различных объемов и повторяемости. По объемам сели разделены на 4 категории: очень крупные с объемом более 1 млн м³, крупные с объемом от 100 тыс. до 1 млн м³, средние с объемом от 10 до 100 тыс. м³ мелкие с объемом менее 10 тыс. м³. По повторяемости сели разделены на три градации: частая с повторяемостью чаще 1 раза в 50 лет, редкая с повторяемостью от 1 раза в 50 лет до 1 раза в 100 лет, очень редкая с повторяемостью реже 1 раза в 100 лет.

Буквами обозначены генетический тип (гляциальный или дождевой) и состав селей (грязекаменный, грязевый, наносоводный).

На карте обозначены прорывоопасные моренные озера с объемом воды от 10 до 100 и более 100 тыс. м³, которые могут быть источниками формирования крупных прорывных гляциальных селей.

На картах также показаны крупные эрозионные врезы в рыхлообломочных отложениях, являющиеся очагами формирования дождевых и гляциальных селей, и селезащитные сооружения (останавливающие и направляющие дамбы, сквозные решетчатые дамбы и сетчатые барьеры).

Для объектов, расположенных в селеопасной зоне, показано расчетное время добегания селя от очага формирования до объекта.

Карты селевого риска

Селевой риск оценивался по трем категориям: социальный, экономический и экологический. Карты селевого риска составлялись на основе карт селевой опасности и перечня объектов, подверженных селевым воздействиям. В этом перечне указывались местоположение объекта, его тип (социальный, экономический, экологический), стоимость, частота воздействия селей и ущерб, наносимый селями при таких воздействиях.

Расчеты экономического риска выполнены для каждого объекта, подверженного воздействию селей. Средний годовой ущерб рассчитан с учетом стоимости объекта, вероятности воздействия селя, его разрушительной способности и устойчивости объекта к селевым воздействиям. Расчет ущерба и риска выполнен для каждого объекта. Общий риск по бассейну получается суммированием ущербов по всем объектам бассейна.

Зоны воздействия селей, выделенные на картах селевой опасности, были дифференцированы по трем уровням риска (низкий, умеренный, высокий), в зависимости от тяжести последствий селевых воздействий и их повторяемости. Тяжесть последствий оценивалась по величине возможного ущерба и уровню чрезвычайных ситуаций (локальный, объектовый, местный, региональный, глобальный) в зависимости от числа погибших и пострадавших людей и размеру материального ущерба, принятым в Комитете по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан. Повторяемость ЧС оценивалась по повторяемости селей. Для повторяемости были выделены четыре градации: очень редкая (реже 1 раза в 100 лет), редкая (1 раз в 20–100 лет), частая (1 раз в 20–50 лет) и очень частая (чаще 1 раза в 20 лет)

Низкий уровень риска принят для территорий, на которых объектовые ЧС повторяются реже 1 раза в 100 лет, а незначительные происшествия могут повторяться 1 раз в 50 лет. На этих территориях защитные мероприятия, как правило, не проводятся.

Умеренный риск присутствует на территориях, где местные ЧС повторяются реже 1 раза в 50 лет, а объектовые ЧС могут повторяться 1 раз в 20 лет. На этих территориях необходимо проводить защитные мероприятия, которые обычно сводятся к регулированию землепользования, мониторингу селевой опасности, превентивному опорожнению прорывоопасных озер, раннему предупреждению о сходе селя.

Высокий селевой риск устанавливается для территорий, на которых 1 раз в 50–100 лет могут возникать региональные и глобальные ЧС, 1 раз в 20–50 лет – местные ЧС и чаще 1 раза в 20 лет – объектовые ЧС и происшествия.

Опорожнение прорывоопасных озер

Большинство горных озер в Заилийском Алатау имеют гляциальное происхождение. Всего три озера являются завальными. Гляциальные озера образовались при отступании ледников. По времени образования они делятся на древние и современные [Катица и др., 2018]. Древние озера возникли после завершения последнего верхнечетвертичного оледенения, закончившегося примерно 10 тыс. лет назад. Современные ледниковые озера образуются при отступании ледников после Малого ледникового периода, длившегося с 13 по конец 19 веков [Severskiy et al., 2016]. Отступление ледников связано с глобальным потеплением климата. Особенно быстро ледники начали сокращаться с середины 20 столетия. В настоящее время они отступают со скоростью более 10 м в год [Кокарев и др., 2011].

Прорывоопасными являются только современные ледниковые озера. Прорыв древних моренных и завальных озер возможен только при переполнении их в результате схода селя или вытеснения воды вследствие горного обвала или подвижки ледника [Bolch et al., 2011; Hubbard et al., 2005]. Прорывоопасность современных ледниковых озер обусловлена тем, что их плотины сложены погребенными льдами. Таяние этих льдов приводит к поверхностному или подземному прорыву озер и формированию гляциальных селей. Объем селя может превышать объем прорывного паводка в 10, а иногда в 20 раз. Наиболее часто прорывы озер наблюдались во второй половине 20 века. До 1950-х годов специалистами отрицалась сама возможность формирования в Заилийском Алатау гляциальных селей. Первый крупный гляциальный сель отмечен в 1956 г. С тех пор в период до 1993 г. в Заилийском Алатау произошло семь гляциальных селей объемом более миллиона м³, которые сопровождалась человеческими жертвами или крупным материальным ущербом [Medeu и др., 2016; Medeu, et al., 2019].

Количество прорывоопасных озер и их размеры постоянно меняются. От момента возникновения ледникового озера до достижения им опасного размера может пройти всего 20 лет. Некоторые озера исчезают в результате опорожнения по подземным каналам стока без формирования селей. Часть озер осушаются в зимний период и снова наполняются летом. Поэтому необходим постоянный мониторинг состояния ледниковых озер. Работы по составлению кадастра озер проводятся совместно Институтом географии и Казселезащитой. В настоящее время на северном склоне Заилийского Алатау насчитывается 22 прорывоопасных ледниковых озера объемом от 25 тыс. до 1,1 млн м³. [Катица и др., 2018].

Для предотвращения прорывных гляциальных селей в мировой практике широко используется искусственное опорожнение моренных озер. Этот метод применяется в Казахстане с 1964 года [Безопасность..., 1998]. В Заилийском Алатау Казселезащита провела опорожнение около 30 прорывоопасных озёр. Такие работы проводятся на озерах объемом более 100 тыс. м³, если их прорыв может привести к формированию селя, способного нанести значительный ущерб. Снижение объема озера до безопасного размера осуществляется прокладкой поверхностного канала, а также откачкой воды насосами и сифонами (рис. 1). Особенно активно эти работы ведут с 2016 г. В настоящее время проводится опорожнение восьми озёр. Для откачки воды используют насосы,

смонтированные на плавучих платформах, и сифоны диаметром 200 мм. Поверхностные каналы прокладываются с использованием мини-экскаваторов и мини-бульдозеров. Техника доставляется на место работ вертолётами.

В 2019 г. в результате превентивного опорожнения удалось предотвратить прорыв моренного озера под ледником Каргалы в одноименном бассейне. Это озеро уже прорывалось по подземному каналу в 2015 г, что привело к формированию села объёмом 150 тыс. м³. Сель был остановлен на выходе из гор защитной дамбой. В 2019 г. озеро вновь начало наполняться. Уровень воды поднимался со скоростью около 10 см в день. К середине июня объём озера достиг 77,2 тыс. м³, а уровень поднялся до гребня озёрной перемычки. Чтобы не допустить прорывы озера, были предприняты работы по снижению его уровня. Откачку воды через озёрную перемычку вели шестью насосами производительностью 360 л/с, установленными на плавучих платформах (рис. 7), и сифоном диаметром 200 мм. Кроме того, экскаватором был прорыт эвакуационный канал глубиной 2,5 м. За период с 6 июня по 13 августа из озера было сброшено 1,6 млн м³ воды. В результате уровень воды в озере был понижен на 3,7 м. Объём озера при этом уменьшился на 42 тыс. м³. 14 августа озеро все-таки прорвалось, но из-за невысокого давления воды в подземном канале расход прорывного паводка не превышал 4 м³/с. Примерно с таким же расходом наносоводный паводок пришёл в селехранилище перед защитной дамбой, где он и остановился.

В 2019 г. превентивное опорожнение проводилось ещё на шести озёрах Заилийского Алатау. Во время этих работ было сброшено 4,6 млн м³ воды.



Рис. 1. Работы по превентивному опорожнению моренных озёр. а – батиметрическая съёмка с использованием эхолота и GPS-навигатора, б – прокладка поверхностного канала с использованием экскаватора и бульдозера, в – насос для откачки воды насосами, смонтированными на плавучей платформе, г – сброс воды сифоном

Fig. 1. Moraine lakes preventive emptying. а – bathymetric survey using an echo sounder and a GPS navigator, б – laying of a surface channel using an excavator and a bulldozer, в – a pump mounted on a floating platform, г – discharge of water by a siphon

Селезащитные сооружения

Первая селезащитная дамба в Заилийском Алатау была построена в начале 1950-х годов в средней части долины реки Улкен Алматы (рис. 2а). Она отводила селевые потоки, выходящие из долины р. Кумбелсу, от зданий гидроэлектростанции. Дамба успешно защитила ГЭС от нескольких крупных селей, объемом более 1 млн м³.

После крупной селевой катастрофы в 1963 г. на озере Есик было принято решение о строительстве селезадерживающей дамбы в долине реки Киши Алматы в урочище Медеу. Проект был разработан Казахским филиалом института «Гидропроект». Авторы проекта – Г. Шаповалов и Ю. Зиневич. При строительстве плотины было сделано два направленных взрыва. Плотина была сдана в эксплуатацию в 1972 г. Ее высота составляла 107 м, а объем селеохранилища – 6,2 млн м³. Уже через год плотине пришлось выдержать серьезный экзамен. Она задержала селя объемом 5,3 млн м³. Плотина выстояла, но в селеохранилище почти не осталось свободного объема для задержания новых селей. Поэтому высоту плотины пришлось увеличить до 150 м. В настоящее время она способно задержать 12,6 млн м³ селевой массы.

В 1958–1966 гг. в бассейне р. Киши Алматы построены четыре сквозных металлических селеуловителей: три решетчатых в русле Киши Алматы (один выше и два ниже урочища Медеу) и один тросово-сетчатый в русле р. Сарысай, а также сплошная габионная плотина в урочище Мынжылкы.

Габионная плотина в урочище Мынжылкы на высоте 3000 м была рассчитана на задержание селя объемом 35 тыс. м³. Она выстояла только 5 минут и была смыта до основания. На этом же месте к 1983 г. была построена новая насыпная плотина высотой 17 м с емкостью селеохранилища 230 тыс. м³. В 2019 г. высота плотины была увеличена надо 26 м, а емкость селеохранилища – до 1 млн м³.

Всего в Заилийском Алатау построено 14 селезащитных плотин различной конструкции: сплошные каменные и железобетонные, а также сквозные железобетонные и стальные (таблица 1, рис. 2). Они защитили г. Алматы в 1973 г., г. Талгар – в 1993 г. и поселок. Карагайлы – в 2015 г.

Таблица 1. Селезащитные плотины в Заилийском Алатау

Table 1. Debris flow protection dams in Zailiyskiy Alatau

Долина реки	Тип плотины	Высота, м	Ёмкость селеохранилища, млн м ³
Есик	Сквозная железобетонная	13	1,5
Есик	Сплошная каменная	48	12,8
Кайназар	Сплошная железобетонная	8,6	0,267
Кайназар	Сквозная железобетонная	5,5	0,144
Рахат	Сквозная железобетонная	5,5	0,107
Талгар	Сплошная каменная	45	8,5
Киши Алматы «Мынжылкы»	Сплошная каменная	23	1,0
Киши Алматы «Сарысай»	Сплошная железобетонная	8	0,1
Киши Алматы «Медеу»	Сплошная каменная	150	12,6
Киши Алматы «Лесничество»	Сквозная стальная	6	0,1
Улкен Алматы	Сплошная железобетонная	40	14,5
Каргалы	Сплошная железобетонная	28,8	1,2
Каскелен	Сквозная железобетонная	19,8	2,2
Узынкаргалы	Сплошная каменная	34	1,46



Рис. 2. Селезащитные сооружения в Зайлийском Алатау. а – селенаправляющая железобетонная дамба на р. Улкен Алматы, б – селеостанавливающая сплошная железобетонная дамба на р. Каргалы, в – селеостанавливающая сплошная каменная дамба на р. Талгар, г – селеостанавливающая решетчатая железобетонная дамба на р. Каскелен, д – сквозная решетчатая стальная плотина дамба на р. Киши Алматы, е – селезадерживающий стальной тросово-сетчатый барьер на р. Беделбай

Fig. 2. Mudflow protection structures in Zailiysky Alatau. а – deflecting reinforced concrete dam on the Ulken Almaty river, б – stopping reinforced concrete dam on the Kargaly river, в – stopping stone dam on the Talgar river, г – stopping reinforced concrete grid dam on the Kaskelen river, д – steel grid dam on the Kishi Almaty river, е – steel wire rope-mesh barrier on the Bedelbay river

На притоках р. Киши Алматы реках Беделбай и Батарейка ниже Медеу, по которым прошли дождевые сели в 1999 г., в 2014 г. построены каскады из гибких металлических тросово-сетчатых барьеров (6 барьеров в русле р. Беделбай и 3 барьера в русле р. Батарейка) (см. рис. 2е).

В настоящее время планируется построить еще две плотины: одну в долине р. Аксай с селехранилищем объемом 4,356 млн м³ и одну в долине р. Улкен Алматы с селехранилищем объемом 2,3 млн м³.

Сплошные селезадерживающие плотины – наиболее надёжное средство защиты от селей (см. рис. 2б, в). Однако в процессе эксплуатации был установлен один существенный их недостаток – они не предотвращают формирование вторичных селей, возникающих при прохождении постселевых паводков ниже плотин. Чтобы такого не случилось, необходимо оборудовать плотины регулируемыми шлюзами.

Сквозные плотины не всегда выполняют свою защитную роль. Две небольшие железобетонные сквозные плотины, установленные в руслах рек Кокшека и Акжар, где часто проходят мелкие сели, были уже через несколько лет занесены селевыми отложениями. Новые сели проходили беспрепятственно поверх этих плотин. Металлическая сквозная плотина в русле реки Киши Алматы была сметена мощным селом 1973 г. Тросово-сетчатый барьер в русле р. Сарысай был легко разорван первым же, сравнительно небольшим селом, прошедшим по руслу Сарысай в 2013 г.

Автоматизированный мониторинг и раннее предупреждение о селевой опасности

Мониторинг и раннее предупреждение природных опасностей является одним из наиболее эффективных мероприятий по снижению риска стихийных бедствий. На Сендайской конференции ООН в 2015 г. это направление было обозначено в числе главных приоритетов.

В Казахстане еще в 1970-е годы устанавливались радиооповестители селей, подававшие сигнал при прохождении селя на диспетчерский пункт Казселезащиты. Они успешно сработали при прохождении селя 1977 г. по реке Улкен Алматы, что позволило рассчитать скорость движения селя на нескольких отрезках пути. Эти устройства использовались также для определения скорости селей во время экспериментальных пусков селей на Чемолганском полигоне. К сожалению, после 1990 г. работы по этому направлению прекратились.

В 2016 г. в связи с расширением территории г. Алматы встал вопрос о модернизации системы защиты от селей. Среди прочих мероприятий по инициативе Института географии было решено организовать автоматизированный мониторинг и раннее предупреждение о селевой опасности. В 2017 г. по заданию Департамента по чрезвычайным ситуациям г. Алматы Институт географии разработал концепцию такого мониторинга [Медев и др., 2018]. В 2019 г. была разработана проектно-сметная документация, а в 2019 г. началось развёртывание сети автоматизированного мониторинга селевой опасности на реках Киши Алматы, Улкен Алматы, Каргалы и Аксай, по которым сходят сели, угрожающие г. Алматы.

В эту сеть входят автоматические станции мониторинга на восьми моренных озёрах, шесть станций – в очагах формирования дождевых селей, десять станций – в селевых руслах и пять станций – на селезащитных дамбах. На станциях, расположенных на моренных озерах, измеряются температура воздуха и осадки, уровень и температура воды в озере, уровень воды в канале стока из озера, температура и влажность грунта в озерной перемычке на глубине до 3 м. На очаговых станциях измеряются температура воздуха и осадки, уровень воды в селевом русле, температура и влажность грунта в селевом очаге на глубине до 3 м. На станциях в селевых руслах измеряются температура воздуха и осадки и уровень воды в селевом русле. На станциях, расположенных на противоселевых дамбах, измеряются температура воздуха и осадки, уровень воды в селехранилище и в русле ниже плотины. Все станции снабжены датчиками схода селя и видеокамерами. Энергоснабжение станций осуществляется от солнечных панелей. Данные со станций мониторинга по сотовой или спутниковой связи передаются на два диспетчерских пункта, расположенные в Департаменте по чрезвычайным ситуациям (ДЧС) г. Алматы и в «Казселезащите». Решение о включении системы раннего предупреждения принимается специалистами «Казселезащиты» и осуществляется оперативным дежурным ДЧС.

Измерение параметров и передача данных могут осуществляться в трех режимах: дежурном, тревожном и аварийном. Дежурный режим предусмотрен при отсутствии угрозы схода селей. В этом режиме измерения происходят через 4 часа. Тревожный режим включается, когда возникают предпосылки для формирования селей (сильные осадки или высокая температура воздуха). В этом режиме измерения происходят ежечасно. Аварийный режим включается при начале процесса селеформирования (прорыв озера, резкий подъем уровня воды в селевом русле). В этом режиме интервал измерений уменьшается до одной минуты.

Данные с автоматических станций будут поступать на диспетчерские пункты «Казселезащиты» и Департамента по чрезвычайным ситуациям г. Алматы (рис. 3). Работы будут завершены в 2020 г. В дальнейшем автоматизированный мониторинг селевой опасности будет развернут во всех селеопасных долинах Заилийского Алатау.



Рис. 3. Видеостена со станциями автоматизированного мониторинга селевой опасности в ситуационном зале Департамента по чрезвычайным ситуациям г. Алматы

Fig. 3. Video wall with automated monitoring stations in the situation room of the Department of Emergency Situations of Almaty

Заключение

Создание в Казахстане в 1973 г. Казселезащиты как специализированной государственной структуры для борьбы с селями обеспечило высокий уровень организации защитных мероприятий. Большие успехи достигнуты в изучении природы селевых потоков, оценке и картографировании селевой опасности, прогнозах селей, превентивном опорожнении прорывоопасных озер, проектировании и строительстве селезащитных сооружений.

В настоящее время проводится модернизация системы противоселевой защиты в Заилийском Алатау, основы которой были сформированы во второй половине 20 столетия. Составляются цифровые карты селевой опасности и селевого риска, совершенствуются технологии опорожнения озер, устанавливаются системы автоматизированного мониторинга и раннего оповещения о селевой опасности, строятся новые селезащитные дамбы.

Установлено, что сквозные селезадерживающие дамбы не всегда выполняют свои защитные функции. Их применение надо проводить с большой осторожностью. Наиболее надежным средством защиты от селей остаются сплошные селеостанавливающие дамбы, но при их проектировании необходимо предусматривать возможность регулирования расходов постселевого паводка, чтобы исключить формирование селей в русле реки ниже плотины.

В системе автоматизированного мониторинга и раннего предупреждения решение об объявлении чрезвычайной ситуации должны принимать специалисты на основе своевременной полной и достоверной информации, поступающей с автоматических станций наблюдения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан по проекту «Селебезопасность Республики Казахстан» № AP05132214.

Список литературы

- Безопасность и контроль гляциальных селей в Казахстане. Алматы: Ғылым, 1998. 102 с.
- Капица В.П., Усманова З.С., Северский И.В., Благовещенский В.П., Касаткин Н.Е., Шахгеданова М.В. Ледниковые озера Иле (Заилийского) Алатау: состояние, современные изменения, вероятные риски // Геориск. 2018. № 3. С. 68–78.
- Кокарев А.Л., Шестерова И.Н. Изменение ледниковых систем северного склона Заилийского Алатау во второй половине XX и начале XXI вв. // Лед и Снег. 2011. № 4 (116). С. 39-46.
- Медеу А.Р., Баймолдаев Т.А., Киренская Т.Л. Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Антология селевых явлений и их исследования. Алматы: Наука, 2016. 575 с.
- Медеу А.Р., Благовещенский В.П., Ранова С.У., Степанов Б.С., Аскарлова М.А. Концепция проектируемого мониторинга селевой опасности в Иле Алатау // Геориск. 2018. № 3. С. 16–22.
- Bolch T., Peters J., Yegorov A., Pradhan B., Buchroithner M., and Blagoveshchensky V. Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan // Natural Hazards. 2011. № 59 (3). P. 1691–1714.
- Hubbard B., Heald A., Reynolds J.M., Quincey D.J., Richardson S.D., Zapata M., Santillan N., Hambrey M.J. Impact of a rock avalanche on a moraine-dammed proglacial lake: Laguna Safuna Alta, Cordillera Blanca, Peru. Earth Surface Processes and Landforms. 2005. № 30. P. 1251–1264.
- Medeu A.R., Blagoveshchenskiy V.P., Gulyayeva T.S., Ranova S.U. Debris Flow Activity in Trans-Ili Alatau in 20th – Early 21st Centuries // Geogr. Nat. Resour. 2019. № 40. P. 292–298. <https://doi.org/10.1134/S1875372819030120>.
- Severskiy I., Vilesov E., Armstrong R., Kokarev A., Kogutenko L., Usmanova Z., Morozova V., Raup B. Changes in glaciation of the Balkhash–Alakol basin, Central Asia, over recent decades // Annals of Glaciology. 2016. V. 57. № 71. P. 382–394. doi: 10.3189/2016AoG71A575.



Селевая опасность для транспортных коммуникаций территории Восточной Сибири и Дальнего Востока

А.Л. Шныпарков, А.С. Турчанинова, Т.И. Хисматуллин, С.А. Сократов

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия, malyn2006@yandex.ru, alla_wave87@mail.ru, timkhism@gmail.com,
sokratov@geogr.msu.ru*

Аннотация. Оценка опасности селевых потоков на середину XXI века для транспортных коммуникаций по муниципальным образованиям Восточной Сибири и Дальнего Востока выполнялась с учётом изменения климатических условий. Для расчёта изменений климатических параметров и связанных с ними показателей условий образования селевых потоков (продолжительность селеопасного периода, количество осадков) применён ансамбль моделей глобального изменения климата CMIP5 сценария RCP 8.5 МГЭИК (IPCC). Исходя из полученного изменения смоделированной продолжительности селеопасного периода и повторяемости селевых потоков сделан вывод об уменьшении степени селевой опасности практически во всех муниципальных образованиях Восточной Сибири и Дальнего Востока к середине XXI века, в случае выполнения такого сценария изменения климата. Анализ полученных результатов показывает, что в середине XXI века высокая степень селевой опасности для транспортных коммуникаций будет отмечаться только в трёх субъектах: Приморском, Хабаровском краях и Сахалинской области. Районы со средней степенью селевой опасности будут занимать территории на севере Хабаровского края, юге Магаданской области, а также в средней и южной частях Сахалинской области. Остальные селеопасные районы на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока в середине XXI века будут характеризоваться низкой степенью селевой опасности для транспортных коммуникаций.

Ключевые слова: *Восточная Сибирь и Дальний Восток, селевая опасность, транспортные коммуникации, середина XXI века*

Ссылка для цитирования: Шныпарков А.Л., Турчанинова А.С., Хисматуллин Т.И., Сократов С.А. Селевая опасность для транспортных коммуникаций территории Восточной Сибири и Дальнего Востока. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 49–59.

Debris flow hazard for the transportation network in the Eastern Siberia and the Russian Far East

A.L. Shnyarkov, A.S. Turchaninova, T.I. Khismatullin, S.A. Sokratov

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, malyn2006@yandex.ru,
alla_wave87@mail.ru, timkhism@gmail.com, sokratov@geogr.msu.ru*

Abstract. Assessment of the debris flow hazard in the middle of the XXI century for transportation network in the municipalities of Eastern Siberia and the Russian Far East was carried out taking into account changes in climatic conditions. The ensemble of global climate change models CMIP5 of the IPCC RCP 8.5 scenario was used to calculate changes in the climate parameters and related indicators of debris flows conditions (the duration of debris flow hazard period, amount of precipitation). Based on the modeled changes in duration of debris flow hazard period and return period of debris flows, it is concluded that the degree of debris flow hazard will decrease in almost all the municipalities in the Eastern Siberia and the Russian Far East by the middle of the XXI

century, if such a scenario of climate change would be fulfilled. The analysis of the obtained results shows that to the middle of the XXI century, high degree of debris flow hazard for transportation network will be observed only in three subjects: Primorsky Krai, Khabarovsk Krai and Sakhalin Oblast. Territories with average degree of debris flow hazard correspond to the north of Khabarovsk Krai, south of the Magadan Oblast and the central and southern parts of Sakhalin Oblast. The other territories with debris flow hazard in the Eastern Siberia and the Russian Far East to the middle of XXI century will be characterized by low degree of hazard for transportation network.

Key words: *Eastern Siberia and the Russian Far East, debris flow hazard, transportation network, mid-XXI century*

Cite this article: Shnyparkov A.L., Turchaninova A.S., Khismatullin T.I., Sokratov S.A. Debris flow hazard for the transportation network in the Eastern Siberia and the Russian Far East. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 49–59.

Введение

В настоящее время сеть транспортных коммуникаций довольно слабо развита на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока (рис. 1). При существовании нескольких федеральных и региональных автомобильных дорог, Транссиба и БАМа основное значение имеют автомобильные дороги местного значения. При развитии экономики Восточной Сибири и Дальнего Востока возникает необходимость развития транспортных коммуникаций между субъектами Российской Федерации. Сложные орографические, климатические, гидрологические условия, а также развитие многолетнемерзлых пород приводят к значительному удорожанию строительства, эксплуатации транспортных сетей на данной территории, возникновению чрезвычайных ситуаций и ущерба от них. Учёт влияния опасных природных процессов на современном этапе и в будущем (середина XXI века) на транспортные коммуникации при разработке стратегии развития транспортных коммуникаций позволит определить наиболее выгодные направления и снизить издержки и ущербы при строительстве и эксплуатации транспортных коммуникаций.

Исследуемая территория включает полностью территорию Дальневосточного федерального округа и большую часть Сибирского федерального округа без Кемеровской, Томской и Новосибирской областей, Алтайского края и республики Горный Алтай (рис. 2). По данным В.Ф. Перова [2012] на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока селевой опасности подвергается 1120,1 км² её территории, что составляет 73,9% от всей селеопасной площади в пределах Российской Федерации. При этом на селеопасные районы с высокой степенью опасности приходится около 8,5% всей селеопасной территории Восточной Сибири и Дальнего Востока, средней степенью селевой опасности — 25%, низкой степенью селевой опасности — 54% и около 12,5% относятся к потенциально селеопасным территориям (рис. 3).

На территории Восточной Сибири и Дальнего Востока неоднократно наблюдался сход селевых потоков, которые приводили к значительному ущербу и жертвам, незначительная часть которых представлена в таблице 1.

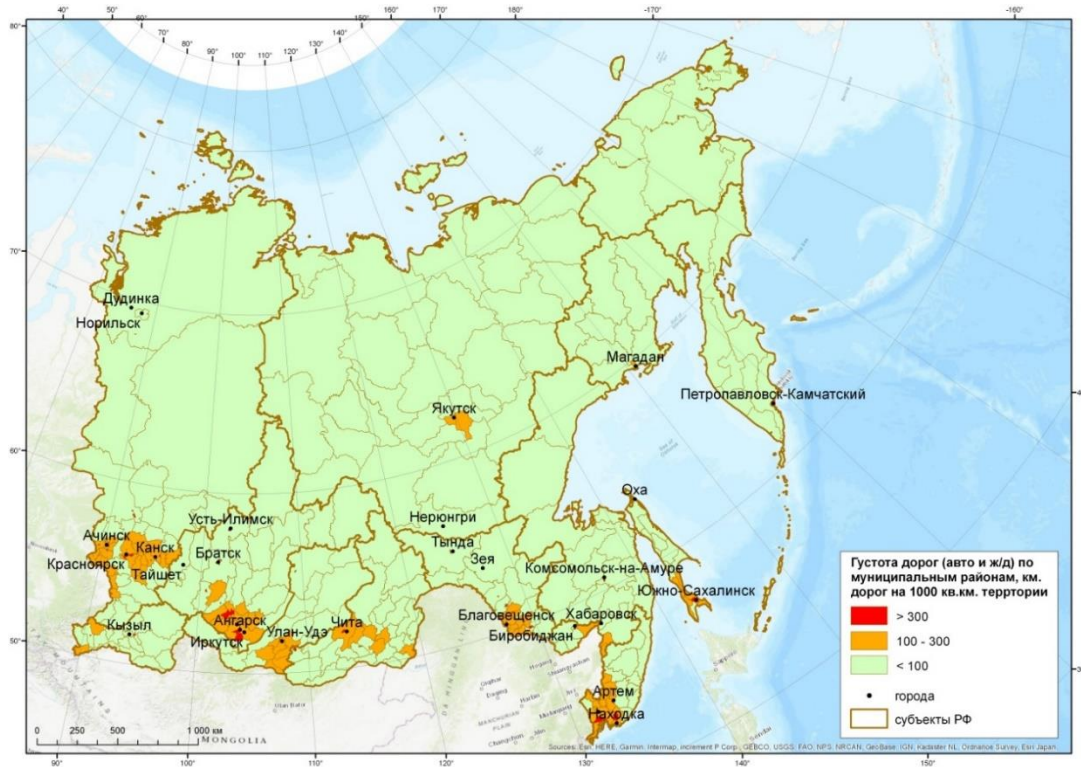


Рис. 1. Густота автомобильных и железных дорог по муниципальным образованиям на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока

Fig. 1. The auto- and railroads density per municipal divisions of the territory of the Eastern Siberia and the Russian Far East

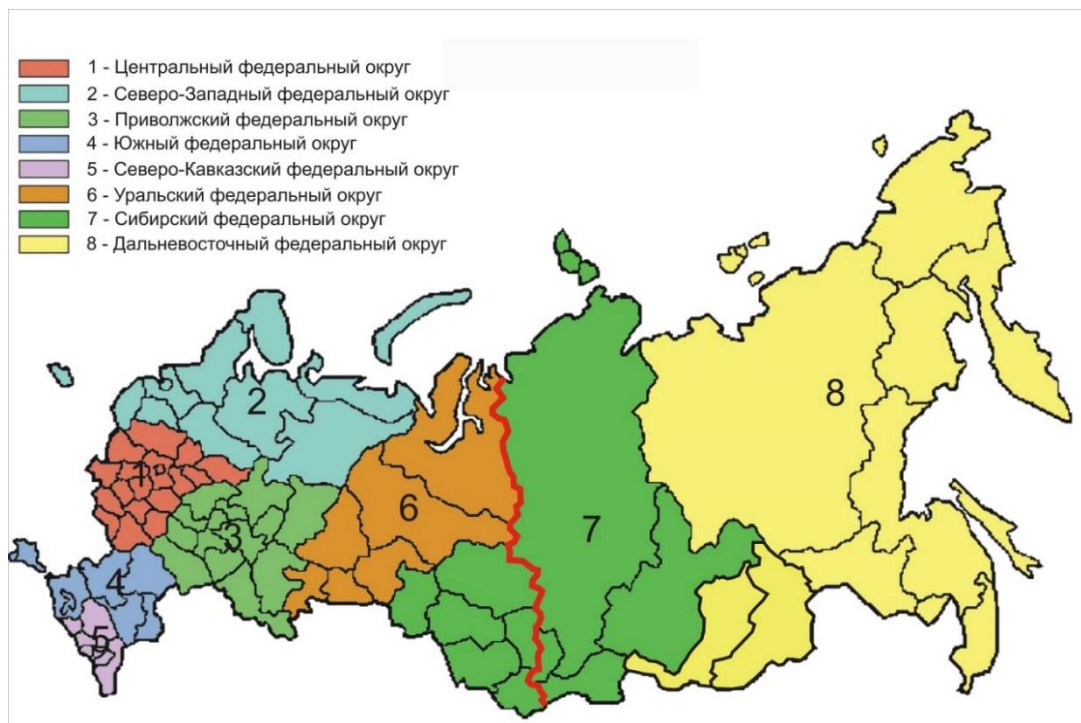


Рис. 2. Федеральные округа Российской Федерации. Красная линия — западная граница района исследования

Fig. 2. Federal Districts of the Russian Federation. The red line – the western border of the regions of investigation



Рис. 3. Степень селевой активности [СП 115.13330.2016]. Красная линия — западная граница района исследования

Fig. 3. The degree of debris flow activity [SP 115.13330.2016]. The red line – the western border of the regions of investigation

Таблица 1. Крупнейшие чрезвычайные ситуации, вызванные селевыми потоками на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока

Table 1. Major emergencies caused by debris flows in Eastern Siberia and the Far East

№	Федеральный округ	Субъект РФ	Муниципальный район	Дата	Характеристика последствий
1	Сибирский	Иркутская область	Слюдянский	27–29.06.1934	Размыто или завалено селевыми отложениями железнодорожное полотно. Перерыв в движении на Транссибирской магистрали длился 22 часа.
2	Дальневосточный	Сахалинская область	Невельской, Холмский, Макаровский	18–19.09.1957	Разрушение автомобильных и железных дорог, мостов.
3	Сибирский	Иркутская область, Бурятия	Слюдянский	24–25.07.1971	Повреждены участки дорог.
4	Дальневосточный	Сахалинская область	Макаровский	1996 сентябрь	Размыв железнодорожного полотна. Движение поездов остановлено.

№	Федеральный округ	Субъект РФ	Муниципальный район	Дата	Характеристика последствий
5	Сибирский	Забайкальский край	Каларский	27.07.2001	Частичное разрушение ж/д полотна в районе оз. Большое Леприндо. Приостановка движения поездов по БАМу.
6	Дальневосточный	Камчатский край	Усть-Камчатский	04.09.2006	Сошедший с вулкана Шивелуч сель размыл дорогу, прервав транспортное сообщение с населёнными пунктами Усть-Камчатск и Крутоберегово.
7	Дальневосточный	Сахалинская область	Макаровский	22–24.06.2009	Из-за селевых потоков размыто 320 м железнодорожного полотна. Закрыто движение поездов.
8	Сибирский	Бурятия	Тункинский	28.06.2014	Размыты дороги в пос. Аршан, разрушены мосты.
9	Дальневосточный	Республика Саха–Якутия	Тындинский	24.07.2016	Участок завала путей на 2 107 километр перегона Чильчи–Ункур составил 18–20 метров. Движение по БАМ было остановлено.

Материалы и методика

Селевая деятельность на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока отмечается во всех субъектах, кроме Еврейской автономной области и незначительных по площади районах Амурской области [Перов, 1989].

По условиям формирования селевых потоков вся территория Восточной Сибири и Дальнего Востока делится на холодную и теплую зоны [Перов, 2012]. К холодной зоне относятся Верхоянский хребет, нагорье Черского, Сунтар-Хаята, горы бассейна Колымы и Чукотки, Путорана, Корякский хребет, Бырранга и Арктические острова. К теплой зоне относятся территории Восточного Саяна, Хамар-Дабан, горы Забайкалья (юг) и Приамурья, Сихотэ-Алинь, горы о-ва Сахалин, Джугджур и Камчатка. Общая площадь селеопасных районов на этой территории составляет 1275,8 км². Здесь преобладают районы со средней и низкой степенью селевой опасности и лишь в Прибайкалье, и Забайкалье отмечаются районы с высокой степенью селевой опасности (почти 21% площади). Незначительные участки с высокой степенью селевой опасности расположены на территории Камчатки, плато Путорана, Верхоянском хребте, а также на территории Магаданской области и Чукотского автономного округа.

На формирование селевых потоков в Восточной Сибири и Дальнего Востока помимо орографических, геоморфологических, литологических и геоботанических факторов существенное влияние оказывает сейсмический фактор, наличие многолетнемерзлых пород, а также на востоке территории вулканическая деятельность. Другой особенностью образования селевых потоков является их формирование на склонах морских террас в пределах Сахалинской области [Рыбальченко, 2013].

Преобладающими типами селевых потоков по водной составляющей являются снеговые сели (в северной части региона) [Войтковский, Корольков, 1998; Виноградов, 1980] и дождевые (в южной части региона) [Абраменко 1980; Будз, 1968; Макаров, 2012]. В северной зоне, как правило, в мае-июне формируются водоснежные потоки, а в летние месяцы при продолжительных дождях дождевые сели. Среди дождевых селей преобладают водокаменные потоки, но могут встречаться и грязекаменные потоки. На склонах вулканов формируются лахары.

Селеопасный период начинается в мае и заканчивается в августе, но в восточных частях (Камчатская, Сахалинская [Казаков, Жукова, 1988], Амурская области, Приморский и Хабаровский края) селеопасный период продлевается до сентября и даже октября.

Повторяемость схода селевых потоков не высока по сравнению с повторяемостью на Северном Кавказе. Наиболее характерным показателем частоты схода селевых потоков является величина 1 раз в 15–30 лет. Мелкие склоновые селевые потоки образуются чаще — 1 раз в 3–6 лет [Лапердин, Тржцинский, 1977].

Объёмы селевых потоков могут достигать 500 тыс. м³, хотя чаще всего они не превышают первых тысяч м³.

Селевые потоки неоднократно наносили ущерб инфраструктуре расположенной на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока. В наибольшей степени воздействию селевых потоков подвержены автомобильные и железные дороги. Особенно часто эти случаи отмечались на Кругобайкальской железной дороге, БАМе, а также на острове Сахалин (см. табл. 1). Так, в июле 2001 г. около озера Большое Леприндо в результате продолжительных дождей сошло несколько селевых потоков, которые перекрыли железнодорожное полотно [Лукашов, Токарева, 2013]. В течение 2-х суток движение по БАМу на этом участке было прекращено. Кроме транспортных коммуникаций воздействию селевых потоков подвержены различные населенные пункты, особенно на южном побережье озера Байкал, а также на западном и восточном побережьях острова Сахалин. Так, 28 июня 2014 года сформировался мощный селевой поток в районе пос. Аршан, который разрушил местные дороги и санаторий «Аршан» [Лапердин и др., 2014].

В Северо-Курильском, Курильском и Южно-Курильском муниципальных образованиях Сахалинской области и в муниципальных образованиях Камчатского края возможно формирование селевых потоков (лахаров) на склонах действующих вулканов (рис. 4). В каждом из этих муниципальных образований селевой деятельности подвержено до 40% территории, а повторяемость схода селевых потоков 1 раз в 20 лет. Образование селевых потоков связано как с интенсивной вулканической деятельности, так и большим количеством осадков в летний период [Бударина, Перов, 1981; Краевая 1969; Куксина, Муравьев, 2018; Черноморец, Сейнова, 2010; Хисматуллин, Шныпарков, 2019].

Оценка степени селевой опасности для транспортной сети Сибири и Дальнего Востока по муниципальным образованиям производилась по четырём градациям: неподверженное селевой опасности; низкая, средняя и высокая степень селевой опасности.

Степень селевой опасности определялась значениями, полученными перемножением следующих трёх характеристик: уязвимость территории в пространстве, во времени и повторяемость селей.

Как правило, оценка степени селевой опасности в мелком масштабе основана на использовании интегрального показателя, включающего процент площади, занятой селевыми бассейнами, и максимальный объём. Применение такого интегрального показателя удобно для площадной оценки селевой опасности. Транспортные коммуникации представляют собой линейные сооружения, поэтому для оценки селевой опасности помимо доли площади селеопасных территорий в муниципальном образовании использовали дополнительно показатель — доля суммы длин селеопасных участков в расчёте на 1 км дна долины. Для каждой селевой области в пределах Восточной Сибири и Дальнего Востока были рассчитаны эти значения. При этом такие

расчёты производились для районов с различной степенью селевой опасности. Таким образом, на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока были произведены расчёты поражённости селевыми потоками по дну долины на 30 ключевых участках. Для каждой селевой области и степени опасности была определена поражённость дна долин селевыми потоками.



Рис. 4. Крупнообломочные отложения в зоне зарождения лахара «Клюв 2». Остров Матуа. Фото Т.И. Хисматуллина

Fig. 4. Large-block deposits in zone of formation of lahar “Klyuv 2”, Isl. Matua. Photo T.I. Khismatullin

Уязвимость территории муниципального образования определялась перемножением доли селеопасных территорий в пределах муниципальных образований на долю селеопасных участков в пределах дна долины.

Уязвимость территории во времени определялась как отношение продолжительности селеопасного периода к числу дней в году. Продолжительность селеопасного периода для каждого муниципального образования определялась с использованием методики, предложенной Т.Л. Сидоровой [1997], и уточнённой Н.Л. Белой [2005].

Повторяемость селей определялась для каждого муниципального образования на основе существующих научных публикаций, а при отсутствии таковых по отдельным муниципальным образованиям использовались сведения по районам аналогам, в которых такие сведения по повторяемости селей имелись.

Оценка изменения степени селевой опасности для транспортных коммуникаций по муниципальным образованиям территории Восточной Сибири и Дальнего Востока выполнялась с учетом изменения климатических условий. Для расчета изменений климатических параметров и связанных с ними показателей селевой активности из ансамбля CMIP5 сценария RCP8.5 МГЭИК (IPCC) была выбрана модель MRI-CGCM3 эксперимент r11p1 (Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan). Китайскими исследователями [Li, Gao, 2015; Miao et. al., 2014] было установлено, что модель

отличает наиболее выраженная положительная корреляция значений атмосферного давления в пределах Сибирского антициклона, полученных в результате реанализа, а также она дает наиболее близкие к реальным значения температур воздуха. Кроме этого, модель имеет достаточно густую сеть расчётных значений — размер ячейки в пределах территории Российской Федерации изменяется от $1,122 \times 1,125$ до $1,118 \times 1,125$ градусов, что, в условиях отсутствия региональных моделей изменения климата для России, позволяет оценивать изменения на относительно небольших по площади территориях. Последний период, по которому выполнялся реанализ — 1991–2000 г. Он определён как «современный» и по отношению к нему выполнялись расчеты изменений искомых параметров в будущем. Расчёты выполнены на середину (2041–2050 гг.) XXI века. На указанные периоды для узлов сетки были рассчитаны средние значения параметров: средние значения температуры воздуха, суммы осадков за каждый месяц. Затем по этим данным были рассчитаны продолжительность тёплого (T более 0°C) периода и суммы осадков за тёплый период. По разности значений параметров за разные периоды (начало и середина XXI века) с использованием ArcGIS 10.3 были построены поверхности, характеризующие их изменения. Далее при наложении на карту муниципальных образований, были определены средние значения параметров продолжительности тёплого периода и количества осадков и их изменения для каждого муниципального образования Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Продолжительность селеопасного периода к середине XXI века определялась по методике Н.Л. Белой [2005] по прогнозируемым значениям температуры воздуха, осадков.

Для определения изменения повторяемости селевых потоков оценивались изменения количества осадков за тёплый период на середину и конец XXI века. Оценка изменения этого параметра селевой деятельности наименее точна, т.к. в современных условиях не найдена тесная связь между повторяемостью селевых потоков и количеством осадков за тёплый период. В связи с этим было принято допущение, что при изменении количества осадков в пределах $\pm 10\%$ повторяемость селевых потоков не изменится. При изменении количества осадков в пределах $\pm 10\text{--}30\%$ повторяемость селевых потоков изменится соответственно на $\pm 10\%$. При изменении количества осадков за тёплый период более $\pm 30\%$ повторяемость селевых потоков изменится на $\pm 20\%$.

Поражённость территорий селевыми потоками муниципальных районов Восточной Сибири и Дальнего Востока принята неизменной, т.к. изменение климатических условий на этой территории не скажется на площади распространения селевых потоков (орографические условия неизменны, а климатические благоприятны для образования селевых потоков), при этом антропогенный фактор не анализировался.

Таким образом, были получены изменения продолжительности селеопасного периода и повторяемости селей на середину XXI века для муниципальных образований на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока и вновь рассчитаны значения степени селевой опасности.

Результаты

Степень селевой опасности для транспортных коммуникаций по муниципальным образованиям Восточной Сибири и Дальнего Востока на середину XXI века показана на рис. 5. В середине XXI века высокая степень селевой опасности для транспортных коммуникаций будет характерна только в трёх субъектах: Приморском, Хабаровском краях и Сахалинской области. Районы со средней степенью селевой опасности будут отмечаться на севере Хабаровского края, юге Магаданской области и в некоторых муниципальных образованиях в средней и южной частях Сахалинской области и юга Камчатского края. Остальные селеопасные районы на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока в середине XXI века будут характеризоваться низкой степенью селевой опасности для транспортных коммуникаций.



Рис. 5. Степень опасности селевых потоков для транспортных коммуникаций по муниципальным образованиям территории Восточной Сибири и Дальнего Востока в середине XXI века

Fig. 5. Degree of debris flow hazard for transportation network of the Eastern Siberia and Russian Far East in the middle of the XXI century

К середине XXI века на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока степень селевой опасности уменьшится практически во всех субъектах.

В Чукотском автономном округе, Красноярском крае, Республиках Хакасия, Тува, Бурятия, Забайкальском крае, Иркутской области степень селевой опасности уменьшится до низкой во всех муниципальных образованиях.

В Магаданской области в большинстве муниципальных образований степень селевой опасности к середине XXI века останется прежней, и будет характеризоваться низкой степенью. В Ольгинском районе степень селевой опасности не изменится и будет характеризоваться средней степенью. Снижение степени селевой опасности со средней до низкой для транспортных коммуникаций к середине XXI века будет отмечаться в Хасынском, Тенькинском, Сусуманском и Ягоднинском районах.

В Камчатском крае степень селевой опасности снизится до низкой во всех муниципальных образованиях, кроме Усть-Большерецкого, Елизовского, Мильковского и Быстринского муниципальных районов. В Елизовском и Мильковском районах степень селевой опасности к середине XXI века с высокой снизится до средней, в Усть-Большерецком и Быстринском районах она увеличится до средней степени.

В Республике Саха–Якутия степень селевой опасности для транспортных коммуникаций к середине XXI века снизится с высокой и средней до низкой в

следующих муниципальных образованиях: Верхоянском, Кобяйском, Момском, Оймяконском, Томпонском, Усть-Майском, Усть-Янском и Эвено-Бытатантайском.

В Хабаровском крае в большинстве муниципальных образований к середине XXI века будет отмечаться повышение степени селевой опасности для транспортных коммуникаций, за исключением Охотского района, где степень селевой опасности снизится с высокой до средней. В Тугуро-Чумиканском, муниципальном образовании и районах, расположенных южнее по территории края, степень селевой опасности возрастет до высокой, за исключением Хабаровского, Комсомольского районов, где степень селевой опасности возрастет до средней степени. В Верхнебуреинском и Николаевском муниципальных образованиях степень селевой опасности останется на прежнем уровне и будет характеризоваться низкой степенью селевой опасности.

В Приморском крае к середине XXI века степень селевой опасности увеличится практически во всех муниципальных районах с низкой до средней и на севере края до высокой.

В Сахалинской области в целом степень селевой опасности к середине XXI века возрастет в большинстве муниципальных образований. Рост степени селевой опасности будет отмечаться в Невельском, Холмском, Корсаковском, Анивском, Макаровском, Смирныховском и Углегорском муниципальных образованиях с низкой до высокой, а в Долинском, Южно-Сахалинском и Александров-Сахалинском муниципальных образований повысится с низкой до средней степени селевой опасности. На Курильских островах повышение степени селевой опасности к середине XXI века будет отмечаться на южных и центральных островах гряды, на о. Парамушир будет снижение селевой опасности.

В Амурской области будет снижение степени селевой опасности в Селемджинском районе со средней до низкой степени селевой опасности. В остальных районах Амурской области степень селевой опасности для транспортных коммуникаций останется низкой.

Заключение

В целом к середине XXI века на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока будет отмечаться снижение степени селевой опасности для транспортных коммуникаций на большей части ее территории до низкой степени. Повышение степени селевой опасности охватит центральные и южные районы Хабаровского края, муниципальные образования Приморского края, Сахалинской области и южные и центральные острова Курильской гряды, где степень селевой опасности возрастет до высоких значений.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РГО-РФФИ, договор №15/2019/ РГО-РФФИ.

Список литературы

- Абраменко Н.А. Некоторые сведения о селевых явлениях на юге Красноярского края и Тувинской АССР. В Селевые потоки. Сб. 5. Л.: Гидрометеиздат, 1980. с. 49–54.
- Белая Н.Л. Моделирование внутригодового распределения дождевых селей в горных регионах мира. Диссертация на соискание уч. степени канд. геогр. наук. М.: 2005. 142 с.
- Бударина О.И., Перов В.Ф. К оценке селевой опасности горных районов Камчатки. В Проблемы противоселевых мероприятий. Алма-Ата: Изд-во «Казахстан», 1981, с. 201–212.
- Будз М.Д. Условия селеобразования в Прибайкалье. Селевые потоки и горные русловые процессы. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1968. с. 291–296.
- Виноградов Ю.Б. Селевые явления на территории северной части Хабаровского края. Селевые потоки. Сб. 4. М.: Гидрометеиздат, 1980. с. 82–90.

- Войтковский К.Ф., Корольков В.Г. Водоснежные потоки на плато Путорана. Материалы гляциологических исследований, 1998. 84, с. 92–94.
- Казаков Н.А., Жукова З.И. Районирование о.Сахалин по степени проявления селевой деятельности. Труды гидрометцентра Сахалинского территориального управления по гидрометеорологии. Вып. 1. Региональные исследования. Южно-Сахалинск: 1988. с. 131–137.
- Краевая Т.С. Краткая характеристика селеопасных районов Камчатки. Труды КазНИГМИ, 1969. Вып. 33, с. 144–151.
- Куксина Л.В., Муравьев Я.Д. Реки вулканических территорий Камчатки и их лахароопасность. Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 5-й Международной конференции. Тбилиси, Грузия, 1–5 октября 2018 г. Черноморец С.С., Гавардашвили Г.В. (ред.). Тбилиси: Универсал, 2018. с. 400–410.
- Лапердин В.К., Леви К.Г., Лехатинов А.М., Кадетова А.В., Пеллинен В.А., Рыбченко А.А. Причины и последствия катастрофических селевых потоков 28 июня 2014 г. в окрестностях пос. Аршан, Республика Бурятия. Геодинамика и тектонофизика, 2014. 5(3), с. 799–816. doi: 10.5800/GT-2014-5-3-0156.
- Лапердин В.К., Тржцинский Ю.Б. Экзогенные геологические процессы и сели Восточного Саяна. Новосибирск, 1977. 103 с.
- Лукашов А.А., Токарева Е.А. Сели восточного фланга Байкальской рифтовой зоны. Геориск, 2013. № 2, с. 14–19.
- Макаров С.А. Сели Прибайкалья. Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2012. 111 с.
- Перов В.Ф. Селеведение. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 274 с.
- Перов В.Ф. Селевые явления на территории СССР. М.: Изд-во МГУ, 1989. 149 с.
- Рыбальченко С.В. Селевая опасность для населённых пунктов Сахалинской области. Геориск, 2013. № 3, с. 40–44.
- Сидорова Т.Л. Оценка селевой деятельности по климатическим параметрам. Автореф. канд. дис. М.: МГУ, 1997. 20 с.
- СП 115.13330.2016. «СНиП 22-01-95 Геофизика опасных природных воздействий». М.: Минстрой России, 2016. v+40 с.
- Хисматуллин Т.И., Шныпарков А.Л. Селевые потоки на острове Матуа. // Su Problemləri: Elm və Texnologiyalar, 2019. 1(13), pp. 7–18.
- Черноморец С.С., Сейнова И.Б. Селевые потоки на вулканах. М.: Изд-во УНЦ ДО, 2010. 72 с.
- Li F., Gao Y.-Q. The Project Siberian High in CMIP5 models. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2015. 8(4), pp. 179–184. doi: 10.3878/AOSL20140101.
- Miao Ch.y., Duan Q.g., Sun Q.h., Huang Y., Kong D.x, Yang T.t, Ye A.zh., Di Zh.h., Gong W. Assessment of CMIP5 climate models and projected temperature changes over Northern Eurasia. Environmental Research Letters. 2014. 9(5), 055007. doi: 10.1088/1748-9326/9/5/055007.



Селевой риск для транспортных коммуникаций территории Восточной Сибири и Дальнего Востока в середине XXI века

А.Л. Шныпарков, А.С. Турчанинова, Т.И. Хисматуллин, С.А. Сократов

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия, malyn2006@yandex.ru, alla_wave87@mail.ru, timkhism@gmail.com,
sokratov@geogr.msu.ru*

Аннотация. Оценка риска селевых потоков на середину XXI века для транспортных коммуникаций по муниципальным образованиям Восточной Сибири и Дальнего Востока выполнялась с учётом прогнозируемого изменения климатических условий. Для этого был использован ансамбль климатических моделей CMIP5, сценарий RCP 8.5 МГЭИК (IPCC). С учётом рассчитанного изменения степени селевой опасности к середине XXI века был оценен селевой риск для транспортных коммуникаций в пределах всех муниципальных образований территории Восточной Сибири и Дальнего Востока. Расчёт селевого риска был основан на учёте уязвимости транспортной инфраструктуры в пространстве и во времени, повторяемости селей, а также существующих стоимостных показателей.

К середине XXI века на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока риск селей для транспортных коммуникаций будет составлять немногим более 6,9 млрд. рублей, что по сравнению с началом XXI века на 26,3% меньше.

Практически на всей территории Восточной Сибири и Дальнего Востока селевой риск для транспортных коммуникаций уменьшится к середине XXI века, за исключением Сахалинской области (увеличение риска более чем на 60% по сравнению с началом XXI века), Амурской области (увеличение на 25%), Хабаровского края (увеличение на 16%) и Приморского края (увеличение на 13%).

Наименьшее снижение селевого риска для транспортных коммуникаций к середине XXI века будет отмечаться в Камчатском крае (46%) и в Чукотском автономном округе (77%). Максимум снижения селевого риска для транспортных коммуникаций к середине XXI века будет отмечаться и в остальных субъектах Восточной Сибири и Дальнего Востока, где значения селевого риска будут ниже на 90% и более по сравнению с началом XXI века.

Ключевые слова: Восточная Сибирь и Дальний Восток, селевой риск, транспортные коммуникации, середина XXI века

Ссылка для цитирования: Шныпарков А.Л., Турчанинова А.С., Хисматуллин Т.И., Сократов С.А. Селевой риск для транспортных коммуникаций территории Восточной Сибири и Дальнего Востока в середине XXI века. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 60–73.

Debris flow risk for transportation network in the Eastern Siberia and the Russian Far East in the middle of the XXI century

A.L. Shnyarkov, A.S. Turchaninova, T.I. Khismatullin, S.A. Sokratov

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, malyn2006@yandex.ru,
alla_wave87@mail.ru, timkhism@gmail.com, sokratov@geogr.msu.ru*

Abstract. The assessment of debris flow risk in the middle of the XXI century for transport network in municipalities of Eastern Siberia and the Far East was carried out taking into account the predicted changes in climate conditions. The CMIP5 climate model ensembles, the IPCC RCP 8.5 scenario, were used for this purpose. Taking into account the calculated change in the degree of debris flow hazard by the middle of the XXI century, the debris

flow risk for transportation network within all municipalities of the territory of Eastern Siberia and the Russian Far East was estimated. The calculation of debris flow risk was based on the assessment of the vulnerability of transport infrastructure in space and time and the frequency of debris flows, as well as existing cost indicators.

By the middle of the XXI century in Eastern Siberia and the Far East, the debris flow risk for transportation network will be slightly more than 6.9 billion rubles, which is 26.3% less than at the beginning of the XXI century.

In almost all of Eastern Siberia and the Russian Far East, the debris flow risk for transportation network will decrease by the middle of the XXIst century, with the exception of the Sakhalin Oblast (increase on more than 60% compared to the beginning of the XXIst century), the Amur Oblast (increase on 25%), the Khabarovsk Krai (increase on 16%) and the Primorsky Krai (increase on 13%).

The smallest reduction in debris flow risk for transport network by the middle of the XXI century will be observed in the Kamchatka Krai (46%) and in the Chukotka Autonomous Okrug (77%). The maximum reduction of debris flow risk for transport network by the middle of the XXI century will be observed in the other regions of Eastern Siberia and the Russian Far East, where the values of debris flow risk will be lower by 90% or more in comparison to the beginning of the XXI century.

Key words: *Eastern Siberia and the Russian Far East, debris flow risk, transportation network, mid-XXI century*

Cite this article: Shnyparkov A.L., Turchaninova A.S., Khismatullin T.I., Sokratov S.A. Debris flow risk for transportation network in the Eastern Siberia and the Russian Far East in the middle of the XXI century. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 60–73.

Введение

Исследуемая территория включает полностью территорию Дальневосточного федерального округа и большую часть Сибирского федерального округа без Кемеровской, Томской и Новосибирской областей, Алтайского края и республики Горный Алтай (рис. 1).



Рис. 1. Федеральные округа Российской Федерации. Красная линия — западная граница района исследования

Fig. 1. Federal Districts of the Russian Federation. The red line – the western border of the regions of investigation

В настоящее время оценки риска опасных природных процессов и явлений выполняются различными методами. К первой группе методов оценки риска можно отнести те, которые практически подменяют понятие риска понятием опасность и оценивают риск в баллах, что в корне не верно. К другой группе методов оценки риска относятся те из них, которые оценивают вероятность последствий. Они, как правило, основаны на теоретических и статистических исследованиях. В основе лежит утверждение, что риск есть функция подверженности, уязвимости и защищенности объекта от опасного природного воздействия. Риск есть вероятность нежелательных последствий [Мяжков, Шныпарков, 2004]. При оценках риска природных процессов используются следующие показатели: вероятность события (повторяемость процессов), уязвимость оцениваемых объектов (уязвимость в пространстве, уязвимость во времени, физическая уязвимость объекта), социально-экономические показатели [Baburin et. al., 2014].

Оценки риска селевых потоков на начало XXI века на территорию Восточной Сибири и Дальнего Востока были выполнены в 2019 году на втором этапе исследования по гранту РГО–РФФИ, для отдельных районов исследуемой территории в рамках других работ были сделаны оценки селевого риска для всей инфраструктуры муниципальных образований [Бабури́н и др., 2019].

В целом исследования и оценки селевого риска крайне скудны.

Изменение климатических условий к середине XXI века, прогнозируемое по всем глобальным моделям прогноза климата, должно сказаться на изменении селевой активности и селевого риска на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока. Несомненно, это отразится на селевом риске для транспортных коммуникаций на этой территории.

К началу XXI века селевой риск для транспортных коммуникаций на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока составлял 9,4 млрд. рублей. Его распределение по субъектам Восточной Сибири и Дальнего Востока показано на рис. 2.

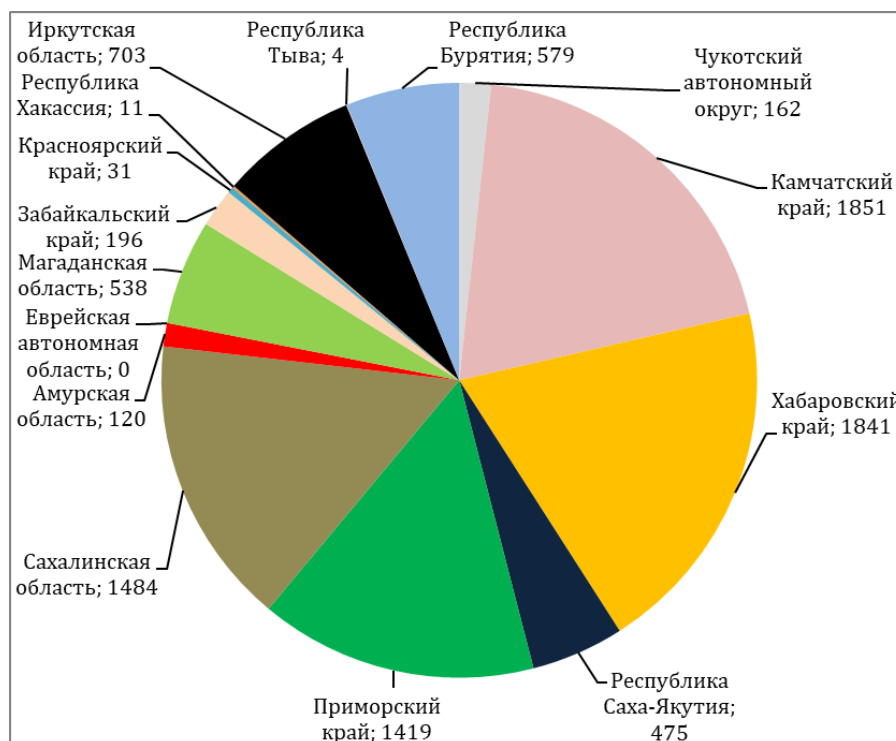


Рис. 2. Распределение селевого риска для транспортных коммуникаций по субъектам Восточной Сибири и Дальнего Востока в начале XXI века, млн. рублей/год

Fig. 2. Distribution of the debris flow risk for transportation network over the Federal subjects of the Eastern Siberia and the Russian Far East in the beginning of the XXI century, mil. rubles/year

Наибольшие значения селевого риска в начале XXI века приходятся на Камчатский, Хабаровский, Приморский края и Сахалинскую область. На территории этих субъектов Восточной Сибири и Дальнего Востока приходится 70% значений селевого риска от общей суммы. Во вторую группу по величине селевого риска (около 500 млн. рублей в год) входят территории Республик Саха-Якутия, Бурятия, Иркутская и Магаданская области. Наименьшими значениями селевого риска характеризуются территории Республик Тыва, Хакасия, Красноярского края и Амурской области. На территории Еврейской автономной области селевой риск отсутствует. Территориальное распределение селевого риска для транспортных коммуникаций по муниципальным образованиям территории Восточной Сибири и Дальнего Востока показано на рис. 3.

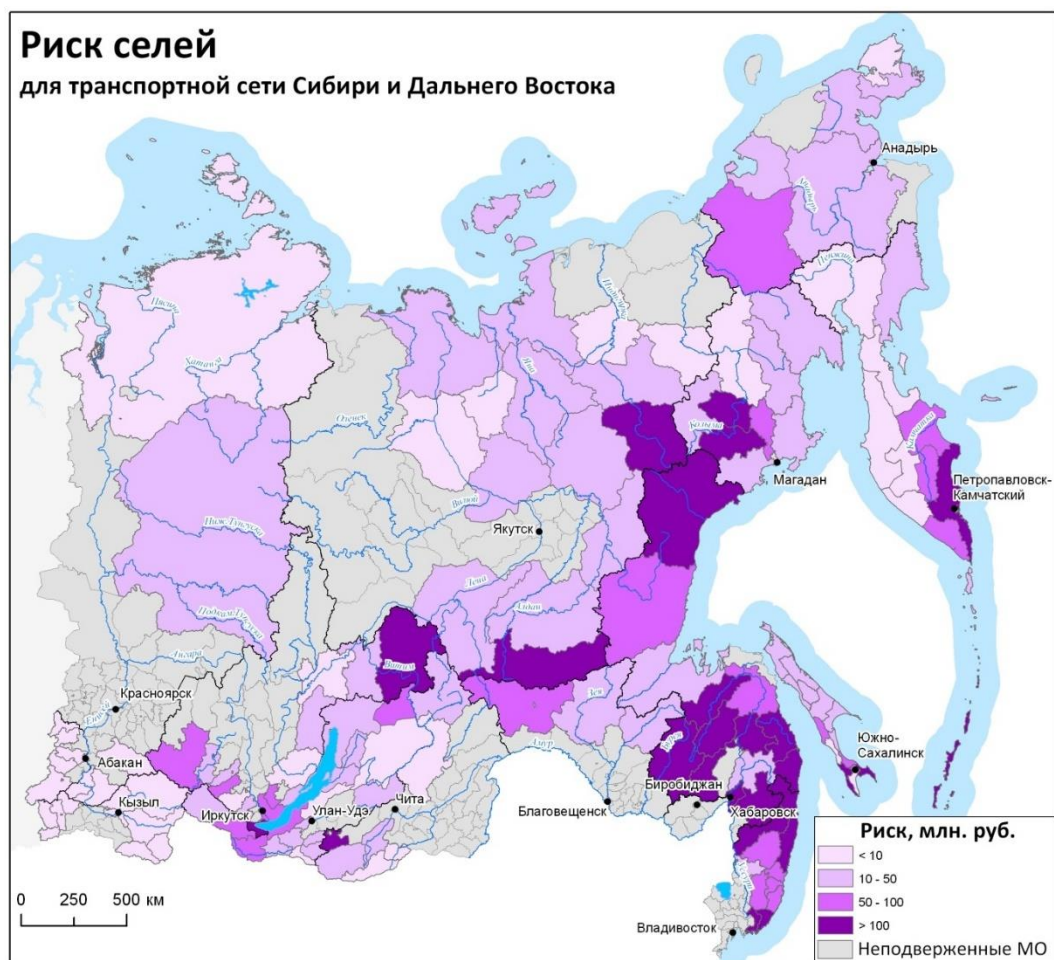


Рис. 3. Распределение селевого риска для транспортных коммуникаций по муниципальным образованиям территории Восточной Сибири и Дальнего Востока в начале XXI века

Fig. 3. Distribution of debris flow risk for transportation network over municipal divisions of the territory of the Eastern Siberia and the Russian Far East in the beginning of the XXI century

Собранные сведения о чрезвычайных ситуациях, вызванных селевыми потоками, на автомобильных и железных дорогах показали, что наиболее часто они возникают на территориях Сахалинской области и Камчатского края. Отсутствуют какие-либо сведения о чрезвычайных ситуациях, вызванных селевыми потоками, на транспортных коммуникациях в пределах Красноярского края, республик Тыва и Хакасия, Магаданской и Амурской областей, Хабаровского края. Чрезвычайные ситуации, вызванные селевыми потоками, на транспортных коммуникациях со значительными последствиями на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока представлены в таблице 1.

Таблица 1. Крупнейшие чрезвычайные ситуации, вызванные селевыми потоками на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока

Table 1. Major emergencies caused by debris flows in Eastern Siberia and the Far East

№	Субъект РФ	Муниципальный район	Дата	Характеристика последствий
1	Иркутская область	Слюдянский	27-29.06.1934	Размыто или завалено селевыми отложениями железнодорожное полотно. Перерыв в движении на Транссибирской магистрали длился 22 часа.
2	Сахалинская область	Невельской, Холмский, Макаровский	18-19.09.1957	Разрушение автомобильных и железных дорог, мостов.
3	Иркутская область, Республика Бурятия	Слюдянский	24-25.07.1971	Повреждены участки дорог.
4	Сахалинская область	Макаровский	1996, сентябрь	Размыв железнодорожного полотна. Движение поездов остановлено.
5	Забайкальский край	Каларский	27.07.2001	Частичное разрушение ж/д полотна в районе оз. Большое Леприндо. Приостановка движения поездов по БАМу.
6	Камчатский край	Усть-Камчатский	04.09.2006	Сошедший с вулкана Шивелуч сель размыл дорогу, прервав транспортное сообщение с населёнными пунктами Усть-Камчатск и Крутоберегово.
7	Сахалинская область	Макаровский	22-24.06.2009	Из-за селевых потоков размыто 320 м железнодорожного полотна. Закрыто движение поездов.
8	Республика Бурятия	Тункинский	28.06.2014	Размыты дороги в пос. Аршан, разрушены мосты.
9	Республика Саха-Якутия	Тындинский	24.07.2016	Участок завала путей на 2 107 километре перегона Чильчи–Ункур составил 18–20 метров. Движение по БАМ было остановлено.

Материалы и методика

Оценка селевого риска для транспортных коммуникаций Восточной Сибири и Дальнего Востока производилась с учетом их уязвимости в пространстве и во времени, повторяемости селей, длины транспортных коммуникаций в пределах муниципальных образований и их нормативной стоимости.

Повторяемость селей определялась для каждого муниципального образования на основе существующих научных публикаций [Атлас..., 2010; Абраменко, 1980;

Бударина, Перов, 1981; Будз, 1968; Войтковский, Корольков, 1998; Краевая, 1969; Казаков, Жукова, 1988; Лехатинов, 1968; Макаров, 2012; Перов, 1989, 2012; Черноморец, Сейнова, 2010; и др.], а при отсутствии таковых по отдельным муниципальным образованиям использовались сведения по районам аналогам, в которых такие сведения по повторяемости селей имелись.

Уязвимость транспортных коммуникаций муниципального образования к селевым потокам определялась путём расчёта доли площади селеопасных территорий в пределах муниципального образования [Атлас..., 2010]. Применение такого показателя удобно для площадной оценки селевой опасности всей инфраструктуры муниципального образования. Транспортные коммуникации представляют собой линейные сооружения, поэтому для оценки их уязвимости в пространстве в пределах муниципальных образований помимо доли площади селеопасных территорий в муниципальном образовании использовали дополнительно показатель - доля суммы длин селеопасных участков в расчёте на 1 км дна долины. Для каждой селевой области в пределах Восточной Сибири и Дальнего Востока были рассчитаны эти значения. При этом такие расчеты производились для районов с различной степенью селевой опасности. Таким образом, на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока были произведены расчёты поражённости селевыми потоками по дну долины на 30 ключевых участках. Для каждой селевой области и степени опасности была определена поражённость дна долин селевыми потоками, а в последствие эти осредненные данные были определены для каждого муниципального образования Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Уязвимость транспортных коммуникаций к селевым потокам во времени определялась как отношение продолжительности селеопасного периода к числу дней в году. Продолжительность селеопасного периода для каждого муниципального образования определялась с использованием методики, предложенной Т.Л. Сидоровой [1997] и уточнённой Н.Л. Белой [2005], а также с использованием для проверки сведений из [Перов, 2012].

Для определения экономической составляющей при оценке селевого риска транспортных коммуникаций использовались сведения о длине транспортных коммуникаций в пределах каждого муниципального образования с сайта Федеральной службы государственной статистики РФ [www.gks.ru/free_doc/new_site/bd_munst/munst.htm], а также стоимость автомобильных и железных дорог разного класса. Сведения о стоимости авто и железных дорог разного класса взяты с различных сайтов [Составление стоимости..., Минтранс России посчитал..., <https://nerud-teh.ru/skolko-stoit-kilometr-dorogi/>]. Исходя из этих данных, стоимость строительства 1 км железных и автомобильных дорог на территории Российской Федерации может варьировать от первых миллионов до 230 млн. рублей (рис. 4).

Оценка селевого риска для транспортных коммуникаций в среднем и мелком масштабах в Российской Федерации слабо развита. В настоящее время разработаны методики оценки селевого риска для транспортных коммуникаций в крупном масштабе. К таким работам можно отнести работу А.Н. Божинского и Ю.Б. Андреева [1996], Ю.Б. Андреева с соавторами [1997]. В данных работах оценивается социальный риск от селевых потоков в крупном масштабе с учетом повторяемости селей, поражённости автодорог селевыми потоками, скорости движения автотранспорта. Сходный подход для оценки лавинного и селевого риска в крупном масштабе предлагается Н.А. Казаковым [2015], но им дополнительно вводится параметр интенсивности воздействия, учет генетического типа снежной лавины и структурно-реологического типа селя. Для расчета селевого риска для транспортных коммуникаций в крупном масштабе используются следующие параметры: повторяемость селей, длина селеопасного участка, продолжительность селеопасного периода, среднесуточная интенсивность движения транспорта, длина тормозного пути транспорта, движущегося с определённой скоростью, средняя скорость движения транспорта. Предлагается рассчитывать полный селевой риск для транспортной магистрали, включающий прямой (разрушение транспортного средства, разрушение полотна автодороги) и

косвенный (расчистка автодороги, ущербы в результате ожидания расчистки автодороги).

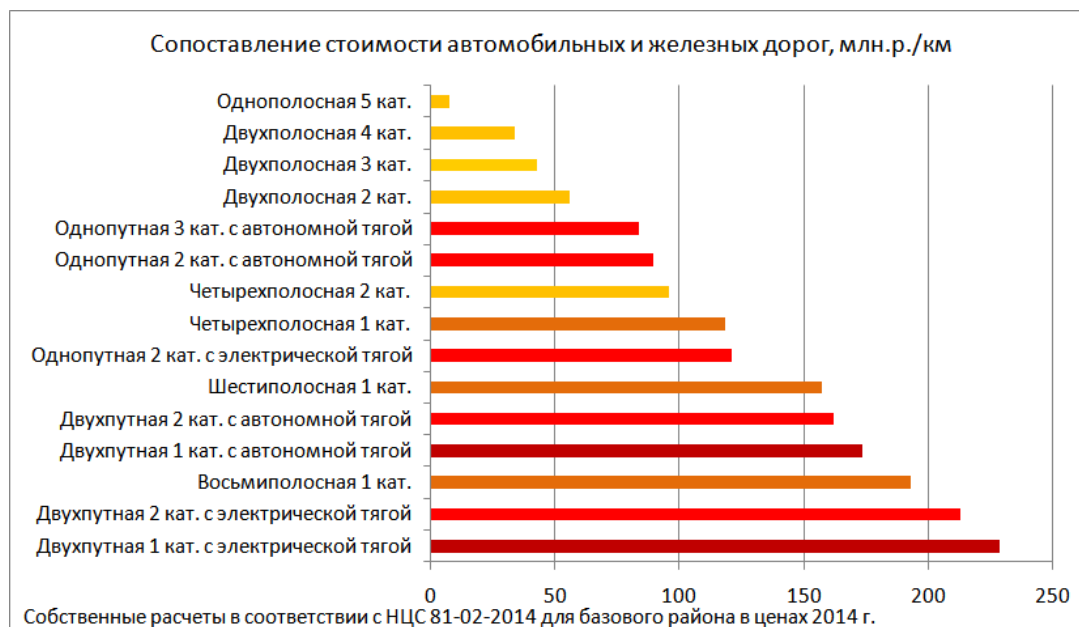


Рис. 4. Сравнение стоимости железных и автомобильных дорог разной категории на территории Российской Федерации [<https://aftershock.news/?q=node/501956&full>]

Fig 4. Comparison of the prices of the rail and the auto roads of different categories at the territory of Russian Federation [<https://aftershock.news/?q=node/501956&full>]

За рубежом оценки селевого риска производятся как в региональном [Liu et al., 2002; Liu, Lei, 2003; Fuchs et al., 2008; Quan Luna et al., 2014], так и крупном масштабах [Liang et al., 2012; Shu et al., 2019; Lin et al., 2012; Lee, Lee, 2015; Chui et al., 2013]. При оценке селевого риска в региональном масштабе используются статистические данные, общегеографические условия (рельеф, растительность, климатические и метеорологические условия, населённость территории, валовый продукт) [Quan Luna et al. 2014]. При оценке селевого риска в крупном масштабе используют динамические характеристики селей (давление на препятствие, скорость, высота селевого потока), характеристики уязвимости объекта и повторяемость селей [Jakob, Holm, 2012].

В данной работе использован метод оценки селевого риска, учитывающий уязвимость территории в пространстве и во времени, повторяемость селей и экономическая составляющая, опубликованный в [Бабурин и др., 2019]. Для оценки селевого риска транспортных коммуникаций вместо условного валового продукта муниципального образования, используемого в [Бабурин и др., 2019], применялась стоимость строительства дорог.

В конечном итоге расчёт селевого риска для транспортных коммуникаций (R_p) производился по формуле:

$$R_p = P \times Y_t \times Y_s \times S, \quad (1)$$

где P — повторяемость селевых потоков, раз в год; Y_t — уязвимость во времени, безразмерная величина; Y_s — уязвимость в пространстве, безразмерная величина; S — стоимость авто- и железной дороги в пределах муниципальных образований, руб.

Уязвимость территорий в пространстве зависит от поражённости территорий селевыми потоками, которая определяется:

$$Y_s = F_{df} \div F_{tot} \times K, \quad (2)$$

где F_{df} — площадь селеопасной территории в пределах муниципального образования, км², F_{tot} — площадь муниципального образования, км², K — доля селеопасных участков по дну долины, безразмерная величина.

Уязвимость территорий во времени определяется:

$$Y_t = T_{df} \div 365, \quad (3)$$

где T_{df} — продолжительность селеопасного периода, дни; 365 — число дней в году.

Стоимость авто- и железных дорог определялась из суммы стоимостей авто- и железных дорог разного класса в пределах муниципального образования:

$$S = \Sigma(L_i \times S_i), \quad (4)$$

где S — совокупная стоимость автомобильных и железных дорог в пределах муниципального образования; L_i — суммарная длина автодорог/железных дорог одного класса; S_i — стоимость строительства 1 км дороги определённого класса.

Расчёты селевого риска были произведены для всех муниципальных образований территории Восточной Сибири и Дальнего Востока — 145, где распространены селевые потоки.

Оценка селевого риска на середину XXI века выполнялась с учётом изменения климатических условий. Для расчёта изменений климатических параметров и связанных с ними показателей селевой деятельности (распространение, повторяемость, продолжительность селеопасного периода) из ансамбля CMIP5 сценария RCP8.5 МГЭИК (IPCC) была выбрана модель MRI-CGCM3 эксперимент r11pl1 (Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan). Китайскими исследователями [Li, Gao, 2015; Miao et al., 2014] было установлено, что модель отличает наиболее выраженная положительная корреляция значений атмосферного давления в пределах Сибирского антициклона, полученных в результате реанализа, а также она дает наиболее близкие к реальным значения температуры воздуха. Кроме этого, модель имеет достаточно густую сеть расчётных значений температуры и осадков — размер ячейки в пределах территории Российской Федерации изменяется от 1,122×1,125 до 1,118×1,125 градусов, что в условиях отсутствия региональных моделей изменения климата для России, позволяет оценивать изменения на относительно небольших по площади территориях. Последний период, по которому выполнялся реанализ — 1991–2000 г. Он определен как «современный» и по отношению к нему выполнялись расчёты изменений искомых параметров в будущем. Расчёты выполнены на середину (2041–2050 гг.) XXI века. На указанные периоды для узлов сетки были рассчитаны средние значения температуры воздуха и суммы осадков за каждый месяц. Затем по этим данным были рассчитаны продолжительность тёплого (Т более 0°C) и холодного периода (Т менее 0°C). Для каждого периода было подсчитано количество прогнозируемых осадков. По разности значений этих параметров за разные периоды (начало и середина XXI века) с использованием ArcGIS 10.3 были построены поверхности, характеризующие их изменения. Далее при наложении на карту муниципальных образований, были определены средние значения параметров продолжительности тёплого и холодного периодов и количества осадков за эти периоды и их изменений для каждого муниципального образования Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Для определения изменения повторяемости селевых потоков оценивались изменения количества осадков за тёплый период на середину и конец XXI века. Оценка изменения этого параметра селевой деятельности наименее точна, т.к. в современных условиях не найдена тесная связь между повторяемостью селевых потоков и количеством осадков за тёплый период. В связи с этим было принято допущение, что при изменении количества осадков в пределах ±10% повторяемость селевых потоков не изменится. При изменении количества осадков в пределах ±10–30% повторяемость

селевых потоков изменится соответственно на $\pm 10\%$. При изменении количества осадков за тёплый период более $\pm 30\%$ повторяемость селевых потоков изменится на $\pm 20\%$.

Поражённость территорий селевыми потоками муниципальных районов Восточной Сибири и Дальнего Востока принята неизменной, т.к. изменение климатических условий на ее территории не скажется на площади распространения селевых потоков (орографические условия неизменны, а климатические благоприятны для образования селевых потоков), при этом антропогенный фактор не анализировался.

Продолжительность селеопасного периода определялась по методике Н.Л. Белой [2005] с учётом изменения продолжительности тёплого периода в каждом муниципальном образовании.

Использование этих данных позволило произвести расчёт селевого риска для транспортных коммуникаций в пределах муниципальных образований на середину XXI века, а сравнение полученных показателей селевого риска с расчётными на начало XXI века позволило определить районы наиболее существенного изменения селевого риска.

Результаты

Суммарное значение селевого риска для транспортных коммуникаций на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока в начале XXI века составляло немного более 9,4 млрд. рублей в год (таблица 2). Наибольшие значения селевого риска в начале XXI века отмечались в Камчатском, Хабаровском, Приморском краях и Сахалинской области, где они превышают 1 млрд. рублей в год. На эти четыре субъекта Восточной Сибири и Дальнего Востока приходится 70,8% селевого риска. Наименьшие значения селевого риска для транспортных коммуникаций в начале XXI века характерны для Чукотского автономного округа, Амурской области, Красноярского края, Республик Тыва и Хакассия.

Таблица 2. Распределение селевого риска для транспортных коммуникаций на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока в середине XXI века

Table 2. Distribution of debris flow risk for transport communications on the territory of Eastern Siberia and the Far East in the middle of XXI century

Субъект РФ	Начало XXI века		Середина XXI века	
	селевой риск, тыс. рублей	доля от общего значения, %	селевой риск, тыс. рублей	доля от общего значения, %
Чукотский автономный округ	162 216	1,7	37 835	0,5
Камчатский край	1 851 256	19,7	996 631	13,2
Хабаровский край	1 841 128	19,6	2 130 396	28,3
Республика Саха-Якутия	474 643	5,0	20 668	0,3
Приморский край	1 418 598	15,1	1 607 628	21,4
Сахалинская область	1 484 225	15,8	2 406 771	32,0
Амурская область	120 018	1,3	149 728	2,0
Еврейская автономная область	0	0,0	0	0,0
Магаданская область	537 508	5,7	49 187	0,7
Забайкальский край	196 120	2,1	10 760	0,1
Красноярский край	30 659	0,3	3 219	0,0
Республика Хакассия	10 782	0,1	653	0,0

Субъект РФ	Начало XXI века		Середина XXI века	
	селевой риск, тыс. рублей	доля от общего значения, %	селевой риск, тыс. рублей	доля от общего значения, %
Иркутская область	702 817	7,5	78 633	1,0
Республика Тыва	3 996	0,0	298	0,0
Республика Бурятия	579276	6,2	37 463	0,5
Сумма	9 413 242	100,0	7 529 870	100,0

Распределение селевого риска для транспортных коммуникаций по муниципальным образованиям показано на рис. 5. Значения селевого риска более 50 млн. рублей в середине XXI века будут отмечаться на территориях муниципальных образований Приморского края, в южных и центральных частях Хабаровского края, Тындинском муниципальном образовании Амурской области, Невельском, Холмском, Углегорском, Макаровском, Корсаковском, Курильском и Южно-Курильском муниципальных образованиях Сахалинской области и Елизовском муниципальном образовании Камчатского края. Селевой риск, характеризующийся значениями от 10 до 50 млн. рублей в год, будет характерен для Чаунского района Чукотского автономного округа, Ольского района Магаданской области, Усть-Камчатского, Мильковского и Усть-Большерецкого районов Камчатского края, муниципальных образований, расположенных севернее Макаровского и Углегорского районов Сахалинской области, а также в Северо-Курильском муниципальном образовании. На территории Хабаровского края значения селевого риска от 10 до 50 млн. рублей в середине XXI века будут отмечаться в Охотском, Аяно-Майском, Тугуро-Чумиканском, Верхнебуриинском и Комсомольском муниципальных образованиях, в Амурской области — в Селемджинском и Зейском муниципальных образованиях и в Иркутской области — в Бодайбинском районе.

К середине XXI века значение селевого риска для транспортных коммуникаций на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока составит немногим более 7,5 млрд. рублей, что на 20,2% меньше, чем в начале XXI века. Наибольшие значения селевого риска для транспортных коммуникаций будут отмечаться в тех же субъектах, что и в начале XXI века, но их доля от общего значения селевого риска увеличится почти до 95%. Рост селевого риска к середине XXI века будет отмечаться в Хабаровском и Приморском краях, Сахалинской и Амурской областях. На остальной территории Восточной Сибири и Дальнего Востока селевой риск для транспортных коммуникаций уменьшится.

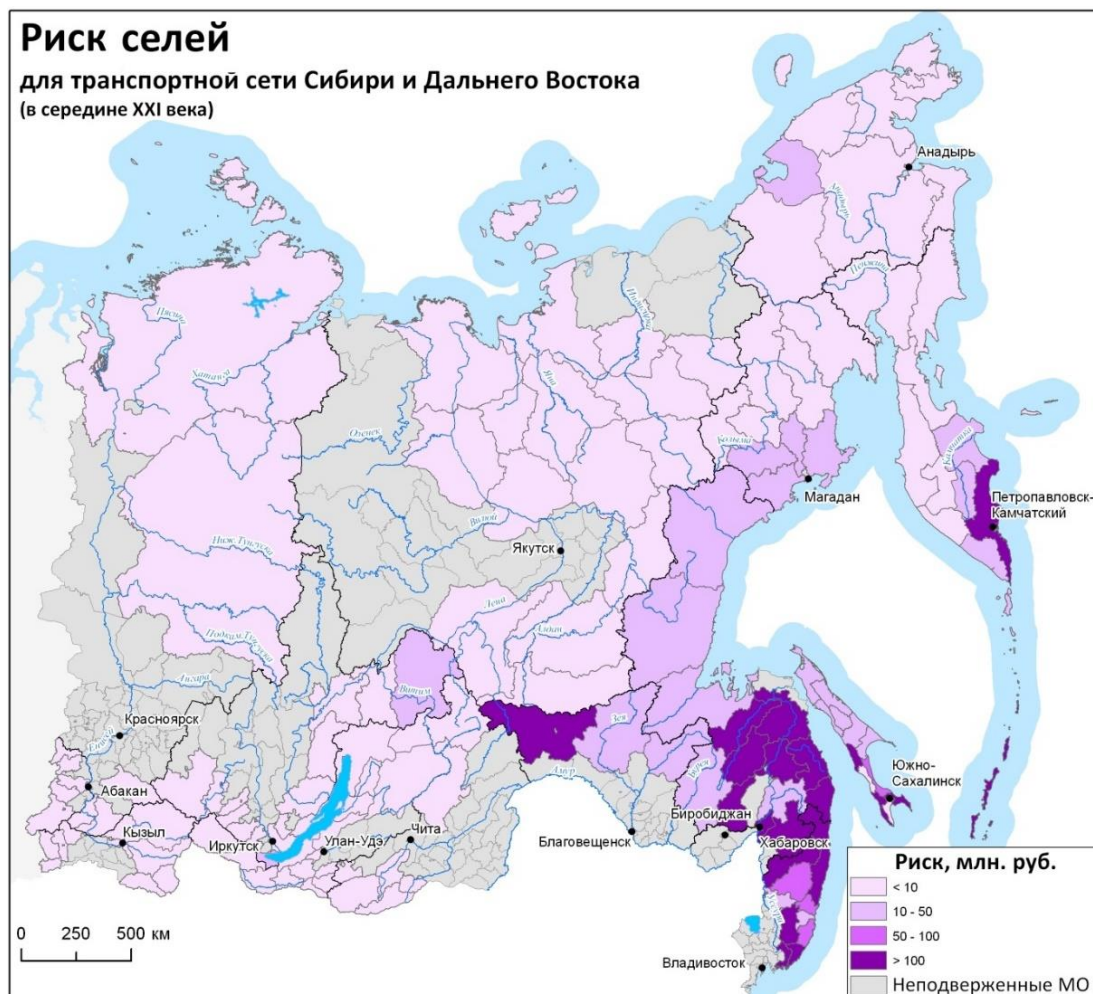


Рис. 5. Селевой риск для транспортных коммуникаций по муниципальным образованиям территории Восточной Сибири и Дальнего Востока в середине XXI века

Fig. 5. Debris flow risk for transportation network per municipal division at the territory of the Eastern Siberia and the Russian Far East in the middle of the XXI century

Остальные муниципальные образования территории Восточной Сибири и Дальнего Востока будут характеризоваться значениями селевого риск для транспортных коммуникаций менее 10 млн. рублей в год.

Наиболее существенные изменения селевого риска для транспортных коммуникаций на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока к середине XXI века будут отмечаться в Сахалинской области, Приморском, Хабаровском краях, где произойдёт существенное его увеличение, также повышение селевого риска к середине XXI века будет отмечаться в Амурской области. В остальных субъектах территории Восточной Сибири и Дальнего Востока будет отмечаться значительное снижение значений селевого риска для транспортных коммуникаций (рис. 6). На большей части территории Восточной Сибири и Дальнего Востока селевой риск для транспортных коммуникаций в середине XXI века по отношению к началу XXI века уменьшится более чем на 50%. Рост селевого риска на 10% и более к середине XXI века будет отмечаться в Амурской области, отдельных муниципальных образованиях Хабаровского и Приморского краев. Максимальный рост селевого риска (более 50%) к середине XXI века будет отмечаться в муниципальных образованиях Сахалинской области, Хабаровского края (Ульчский, им. Полины Осипенко и Советско-Гаванский).

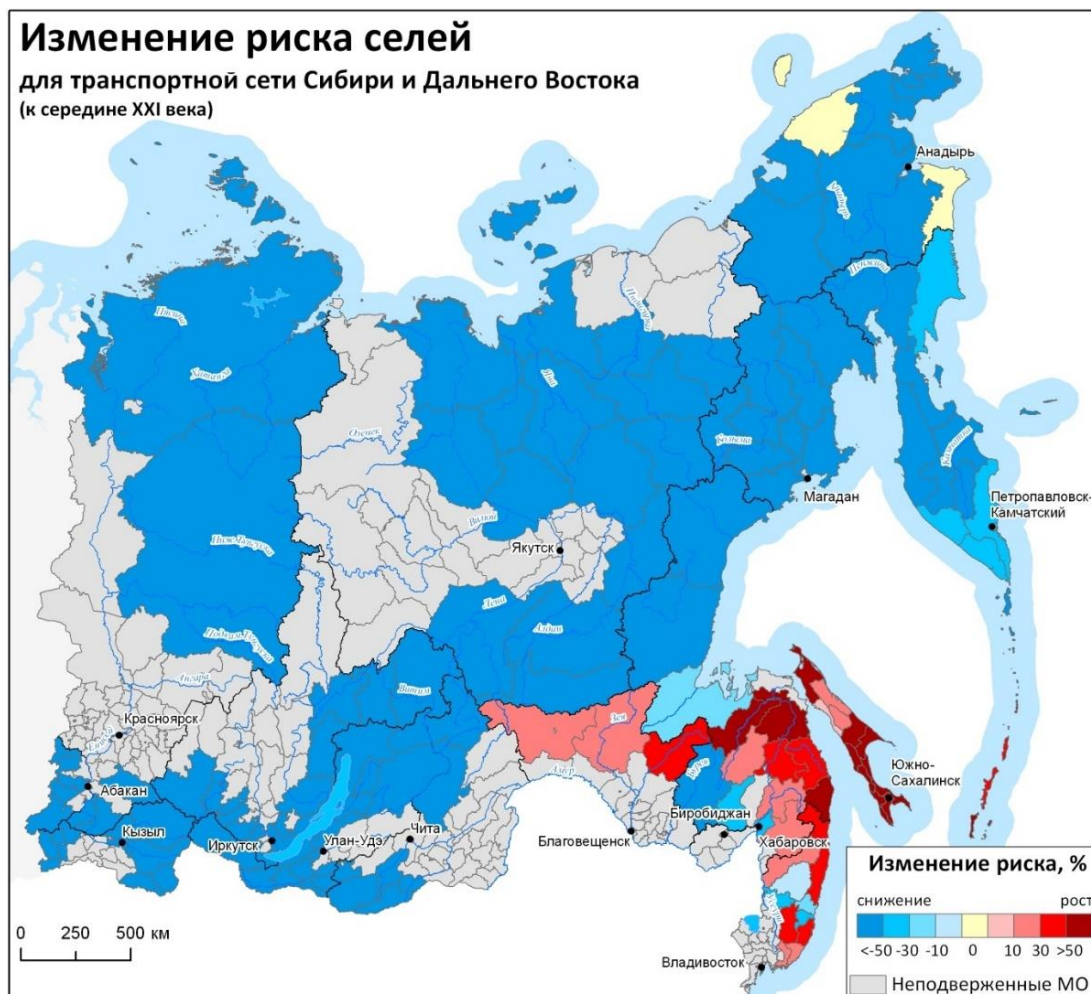


Рис. 6. Изменение селевого риска для транспортных коммуникаций на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока в середине XXI века по отношению к началу века

Fig. 6. The change in the debris flow risk for transportation network at the territory of the Eastern Siberia and the Russian Far East in the middle of the XXI century relative to the beginning of the century

Заключение

В целом к середине XXI века на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока будет отмечаться снижение селевого риска для транспортных коммуникаций на большей части ее территории. Существенное снижение селевого риска для транспортных коммуникаций (более чем на 90%) будет отмечаться в Республиках Саха (Якутия), Республиках Хакасия, Бурятия, Тыва, Забайкальском крае и Магаданской области. Повышение селевого риска для транспортных коммуникаций к середине XXI века охватит центральные и южные районы Хабаровского края, муниципальные образования Приморского края, Сахалинской области и южные и центральные острова Курильской гряды, где селевой риск повысится более чем на 30%. Максимум повышения селевого риска для транспортных коммуникаций к середине XXI века ожидается в Невельском (94%), Анивском (67%), Холмском (65%) и Макаровском (64%) муниципальных образованиях Сахалинской области и Советско-Гаванском (70%) и Ульчском (69%) муниципальных образованиях Хабаровского края.

Снижение селевого риска к середине XXI века положительно скажется на проектировании и строительстве транспортных коммуникаций на большей части территории Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Благодарности

Работы выполнены при финансовой поддержке гранта РГО-РФФИ, договоры №5/2017/ РГО-РФФИ, №15/2018/ РГО-РФФИ №15/2019/ РГО-РФФИ.

Список литературы

- Абраменко Н.А. Некоторые сведения о селевых явлениях на юге Красноярского края и Тувинской АССР. В Селевые потоки. Сб. 5. Л.: Гидрометеоздат, 1980. с. 49–54.
- Андреев Ю.Б., Божинский А.Н. Оценка и картографирование риска на примере селевой опасности на автодороге Баксан-Азау (участок Заюково-Азау). В Опасные природные явления. Оценка риска. Деп. в ВИНТИ 26.07.96 №2567-В96. М.: 1996. с. 131–135.
- Андреев Ю.Б., Божинский А.Н., Сидорова Т.Л. Методика картографирования вероятного ущерба от лавин и селей. Вестник Московского университета. Серия 5: География, 1997. № 5, с. 67–69.
- Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций. Российская Федерация. Шойгу С.К. (ред.). М.: Дизайн. Информация. Картография, 2010. 696 с.
- Бабурин В.Л., Бадина С.В., Деркачева А.А., Сократов С.А., Хисматуллин Т.И., Шныпарков А.Л. Оценка селевого риска в экономических показателях на примере Сибирского федерального округа. Вестник Московского университета. Серия 5: География, 2019. № 4. с. 3–14.
- Белая Н.Л. Моделирование внутригодового распределения дождевых селей в горных регионах мира. Диссертация на соискание уч. степени канд. геогр. наук. М.: 2005. 142 с.
- Бударина О.И., Перов В.Ф. К оценке селевой опасности горных районов Камчатки. В Проблемы противоселевых мероприятий. Алма-Ата: Изд-во «Казахстан», 1981, с. 201–212.
- Будз М.Д. Условия селеобразования в Прибайкалье. Селевые потоки и горные русловые процессы. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1968. с. 291–296.
- Войтковский К.Ф., Корольков В.Г. Водоснежные потоки на плато Путорана. Материалы гляциологических исследований, 1998. 84. с. 92–94.
- Казаков Н.А. Методология расчёта рисков от воздействия лавинных и селевых процессов на территории, объекты и сооружения. Геориск, 2015. № 1, с. 10–14.
- Казаков Н.А., Жукова З.И. Районирование о.Сахалин по степени проявления селевой деятельности. Труды гидрометцентра Сахалинского территориального управления по гидрометеорологии. Вып. 1. Региональные исследования. Южно-Сахалинск: 1988. с. 131–137.
- Краевая Т.С. Краткая характеристика селеопасных районов Камчатки. Труды КазНИГМИ, 1969. Вып. 33, с. 144–151.
- Лехатинов А.М. Селевые явления Северного Прибайкалья. Автореферат дисс. на соискание учёной степени канд. геогр. наук. М.: МГПИ им. В.И. Ленина, 1968. 23 с.
- Макаров С.А. Сели Прибайкалья. Иркутск: Издательство института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2012. 111 с.
- Мягков С.М., Шныпарков А.Л. Концепция риска. В География, общество, природная среда. Касимов Н.С. (ред.) Т. 4: Природно-антропогенные процессы и экологический риск. Малхазова С.М, Чалов Р.С. (ред.) М.: Изд-во «Городец», 2004. с. 265–274.
- Перов В.Ф. Селеведение. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 274 с.
- Перов В.Ф. Селевые явления на территории СССР. М.: Изд-во МГУ, 1989. 149 с.
- Сидорова Т.Л. Оценка селевой деятельности по климатическим параметрам. Автореф. канд. дис. М.: МГУ, 1997. 20 с.
- Черноморец С.С., Сейнова И.Б. Селевые потоки на вулканах. М.: Изд-во УНЦ ДО, 2010. 72 с.
- Baburin V.L., GavriloVA S.A., Koltermann P.-K., Seliverstov Yu.G., Sokratov S.A., Shnyarkov A.L. Quantification of economic and social risks of debris flows for the Black Sea coastal region of the North Caucasus. Geography, Environment, Sustainability, 2014. 7(3), P. 108–122. doi: 10.24057/2071-9388-2014-7-3-108-122.
- Cui P., Zou Q., Xiang L., Zeng Ch. Risk assessment of simultaneous debris flows in mountain townships. Progress in Physical Geography, 2013. 37(4), pp. 516–542. doi: 10.1177/0309133313491445.
- Fuchs S., Kaitna R., Scheidl C., Hübl J. The application of the risk concept to debris flow hazards. Geomechanik und Tunnelbau, 2008. 1(2): 120–129. doi: 10.1002/geot.200800013.
- Jakob M., Holm K. Risk assessments for debris flows. In Landslides . Types, Mechanisms and Modeling. Clague J.J., Fraser S., Stead D. (Eds.). Cambridge University Press, 2012. pp. 71–82 doi: 10.1017/CBO9780511740367.008.

- Lee X.-Y., Lee K.-C. Risk assessment on debris flow hazard along linear construction civil engineering based on satellite remote sensing and fuzzy comprehensive evaluation method. *In Proceedings of the International Conference on Chemical, Material and Food Engineering (Advances in Engineering Research, 22)*. Gao Y. (ed.). 2015, P. 463–466. doi: 10.2991/cmfe-15.2015.108.
- Li F., Gao Y.-Q. The Project Siberian High in CMIP5 models. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2015. 8(4), pp. 179–184. doi: 10.3878/AOSL20140101.
- Liang W.-j., Zhuang D.-f., Jiang D., Pan J.-j., Ren H.-y. Assessment of debris flow hazards using a Bayesian Network. *Geomorphology*. 2012. 171–172, pp. 94–100. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.05.008.
- Lin J., Chen C., Peng C. Potential hazard analysis and risk assessment of debris flow by fuzzy modeling. *Natural Hazards*, 2012. 64(1), pp. 273–282. doi: 10.1007/s11069-012-0236-z.
- Liu X., Lei J. A method for assessing regional debris flow risk: an application in Zhaotong of Yunnan province (SW China). *Geomorphology*. 2003. 52(3–4), pp. 181–191. doi: 10.1016/S0169-555X(02)00242-8.
- Liu X., Yue Z., Tham L.G., Lee Ch.F. Empirical assessment of debris flow risk on a regional scale in Yunnan province, Southwestern China. *Environmental Management*. 2002. 30(2), pp. 249–264 doi: 10.1007/s00267-001-2658-3.
- Miao Ch.y., Duan Q.g., Sun Q.h., Huang Y., Kong D.x, Yang T.t, Ye A.zh., Di Zh.h., Gong W. Assessment of CMIP5 climate models and projected temperature changes over Northern Eurasia. *Environmental Research Letters*. 2014. 9(5), 055007. doi: 10.1088/1748-9326/9/5/055007.
- Quan Luna B., Blahut J., Kappes M., Akbas S.O., Malet J.-P., Remaître A., van Asch T., Jaboyedoff M. Methods for debris flow hazard and risk assessment. *In Mountain Risks: From Prediction to Management and Governance (Advances in Natural and Technological Hazards Research, 34)*. van Asch T., Corominas J., Greiving S., Malet JP., Sterlacchini S. (Eds.). Dordrecht: Springer, 2014. pp. 133–177. doi: 10.1007/978-94-007-6769-0_5.
- Shu H., Ma J., Zhang P., Yu H., Ren S., Qi S., Yang H. Debris-flow risk assessment: from catchment to regional scale: a case study from Southern Gansu Province, China. *Ekoloji*, 2019. 28(107), pp. 2319–2333.
- Минтранс России посчитал стоимость строительства и реконструкции километра автомобильных дорог общего пользования <https://investinfra.ru/novosti/mintrans-rossii-poschital-stoimost-stroitelstva-i-rekonstrukcii-kilometra-avtomobilnyh-dorog-obschego-polzovaniya.html>
- Сопоставление стоимости автомобильных и железных дорог <https://aftershock.news/?q=node/501956&full>;
- Федеральная служба государственной статистики РФ http://www.gks.ru/free_doc/new_site/bd_munst/munst.htm — База данных показателей муниципальных образований (дата обращения 12.06–23.12.2016).



Assessments on debris flow distribution, triggering and evolution in the Dolomites area (North-Eastern Italy)

P.R. Tecca¹, R. Genevois², G. Scarso²

¹Research Institute for Geo-Hydrological Protection, National Research Council (CNR-IRPI), Padova, Italy

²Department of GeoSciences, University of Padova, Padova, Italy,
rinaldogenevois@gmail.com

Abstract. Debris flows are considered among the most dangerous and destructive processes that affect mountainous areas all over the world. In Italy debris flows are very common in all the Alps, and in particular in the Dolomites (North-Eastern Italy). This paper concerns the study of debris flows distribution, triggering and evolution in the Cortina d'Ampezzo area, located in the Eastern Dolomites, sample study area over about 30 years in the context of National and European research projects. The morphology of the area is characterised by sub-vertical dolomitic cliffs and a thick talus developing from their base to the valley bottom. Through the analysis of aerial photographs, 325 debris flows, both channelized and hillslope type, have been detected. They all originate at the rock cliff base and develop towards the valley floor. The morphometric and hydrologic parameters of the rock headwater catchment and of the transport and deposition zones have been measured for each debris flow, as well as the recording of the rainfall responsible for the triggering process. The debris flows have been divided according to their type (hill-slope or channelized) and rock headwater catchments which do not give rise to debris flow have been considered separately. All the collected data have been statistically analysed getting some general conclusions especially regarding the headwaters that do not originate debris flows. The mean channel lengths increase over the years, and this would seem in connection with an increasing trend of total annual rainfall and frequency of maximum intensity since the late 1980s.

Key words: debris flow, morphometry, triggering mechanism, Dolomites (Italy)

Cite this article: Tecca P.R., Genevois R., Scarso G. Assessments on debris flow distribution, triggering and evolution in the Dolomites area (North-Eastern Italy). In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe-Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: "Promotion" LLC, 2020, p. 74–87.

Оценка масштабов распространения, механизмов возникновения и эволюции селевых потоков в районе Доломитовых Альп (Северо-Восточная Италия)

П.Р. Текка¹, Р. Женевоа, Дж. Скарсо²

¹Исследовательский институт по гидрогеологической защите, Национальный совет по науке, Падуя, Италия

²Департамент наук о Земле, Падуанский университет, Падуя, Италия,
rinaldo.genevois@unipd.it

Аннотация. Селевые потоки считаются одними из самых опасных и разрушительных процессов, затрагивающих горные районы во всем мире. В Италии селевые потоки очень распространены во всем Альпийском регионе, и, в частности, в Доломитовых Альпах (Северо-Восточная Италия). Настоящая работа посвящена изучению масштабов распространения, возникновения и эволюции селевых потоков в районе Кортина д'Ампеццо, расположенном в восточной части Доломитовых Альп, где в рамках национальных и европейских исследовательских проектов в

течение примерно 30 лет проводились исследования. Морфология района характеризуется наличием субвертикальных, сложенных доломитами, скальных уступов и мощными осыпями, развивающимися от их подножия до дна долины. В результате анализа аэрофотоснимков было обнаружено 325 селевых потоков, как русловых, так и склоновых. Все они берут начало у основания скальных уступов и развиваются в направлении дна долины. Для каждого селевого потока были измерены морфометрические и гидрологические параметры всех частей водосборного бассейна: зоны зарождения, транзита и аккумуляции, а также собраны данные о количестве атмосферных осадков, выпадение которых стало триггером для схода селей. Селевые потоки были разделены в соответствии с их типом (склоновые или русловые), а водосборные бассейны, сложенные в верхних частях коренными породами и потому не подверженные сходу селевых потоков, рассматривались отдельно. Все собранные данные были статистически проанализированы, что позволило сделать некоторые общие выводы, особенно в отношении водосборов, не подверженных сходу селевых потоков. Средняя длина русел с годами увеличивается, и это, по-видимому, связано с тенденцией к увеличению общего годового количества осадков и частоты селей максимальной интенсивности с конца 1980-х гг.

Ключевые слова: селевые потоки, морфометрия, триггерные механизмы, Доломитовые Альпы (Италия)

Ссылка для цитирования: Текка П.Р., Женева Р., Скарсо Дж. Оценка масштабов распространения, механизмов возникновения и эволюции селевых потоков в районе Доломитовых Альп (Северо-Восточная Италия). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 74–87.

Introduction

In the last years, increasing concern has been expressed about the state of the Alpine Environment and its safety, since European Alps play an important role in the economy and in the culture of the European countries. However, the means of defining, describing, monitoring and forecasting of the existing natural hazards should be considered not yet entirely adequate [Armento, 2007; Genevois et al., 2018].

Debris flow hazards constitute one of the major threats to permanent settlements, tourist infrastructures as well as to transit routes. They occur, in facts, as sporadic, short, but severe events, mostly as a consequence of extreme hydro-meteorological conditions, conditioning the geomorphic evolution of the alpine torrent basins. Models of propagation and deposition of transported sediments and reliable mathematical and physical modelling have been developed [e.g. Phillips and Davies, 1991; Coussot et al., 1998], but they need to be fed by field or experimental parameters for an effective hazard mapping and a correct design of active defensive measures.

Apart from the use of numerical simulation models, hazard assessment is generally based on detailed classifications and mapping systems in order to identify factors contributing to the hazard and to assess dangerous processes. Everywhere is thus arising the need to control and to forecast debris flow hazards in order to mitigate related risk through a better understanding of the mechanics and dynamics of these processes [e.g. Iverson, 1997; Berti et al., 2000; Tecca et al., 2003; Genevois and Tecca, 2016]. These phenomena have, then, to be first described, their occurrence must be analysed and, finally, they have to be related to their consequences, that is defining three fundamental mapping stages: “danger, hazard and risk”.

In this paper only the initial level of mapping has been considered, excluding the assessment of risk and the management of the consequences. With the aim to detect the relevant characteristics of debris flows in the Cortina d’Ampezzo municipality (North-Eastern Italian Alps), characterized by numerous and frequent debris flows, morphometric parameters of existing debris flows have been measured through the examination of aerial photographs and

adequate field check points. All the existing catchments have been analysed, setting the closure of headwater catchments at the base of the rock cliffs, where the scree slope can originate debris flows. Moreover, differentiation has been made between catchments originating or non-originating debris flows and between channelized and hill-slope debris flows.

For this purpose, basic information on geology, geomorphology, hydrology and hydrogeology of the area and the location of debris flows have been studied. Afterwards, the main geometrical and morphological characteristics have been statistically analysed and results correlated to rainfall intensity, as it is the only triggering factor in this study area.

Geological, geomorphological and climatic settings

The Cortina d'Ampezzo area is located in the Upper River Boite Valley (Eastern Dolomites, North-Eastern Alps). The stratigraphical sequence of sedimentary rocks outcropping in the whole dolomitic area includes lithologies from Upper Triassic to Lower Jurassic age (Fig. 1).

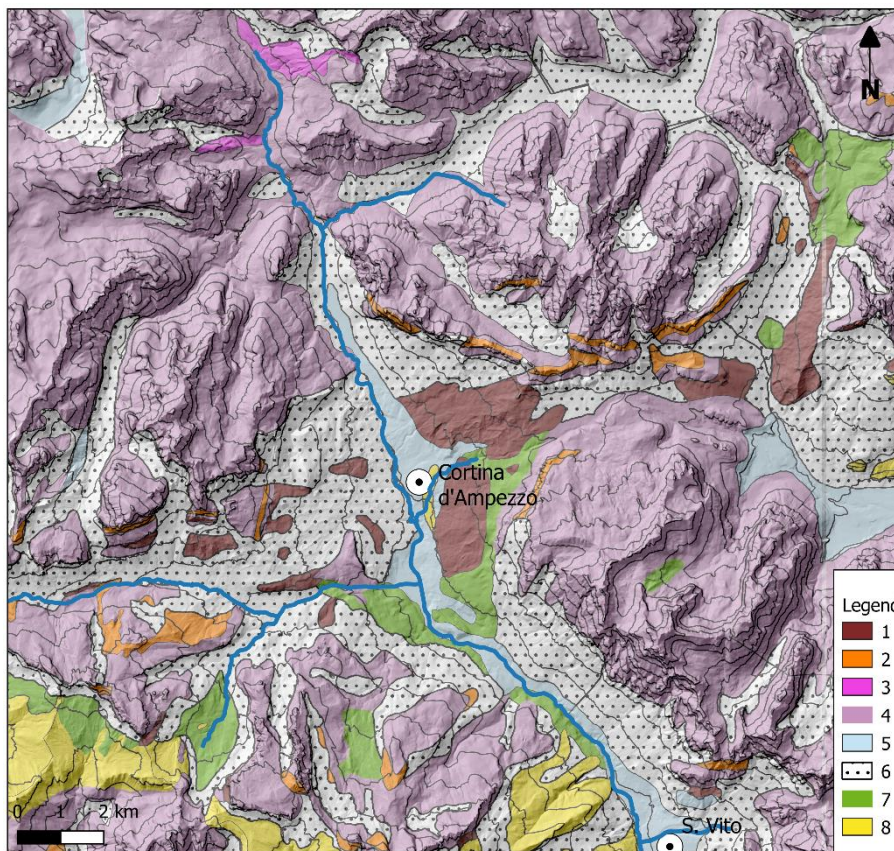


Fig. 1. Lithological sketch map of the Cortina d'Ampezzo area; 1: Alternation of sandstone and marl; 2) Mudstone and chalk; 3) Clayey limestone; 4) Limestone and dolomite; 5) Alluvial deposits; 6) Gravels; 7) Morainic deposits; 8) Vulcanites

Peak elevations vary between 2500 and 3200 m a.s.l., and valley floor has elevations ranging from 1100 and 1300 m a.s.l.. The morphology of the area is strongly influenced by the geological structure, mostly characterized by the presence of rigid over plastic formations. Rigid carbonate rocks (Dolomia Principale Fm.) built up high cliffs, whereas the pelitic formations (Raible Fm.) form gentler lower slopes. The dip of the stratigraphical units, generally upslope on the left River Boite side and downslope on the right one, imparted some asymmetry to the form of the main valley. On the left River Boite side, sub-vertical cliffs are present and the intense weathering has developed a thick talus. Slopes are widely covered by

landslide deposits and scree of varying thickness, and the valley floor is blanketed by postglacial sediments and recent alluvial deposits [APAT, 2009].

The climatic conditions are typical of an Alpine environment. Annual precipitation roughly ranges from 900 to 1500 mm; precipitation mostly occurs as snowfall from November - December to April - May and as rainfall in late spring and summer, with a maximum between June and August (Fig. 2). To take into account the existing large differences in elevation, general rainfall distribution and rainy days have been considered for two of the four weather stations: the first one (Cortina, 1275 m a.s.l.) at the valley bottom, and the second one (Faloria, 2235 m a.s.l.) on a mountain top [ARPAV, 2020].

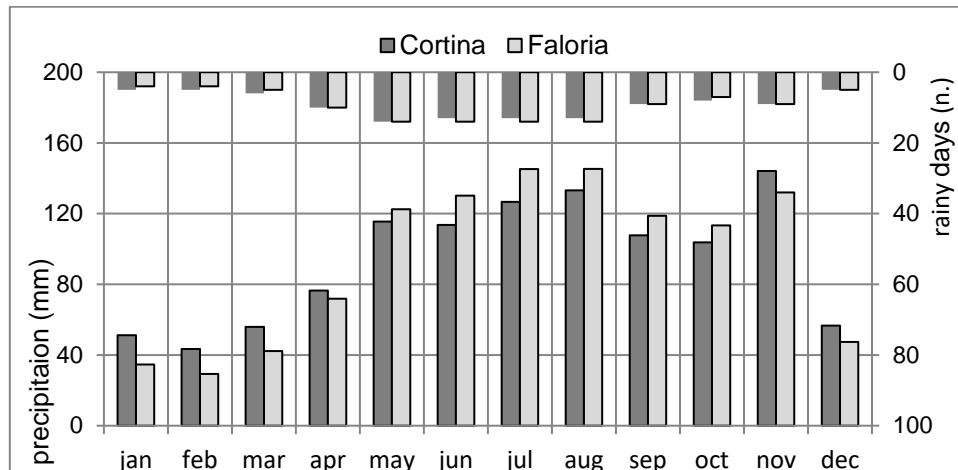


Fig. 2. Mean monthly precipitation and rainy days from 1982 – 2012 at Cortina d’Ampezzo (1275 m a.s.l.) and Faloria (2235 m a.s.l.) weather stations

Considering the mean monthly precipitation over the 1994-2019 period (Fig. 2), the differences between the two weather stations are limited, although the Faloria weather station, which is located at a higher elevation, displays higher values.

Due to the relevance of the rainfall intensity in the trigger mechanism, the rains of maximum intensity in time intervals of 5, 10 and 15 min were also considered. Cortina weather station shows a certain increasing trend of intensity precipitation, especially for the 10 min and 15 min time intervals (Fig. 3). For longer time intervals (30 min and 45 min), the increase of this trend is less pronounced.

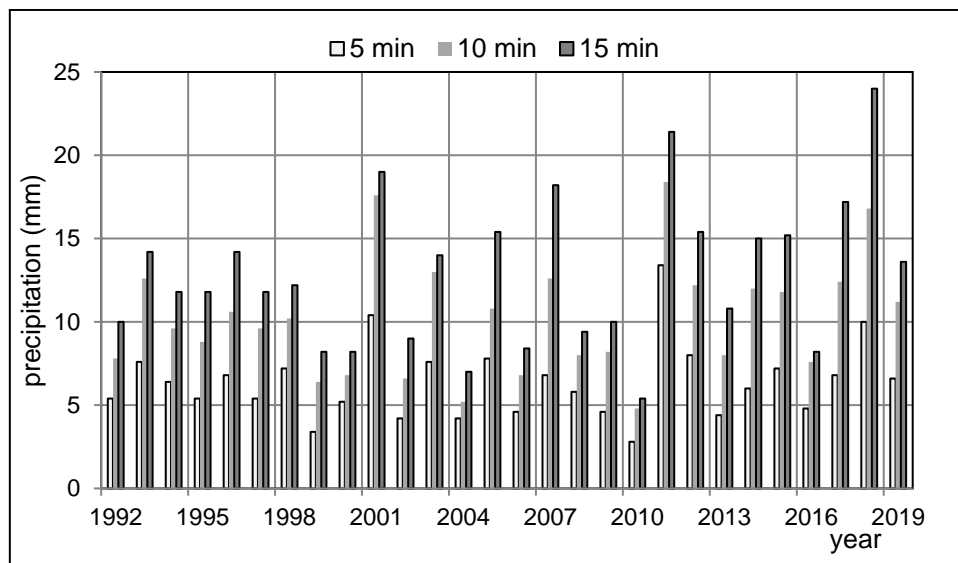


Fig. 3. Cortina weather station: precipitation intensity trend for the time intervals 5, 10 and 15 min

Debris flows distribution and characteristics

The most hazardous debris flows in the Cortina d'Ampezzo area are channelized debris flows, but many hillslope debris flows can be observed. The main characteristics of debris flows in the area were identified mainly from aerial photographs, implemented by field investigation. 191 hillslope and 133 channelized debris flows were identified out of a total of 324, and mapped (Fig. 4).

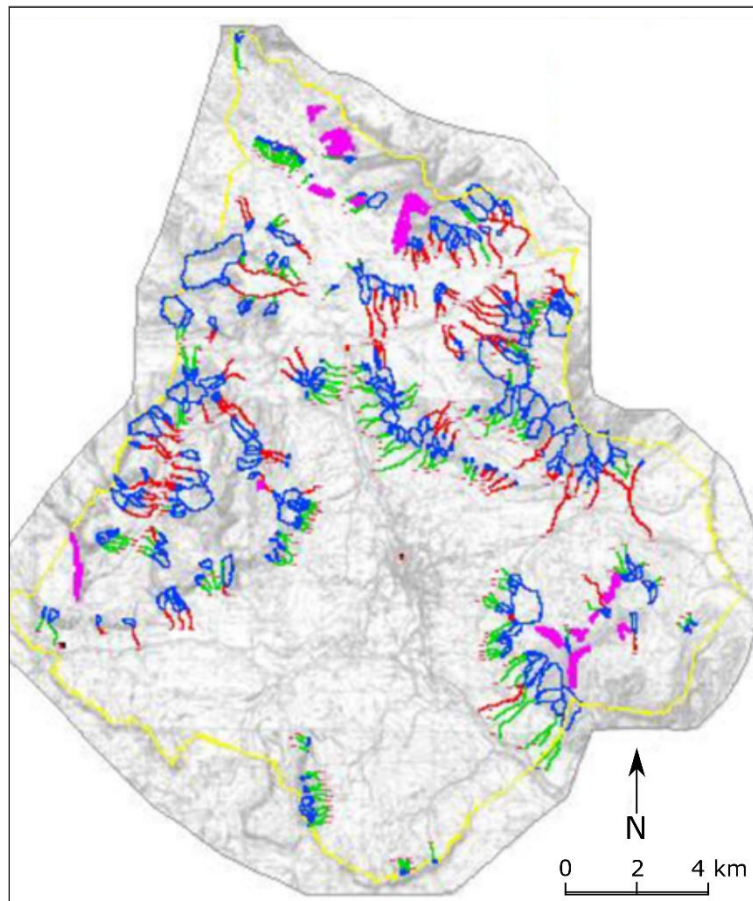


Fig. 4. Debris flow distribution in the Cortina d'Ampezzo area

Debris flows can be considered as the flow of a one-phase non-Newtonian fluid [Pierson and Costa, 1987; Major and Pierson, 1990; Wang et al., 2014]. Properties of transported material can be measured mostly in static condition, whereas only a few can be accurately measured in flowing debris. Many Authors report physical characteristics of these materials in the studied area [e.g., Berti et al., 2000; Tecca et al., 2003; Berti and Simoni, 2005; Armento et al., 2008].

The transported sediment is poorly sorted, containing up to 30% in weight of finer fraction (silts and clays). Typical mean values of main physical and mechanical parameters, determined on samples with particle diameter less than 20 mm, are: i) effective internal friction angle: 37°-44°; ii) void ratio: 0.31-0.36; iii) saturated density: 1940-2200 kg/m³. The comparison of the inferred field conditions with the "scaled" critical lines indicates a contractive behaviour of the in-situ material, then a high susceptibility of the material to liquefy at failure.

The basins were first discriminated in producing (DF) and not producing debris flows (NON-DF). Each DF, was then classified as hill slope (HS DF) or channelized (C DF), and the following morphometric parameters were assessed, by aerial photos analysis implemented by direct field surveys: 1) slope exposition; 2) basin: area, length and width, maximum and minimum elevation, form factor and time of concentration; 3) length of the flow channel for

NON-DF, calculated as the distance between the source area and the end of the deposition zone for DF; 4) mean slope of the transport, deposition and source area zones.

The form factor A_f , a dimensionless ratio of the basin area to the square of its length is always less than 0.79: the smaller its value the more the basin is elongated, that produces a low peak flow of longer duration. Basins with higher A_f values are characterized by high peak flow of shorter duration [Farhan, 2017]. The concentration time (t_c), the response of the watershed to a rainfall event, has been calculated with the *Kerby-Kirpich* method, applicable to watersheds ranging from about 0.65 to 388.km² [Roussel et al., 2005]. The total concentration time is obtained by adding the overland flow time (t_{ov}) to the channel flow time (t_{ch}):

$$t_c = t_{ov} + t_{ch}$$

Values of morphometric parameters of the catchments (area A and form factor A_f) and flow channels (length L , transport Tr . and deposition Dep . slopes) together with the hydrologic parameter (t_c) were statistically analysed, obtaining the density histograms of each parameter value and the best distribution. An example for the lengths is shown in Fig. 5.

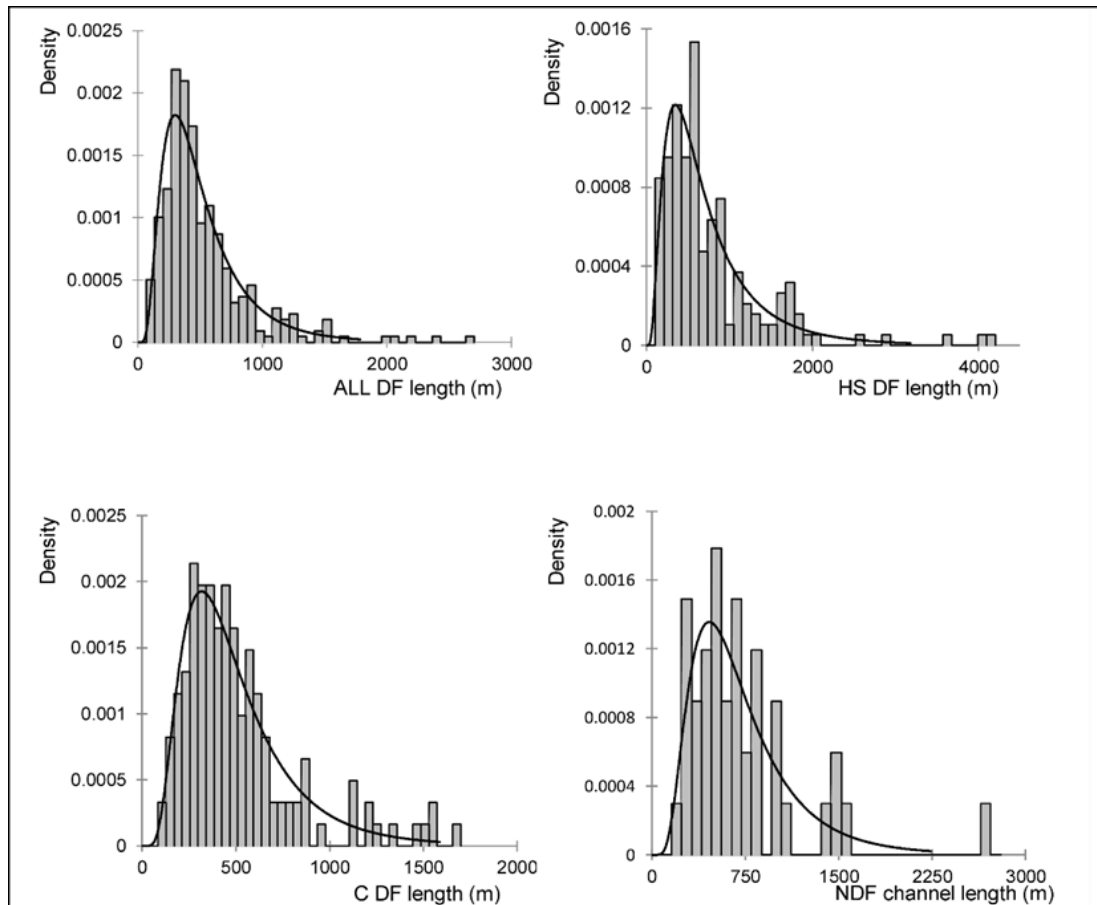


Fig. 5. Length histograms and best-fit log-normal distribution of the four types of basins

The statistical values of considered parameters for the four basin groups are shown in Table 1.

The log-normal distribution, generally significant in the description of natural phenomena, is almost always the best-fit distribution.

Assuming that the four basin groups can be considered statistical populations and the corresponding parameters are samples of these populations, a multiple comparison procedure has been performed using the *Kruskal-Wallis test*.

Table 1. Distribution parameters of morphological and hydrological characteristics of the basin groups

DF TYPE	No.	Distribution parameters	A (m ²)	A _f (-)	t _c (min)	L (m)	Tr. (°)	Dep. (°)
ALL DF	325	normal						
		μ	67696	0.190	6.24	524	29.2	23.5
		σ	106292	0.096	2.66	371	6.5	9.2
		log-normal						
		μ	10.212	-1.777	1.747	6.070	3.345	3.077
		σ	1.375	0.492	0.410	0.608	0.260	0.018
HS DF	182	normal						
		μ	53444	0.184	5.77	770	28.9	25.0
		σ	93635	0.089	2.29	651	7.4	9.4
		log-normal						
		μ	10.013	-1.806	1.681	6.378	3.325	3.150
		σ	1.307	0.485	0.377	0.725	0.303	0.391
C DF	143	normal						
		μ	85183	0.210	6.64	509	29.7	20.7
		σ	118119	0.139	2.75	316	5.0	7.2
		log-normal						
		μ	10.448	-1.714	1.807	6.072	3.375	2.965
		σ	1.427	0.030	0.419	0.558	0.185	0.379
NON DF	42	normal						
		μ	143206	0.182	11.15	730	-	-
		σ	221842	0.049	5.37	468	-	-
		log-normal						
		μ	11.133	-1.737	2.316	6.435	-	-
		σ	1.188	0.249	0.430	0.549	-	-

No.: number of observations; A: basin area; A_f: basin form factor; t_c: concentration time; L: flow channel length; Tr: transport area slope; Dep: deposition area slope.

The *Kruskal-Wallis* is a non-parametric test to compare outcomes among three or more independent groups when the assumption of normality cannot be accepted. In this test, if even one of the samples is different from another, the approximated probability value (p-value) will be lower than the considered significance level (5%) and the null hypothesis H₀ (the samples come from the same population) has to be rejected.

The analysis of the four basin groups shows that the null hypothesis H₀ has to be always rejected, but no significant differences between distributions result if form factor (A_f), transport slope (Tr) and, partially, deposition slope (Dep) are considered (Table 2).

Table 2. Results of the *Kruskal-Wallis* test

		ALL DF	HS DF	C DF	NON DF
A	ALL DF		No	No	Yes
	HS DF	No		Yes	Yes
	C DF	No	Yes		Yes
	NDF	Yes	Yes	Yes	
A _f	ALL DF		No	No	No
	HS DF	No		No	No
	C DF	No	No		No
	NDF	No	No	No	

		ALL DF	HS DF	C DF	NON DF
t _c	ALL DF		No	No	Yes
	HS DF	No		Yes	Yes
	C DF	No	Yes		Yes
	NDF	Yes	Yes	Yes	
L	ALL DF		Yes	No	yes
	HS DF	Yes		Yes	No
	C DF	No	Yes		Yes
	NDF	yes	No	Yes	
Tr.	ALL DF		No	No	
	HS DF	No		No	
	C DF	No	No		
Dep.	ALL DF		No	Yes	
	HS DF	No		Yes	
	C DF	Yes	Yes		

The most responsible parameters for the differences obtained have been identified through the *Kolmogorov–Smirnov test*, sensitive to differences in both location and shape of the empirical cumulative distribution functions. The test quantifies the maximum difference (D) between two cumulative distributions: the closer is D to 0, the more likely the two samples are drawn from the same distribution. The results, presented in Table 3, show that the D values are almost always equal or very close to 1 (> 0.9), suggesting that samples were not drawn from the same distribution. However, it should be noted that for the samples of transport slope (Tr) and deposition slope (Dep), the D value is considerably lower and therefore, the possibility that they come from the same distribution may not be completely excluded.

The correlations between geomorphological evolution of the slopes and the debris flow events have been explored analysing ten series of aerial photos, covering a time interval of 61 years. The data relating to the delimitation of the headwater catchments and the debris flow channels not reaching the valley bottom, have been entered, scaled and georeferenced so that they could be superimposed. Lengths were assessed in order to obtain an average elongation rate of the channels during the years.

Table 3. D values resulting from the *Kolmogorov–Smirnov tests*

		A	A _f	t _c	L	Tr	Dep
ALL DF	A		1	1	0.985	1	1
	A _f	1		1	1	1	1
	t _c	1	1		1	0.972	0.912
	L	0.985	1	1		1	0.994
	Tr	1	1	0.972	1		0.415
	Dep	1	1	0.912	0.994	0.415	
HS DF	A		1	1	0.967	1	1
	A _f	1		1	1	1	1
	t _c	1	1		1	0.972	0.952
	L	0.967	1	1		1	1

		A	A _f	t _c	L	Tr	Dep
	Tr	1	1	0.972	1		0.269
	Dep	1	1	0.952	1	0.269	
C D F	A		1	1	0.993	1	1
	A _f	1		1	1	1	1
	t _c	1	1		1	0.993	0.91
	L	0.993	1	1		1	1
	Tr	1	1	0.993	1		0.647
	Dep	1	1	0.913	1	0.647	
NON DF	A		1	1	1	----	----
	A _f	1		1	1	----	----
	t _c	1	1		1	----	----
	L	1	1	1		----	----

The results show a non-uniform annual increase in the average length of the channels, characterized by increasing velocity and acceleration. The best-fit line to experimental data (Fig. 6) is a third degree polynomial curve ($R^2=0.9935$) whose first derivative, that is the velocity of the annual channel elongation, shows an increase slightly exponential ($R^2=0.9991$), that can be really approximated to a linear regression ($R^2=0.9988$). Also the second derivative with respect to time, that is the instantaneous acceleration of the annual channel elongation, shows an exponential behaviour ($R^2=0.8830$), corresponding to an exact linear behaviour of the best-fit curve ($R^2=1$). The experimental data indicate a constant increase of the acceleration of channel elongation.

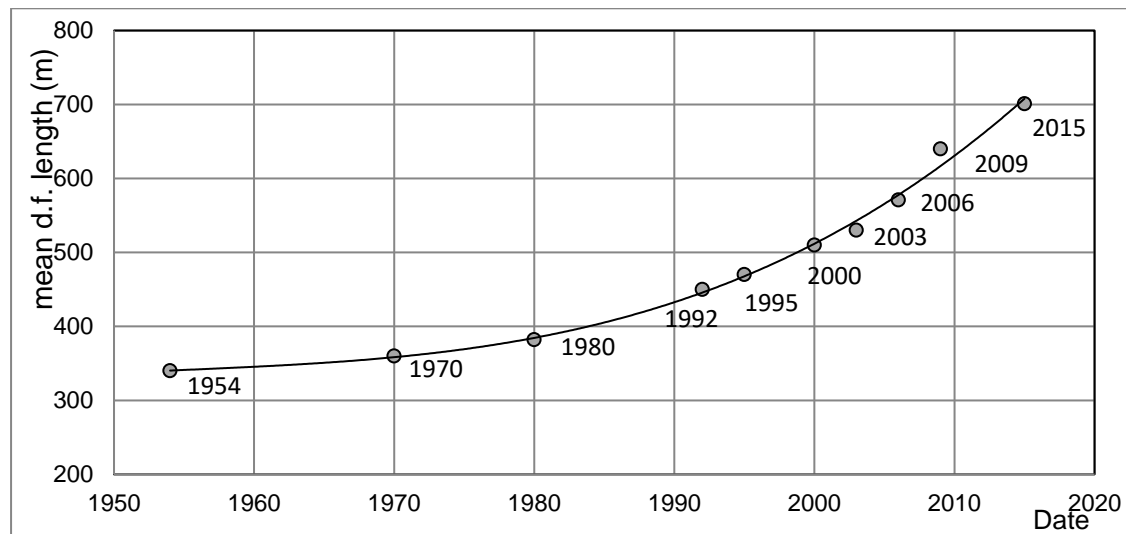


Fig. 6. Flow channels elongation evaluated by air photo interpretation.

Rainfall analysis

Rainfall in the study area have been analysed considering the annual precipitations registered at the four exiting weather stations in the period 1994-2019. Mean (μ) and standard deviation (σ) values of rainfall and rainy days are quoted in Table 4.

We analysed rainfall intensity data of the weather stations located in the Cortina d'Ampezzo area at different elevations (Faloria, 2235 m a.s.l.; Misurina, 1743 m a.s.l.; Podestagno, 1316 m a.s.l.; Cortina, 1271 m a.s.l.).

Table 4. Rainfall data in the study area

Weather station	Elevation (m a.s.l.)	Rainfall (mm)		Rainy days (mm)	
		mean (μ)	st. dev. (σ)	mean (μ)	st. dev. (σ)
Cortina	1271	1128.1	244.6	110	13.8
Podestagno	1316	1286.4	250.8	116	13.1
Misurina	1743	1180.9	181.1	117	10.6
Faloria	2235	1132.6	237.5	108	15.1

The maximum rainfall depths in short periods, registered in the period 1985-2019, have been preliminarily considered as a whole. Almost 200 events have been found with rainfall intensity ranging from 41 mm/30 min to 22 mm/6 min, but very intense precipitations were not common. Rainfall depths have then been analysed considering the elevation of the weather station, the chosen storm duration or time base T (5, 10 and 15 min) and the return period R (2, 5, 10 and 20 years).

As storm rainfall has been recognized since long time to be variable in space, the annual maxima of each chosen storm duration have been preliminarily compared with the Krustall-Wallis test. No significant statistical differences have been found, so the data of all stations have been taken into consideration for the definition of the critical rainfall with respect to debris flows initiation. A general very slight and irregular decrease of the rainfall depth (H) can be observed with the increase of the elevation for all the given storm duration (Fig. 7). Considering the weather stations with the higher elevation difference (Cortina, 1271 m a.s.l. and Faloria, 2235 m a.s.l.), the H annual maxima for the most significant return periods (R = 5, 10, 15 min), exhibit a power law behaviour (Fig. 8), confirming that rainfall depth, beside the considered storm duration, depends enough on the elevation of the weather station.

In order to have a better understanding of the effect of elevation on maximum intensity rainfall in the area, three rain gauges were located along a debris flow channel, 1.6 km long at the base of the rock cliff (1720 m a.s.l.), in an intermediate position (1494 m a.s.l.) and at the end of the channel, before the deposition area (1214 m a.s.l.); data were collected throughout 2016.

Increasing the time base used for the analysis from 1 min to 5 days, a general but not uniform decrease of the rainfall intensities can be observed: up to about 30 min time base rainfall intensities increase from the downslope to the upslope rain gauge showing differences that tend correspondingly to decrease. When time base is longer than 30 min (Fig. 9), significant differences do not exist.

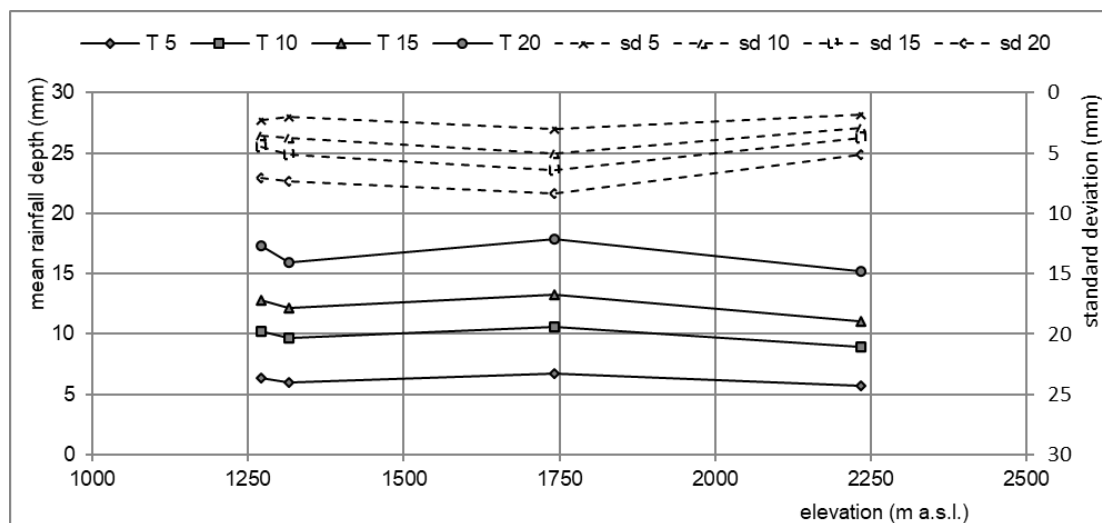


Fig. 7. Variation of mean annual maximum rainfall and corresponding standard deviation (sd, mm) with the elevation for different storm duration (T, mm)

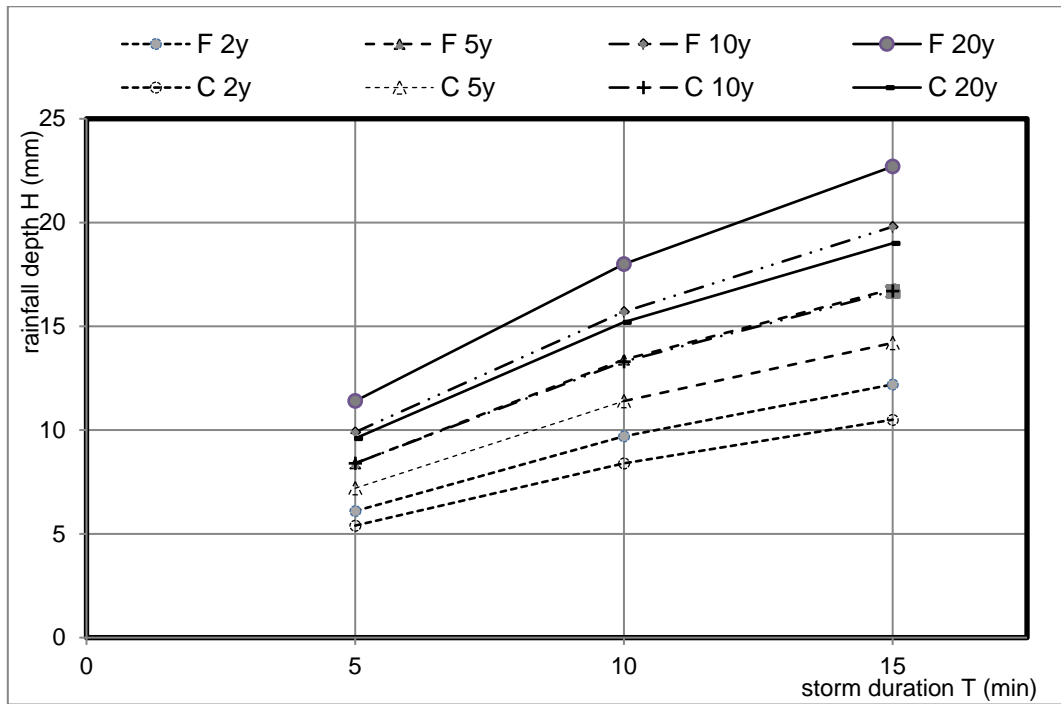


Fig. 8. Rainfall depth (H) vs storm duration (T) for 2, 5, 10 and 20 years return periods (weather station Faloria (F) and Cortina (C))

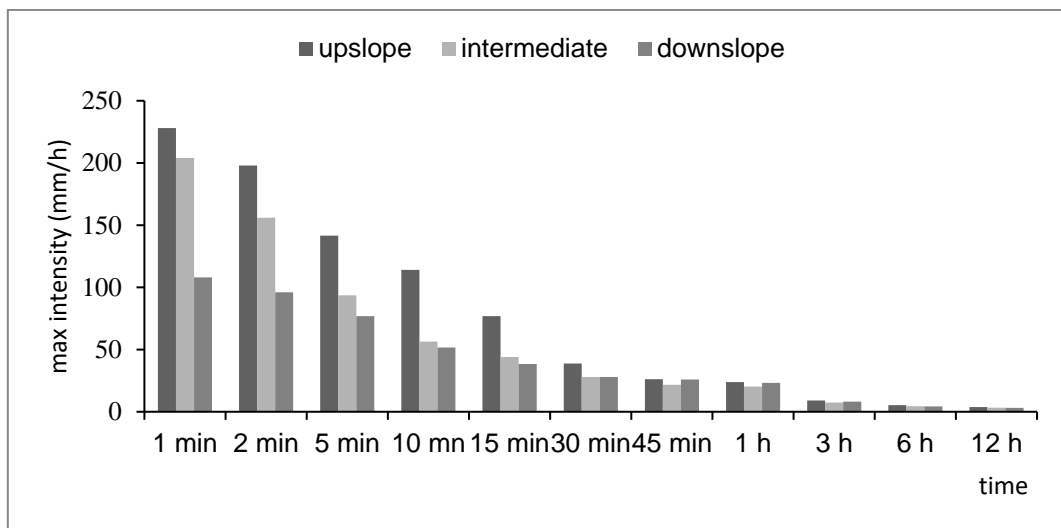


Fig. 9. Maximum rainfall intensities, at the downslope, intermediate and upslope rain gauges obtained with different time bases from April 22 to October 9, 2016

Discussion and conclusions

In order to find possible relationships between main geomorphic and hydrologic parameters of debris flows, we chose the sample area of Cortina d'Ampezzo (North-eastern Italy), having a large number of sediment source areas, lithologically homogeneous, producing both channelized and hill-slope debris flows. Geomorphic (length, transport and deposition gradients, headwater area and form factor) and hydrologic (rainfall and concentration time) parameters, evaluated by field investigation, air photo interpretation, and topographical maps, were then statistically evaluated and compared.

Ultimately, the comparison of the four considered statistical population (ALL DF, HS DF, C DF and NON-DF) shows that all distributions result statistically different. For a better understanding of the relationships between the given parameters, all possible pairs were then

subsequently compared, using the *Kolmogorov–Smirnov test*. The results indicate that the distributions of the samples pairs are always different but, if mean values of parameters were also considered, some general conclusions can be drawn in particular as regards watershed that produce (ALL DF) or do not produce (NON-DF) debris flows. Indeed, mean values of basin area, concentration time and channel flow length of NON-DF watersheds are always greater than those obtained for ALL DF watersheds. However, while the flow channel length is directly connected to the morphological characteristics of the valley (depth and width), watershed area and concentration time seem to indicate different hydraulic triggering conditions.

Since debris flows occur in gullies eroded into very thick unconsolidated Quaternary deposits and, then, sediments availability can be considered unlimited, it can be said that their occurrence probability is a function mainly of the hydro-meteorological threshold exceeding. For a debris flow to occur, are needed both large quantities of water and high-intensity hydrodynamic forces in order to initially saturate sediments in the higher and steeper part of the gully. The consequent increase of pore water pressure lead to failure and the transformation of the solid mass of sediments into a debris flow. This condition depends on the relation between the rate of the entering water flow into sediments and the effective soil flow rate, that is in turn function of the hydraulic conductivity (k). Since involved sediments are characterized by very high k values (in the order of 10^{-1} - 10^{-3} m/s), and the source areas are rather steep ($\mu=37.1^\circ$ and $\sigma=8.1^\circ$), the amount of entering water flow should be very significant.

The water inflow depends mainly on: (a) basin size; (b) basin shape; (c) the rainfall intensity; (d) the time of concentration (t_c). Taking into account these facts, the triggering and the mobilization of debris flows can only occur during very heavy short periods rainfall.

Because debris flows in the Cortina d'Ampezzo area appear to be initiated largely by overland flow processes and, in particular, by the "firehose effect", the increase of pore water pressure derives mainly from the sudden impact of a water flow, a condition that can only occur during short-lasting heavy rainfall in small catchments with short concentration times. Consequently, in NON-DF watersheds, showing concentration times higher than ALL DF basins, it is presumable that the hydrodynamic forces necessary for the failure and the mobilization of the sediments cannot be developed [Iverson, 1997; Marchi and D'Agostino, 2004].

Since sufficient kinetic energy and excess pore pressures are required to maintain the flow condition, any decrease in the slope angle will decrease the debris flow mobility until the start of the deposition process. However, excess pore pressure dissipates mainly in the post-depositional consolidation phase [Major and Iverson, 1999] and, consequently, the deposition process would originate only from friction inside and at the edge of the flowing mass, where high pore pressure cannot completely develop. The same granular temperature, generated and maintained by the incessant conversion of bulk kinetic energy to grain fluctuation energy, may be considered function of the slope angle. The deposition process, then, is rather complicated but, simplifying, it will exist only one slope angle for which a cohesionless mass, with a particular friction angle and density, might mobilize in accordance with the Mohr- Coulomb failure criterion. Considering the range of both slope angles and present soil friction angle, the above considerations could explain the small differences observed between cumulative distributions of transport and deposition slope angles.

However, while mean values of transport slope gradient for HS DF and C DF are very similar (respectively 28.9° and 29.6°), mean values of deposition slope angle result greater for HS DF than for C DF (respectively 25.0° and 20.6°). Actually, it should be considered that the slope angle of the transport area depends greatly, in addition to the glacial morphology of the valley, on the frictional resistance of the detrital cover in the absence of a shallow groundwater. On the other hand, deposition slope angle depends, above all, on the rheological characteristics of the debris flow. Flume investigations on debris flow mixtures demonstrated that their behaviour changes also for small variations in concentration, kinetic energy content and grain size distribution, especially the clay content. Deposition will mainly occur when kinetic energy degrades and granular temperature falls to zero [Major and Pierson, 1992; Iverson, 1997].

The dependence between the rheological parameters and the solid concentration has been investigated by many authors [e.g., Phillips and Davies, 1991; Coussot et al, 1998; Martino,

2003; GDR MiDi, 2004]: they basically found that higher solid volumetric concentrations tend to decrease the bulk flow velocity (mobility) of the debris flow and that even relatively small variations of the water content strongly influence the viscosity and, then, the flow velocity to which deposition area shape, especially its length, are related.

The basins that originate or do not originate debris flows differ only for the value of the concentration times, while the physical and mechanical characteristics of the potentially mobilizable sediment can be considered fairly uniform. These observations suggest that the rheological properties of the debris flows depend substantially only on the amount of water that impulsively arrives in the sediments of the source area. Due to the lack of homogeneity in space and time of rainfall intensity and distribution, the correct evaluation of the precipitation that really fall in the catchment by means of a rain gauge is necessary. The opportunity to install a wider network of meteorological stations, together with the monitoring of sites affected by debris-flows, will enable a more and more detailed definition of the triggering conditions of these phenomena.

Finally, it should be emphasized the constant increase of channels progressive elongation detected in the period 1954-2015 that could be due to: i) a higher frequency of debris flow phenomena, such as a consequence of a higher frequency of precipitation of maximum intensity, especially those of less than 15 minutes; ii) greater volumes mobilized, as a consequence of the presence of a greater quantity of debris, available after long periods of low rainfall.

In any case, the sharp increase in the rate of elongation of the channels is easily interpretable only in relation to general climatic conditions, as the local variation shows only a slight increase of rainfall in recent decades. In conclusion, the research highlights the extreme complexity of debris flow phenomena and the necessity to understand mechanisms and factors controlling the likelihood of debris flows, as they represent the fundamental basis for both hazard evaluation and proper planning of structural and non-structural measures.

References

- APAT Note Illustrative della Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 029 Cortina d'Ampezzo.
- Armento M.C. (2007) Le colate detritiche della Conca Ampezzana: Meccanismi di innesco e valutazione della pericolosità. Earth Sciences Ph.D., University of Padova. Supervisor: Prof. R. Genevois.
- Armento M.C., Genevois R., Tecca P.R. (2008). Comparison of numerical models of two debris flows in the Cortina d' Ampezzo area, Dolomites, Italy. *Landslides* 5:143–150. DOI 10.1007/s10346-007-0111-2.
- ARPAV (2020). Regional Department of Territorial Security. Meteorological Service – Teolo (Padova).
- Berti M., Genevois R., LaHusen R., Tecca P.R. (2000). Debris flow monitoring in the Acquabona watershed on the Dolomites (Italian alps). *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*. Volume 25, Issue 9, pp 707-715.
- Berti M., Simoni A. (2005) Experimental evidences and numerical modelling of debris flow initiated by channel runoff. *Landslides* 2(3):171-182. DOI: 10.1007/s10346-005-0062-4.
- California Culvert Practice, 2nd Edition, Department of Public Works, Division of Highways, Sacramento, 1955.
- Coussot P., Laigle D., Arattano M., Deganutti A., Marchi L. (1998). Direct determination of rheological characteristics of debris flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 124, n.8, 1998.
- Farhan Y. (2017). Applied morphometry and watershed management using RS, GIS ad multivariate statistics (Case Studies). Scientific Research Publishing Inc. pp. 484 ISBN: 978-1-61896-410-6.
- Genevois R. and Tecca P.R. (2016) - Estimation of the Debris Flow Risk in the Cortina d' Ampezzo area (North-Eastern Italy). In: Proc. 6th Int. Sc. and Tec. Conf. "Modern Problems of Water Management, Environmental Protection, Architecture and Construction", 22-25 September, Tbilisi, Georgia, 212-221.
- Genevois R., Tecca P.R., Deganutti A.M. (2018). Debris flow mitigation and control in the Dolomites (North-Eastern Italy). *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2, 57-65. DOI: 10.4408/IJEGE.2018-02.0-04
- Iverson R.M. (1997) The physics of debris flows. *Review of Geophysics*, 35, 3. Pp. 245-296. <https://doi.org/10.1029/97RG00426>.

- Major, J.J., and Pierson, T.C., 1990, Rheological analysis of fine-grained natural debris-flow material, in Proceedings of the International Symposium on Hydraulics/Hydrology of Arid Lands, July 30-Aug. 2, 1990, San Diego, CA: American Soc. of Civil Engineers, New York, p.225-231.
- Major J.J., Iverson R.M. (1999). Debris-flow deposition: Effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins. *GSA Bulletin*, 111, 10; pp. 1424–1434. doi: <https://doi.org/10.1130/0016-7606>.
- Major, J.J., Pierson T.C. (1992). Debris flow rheology: Experimental analysis of fine-grained slurries, *Water Resour. Res.*, 28, 3, 841-857. <https://doi.org/10.1029/91WR02834>.
- Martino R. (2003). Experimental analysis on the rheological properties of a debris-flow deposit. In *Debris Flow Mechanics and Mitigation Conference, Davos, Vol. 1*. ISBN: 978-9077017784
- Marchi L., D'Agostino V. (2004). Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Italian Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 2, pp. 207-220. <https://doi.org/10.1002/esp.1027>.
- Martino R. (2003). Experimental analysis on the rheological properties of a debris-flow deposit. In *Debris Flow Mechanics and Mitigation Conference, Davos, Vol. 1*. ISBN: 978-9077017784
- Pierson T.C., Costa J.E. (1987) A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, 7, 1–12.
- Phillips C.J., Davies T.R.H. (1991). Determining rheological parameters of debris flow material, *Geomorphology*, 4, , 101-110.
- Roussel M.C., Thompson D.B., Fang X., Cleveland T.G., Garcia C.A. 2005. Time-Parameter Estimation For Applicable Texas Watersheds. Research Report 0–4696–2. Lamar University. SHA 2005. Application of Hydrologic Methods in Maryland. U.S. State Highway Administration.
- Tecca P.R., Galgaro A., Genevois R., Deganutti A.M. (2003) Development of a remotely controlled debris flow monitoring system in the Dolomites (Acquabona, Italy). *Hydrol Processes* 17:1771–1784.
- Wang ZY, Lee JHW, Melching CS (2014) River dynamics and integrated river management. Springer Verlag/Tsinghua Press, Berlin/Beijing, p. 226–230.



Elastic mudflow regulating barrage and methodology for its calculation

G.V. Gavardashvili^{1,2}, E.G. Kukhalashvili¹, Sh.G. Kupreishvili^{1,2}, N.G. Gavardashvili²

¹*Tsotne Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia, givi_gava@yahoo.com, e.kukhalashvili@agrni.edu.ge, shorena_12@mail.ru*

²*Ecocenter for Environmental Protection, Tbilisi, Georgia, n.gavardashvili@gmail.com*

Abstract. The Elastic Debris Flow-Regulating Barrage is a longitudinal structure placed across the bed of a debris flow channel. As the heights of the prisms are increasing, the structure has a springboard shape directed opposite the current, while damping of the debris flow energy is attained by means of pockets formed with elastic ropes between the upper faces of the prisms. With the purpose of designing an elastic debris flow -regulating barrage, computational models were developed and a laboratory model was made based on them (with sizes: length – 0,60 m, width – 0,36 m and height – 0,25 m; the gradient of a springboard-type model is 0.25) to test it at the hydraulic laboratory. The methodology for calculating the design of Elastic Debris Flow-Regulating Barrage is presented.

Key words: debris flow, elastic barrage, springboard, regulation

Cite this article: Gavardashvili G.V., Kukhalashvili E.G., Kupreishvili Sh.G., Gavardashvili N.G. Elastic mudflow regulating barrage and methodology for its calculation. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 88–96.

Селерегулирующий эластичный барраж и методология его расчета

Г.В. Гавардашвили^{1,2}, Э.Г. Кухалашвили¹, Ш.Г. Купреишвили^{1,2},
Н.Г. Гавардашвили²

¹*Институт водного хозяйства им. Ц. Мицихулава Грузинского технического университета, Тбилиси, Грузия*

²*Экоцентр охраны окружающей среды, Тбилиси, Грузия, givi_gava@yahoo.com, e.kukhalashvili@agrni.edu.ge, n.gavardashvili@gmail.com, shorena_12@mail.ru*

Аннотация. Противоселевой эластичный барраж представляет собой упругую конструкцию, устанавливаемую в селеносном русле поперек направления потока. По мере увеличения высоты призм конструкция имеет форму трамплина, направленного против течения, а демпфирование энергии селевого потока достигается с помощью карманов, образованных эластичными канатами между верхними гранями призм. С целью проектирования эластичного противоселевого барража были разработаны расчетные модели и на их основе изготовлена лабораторная модель (размеры: длина - 0,60 м, ширина - 0,36 м и высота - 0,25 м; уклон трамплина - 0,25) для испытаний в гидравлической лаборатории. В статье представлена методология расчета при проектировании противоселевого эластичного барража.

Ключевые слова: селевые потоки, эластичный барраж, трамплин, регулирование

Ссылка для цитирования: Гавардашвили Г.В., Кухалашвили Э.Г., Купреишвили Ш.Г., Гавардашвили Н.Г. Селерегулирующий эластичный барраж и методология его расчета. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск,

прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 88–96.

Introduction

The fund of the major fertile soils on the Earth, settled areas, agricultural and industrial facilities and a certain proportion of motor roads and railway lines are located in the riverbank zones or on the alluvial fans of solid sediment and are subject to an impact of such natural disasters as mudflow processes.

Due to an unexpected nature and great destruction force, these currents drastically change the existing environment and inflict great damage to the people's economy. Due to the activation of mudflow processes, the scientists were forced to study the physics of their formation and develop engineering measures on its basis to combat them [*Assessment of hazard mapping system in Georgia and recommended actions (Road Map), 2018*].

At present, in order to protect the buildings, premises and territories from mudflows, mudflow-arresters, mudflow-guide, and stabilizing, mudflow-avoiding and organized technical-engineering measures are used. They are as follows:

- Mudflow-arresting concrete, reinforced concrete rip-rap and ground dams: the mudflow currents are retained by forming mudflow-reserves in the surfaces;
- Mudflow-conducting channels, mudflow-diversion structures: they conduct mudflows across or by bypassing the object;
- Mudflow-guide and guard dams and heels: a current is directed to a mudflow-conducting bed;
- A cascade of dikes, retaining walls, slope terraces, agrotechnical melioration: the movement of mudflow currents are stopped or the dynamic properties of mudflow currents are diminished;
- Mudflow-avoiding structures, mudflow regulation dams, mudflow-diverters: mudflows are prevented;
- Organizing organizational-technical supervisory and reporting services: the occurrence of mudflow currents is predicted.

It should be noted that the first works to regulate mountain currents were accomplished in 323 c. BC in Japan. Since then, till the end of the XIX century, the scientists had to study the essence of mudflow origination and make conclusions in order to select the right measures to combat mudflows and to use them as a basis to classify the combating measures into the following groups:

- **European:** the European approach is based on the French school and prioritizes forest melioration as a measure to combat mudflows and recommends the construction of hydraulic structures, barrages, mass flood beds and weirs to regulate the tributaries of the second and third ranges of a hydrographic network. As per the recommendations of the European approach of recent year, open-end filtering barrages are expedient to use.
- **African:** the measures of the African approach, aiming at protecting the soil from erosion, use slope terracing and growing forest reserves and recently, have been using barrages as transverse hydraulic structures to regulate the watercourses.
- **American:** the American approach means regulating the mudflows by using the complexes of large hydraulic structures and mudflow-retaining dikes. Recently, the given measures have been actively using forest melioration, barraging, weirs, etc.
- **Asian:** the Asian approach uses a combination of European and African methods to combat mudflows. Recently, it has been widely using different kinds of transverse open-end structures.

Due to the abnormality, the peculiarity of impact of the mudflows on the structures is directly associated with structural solutions. The work proposes the copyrighted engineering solutions, which are totally different from the existing ones.

Georgia, as a mountainous country, with its territory of 69 700 km² and with 25 074 small and big rivers with the total length of 54 768 km, has over 3000 water catch basins with active erosive-denudation processes developed in them [Gavardashvili, 2011].

In the South Caucasus (see Fig. 1), the major scientific-classical studies of erosive-mudflow processes started in 1776 when in Georgia, a strong glacial mudflow was formed as a result of the movement of the icy mass in the process of formation of Devdorak Glacier in the Tergi River basin, which blocked the Tergi River bed and inflicted a great damage to the territory of Russia, after accumulated water mass outburst through the temporary dam.



Fig. 1. Map of South Caucasus

Thus, the scientific studies of the erosive-mudflow processes in South Caucasus has an over 200-year-long history in the history of studies with Tsothe Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University (GTU) (former Scientific-Research Institute of Hydraulic Engineering and Reclamation of Georgia (ГрузНИИГИМ)) actively participating in it since 1929.

It should also be noted that in the 1950-1990s, in the former Soviet Union, the Scientific-Research Institute of Hydraulic Engineering and Reclamation of Georgia was a coordinator of scientific forecasts of mudflow processes and fight against them.

Fig. 2 shows the risk of mudflow hazard in different Municipalities of Georgia. The blue line denotes a mudflow watercourse. Each Municipality is given in a different color by showing hazard risk coefficients, which are calculated by dividing the total length of the mudflow-forming watercourses to the total length of the network of rivers in the basin [Natural Hazards in Georgia. SENN, Tbilisi, 2011].

By using this methodology, the map shows the least damaged municipalities in a grey color (Ninotsminda, Akhalkalaki, Dmanisi and the cities of Poti, Batumi and Kutaisi); the blue color denotes more damaged Municipalities (Adigeni, Kharagauli, Khashuri, Kareli, etc.) and the brown color denotes the Municipalities with the highest risk of hazard of the development of mudflow processes (Kazbegi, Dusheti, Telavi, Kvareli, Gurjaani, Oni, Mestia, Lentekhi, Tianeti etc.) [Guide for adaptation to the climate change. Tbilisi, 2016].

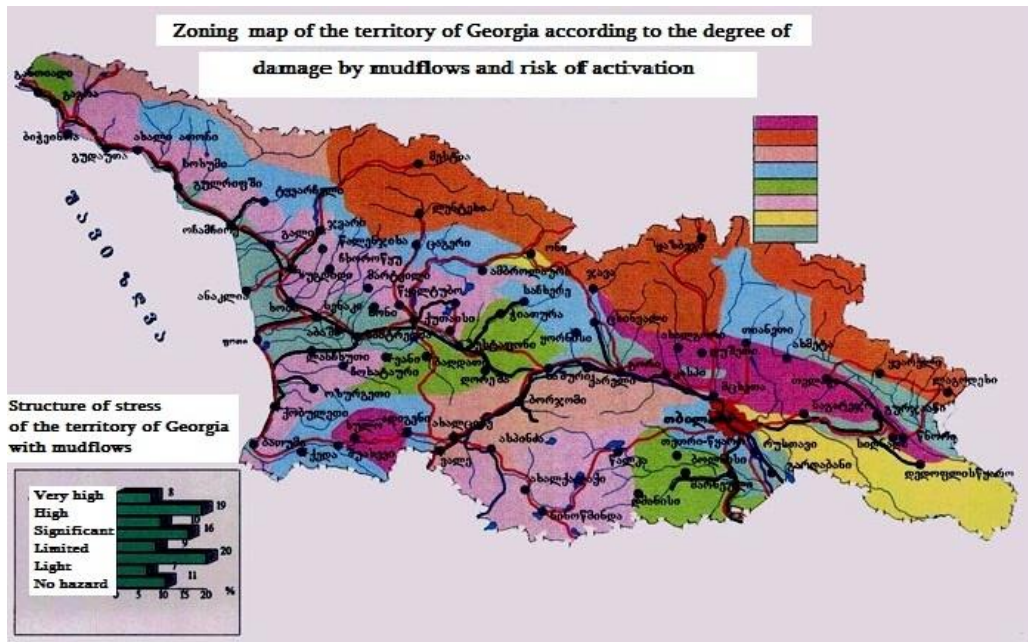


Fig. 2. Map of risks of mudflow hazard in Georgia

Study Object

On February 19, 2020, at the session of Technical Council of the Patriarchate of Georgia headed by episcopo David, Mr. Givi Gavardashvili delivered a speech. The topic of his report was the presentation of Grant Project #AR-18-1244: “Elastic mudflow-regulating barrage” of Shota Rustaveli National Science Foundation and selection of the territory to build the facility. The Technical Council of the Patriarchate of Georgia made a decision to develop an elastic mudflow-regulating barrage project and provide the facility in the Samonastro Khevi River to protect the Shio-Mgvime Monastic Complex, a monument of the VI century, from mudflows [Gavardashvili et al., 2013].

The object of the study is the Shio-Mgvime Monastery located on the left bank of the Mtkvari River (see Fig. 3a), on the southern slope of Sarkine (Akhaltba) Ridge. The Monastery was founded by monk Shio, who came to Georgia from Syria. He spent the last two years of his life in a dark cave dug into the ground in the central part of the Monastery and was buried there. The ancient building of the Monastic Complex is the John the Baptist Church built in 560-570s, in the life of Shio, with its lower part built out of the rock cut on purpose. The Church is of a “Free Cross” type and is built with crushed stone (see Fig. 3b).

Geology of the area: the territory of the Shio-Mgvime Monastery is located at 600-650 m above sea level and the descending plane of the mountain slope is at the altitude of 750-760 m. In a geological respect, the territory is located in the central part of a big avalanche-type landslide, which is its main block.

Horizontally located thick strata of the Miopliocene conglomerates are clearly seen all along the height of a tear-off wall of the said landslide. The role of the cohesive ground of the conglomerates is played by clays, loamy soils and sometimes, sandy loams, resulting in weak cementing ability of the given rocks. Following the above-mentioned, under the impact of the surface waters, virtually loose non-cohesive ground has been converted into easily erodible material, with its strength, as per the visual assessment, exceeding several tens of meters.



Fig. 3. a) Geographical location of the Shio-Mgvime Monastery. b) General view of the Shio-Mgvime Monastery

Soils and landscape: There are mainly alluvial, meadow alluvial and brown meadow soils spread on the territory adjacent to the Shio-Mgvime Monastery. These soils are gullied at some locations. At some locations, there are averagely or intensely washed-down dark, humus-sulphate (gash) and dark brown soils subject to wind and water erosion and dissected with watercourses and active gullies, where the cases of freshets and mudflow passages have already been registered to date. Mostly, cliff xerophytes and light forests are identified on the territory of the Shio-Mgvime Monastery. As for the landscape, mostly forest plantations grow on meadow alluvial carbonate or brown soils in the environs of the Shio-Mgvime Monastery.

Climate: The territory of the Shio-Mgvime Monastery has a moderately humid climate, with moderately cold winter and hot summer, with two precipitation minimums a year: average 500-550 mm during the warm season of the year and 150 mm in the cold season of the year. An average value of absolute annual minimums of air temperature is 14° and an average value of absolute annual maximums is $+38^{\circ}$; annual amplitude of air temperature is 24° . The number of days with a snow cover in winter is 30 a year, with an instable snow cover; the date of snow cover melting is 1-11 March. The duration of a stable snow cover does not exceed 50 days. Average annual evaporation on the territory of the Shio-Mgvime Monastery does not exceed 900 mm.

Goal of the study: The goal of the scientific study is to provide a structural design of an innovative mudflow-regulating barrage to protect the Shio-Mgvime Monastery against erosive-mudflow processes, to test it at the laboratory, develop the methodology to design the facility and build it in the River Samonastro Khevi to protect the Shio-Mgvime Monastery from mudflows. The given works are accomplished under the financial support of Grant Project #AR-18-1244 of Shota Rustaveli National Science Foundation.

Elastic mudflow-regulating barrage

With the aim to protect the Shio-Mgvime Monastery against mudflows, by considering the topographic, geological, hydrological and hydraulic properties of the River Samonastro Khevi, an innovative design of a mudflow-regulating barrage was developed at Tsoetne Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University (GTU), whose scientific and technical priority was approved in 2020 by Georgian Patent License [Gavardashvili *et al.*, 2019].

The mudflow-regulating facility is made up of a surface of bank trusses (3), supports (4), trusses (5) and beams giving it additional stability (7), which are located in a manner as to form triangular prisms, with their bases with the holes to hold the ropes (8) are a support of the pockets of a semi-cylindrical shape formed with the ropes to be fixed (hung) in the body of the triangle bass along the current (1) and laterally (2).

Sizes of the mudflow-regulating facility: by considering the expected mudflow and site topography, the main impact force of a current passage strikes the mudflow-retaining pocket provided on the initial steps of the facility, while the subsequent quenching of energy is attained

gradually on the springboard surface at the expense of an elastic cylindrical surface. The sizes of the through force are directly associated with the diameter of the micro-transported stones of the expected mudflow. Owing to its elasticity, the designed facility is capable of receiving multiple impacts of the mudflow. The technical-economic advantage of the facility is that it is possible to use it for many times by untying the ropes and cleaning the facility. In addition, the construction elements with less complex shapes are used in the facility design that reduces the cost of construction [Kukhalashvili et al., 2019].

The innovative aspects of the elastic mudflow-regulating barrage are that the barrage is reliable and has long service life; it is stable and elastic to the impact force of the current and comes with better elasticity and reduced rigidity.

The design of the elastic mudflow-regulating barrage (Fig. 4) uses the construction structures of simple shapes and secondary resources reducing the construction costs drastically, while the multiple use of the barrage results in its high technical-economic value.

Hydrological and hydraulic calculation of the Samonastro Khevi River to regulate

The natural factors contributing to the erosive-mudflow processes on the Samonastro Khevi River and its tributaries are: 1) the geology of the territory: great thicknesses of loose non-cohesive rocks playing a role of hearths of solid mudflow material, 2) the type of precipitations: short, but intense downpours are typical to the given Region (Mtskheta Region), 3) peculiarities of the relief: a big water catch basin, well-developed erosive network with dense branches and symmetrical location and steep slopes of the gorge and slopes, and 4) poor vegetation cover on the vertical tear-off wall (virtually, without grass cover).

The 1% liquid flow in the Samonastro Khevi River was calculated with the dependence of Prof. G. Rostomov [Gavardashvili et al., 2013], which is as follows:

$$Q_{\max} = R \left[\frac{F^{0,66} \cdot K^{1,35} \cdot \tau^{0,38} \cdot I^{0,125}}{(L + 10)^{0,44}} \right] \cdot S \sigma \lambda \text{ (m}^3\text{/sec)}, \quad (1)$$

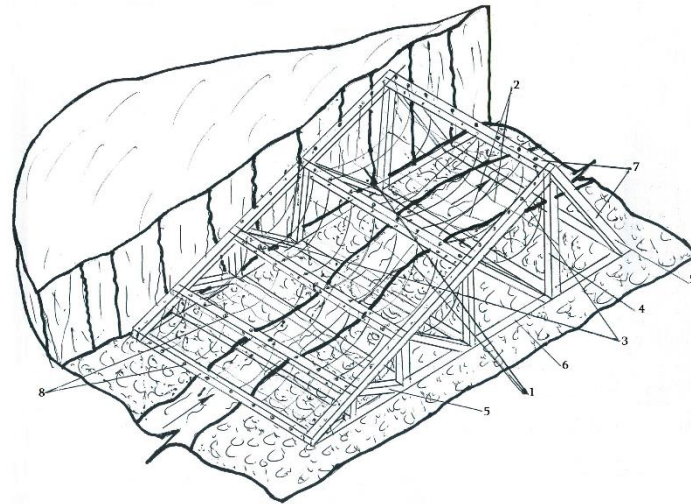
where: R is the regional coefficient and is 1,15 for the water catch basin of the Mtkvari River; F is the area of the water catch basin of the Samonastro Khevi River ($F = 0,0156 \text{ km}^2$), K is the climatic coefficient ($K = 5,5$); τ is the reoccurrence in years ($\tau = 100$ years); I is the average gradient of the watercourse ($I = 0,181$); L is the length of the watercourse ($L = 0,375 \text{ km}$); S is the soil index ($S = 0,82$); σ is the shape coefficient of the water catch basin ($\sigma = 1,14$), λ is the basin forestation coefficient ($\lambda = 0,893$). By inserting the data of the Samonastro Khevi River in dependence (1), we will gain:

$$Q_{\max} = 1,15 \left[\frac{0,064 \cdot 9,988 \cdot 5,754 \cdot 0,807}{2,80} \right] \cdot 0,835 = 1,33 \text{ (m}^3\text{/sec)}. \quad (2)$$

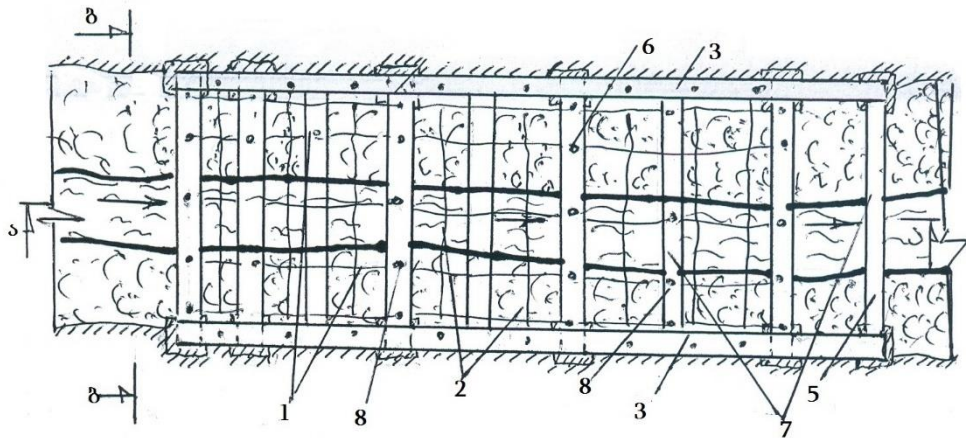
The density of turbulent mudflow (ρ) is calculated with the following dependence:

$$\rho = \frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w}, \quad (3)$$

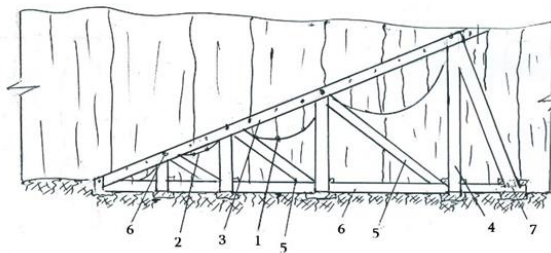
where: γ_m is the volume weight of the turbulent mudflow ($\gamma_m = 1,8$), γ_w is the water volumetric weight ($\gamma_w = 1,0$), γ_s is the volumetric weight of a stone ($\gamma_s = 2,65$). By considering the given values, by using dependence (3), we calculate the mudflow density, which is $\rho = 0,48$.



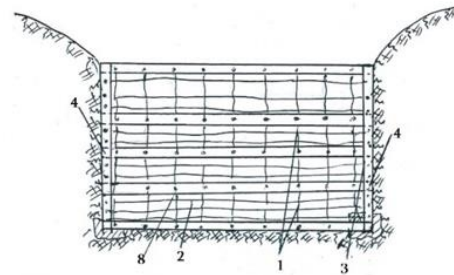
a) Elastic barrage in axonometry



b) Facility plan



c) Longitudinal section of the barrage



d) Cross section

Fig. 4. Elastic mudflow-regulating barrage

By using the given values, we calculate peak discharge of the turbulent mudflow with the following formula [Натишвили, Гавардашвили, 2018]:

$$Q_m = \frac{\gamma_w \cdot Q_w + \gamma_s \cdot \rho \cdot Q_w}{\gamma_m} = \frac{1,0 \cdot 1,33 + 2,65 \cdot 0,48 \cdot 1,0}{1,8} = 1,45. \quad (4)$$

As a result of the expedition studies accomplished in the Samonastro Khevi River in 2000-2019, it was determined that the mudflow passage mainly occurs from May to July, with the depth of $H=1,0$ m; the average diameter of solid fractions transported by the mudflow is 10-15 cm and their maximum diameter is 20-30 cm. However, in some cases, stone admixtures with the diameter of 40-50 cm were fixed in the bed of the Samonastro Khevi River.

In case of a peak discharge of the turbulent mudflow formed in the Samonastro Khevi River, the relevant velocity is calculated with the following dependence [Натишвили, Гавардашвили, 2018]:

$$V = \frac{6,5 \cdot H^{0,66} \cdot I^{0,25}}{\sqrt{\frac{\gamma_m(\gamma_s - 1)}{\gamma_s - \gamma_m}}} = \frac{6,5 \cdot 1,0^{0,66} \cdot 0,19^{0,25}}{\sqrt{\frac{1,8(2,65 - 1)}{2,65 - 1,8}}} = 2,29 \quad (5)$$

Thus, by knowing the main hydrological and hydraulic characteristics of the turbulent mudflow, at the next stage, we may consider the design engineering plans of an elastic mudflow-regulating barrage to protect the Shio-Mgvime Monastic Complex against the natural calamities.

Laboratory modeling of the elastic mudflow-regulating barrage

In order to provide a laboratory model of the elastic mudflow-regulating barrage, a hydraulic channel was selected at the hydraulic laboratory of Tsotne Mirtskhulava Water Management Institute with the following sizes: width – 0,36 m, height – 0,29 m, channel gradient variation – 0,01-0,06.

As for the model of the elastic mudflow-regulating barrage itself, its sizes are as follows by considering the parameters of the hydraulic channel: length of the model barrage – 0,60 m, width – 0,36 m, maximum height of the barrage is 0,15 m, number of steps is 3, length of the step base is 0,20 m, the sizes of the through network holes to provide in the elastic pockets are 5-7 mm in the first case, 4-5 mm in the second case and 203 mm in the third case (see Fig. 5).

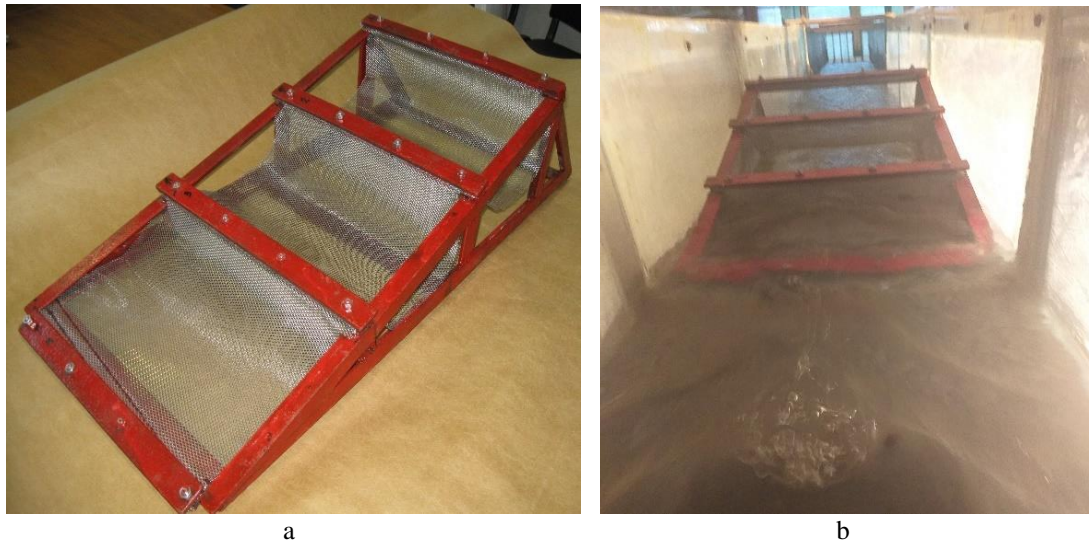


Fig. 5. Elastic mudflow-regulating barrage: a) laboratory model of the barrage; b) barrage in experiment

The test experiments on the laboratory model of the elastic mudflow-regulating barrage will be provided in terms of movement of the currents loaded with sediment through the hydraulic channel, where the following parameters of modeling similarity will be observed: the laboratory experiments will be done in terms of movement of the currents loaded with sediment through the hydraulic channel when dynamic similarity ($Fr = ident$), geometrical similarity (bed gradient $i = ident$), sediment movement ($V_{water}/V_{sediments} = ident$), bed resistance coefficient (Chezy's coefficient $C = ident$). At present, the experiment planning methodology is being specified with the aim to continue the works at the laboratory.

Conclusion

With the aim to efficiently regulate the mudflows, an innovative design of the elastic mudflow-regulating barrage was developed at Tsothe Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University (GTU) and the priority of its scientific-technical novelty was approved by Georgian Patent License (GE P 2020 7068);

Based on the available scientific literature and field and experimental studies, the geographical, climatic and geological conditions of the Samonastro Khevi River were evaluated and the principal hydrological and hydraulic parameters of the turbulent mudflow formed in the given River were calculated.

Aiming at developing the model of the elastic mudflow-regulating barrage, the design plans of the facility were developed, a laboratory model was prepared by using it and relevant scientific studies were accomplished at the hydraulic laboratory of Tsothe Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University (GTU).

The results of the primary scientific studies are satisfactory what allows continuing the laboratory studies in the future.

Acknowledgments

The scientific studies are accomplished under the financial support of Grant Project #AR-18-1244 “Elastic mudflow-regulating barrage” of Shota Rustaveli National Science Foundation.

References

- Assessment of hazard mapping system in Georgia and recommended actions (Road Map). (2018). Tbilisi, Georgia, 64 p.
- Gavardashvili G. (2011). Measures for the Safety of Mountain Landscapes During Natural and Tehnogenic Disasters. Tbilisi, Universal, 273 p. (in Georgian).
- Gavardashvili G.G., Chakhaia G.G., Tsulukidze L.N., Okriashvili O.K. (2013) Designing The Engineering-Environmental Measures To Protect The Shiomghvime Monastery Against Erosive And Mudflow Processes. // Proceedings of the 5th International Conference on Contemporary Problems in Architecture and Construction. June, 24-27, Saint-Petersburg, p. 7-12.
- Gavardashvili G., Kukhalashvili E, Kupreishvili Sh., Gavardashvili N. (2019). Elastic debris flow-regulating barrage. Georgian Patent #AP 2019 14656 A. Official, Bulletin of the Industrial Patent #15(523), SAKPATENTI, 12/08/2019, Tbilisi, p. 6.
- Guide for adaptation to the climate change. Tbilisi, 2016, p. 266.
- Kukhalashvili E.G., Gavardashvili G.V., Kupreishvil Sh., Gavardashvil N.G. (2019) - Designing and evaluating elastic debris flow-regulating barrage for efficient debris flow regulation. XIII International Conference on Environmental, Biological, Ecological Sciences and Engineering. WASET, Rome, Italy, December, 12-13, pp. 759- 762.
- Natural Hazards in Georgia. SENN, Tbilisi (2011), 65 p. [http://drm.cenn.org/paper_atlas/RA-part-3. pdf](http://drm.cenn.org/paper_atlas/RA-part-3.pdf)
- Натишвили О.Г., Гавардашвили Г.В. (2018). Гидравлический расчет противоселевого сооружения с донной решеткой для гашения кинетической энергии несвязного селевого потока с целью трансформации его в обыкновенный наносонесущий поток. // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 5-й Международной конференции Тбилиси, Грузия, 1-5 октября, с. 500 – 505



Сели 4 сентября 2017 г. на Охотоморском побережье о. Парамушир, Курильские острова

Т.А. Котенко, Л.В. Котенко

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
Россия, sinarka2017@mail.ru*

Аннотация. В статье публикуются материалы комплексного (полевого и камерального) исследования селей, сошедших 4 сентября 2017 г. по руслам р. Юрьева и девяти безымянных ручьев охотоморского побережья о. Парамушир. Пеший туризм очень популярен на острове. Река Юрьева является привлекательным природным объектом Северных Курил и обладает большим рекреационным потенциалом благодаря Верхне-Юрьевским горячим источникам. Однако периодически активизирующиеся селевые процессы практически не изучены и поэтому представляют угрозу для будущего развития туризма. Авторами определены основные характеристики селей, морфологические и геологические факторы селеобразования. Реализация селевого процесса стала возможна благодаря геолого-геоморфологическим особенностям речных бассейнов: большие уклоны русел и прилегающих склонов; интенсивное физическое и химическое выветривание горных пород, а также сейсмическая активность, способствующие накоплению рыхлообломочного материала (в т.ч. пирокластического) в седиментационных ловушках. Кроме того, пепел текущего извержения вулкана Эбеко, активно поступавший в русло, способствовал повышению мутности водотоков, усиливая их эрозионную способность. Наиболее мощный селевой процесс наблюдался в долине р. Юрьева: общая площадь очагов составила 16% от площади речного бассейна. В ходе исследования для бассейна р. Юрьева были также выявлены особенности механизма развития селевого процесса. На притоках основной реки формировались преимущественно водокаменные потоки. Они выносили материал в главное русло, где водокаменный селъ уже трансформировался в грязекаменный, сформировав в итоге обширный конус выноса и достигнув морского побережья. Селеобразующая сумма осадков составила около 100 мм на высоте 24 м. Полученные материалы в дальнейшем могут быть использованы для уточнения карт селевой опасности о. Парамушир.

Ключевые слова: *дождевой селъ; отложения; остров Парамушир; конус выноса; селевые очаги; лахар; эрозия; вулкан Эбеко*

Ссылка для цитирования: Котенко Т.А., Котенко Л.В. Сели 4 сентября 2017 г. на Охотоморском побережье о. Парамушир, Курильские острова. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 97–110.

Debris flows on September 4, 2017 on the Okhotsk coast of Paramushir Island, Kuril Islands

T.A. Kotenko, L.V. Kotenko

*Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch, Russian Academy of
Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, sinarka2017@mail.ru*

Abstract. In the article the materials of the complex (field and cameral) study of debris flows that have occurred along the Yuryeva River bed and the beds of nine unnamed streams on the Okhotsk coast of Paramushir Island on 4 September 2017 are published. Hiking is a popular type of tourism on the Islands. Yurieva River is an attractive natural site and has a great recreational potential due to the presence of Upper Yuriev hot springs.

However, debris flow processes periodically occurring in this valley are poorly studied and therefore pose a threat to the future development of tourism. The authors define its basic characteristics, morphological and geological factors of debris flow formation. "Favorable" geological and geomorphological features of the river catchments have also played an important role. They are: steep slopes of the river bed; intensive physical and chemical weathering of rocks, as well as seismic activity, contributing to the accumulation of loose material (including pyroclastic) in sedimentation traps. In addition, the ash of Ebeko current volcanic eruption, which actively entered the channels, contributed to the turbidity of water, increasing their erosion capacity. The most powerful debris flow process was observed in the Yuriev river catchment. Mainly water-rock flows were formed on the tributaries of the main river. They carried the material into the main channel, where the water-rock flow transformed into debris flow. The last one formed a vast fan and reached the sea coast. The debris flow forming precipitation was about 100 mm at an altitude of 24 m. In the future the obtained materials can be used to check up the maps of Paramushir Island debris flow hazard.

Key words: rain debris flow; Paramushir Island; sediments; fan; debris flow original sites, lahar; erosion, Ebeko volcano

Cite this article: Kotenko T.A., Kotenko L.V. Debris flows on September 4, 2017 on the Okhotsk coast of Paramushir Island, Kuril Islands. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: "Promotion" LLC, 2020, p. 97–110.

Введение

Район исследования расположен в северной части о. Парамушир, Курильские острова на охотоморском склоне хребта Вернадского в широтном диапазоне 50°41' – 50°46' с.ш. Протяженность участка по береговой линии составляет 9,2 км. При прохождении тайфуна «Санву» 4 сентября 2017 г. в бассейне р. Юрьева и прилегающих бассейнах ручьев без названия (РО1-9) (рис. 1) сформировались селевые потоки, ставшие частью процесса массового схода селей дождевого генезиса в северной части о. Парамушир [Котенко, 2018].

Специальных исследований селеопасности данных речных бассейнов до сих пор не проводилось, так как эта территория не осваивается в жилом или промышленном аспекте. Однако, в связи с интенсивным развитием туризма на Курильских островах, побережье острова и, особенно река Юрьева, становятся все более посещаемыми туристическими группами в летний период, поскольку по бортам и в ложе реки имеются многочисленные выходы высокоминерализованных ультракислых Верхне-Юрьевских горячих источников [Калачева, Котенко, 2013]. Выходы источников локализованы на участке абсолютных высот 370 - 600 м н.у.м. протяженностью около 1 км. Из-за узости долины места для ночевки часто выбираются на относительно ровных террасах, которые сформированы селевыми отложениями. В то же время морфологические, геологические, метеорологические, гидрологические условия данной территории, близость действующего вулкана Эбеко, сейсмоактивность региона создают условия для высокой селевой опасности [Атлас, 2009; Мальнева и др., 2014; Мелекесцев, 2006; Рыбальченко, 2012].

Представленные в работе результаты исследований базируются на следующих материалах:

- данные полевого обследования селевых отложений и русловых деформаций в бассейнах р. Юрьева и ручьев;
- данные фотосъемки, выполненной до селя и после него;
- спутниковые снимки, доступные на сервисе Google Earth (до селя) и снимки со спутника WorldView-2 за 6 и 13 сентября 2017 г. с

пространственным разрешением 0,46 м/пиксель (источник: <http://catalog.sovzond.ru>);

- метеорологические данные ближайшего пункта метеонаблюдений (аэрологической станции «Северо-Курильск»).

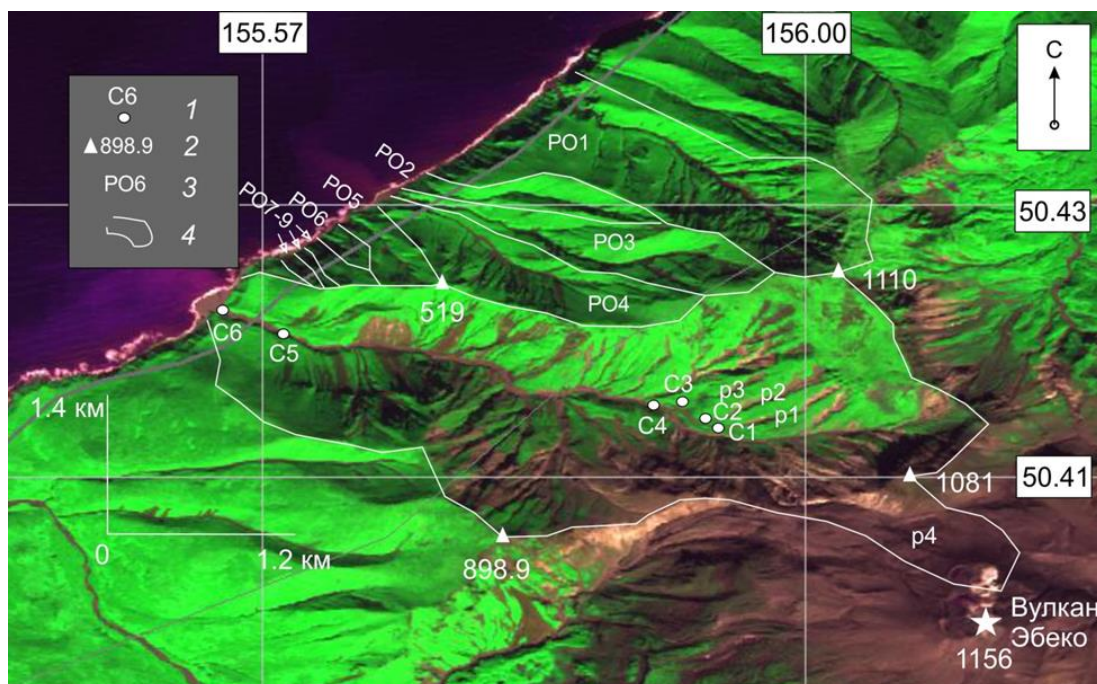


Рис. 1. Карта района. *Обозначения:* 1 - расчетные створы в русле р. Юрьева; 2 - главные высотные отметки (м н.у.м.); 3 - ручьи; 4 - границы водосборных бассейнов. В качестве картографической основы использован космический снимок спутника WorldView-2 за 6 сентября 2017 г.

Fig. 1. Map of the area. *Designations:* 1- control stations; 2- main elevation marks (m a.s.l.); 3- streams; 4- borders of the catchment. The WorldView-2 satellite image was used as a mapping basis

Факторы селеформирования

На изученном участке находится один крупный водоток – река Юрьева, которая имеет длину 5,5 км, площадь водосбора – 9,3 км², перистый тип речной сети. Исток реки расположен на западном склоне хребта Вернадского на абсолютной высоте 840 м с высшей отметкой водосбора – 1081 м. Общее падение русла реки около 840 м, средний уклон – 16 %. Долина реки Юрьева имеет корытообразную форму с очень крутыми склонами (30–75°), шириной по днищу – 9–12 м, высотой склонов – 400–600 м. Расходы воды в устье, по авторским данным за период с 2001 по 2019 гг., с июля по октябрь варьируют от 0,6 до 5 м³/с, в суточном ходе водности вечерний расход может превышать утренний в 2–2,5 раза за счет дневного таяния снежников. Вершина бассейна на протяжении 1,5 км представляет собой разветвленную систему глубоких врезов в крупную эрозионную котловину диаметром 2 км (рис. 2). Глубина врезов в среднем составляет 250–300 м.

Первоначальные области накопления материала для селевых потоков расположены на двух участках в верховье. Первый участок находится в пригребневой части эрозионной котловины, где интенсивными агентами разрушения горных пород являются физическое выветривание и сейсмическая активность. Крупные осыпные шлейфы формируются на склонах под линиями контакта с толщами лавовых потоков, с дайками и некками (рис. 3а). Концентрация обломочного материала происходит в седиментационных ловушках (рис. 3а, б) (рытвины, врезы, углубления, русла

постоянных и временных водотоков) за счет интенсивных склоновых гравитационных процессов.



Рис. 2. Верхняя часть бассейна р. Юрьева с эрозионными врезами постоянных водотоков в августе 2017 г. Фото Т.А. Котенко

Fig. 2. Upper reaches of Yurieva River and catchment erosion cuts of a permanent watercourse in August 2017. Photo by T.A. Kotenko





Рис. 3. Потенциальные селевые массивы в августе 2017 г.: а - осыпные шлейфы под г. Зеленая, заполняющие эрозионные врезы; б - крупнообломочный материал осыпей в устье руч. Горячий. Фото Котенко Л.В.

Fig. 3. Potential debris flow massifs in August 2017: a - scree fans under mount Zelenaya fill the erosion cuts; b - large-block scree material at Goryachy Stream mouth. Photo by Kotenko L.V.

Второй участок расположен на северном склоне действующего вулкана Эбеко, покрытом неконсолидированным пирокластическим чехлом (рис. 4), где берет свое начало левый приток реки (см. р4 на рис. 1).

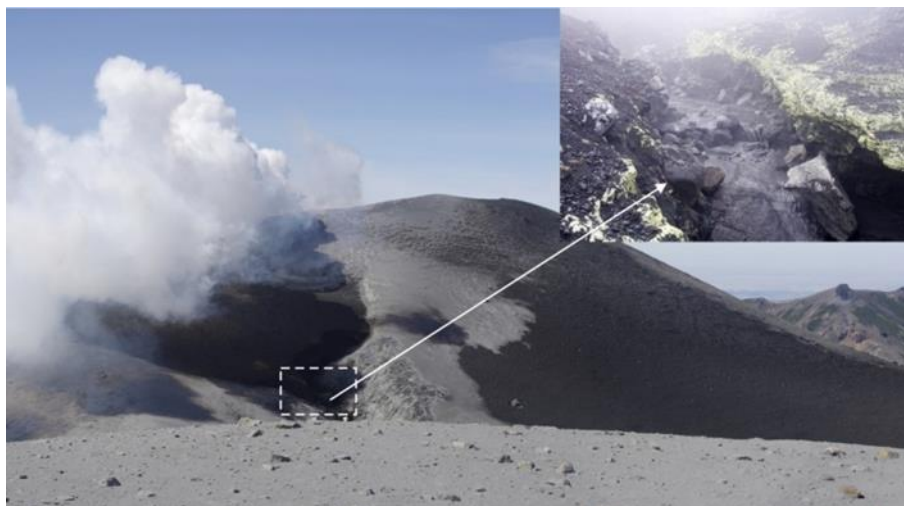


Рис. 4. Приток реки Юрьева, дренирующий конус вулкана Эбеко и неконсолидированные пирокластические отложения. Мутная вода ручья содержит тонкодисперсные пеплы. Фото Т.А. Котенко

Fig. 4. Tributary of Yurieva River drains the Ebeko volcano cone and unconsolidated pyroclastic deposits. The muddy water of the stream contains fine ash. Photo by T.A. Kotenko

Современная стадия развития вулкана Эбеко по [Мелекесцев, 2006] характеризуется отсутствием эффузивной деятельности и значительной денудацией постройки. При этом наблюдаются частые и продолжительные периоды (до 4-х лет) эксплозивной активности вулкана Эбеко с продуктами извержений от тонкодисперсных пеплов (менее 0,063 мм) до вулканических бомб массой более 10 т. В 2017 г. вулкан находился в стадии извержения, начавшегося в октябре 2016 г. [Котенко и др., 2018]. Повсеместно наблюдались отложения свежего тонкодисперсного пепла. Их толщина уменьшалась при удалении от конуса вулкана к устью реки от 1,5 м до 1–2 мм. В нижних частях склонов (высоты 370-600 м н.у.м.) на протяжении 1 км наблюдается также активное химическое выветривание в местах выходов многочисленных кислых термальных источников (температура воды до 87°C, водородный показатель (рН) до 1,27) [Калачева, Котенко, 2013].

Склоны в пределах эрозионной котловины задернованы фрагментарно, ниже по течению реки – почти сплошным покровом за исключением эрозионных врезов, рытвин, участков скальных обнажений и останцов. Растительный покров представлен ольховым стлаником с альпийскими луговинами, верещатниками и мхами. В днище долины на отдельных участках сохранились старые селевые террасы мощностью до 5 м, которые заросли разнотравьем и кустарниками: ольхой и рябиной, широко развиты мхи. Почвы, сформированные на задернованных склонах долины, имеют морфологические особенности, характерные для всех синлитогенных вулканических почв о. Парамушир [Гришин, Шляхов, 2008]: наблюдается переслаивание суглинков и супесей со слоями пеплов вулкана Эбеко и транзитных пеплов, преимущественно мелкодисперсной фракции.

Ближе к устью р. Юрьева прорезает морские террасы 25–30 м высоты, которые служат промежуточным базисом эрозии. В верхнем течении русло прямолинейное. В среднем и нижнем течении русло извилистое с выраженной боковой эрозией. Все дно русла, кроме порогов и перекатов, выстлано перлювием монотонного грубообломочного глыбово-галечного состава. На изгибах русла сформированы зачаточные прирусловые отмели, сложенные более мелкообломочным аллювием.

Твердую составляющую селей способны обеспечивать разрушающиеся эрозионными и склоновыми процессами андезитовые и андезибазальтовые вулканогенные образования, неконсолидированная пирокластика вулканического конуса Эбеко. Мелкозем также поставляется суглинками и пеплами почвенно-пирокластического чехла и отложениями пеплов текущих извержений вулканов.

Ручьи охотоморского побережья на рассматриваемом участке стекают с крутых склонов северо-западной ориентации. Их длина варьирует от 1 до 3 км, площади водосборов не превышают 2 км², уклоны тальвегов составляют в среднем 30–65%. Часть ручьев разгружается непосредственно в море, часть имеет висячие устья с водопадами. Склоны задернованы сплошным покровом, растительный покров и почвы схожи с бассейном р. Юрьева. Расходы ручьев в летне-осеннюю межень малы (менее 2×10⁻³ м³/с), часть из них, например РО5-9 (см. рис. 1) к середине августа пересыхают. Согласно общей типологии водосборов с проявлением селевого процесса [Перов, 2003] данные водосборы относятся к классам долинных простого типа (РО1-4) и склоновых элементарного типа (РО5-9). Селевые отложения во всех случаях концентрируются на конусах выноса, которые фрагментарно сохранились в устьях всех этих ручьев. Твердая составляющая селей обеспечивается главным образом гравитационными процессами (осыпи, обвалы, сплывы) и накоплением продуктов обрушений в днищах долин.

Результаты исследований и их обсуждение

Многочисленные селевые очаги на склонах долины р. Юрьева первоначально были установлены по данным дешифрирования космических снимков WorldView-2 за 6 и 13 сентября 2017 г. с пространственным разрешением 0,46 м (Интернет-ресурс: <http://catalog.sovzond.ru>) (см. рис. 1).

Для заверки дешифрирования использованы данные полевых описаний и измерений морфологических параметров и фотосъемки. Наблюдались следующие типы очагов (рис. 5): эрозионные рытвины в рыхлообломочных отложениях; эрозионные врезы постоянных водотоков; береговые ниши срыва; оплывины. Общая площадь очагов составила около 1,5 км², то есть 16% от площади речного бассейна.



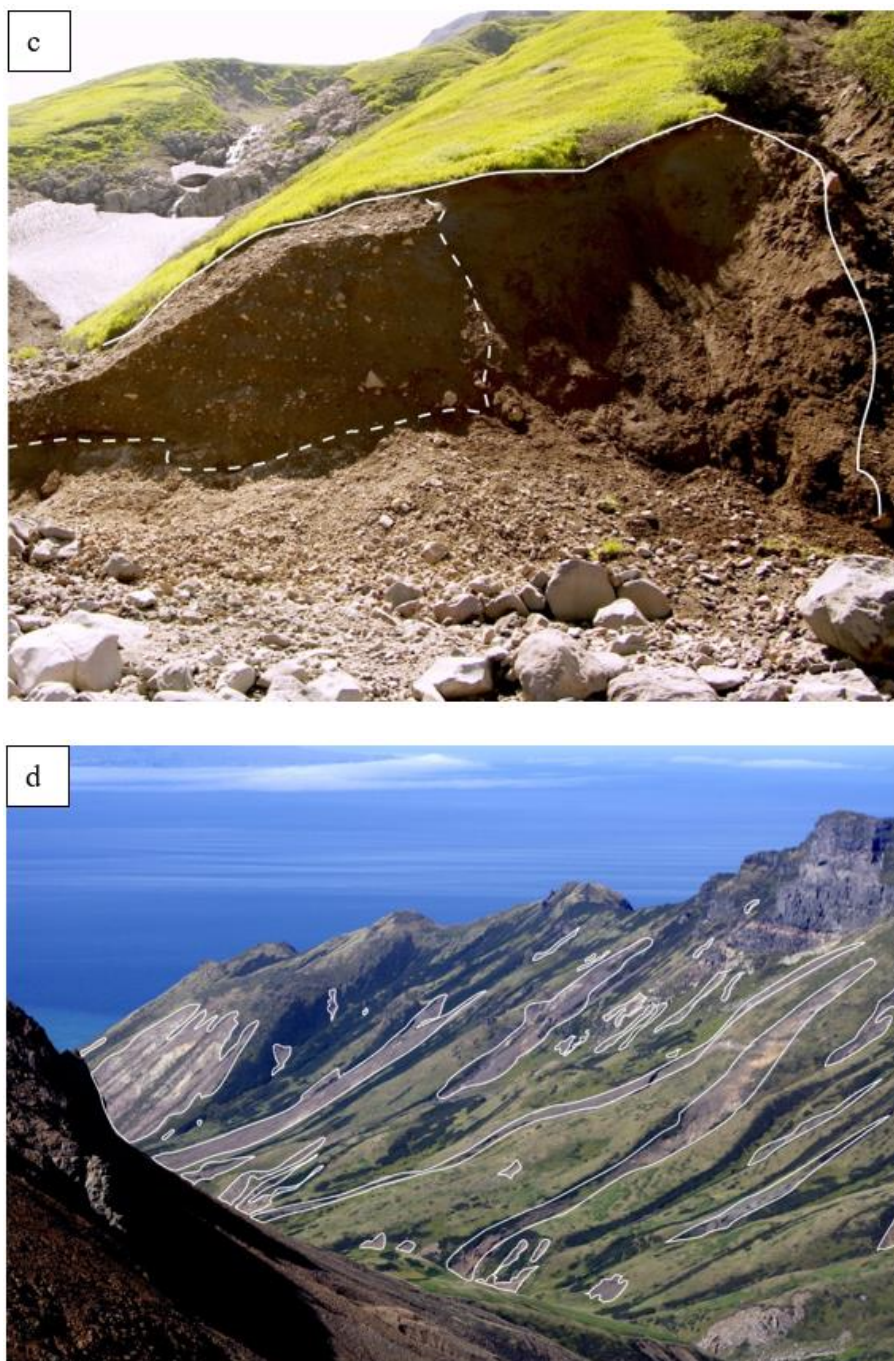


Рис. 5. Типы селевых очагов в бассейне р. Юрьева: а - эрозийные рытвины в рыхлообломочных отложениях, б - эрозийный врез постоянного водотока, с - береговая ниша срыва (сплошная линия), частично заполненная селевой массой (пунктир), d - оплывины. Фото Т.А. Котенко

Fig. 5. Types of debris flow origination sites in the Yuriyeva River catchment: a - erosion gullies in loose sediments; b - erosion cut of a permanent watercourse; c - bank failure niche (solid line) partially filled with debris flow deposits (dotted line); d - earthflows. Photo by T.A. Kotenko

В устье большинства притоков селевых отложений не обнаружено. Притоки р. Юрьева заложены на крутых склонах долины без промежуточных базисов эрозии, поэтому селевой материал разгружался прямо в главное русло и дальше транспортировался основным потоком. Исключение составляют три ручья, обозначенные как р1, р2 и р3 на рис. 1, на северном склоне долины, которые сначала разгружаются в распадке, отделенном от главного русла невысоким вытянутым вдоль

русла холмом, а после единым потоком впадают в основную реку. Ручьи заложены в эрозионных врезках шириной от 8 м до 140 м, глубина врезок меняется от 1 м до 15 м. Длина ручьев составляет 0,66–1 км, средний уклон тальвега – 33,7–35,7%. 16 августа 2019 г. расходы воды в устье ручьев составляли 0,05–0,2 л/с, полученные селевые расходы даны в таблице 1. Наиболее крупные формы отложений селевого материала зафиксированы на р2 в виде селевой гряды с правого борта (рис. 6) и центрального поля аккумуляции.



Рис. 6. Селевая гряда с правого борта ручья. Фото Л.В. Котенко

Fig. 6. Debris flow levee on the right side of the stream. Photo by L.V. Kotenko

Максимальная высота селевой гряды составила 1,9 м, длина 10 м. Дно распадка до схода селей было ровно вымощено галечником, а после схода селей остался врез до коренных пород глубиной до 1,5 м и шириной до 4 м. В бортах ручьев хорошо сохранились метки высших селевых уровней. В совместном устье ручьев р1–3 ширина увеличилась с 2 м до 7,6 м.

Прохождение селей зафиксировано на всех без исключения притоках по донной и боковой эрозии русел (рис. 7), особенно в приустьевой части, для ручьев с задернованными долинами – по срыву почвенного покрова и уничтожению растительности. На ручье Горячем, заложеном в магматических породах, произошла полная зачистка днища долины от накопленного там материала склоновых осыпей.

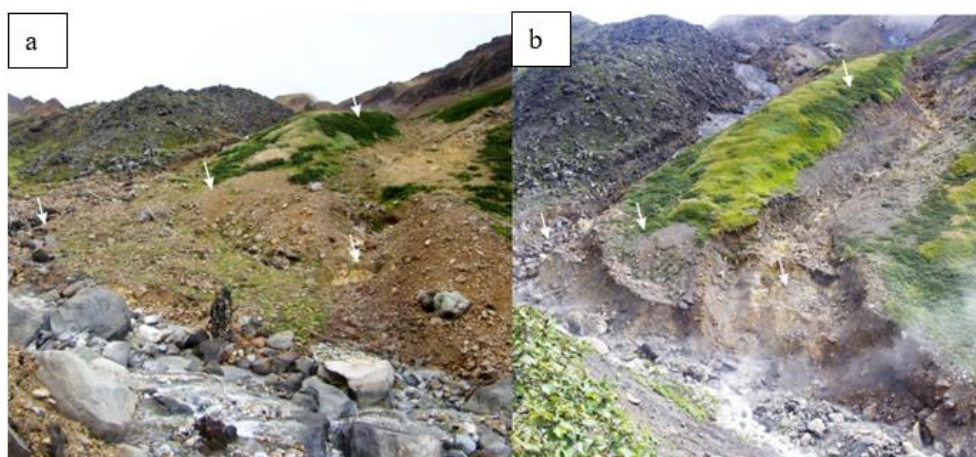


Рис. 7. Участок левого борта р. Юрьева до (а) и после (б) селя. Стрелки показывают общие точки склона. Фото Т.А. Котенко

Fig. 7. Section of the left slope of the Yurieva River before (a) and after (b) the debris flow. Arrows show the same points of the slope. Photo by T.A. Kotenko

Авторы считают важным указать на то, что селевой поток, сформировавшийся на ручье р4 (см. рис. 1) следует считать лахаром [Vallance, 2005], а более точно (в соответствии с отечественной классификацией) – холодным лахаром [Виноградов, 1980], поскольку ручей дренирует конус действующего вулкана Эбеко, покрытого легко размываемой толщей рыхлообломочного материала, в том числе свежих пеплов текущего извержения. Дополнительным фактором селеносности данного ручья является постоянная высокая мутность вод (повышающая его эрозионные способности), которая обеспечивается смывом мелкодисперсной фракции пирокластического чехла и поступлением свежего вулканического пепла во время эксплозий вулкана. Следы движения рыхлообломочного материала зафиксированы в виде многочисленных эрозионных рытвин, ориентированных вниз по склону. Русло ручья претерпело значительную деформацию за счет донной и боковой эрозии.

В русле р. Юрьева признаки прохождения селя наблюдаются с высоты около 790 м н.у.м. Сначала сформировался водокаменный поток, морфологические следы селя выражены главным образом в донной и боковой эрозии. Глубина вреза русла местами достигает 2,5 м. Первая селевая терраса без признаков сортировки (сформированная разгрузкой в главное русло грязекаменных селей, сошедших по нескольким левым притокам) находится на высоте 400 м н.у.м. по левому борту. Ее максимальная высота составляет 1,9 м, длина – 60 м, ширина – 2–3 м. Далее снова следует участок с признаками движения водокаменного селя вплоть до высоты 340 м н.у.м.: здесь при слиянии основного русла с правым селеносным притоком остались следы заплеска грязекаменного потока на противоположном склоне. Ниже по течению реки наблюдаются следы грязекаменного потока, признаками которого являются: отсутствие донной эрозии; мощная боковая эрозия с береговыми нишами срыва участков, сложенных рыхлыми отложениями; селевая замазка стволов и веток ольхового стланика в нижних частях склонов. В зоне аккумуляции зафиксированы селевые отложения в виде многоярусных боковых террас без выраженной сортировки (от двух до четырех) и широкий селевой конус выноса (рис. 8).



Рис. 8. Зона аккумуляции, 3.07.2018 г. Фото Л.В. Котенко Л.В.

Fig. 8. Accumulation zone, 3 July 2018. Photo by L.V. Kotenko

Селевой поток занимал все днище долины, поэтому растительность здесь уничтожена. Зона аккумуляции, в которой сосредоточен максимальный объем селевого материала, находится ниже высоты 62 м н.у.м. (0,5 км до береговой линии). При сохранении величины уклона русла (в среднем 13,5%) ниже этой высоты долина расширяется (по сравнению с вышележащим прямолинейным участком в лавовом

зажиге протяженностью около 300 м) и становится более извилистой. Здесь сформировались в несколько этапов террасы мощностью до 6 м. На высотном участке от 9 до 18 м н.у.м. отметка высшего селевого горизонта находится на высоте 8 м над руслом. Максимальная высота прохождения селя зафиксирована на высотах 60–90 м н.у.м. на узком скальном участке русла, где она составляла 9 м. Наблюдался перенос потоком валунов до 2 м в поперечнике.

На открытом участке морского берега селевые отложения имеют форму широкого конуса выноса: ширина надводной части составляла 270 м, длина – 110 м, максимальная мощность отложений – 6 м. Селевые отложения конуса выноса увеличили размер суши в береговой черте на 0,02 км². Но следует отметить, что высокая интенсивность приливных и штормовых процессов способствует быстрому размыву его фронтальной части. Так, в августе 2019 г. зафиксировано отступление бровки поля селевых отложений на 30–40 м.

В ходе полевых исследований были получены следующие морфометрические характеристики селевого потока в русле р. Юрьева:

- максимальная высота селевого очага – 1070 м н.у.м.;
- длина пути селя – 5,5 км;
- объем селевых отложений в зоне аккумуляции – 297 тыс. м³;
- объем селевых отложений в зоне транзита – 3 тыс. м³;
- максимальная толщина селевых отложений – 8 м;
- площадь зоны аккумуляции – 463 тыс. м²;
- суммарный объем твердой составляющей селя – 300 тыс. м³.

Оценка объема селевых отложений на конусе выноса вероятнее всего занижена, так как селевой поток частично разгрузился в море.

В таблице приведены полученные динамические характеристики селевых потоков, сошедших по главному руслу р. Юрьева и трем ее притокам. Расчет характеристик проводился по известным методикам, приведенным в «Руководстве селестокосным станциям и гидрографическим партиям. Вып. 1. Организация и проведение работ по изучению селей» [Гидрометеиздат, Москва, 1990].

Таблица. Динамические характеристика селевых потоков 4.09.2017 г. Расчетные створы показаны на рис. 1

Table. Dynamic characteristics of debris flows, occurred on 4 September 2017. Control stations are shown in Fig. 1

№ створа	Абсолютная высота, м	Средний бытовой расход в межень, м ³ /с	Максимальная глубина потока, м	Скорость по В.В. Голубцову, м/с	Скорость по диаметру селевых глыб, м/с	Уклон, %	Площадь створа, м ²	Максимальный расход селя по В.В. Голубцову, м ³ /с	Максимальный расход селя по диаметру обломков глыб, м ³ /с	Максимальный удельный расход селевого потока на 1 м ширины потока, м ³ /с
C1	406	0,5×10 ⁻⁴	1	3,8	3,1	38,9	4	15	12	3,8
C2	401	1,5×10 ⁻⁴	2	6,1	5,1	37,4	22	133	111	12,1
C3	374	2×10 ⁻⁴	1,5	5,0	4,4	39,2	11,4	57	50	7,6
C4	330	0,19	5	9,6	5,8	15,0	80	767	464	47,9
C5	60	0,7	6	6,5	5,7	13,0	150	974	848	39
C6	18	0,86	8	5,5	5,7	2,6	200	1091	1131	43,6

Севернее р. Юрьева, селевые отложения и деформации русел установлены только для ручьев ОР1-9 (рис. 1).



Рис. 10. Ручьи PO3 и PO4: оплывины (сплошная линия) и два селевых конуса выноса (пунктир). Фото Т.А. Котенко Т.А.

Fig. 10. Streams PO3 and PO4: earthflows (solid line) and two fans (dotted line). Photo by T.A. Kotenko

Селевые очаги были представлены двумя типами: эрозионными рытвинами в рыхлообломочных отложениях и оплывинами. Отложения водокаменных потоков сосредоточены в устьях в виде конусов выноса с выраженной сортировкой материала по крупности (PO1-4) (рис. 10) и без сортировки в случае висячего устья (PO5-9). Также наблюдалась значительная эрозия русел (донная и боковая). Ширина фронта конусов выноса на дату обследования (30.06.2018 г.) не более 120 м, объемы селевых отложений – от $\sim 100 \text{ м}^3$ до $\sim 4000 \text{ м}^3$. Возможно, объем селевых отложений в зоне аккумуляции ручьев PO1-4 занижен, так как селевые потоки частично разгрузились в море, а впоследствии их фронтальные части были размывы.

Метеорологические селеобразующие факторы

Для анализа метеорологических факторов, вызвавших сход селей, были привлечены данные ближайшего пункта метеонаблюдений: аэрологической станции «Северо-Курильск» (8 км от вершины речного бассейна, абсолютная высота 24 м). Интенсивность и накопление сумм осадков анализировались по измерениям автоматического метеорологического комплекса АМК. Суммы осадков корректировались по данным осадкомера Третьякова, так как датчик жидких осадков АМК не регистрирует слабые осадки (менее 0,3 мм). Причиной массового схода селей в северной части о. Парамушир, в том числе и на рассматриваемой территории, стали очень сильные осадки, вызванные прохождением тайфуна «Санву». Дождь начался 3 сентября в 19:15 местного времени (UTC+11 час), шел с переменной интенсивностью (максимальное значение 2,8 мм/10 мин) до 15:46 4 сентября (рис. 11). С 15:47 до 16:20 интенсивность осадков резко возросла, достигнув в 5-ти минутный промежуток времени, начиная с 16:06, максимума за дождь – 7,2 мм/10 мин, накопленная сумма осадков составила к этому часу около 100 мм. В бассейнах рек восточного побережья о. Парамушир (р. Кузьминка и р. Матросская) около 16 ч паводки трансформировались в селевые потоки [Котенко, 2018]. Вероятнее всего, высокая интенсивность дождя стала спусковым механизмом для зарождения селей и в бассейне р. Юрьева. Сильный дождь

продолжался до 18 ч, после чего еще 8 часов наблюдались слабые осадки. Осадки продолжались 32 ч 35 мин, сумма осадков составила 148,9 мм.

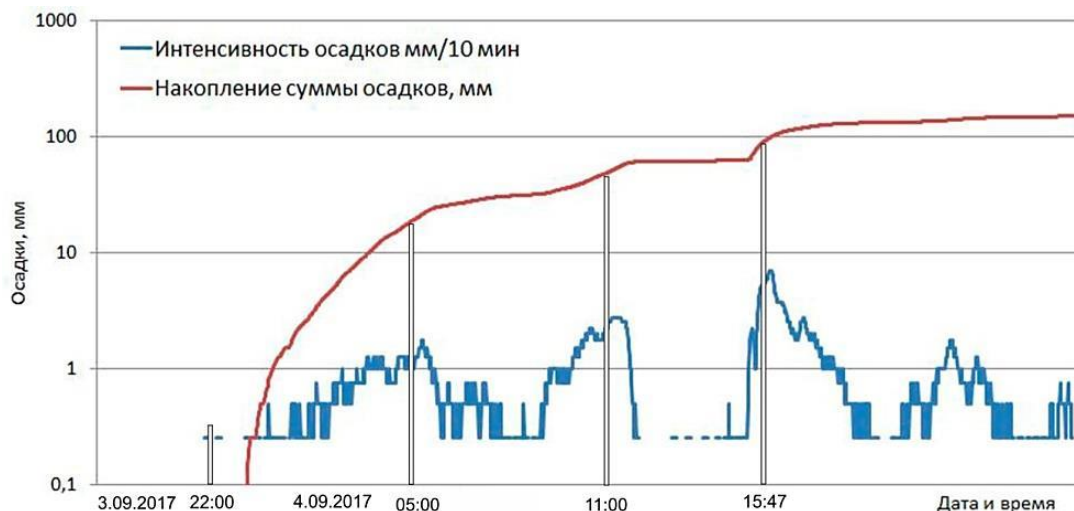


Рис. 11. Данные об осадках на аэрологической станции «Северо-Курильск» (24 м н.у.м.) показывают накопление суммы осадков и их интенсивность за 4 сентября 2017 г.

Fig. 11. Precipitation data from aerological station “Severo-Kurilsk” showing accumulation of precipitation and their intensity for 4 September 2017

Заключение

Впервые получены данные о массовом селеообразовании на охотоморском побережье северной части о. Парамушир 4 сентября 2017 г. Водокаменные потоки сошли по руслам девяти ручьев, в устье которых селевые отложения аккумулировались в виде конусов выноса с объемом материала не более 4000 м³.

Наиболее значительный селевой процесс наблюдался в бассейне р. Юрьева (о. Парамушир). Следы прохождения селей установлены на всех ее притоках, откуда сели разгружались в главное русло (за исключением трех ручьев по правому борту, селевой материал которых частично отложился в параллельном главному руслу распадке). Идентифицированы многочисленные селевые очаги следующих типов: эрозионные рытвины в рыхлообломочных отложениях, эрозионные врезы постоянных водотоков, береговые ниши срыва, оплывины. Селевой поток на притоке, стекающем с конуса вулкана Эбеко, следует идентифицировать как лахар (холодный), так как его твердая составляющая была представлена отложениями пеплов текущего извержения вулкана. Общая площадь селевых очагов составила около 1,5 км² или 16% от площади речного бассейна. Тип зарождения селей определен как эрозионно-сдвиговой. В русле р. Юрьева признаки движения водокаменного потока зафиксированы с высоты 790 м н.у.м., ниже по течению, с высоты 340 м н.у.м., произошла его трансформация в грязекаменный поток. Расход селя в устье превысил средний бытовой расход в летне-осеннюю межень более чем в 1 300 раз. В устье реки селевые отложения имеют форму широкого конуса выноса, благодаря которому изменилась конфигурация береговой линии, а прирост суши составил 0,02 км². Суммарный объем твердой составляющей селя, по минимальной оценке, составляет около 300 тыс. м³. Таким образом, проведенное исследование позволило детально охарактеризовать особенности развития селевого процесса в бассейне р. Юрьева.

Активизация селевых процессов была вызвана атмосферными осадками высокой интенсивности при прохождении тайфуна «Санву». Селеформирующая сумма осадков на высоте 24 м составила около 100 мм. Сели западного берега о. Парамушир стали

частью массового селеформирования на севере о. Парамушир, что свидетельствует о типичности данного опасного процесса для исследуемой территории.

Полученные материалы в дальнейшем могут быть использованы для уточнения карт селевой опасности о. Парамушир и принятия мер по обеспечению безопасности отдыхающих здесь туристов.

Список литературы

- Атлас Курильских островов. Москва, Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009. 516 с.
- Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеониздат, 1980. 144 с.
- Гришин С. Ю., Шляхов С.А. Растительность и почвы острова Парамушир (Северные Курилы). – География и природные ресурсы. 2008, № 4, с. 96–103.
- Калачева Е.Г., Котенко Т.А. Химический состав вод и условия формирования Верхне-Юрьевских термальных источников (о. Парамушир, Курильские острова). - Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». 2013, № 2 (22), с. 55–68.
- Котенко Т.А., Котенко Л.В. Дождевые сели 4 сентября 2017 г. в северной части острова Парамушир, Курильские острова. – Геориск. 2018, Том XII, № 3, с. 46–55.
- Котенко Т. А., Сандиминова Е.И., Котенко Л.В. Извержения вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2016–2017 гг. – Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». 2018, № 1 (37), с. 32–42.
- Мальнева И.В., Кононова Н.К., Крестин Б.М. Активность селей на Курильских островах в период современных изменений климата. – Геориск. 2014, № 3, с. 28–32.
- Мелекесцев И.В. Действующие и потенциально активные вулканы Курило-Камчатской островной дуги в начале XXI в.: этапы исследований, определение термина «действующий вулкан», будущие извержения и вулканическая опасность. – Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». 2006, № 1 (7), с. 15–35.
- Перов В.Ф. Селеведение. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 274 с.
- Рыбальченко С.В. Селевая опасность населенных пунктов Сахалинской области. - Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе, Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы, Иркутск. 2012, Том. 2, с. 118–120.
- Vallance J.W. Volcanic debris flows. – In M. Jacob, O. Hungr (eds), Debris-flow hazards and related phenomena. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 2005, pp. 247–274.



Завальные плотины и катастрофические прорывные паводки в долинах рек Памира

А.Л. Стром

ООО «Центр геодинамических исследований», Москва, Россия,
strom.alexandr@yandex.ru

Аннотация. Крупные скальные оползни и каменные лавины широко развиты в глубоких долинах Памирских рек. Многие из этих оползней образовывали завальные плотины, большинство из которых было затем прорвано и промыто на значительную глубину. Следы колоссальных доисторических прорывных паводков могут быть установлены по характерным сочетаниям геологических и геоморфологических признаков. Таковыми являются: 1) обширные площади развития селевых отложений ниже по течению от прорванных завальных плотин, что наблюдается, в частности, в верховьях бассейна р. Кокча в Афганском Бадахшане; 2) выпуклые поперечные профили конусов выноса крупных рек на выходе из горных хребтов. Такие профили характерны для сравнительно небольших конусов выноса, образованных селевыми потоками, но являются аномальными для больших рек с постоянным водотоком. Наиболее яркий пример – река Пяндж на выходе из Даравазского хребта; 3) аномально крутые продольные профили речных долин на участках между двумя прорванными завальными плотинами, верхняя из которых создавала подпрудное озеро, а ее основание было защищено от размыва материалом, вынесенным из тела плотины и отложенном на участке между двумя завалами. Такие продольные профили описаны в долинах рек Пяндж и Гунт. Изучение подобных явлений помогает оценить, что может произойти при прорыве существующих подпрудных озер или озер, которые могут образоваться в будущем.

Ключевые слова: скальный оползень, завальная плотина, подпрудное озеро, прорывной паводок, конус выноса, продольный профиль, сель, наносоводный паводок

Ссылка для цитирования: Стром А.Л. Завальные плотины и катастрофические прорывные паводки в долинах рек Памира. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 111–121.

Rockslide dams and catastrophic outburst floods in the river valleys of the Pamir mountains

A.L. Strom

“Geodynamics Research Center“ LLC, Moscow, Russia, strom.alexandr@yandex.ru

Abstract. Deep river valleys in Pamir are rich of large-scale rockslides and rock avalanches. Many of them form natural blockages though most of such natural dams have been breached and deeply eroded. Evidence of the outstanding prehistoric outburst floods can be revealed based on several sets of the geomorphic and geological data: 1) vast area covered by debris flow deposits downstream from the breached landslide dams, such as in the upper reaches of the Kokcha River basin in Afghan Badakhshan; 2) convex profiles of the alluvial fans of large rivers where they leave mountain ranges. Such profiles are typical of relatively small fans formed by debris flows, but are abnormal of large rivers with permanent flow. The most impressive one is that of the Pyanj River where it comes out from the Darvaz Range; 3) the anomalously steep longitudinal profiles of river valleys at their sections between two breached natural dams. The upstream one had formed large lake and its lower part had been protected from incision by the material eroded from this

dam and stored in the trap between two dams. Such phenomena were found in the Pyanj and Gunt River valleys. Study of these events helps to estimate what could happen after breach of the existing or future rockslide dammed lakes.

Key words: *rockslide, landslide dam, dammed lake, outburst flood, alluvial fan, longitudinal profile, debris flow, debris flood*

Cite this article: Strom A.L. Rockslide dams and catastrophic outburst floods in the river valleys of the Pamir mountains. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 111–121.

Введение

Памир – одна из наиболее высоких горных систем в Азии. Протекающие здесь реки выработали глубокие долины с крутыми склонами, что создало предпосылки для формирования многочисленных крупных скальных оползней. Многие из них перегораживали речные долины, создавая подпрудные озера, некоторые из которых существуют вплоть до настоящего времени. Крупнейшие из них – Сарезское, Яшилькуль, Шива, содержат кубические километры воды и их гипотетически возможный прорыв чреват чрезвычайно тяжелыми последствиями. Большинство же завальных плотин, выявленных на Памире, в том числе на крупных реках, было прорвано и промыто на значительную глубину, причем в ряде случаев удалось найти признаки, указывающие на то, что эти прорывы имели катастрофический характер (рис. 1). Изучение следов таких доисторических катастроф дает дополнительную информацию о том, что может произойти в случае прорыва какого-либо из существующих подпрудных озер или озер, которые могут образоваться при обрушении потенциально неустойчивых склонов в будущем.

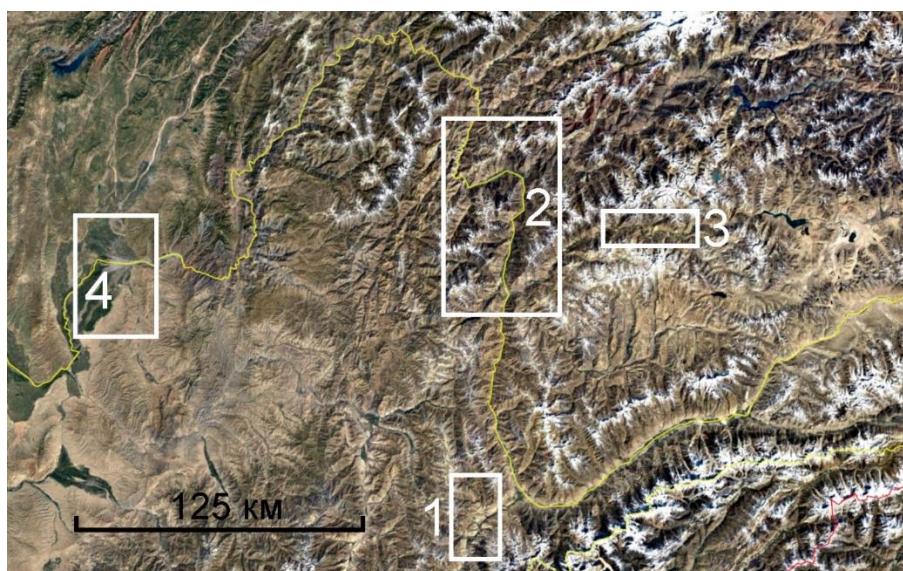


Рис. 1. Положение участков на Памире, где обнаружены признаки, указывающие на то, что в прошлом здесь происходили катастрофические прорывные паводки. 1 – в верховьях бассейна р. Кокча (Афганский Бадахшан); 2 – в средней части долины р. Пяндж; 3 – в средней части долины р. Гунт; 4 – на выходе р. Пяндж из Дарвазского хребта

Fig. 1. Position of sites in Pamir with evidence of the past catastrophic outburst floods. 1 – in the upper reaches of the Kokcha River basin (Afghan Badakhshan); 2 – in the middle reaches of the Pyanj River valley; 3 – in the middle reaches of the Gunt River valley; 4 – where the Pyanj River leaves the Darvaz Range

В предлагаемой статье рассмотрено несколько примеров, когда анализ геолого-геоморфологических особенностей участков речных долин на Памире позволил выявить следы катастрофических прорывных паводков. Детальное изучение некоторых из участков, обозначенных на рис. 1, позволило также сделать вывод об одновременности образования нескольких завальных плотин, что является дополнительным аргументом в пользу предположения об обрушении высоких скальных склонов при сильных доисторических землетрясениях.

Доисторические прорывные паводки

Первый участок, где следы ранее произошедших прорывных паводков наиболее очевидны и однозначны, располагается в Афганском Бадахшане, в верхней части бассейна р. Кокча (1 на рис. 1), у слияния рек Дакханзар и Шульвадар [*Strom, Abdrakhmatov, 2018*]. На космическом снимке (рис. 2) хорошо видны следы мощных селевых потоков, произошедших, по-видимому, сравнительно недавно, поскольку их поверхность практически полностью лишена растительности. Потоки отличались большой мощностью, так как их отложения заполнили дно долины на протяжении около 7 км на всю его ширину, превышающую, местами, 1 км, и даже подпрудили небольшую долину притока, отмеченную на рис. 2 как 'P'. При общей площади этих отложений примерно 5.5 км², объем вынесенного материала составлял несколько десятков миллионов кубометров, что намного превосходит объем отложений большинства селевых потоков, вызванных атмосферными осадками и, даже, прорывом ледниковых озер. Все это позволяет достаточно обоснованно предполагать, что эти селевые потоки, зародившиеся в двух смежных долинах, каждая из которых была перекрыта несколькими крупными, ныне прорванными, завальными плотинами, произошли именно при прорыве озер, образованных этими плотинами (рис. 3).

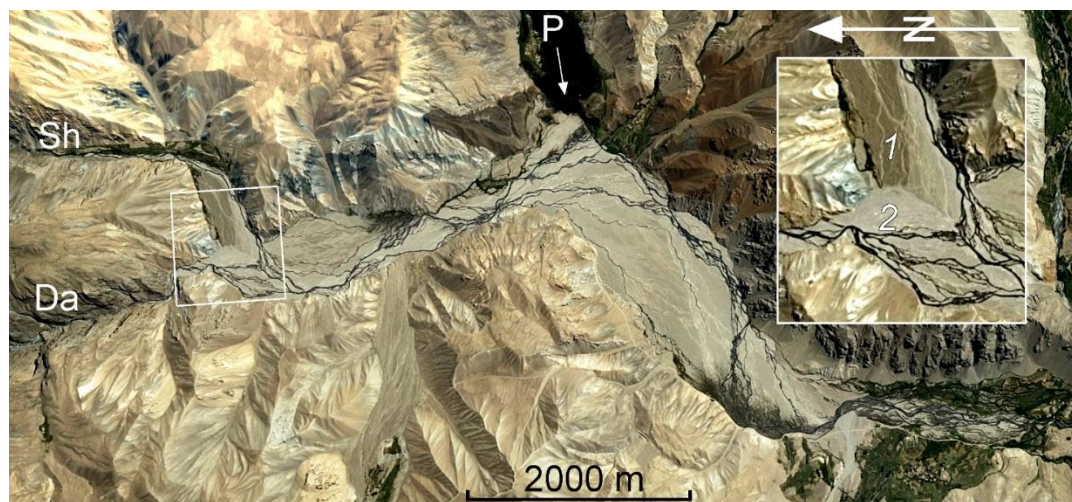


Рис. 2. Космический снимок (Google Earth) долины ниже слияния рек Дакханзар (Da) и Шульвадар (Sh). P – подпруженная долина, идущая с перевала между бассейнами рек Пяндж и Кокча. На увеличенном фрагменте видны взаимоотношения между селевыми потоками, вышедшими из долины р. Шульвадар (1) и Дакханзар (2). Из работы [*Strom, Abdrakhmatov, 2018*] с разрешения издательства Elsevier

Fig. 2. Google Earth image of the valley downstream from the confluence of the Dakhanzar (Da) and the Shulvadar (Sh) Rivers. P – dammed river flowing from the pass between the Pyanj and Kokcha River basins. Zoomed image of the outlined area shown in the inset demonstrates temporal relationships between outburst floods from the Shulvadar River (1) and the Dakhanzar River (2). After [*Strom, Abdrakhmatov, 2018*] with permission from Elsevier

Сель, вышедший из реки Шульвадар, произошел несколько раньше (см. врезку на рис. 2). Тем не менее, можно предполагать, что завальные плотины, при прорыве

которых могли произойти эти селевые потоки, могли образоваться одновременно, скорее всего при сильном землетрясении. Крупнейшая завальная плотина в долине р. Дакханзар (36.726° с.ш., 71.389° в.д.) объемом около 180 миллионов м^3 , в несколько раз превосходила крупнейшую плотину в долине р. Шульвадар (36.705° с.ш., 71.422° в.д.), объем которой составлял примерно 50 миллионов м^3 . К тому же она была выше (~200 м против ~150 м). Учитывая, что размеры водосборных бассейнов обеих рек примерно одинаковы, подпрудное озеро в долине р. Дакханзар могло просуществовать несколько дольше, чем озеро в долине р. Шульвадар, прорванное первым.

Безусловно, для однозначного доказательства одновременности образования завальных плотин в этих долинах необходимо датировать их; тем не менее, высказанное предположение логично и не противоречит наблюдаемым фактам.

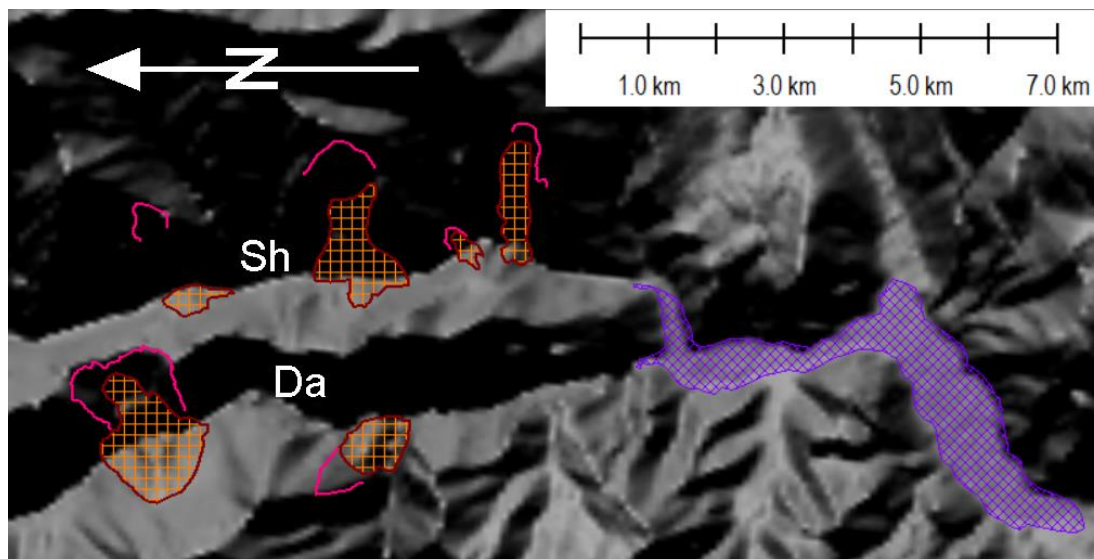


Рис. 3. Скальные оползни, перекрывавшие долины рек Дакханзар (Da) и Шульвадар (Sh) выше по течению от участка, покрытого селевыми отложениями (лиловая штриховка)

Fig. 3. River-damming rockslides in the Dakhanzar (Da) and the Shulvadar (Sh) River valleys upstream from floodplain covered by the outburst flood deposits (violet cross-hatched area)

Следы крупнейшего не только на Памире, но и во всем Центрально-Азиатском регионе прорывного паводка были обнаружены в среднем и нижнем течении р. Пяндж (участки 2 и 4 на рис. 1) [Strom, Abdrakhmatov, 2018]. Он произошел при последовательном прорыве двух гигантских завальных плотин, перекрывавших долину р. Пяндж в 31 и 43 км ниже по течению от устья р. Бартанг, у селений Шидз (37.93° с.ш., 71.31° в.д.) и Вознавд (37.97° с.ш., 71.27° в.д.). Оползневые цирки располагались на правом, Таджикском, борту долины, а остатки оползневых тел сохранились также на левом – Афганском борту. Обрушения произошли на склонах высотой 1400-1500 м, сложенных гранитами и мигматитами, и полностью перекрывали долину.

Шидский оползень объемом примерно 700 миллионов м^3 (учитывая нижнюю часть его тела, ныне погребенную под отложениями долины Пянджа) образовал плотину высотой не менее 450 м. Ее часть, сохранившаяся от размыва, образует ныне слегка выпуклую террасовидную поверхность высотой 300-400 м над уровнем реки, лежащую у подножия колоссального цирка шириной около 2 км и глубиной (в склон) до 800 м с очень крутой (~ 50°) тыловой стенкой отрыва высотой до 1 км (рис. 4). Сохранившаяся фронтальная часть оползневого тела видна на Афганской стороне долины на отметках 2090-2250 м над уровнем моря (нижняя врезка на этом рисунке).

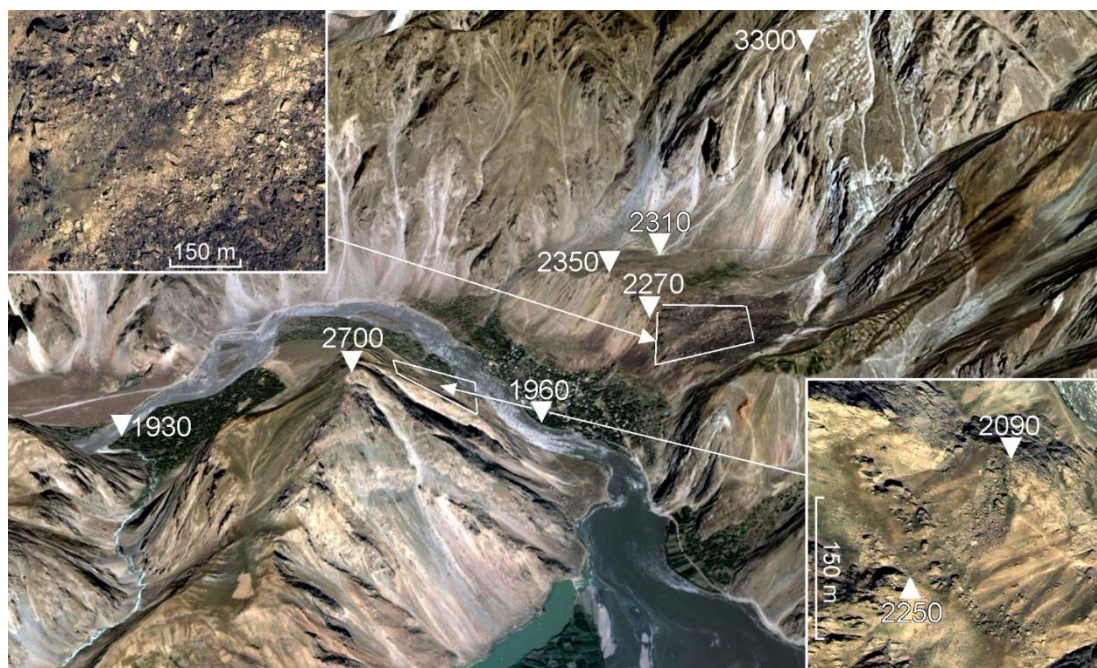


Рис. 4. Космический снимок оползня Шидз. На врезках показаны глыбовые развалы на сохранившейся от размыва поверхности завальной плотины. Из работы [Strom, Abdrakhmatov, 2018] с разрешения издательства Elsevier

Fig. 4. Google Earth view of the Shidz rockslide. Coarse angular boulders forming rockslide carapace at the remaining parts of the blockage surface are shown in the insets. After [Strom, Abdrakhmatov, 2018] with permission from Elsevier

Оползень все еще частично подпруживает долину р. Пяндж и, судя по продольному профилю реки (рис. 5), нижняя часть его тела мощностью до 150 м не была размывта и ныне погребена под озерными отложениями с верховой стороны (толща 'А' на рис. 5) и под отложениями, вынесенными из тела завальной плотины при его прорыве с низовой стороны (толща 'В' на рис. 5). Последние предотвратили дальнейший размыв тела завала.

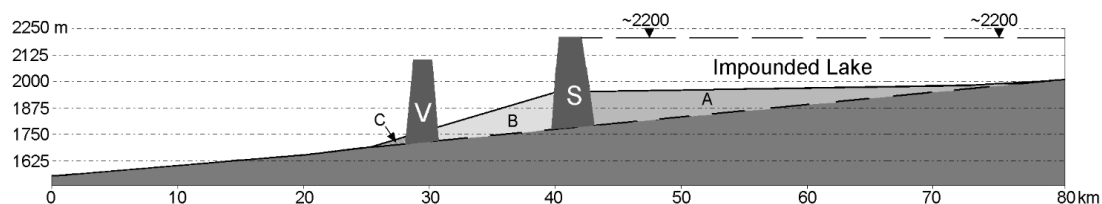


Рис. 5. Продольный профиль по долине р. Пяндж на участке между устьями рек Бартаг и Язгулем. А – отложения, накопившиеся в подпрудном озере выше Шидского завала (S); В – отложения, вынесенные из тела завальной плотины; С – отложения, накопившиеся ниже Вознавдской завальной плотины (V). Из работы [Strom, Abdrakhmatov, 2018] с разрешения издательства Elsevier

Fig. 5. Thalweg profile of the Pyanj River between the Bartang and Yazgulem River mouths. A – sediments accumulated in the dammed lake formed by Shidz rockslide dam (S); B – deposits eroded from the Shidz blockage; C: deposits accumulated downstream of the Voznavd rockslide dam (V). After [Strom, Abdrakhmatov, 2018] with permission from Elsevier

В отличие от Сарезского озера, которое сохранилось благодаря удачному сочетанию сравнительно небольшого среднегодового расхода р. Мургаб (примерно 50 м³/сек), берущей начало на засушливом высокогорном плато Восточного Памира, и колоссального размера верхней, наиболее водопроницаемой части завальной плотины, благодаря чему существует примерный баланс между притоком в озеро и

фильтрационным расходом через плотину [Ischuk, 2011], Шидский завал перекрывал намного более водообильный Пяндж со среднегодовым расходом порядка 800 м³/сек [Государственный водный кадастр, 1990]. Такой приток не мог быть скомпенсирован фильтрацией, что привело к достаточно быстрому заполнению озера и к переливу через плотину. Принимая, что низшая точка гребня завала находилась на отметках где-то около 2200 м, завальное озеро должно было иметь протяженность более 100 км в долине Пянджа (т.е. до Хорога и, возможно, даже выше) и более 40 км по долине Бартанга (рис. 6), а его объем мог достигать 31 км³. Учитывая среднегодовой расход Пянджа, заполнение озера водой до уровня гребня завальной плотины могло произойти примерно за 2 года, считая, что часть притока фильтровалась через плотину.

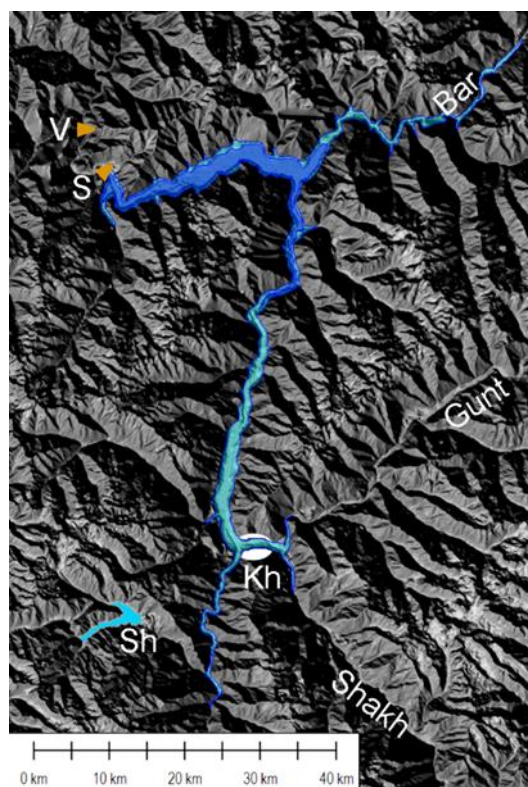


Рис. 6. Схематическая карта озера, образованного Шидским завалом (S). V – Вознаджская завальная плотина; Bar – река Бартанг; Gunt – река Гунт; Shakh – река Шахдара; Sh – озеро Шива, Kh – the Khorog town. Темно-синяя заливка – заиленная часть озера; голубая заливка – предполагаемое озеро при отметке его уровня 2200 м. Background: shaded SRTM DEM visualized by the Global Mapper software. Из работы [Strom, Abdrakhmatov, 2018] с разрешения издательства Elsevier

Fig. 6. The schematic map of the lake dammed by the Shidz rockslide (S). V – the Voznadj rockslide dam; Bar – the Bartang River; Gunt – the Gunt River; Shakh – the Shakhdara River; Sh – the Shiva Lake; Kh – the Khorog town. Dark blue: silted part of the lake; light blue: the assumed lake at 2200 m a.s.l. Background: shaded SRTM DEM visualized by the Global Mapper software. After [Strom, Abdrakhmatov, 2018] with permission from Elsevier

Как отмечено выше, нижняя часть озерной ванны была заиlena и сегодня дно долины Пянджа на протяжении около 43 км, вплоть до устья р. Баджувдара, а также дно долины Бартанга на протяжении около 10 км представляют собой выровненную поверхность, сложенную озерными отложениями, где меандрируют эти горные реки. Общий объем отложений, накопившихся в озере, максимальная мощность которых непосредственно выше завала достигает 150 м, оценивается в 2.5–3.0 км³. Однако, при среднегодовом твердом стоке Пянджа порядка 5–10×10⁶ м³ (к сожалению, непосредственные измерения этой величины по пограничной реке отсутствуют

[Государственный Водный Кадастр, 1990]), накопление такого объема осадков должно было занять примерно 300-600 лет. Возникает вопрос, как нижняя часть оползневой плотины, сложенная сильно раздробленным материалом, могла сопротивляться размыву при переливе столь длительное время? С большой вероятностью это произошло благодаря тому, что в 12 км ниже по течению долина р. Пяндж была перекрыта еще одной завальной плотиной, образованной Вознавдским оползнем объемом около 250 миллионов м³ и эффективной высотой, по-видимому, около 300 м (рис. 6, 7), образовавшимся, скорее всего, одновременно с Шидским.



Рис. 7. Перспективное изображение Вознавдского оползня на космическом снимке из Google Earth. На врезке видны глыбы на поверхности оползневого тела на Афганской стороне долины р. Пяндж. Из работы [Strom, Abdrakhmatov, 2018] с разрешения издательства Elsevier

Fig. 7. 3D Google Earth view of the Voznavd rockslide. Bouldery carapace of the distal part of rockslide body is shown in the inset. After [Strom, Abdrakhmatov, 2018] with permission from Elsevier

Оползень Вознавд произошел на правом борту долины р. Пяндж высотой более 1500 м, и его тыловая стенка отрыва высотой около 1000 м имеет уклон до 56°, т.е. круче, чем у Шидского оползня. В отличие от Шидского оползня, поверхность тела которого, видимо, постепенно понижалась к левому борту долины, Вознавдский оползень двигался, как типичная первичная лавина в условиях фронтального ограничения [Strom, 2010; Strom, Abdrakhmatov, 2018] и его фронтальная часть сохранилась на левом, Афганском борту долины в 450 м над уровнем реки (рис. 7). Благодаря такому продольному профилю оползневого тела, образованная им плотина была прорвана и размыва у подножия цирка. Поскольку на левом борту оползневое тело вошло в некоторое понижение, последнее сыграло роль ловушки, препятствовавшей существенному расширению оползневого тела вверх и вниз по долине [Strom, 2010].

При прорыве верхнего (Шидского) завала из его тела было вынесено порядка 200-250 миллионов м³ обломочного материала, который, несмотря на очевидную колоссальную мощность прорвавшегося водного потока, не мог транспортироваться свободно, пока не была прорвана и промыта нижняя (Вознавдская) плотина. Этот материал отложился на дне долины на участке между завальными плотинами, образовав своего рода осадочный "клин" (толща В на рис. 5) который и сыграл роль контрфорса, предотвратившего полный размыв Шидской завальной плотины после прорыва Вознавдского завала. Именно благодаря этому заилиение сохранившейся части Шидского

озера могло продолжаться в течение столь длительного времени. Это объясняет противоречие между значительным объемом накопившихся озерных осадков и предполагаемым коротким временем существования подпрудного озера до его прорыва.

После прорыва Вознавдской завальной плотины, ничто не препятствовало транспортировке материала, выносимого из тел уже обеих плотин вниз по долине Пянджа, и на продольном профиле мы видим лишь незначительный осадочный "клин" ниже по течению от Вознавдского оползня (толща С на рис. 5).

Действительные временные соотношения между Шидским и Вознавдским оползнями неизвестны, однако с большой долей вероятности можно утверждать, что они образовались одновременно, скорее всего при сильном землетрясении. Такое предположение основывается на анализе продольного профиля р. Пяндж на этом участке, показанного на рис. 5.

Если бы Вознавдский оползень образовался до Шидского завала или уже после его прорыва, долина выше него скорее всего была бы частично заилена по аналогии с долиной выше Шидского оползня и, соответственно, дно долины Пянджа на этом участке должно было бы быть почти горизонтальным, чего не наблюдается.

Аналогичная ситуация имела место в долине Гунта (участок 3 на рис. 1), которая была перегорожена на протяжении 20 км трижды – более древними Зуворской и Вир-Тангивской завальными плотинами и более молодым Чартымским завалом (см. рис. 8). Уклон русла р. Гунт между прорванными Зуворской и Вир-Тангивской завальными плотинами (~15 м/км) существенно круче, чем в целом в долине Гунта (~8 м/км), а выше Вир-Тангивского оползня уклон крайне незначителен (всего около 2.2 м/км) (рис. 9). Чартымский завал высотой около 60 м сохранился практически в неизменном виде, а созданное им озеро полностью заилено. Озеро, созданное Вир-Тангивским оползнем (каменной лавиной), по-видимому, достигало уровня примерно 3160 м, так как выше по течению на правом борту долины в делювиально-коллювиальных отложениях на этом уровне на протяжении примерно 3 км сохранились следы размыва (см. рис. 8). Объем такого подпрудного озера составлял примерно 5.6 км³.

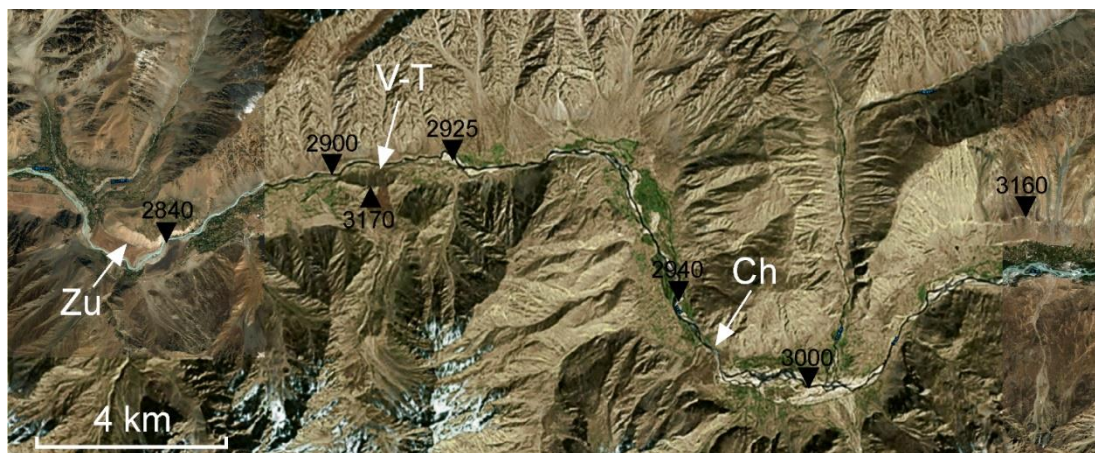


Рис. 8. Космический снимок участка долины р. Гунт в его среднем течении. Zu – Зуворский завал; V-T – Вир-Тангивский завал; Ch – Чартымский завал; 3160 – уровень, на котором наблюдаются предполагаемые следы береговой эрозии

Fig. 8. Space image of the middle reaches of the Gunt River valley. Zu – the Zuvor blockage; V-T – the Vir-Tangiv blockage; Ch – the Chartym blockage; 3160 – level at which assumed traces of the bank erosion are observed

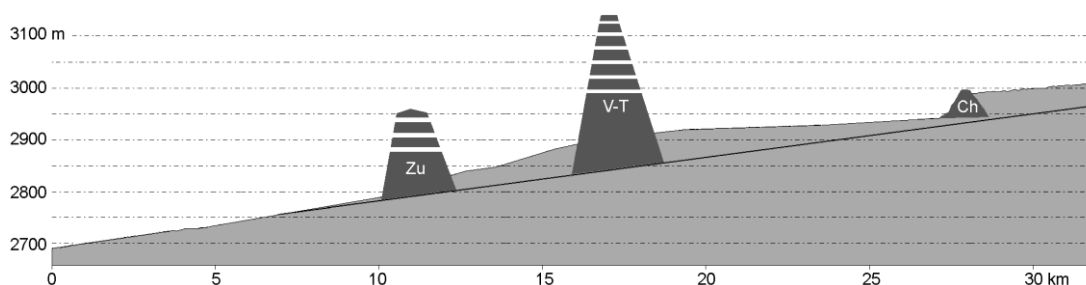


Рис. 9. Продольный профиль долины р. Гунт на участке, где она перекрывалась Зуворским (Zu), Вир-Тангивским (V-T) и Чартымским (Ch) завалами. Штриховкой обозначены предполагаемые верхние части завальных плотин. Сплошная черная линия – предполагаемое "дооползневое" дно долины. Из работы [Strom, Abdrakhmatov, 2018] с разрешения издательства Elsevier

Fig. 9. Longitudinal profile of the Gunt River valley where it had been blocked by the Zuvor (Zu), Vir-Tangiv (V-T) and Chartym (Ch) rockslide dams. Hatched parts of the dams – their assumed upper parts. Bold black line – assumed "pre-slide" bottom of the valley. After [Strom, Abdrakhmatov, 2018] with permission from Elsevier

Можно предположить, что, как и в случае двойного перекрытия реки Пяндж, древние завалы в среднем течении Грунта, скорее всего образовались одновременно. Учитывая, что долину Гунта на этом участке пересекает юго-западная часть активного Патхур-Немосского разлома [Strom, Abdrakhmatov, 2018], одновременное обрушение высоких скальных склонов с большой вероятностью произошло при сильном землетрясении. Поскольку на этом участке есть как более древние, так и более молодые оползни в скальных массивах, определив их возраст можно будет оценивать повторяемость сильных землетрясений на этом участке. Эти данные необходимо также сопоставлять с возрастными подвижками по активному разлому.

Прорыв столь крупных подпрудных озер должен был сформировать колоссальные прорывные паводки. При прорыве намного меньшего по объему завального озера Байраман в Папуа Новой Гвинее объемом около 50 миллионов м³ в 1985 г. очевидцами непосредственно ниже прорываемой плотины наблюдался селевой вал высотой около 100 м [King et al., 1989]. Пиковый расход при прорыве Игонского завала в Тибете в 2000 г., создавшего озеро объемом около 2 км³, измеренный в нескольких километрах ниже по течению, составил 120 000 м³/с [Shang et al., 2003; Evans, Delaney, 2011].

Еще более значительный пиковый расход, по-видимому, имел место при доисторическом прорыве на р. Сарыджаз, где она выходит на территорию Китая. По самым грубым оценкам пиковый расход при прорыве озера объемом около 2.5 км³, образованного завальной плотинной высотой 300-350 м, составлял порядка 400000 м³/с [Strom, Abdrakhmatov, 2018], а по расчетам, выполненным проф. Стивеном Вардом (устное сообщение), мог достигать 1 миллиона м³/с.

Учитывая, что в обоих рассмотренных в этой статье случаях объем накопленной воды существенно превышал вышеприведенные примеры, прорывные паводки могли иметь еще более впечатляющие характеристики и должны были оставить какие-то следы ниже по течению. По мнению автора, такие следы удалось обнаружить в низовьях р. Пяндж, у пос. Московский, где река выходит из узкого ущелья, прорезанного в Дарвазском хребте, на предгорную равнину (участок 4 на рис. 1), образуя колоссальный конус выноса (рис. 10), поверхность которого, как отчетливо видно на профиле А-В (рис. 11) имеет выпуклое поперечное сечение. Осевая часть конуса, где, собственно, и протекает река, находится примерно в 20 метрах выше его краевых частей. Уже примерно в 25 км ниже по течению поперечное сечение долины становится совершенно иным – с плоским, достаточно ровным дном, занятым поймой и комплексом низких террас, что характерно для долин крупных Центрально-Азиатских рек, выходящих на равнинные участки. Описанный же выше выпуклый профиль характерен для конусов выноса, сформированных селевыми потоками, а не рекой с постоянным водотоком и среднегодовым расходом 845 м³/с [Государственный водный кадастр, 1990].

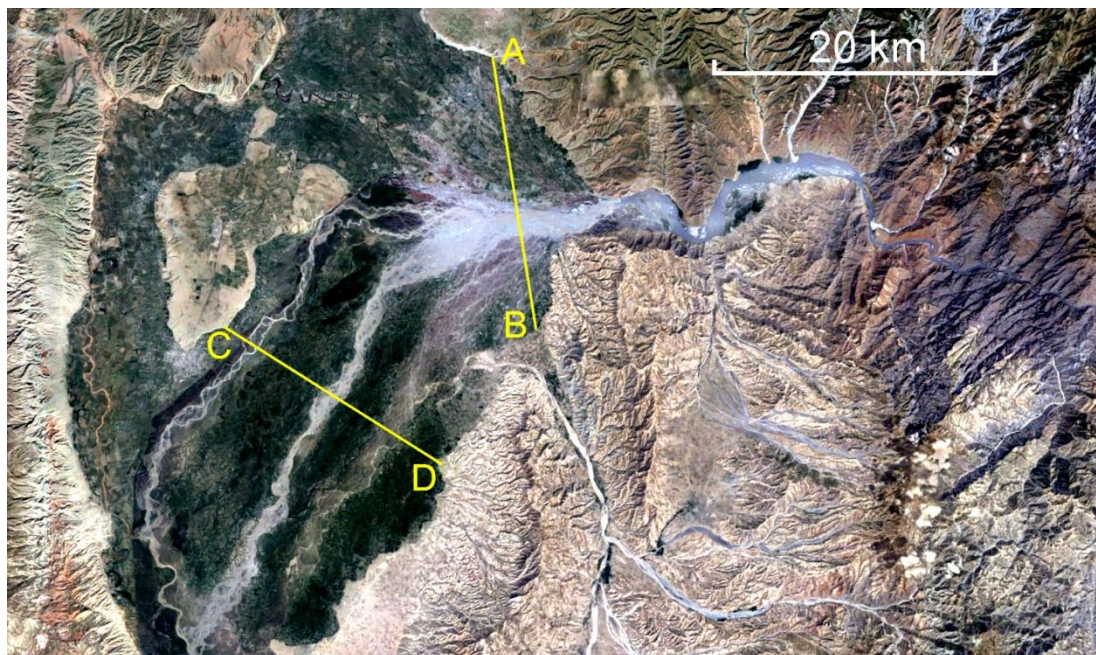


Рис. 10. Космический снимок долины р. Пяндж ниже ущелья, где он пересекает Дарвазский хребет. Линии А-В и С-Д – профили, показанные на рис. 11. Из работы [Strom, Abdrakhmatov, 2018] с разрешения издательства Elsevier, с изменениями

Fig. 10. Google Earth space image of the Pyanj River valley downstream from the gorge where it crosses the Darvaz Range. Lines A-B and C-D mark position of the profiles shown on Fig. 11. Modified after [Strom, Abdrakhmatov, 2018] with permission from Elsevier

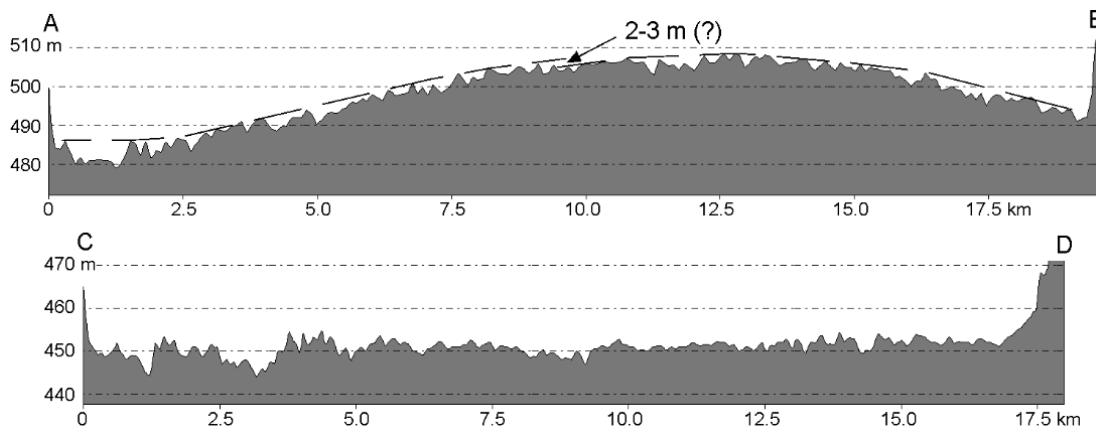


Рис. 11. Топографические профили (в искаженном масштабе) головной части конуса выноса р. Пяндж (А-В) и его долины примерно в 25 км ниже по течению (С-Д). Положение профилей показано на рис. 10. Из работы (Strom, Abdrakhmatov, 2018) с разрешения издательства Elsevier

Fig. 11. Topographic profiles (scale is distorted) of the Pyanj River alluvial fan (A-B) and of its valley about 25 km downstream. See their position on Fig. 10. After [Strom, Abdrakhmatov, 2018] with permission from Elsevier

Описанный конус выноса вполне мог быть образован при прорыве Шидского завального озера. При формировании «обычных» селевых потоков, даже столь мощных, как Исыкский 1964 г. или Алмаатинский 1973 г., также связанных с прорывом озер, но на несколько порядков меньшего объема, количество обломочного материала, вовлеченного в селеобразование, существенно превосходило первоначальный расход

породивших их водных потоков [Степанов, Степанова, 1991; Степанов, Яфязова, 2014]. В рассматриваемых же случаях, когда объем прорывного паводка исчислялся кубическими километрами, скорее всего формировались колоссальные наносоводные паводки, переносившие как материал, вынесенный из прорванных завальных плотин, так и захваченный с бортов речных долины.

Более того, внимательный анализ поперечного профиля А-В показал, что северная часть поверхности конуса выноса Пянджа возможно более древняя и ее огибающая на 2-3 метра выше, чем у большей, южной, части конуса (см. рис. 11). Такой признак двукратного формирования конуса выноса р. Пяндж хорошо согласуется с тем, что в его бассейне прорыв крупных подпрудных озер с одновременным высвобождением нескольких кубических километров воды происходил, как минимум, дважды.

Предложенное объяснение морфологии конуса выноса р. Пяндж безусловно является лишь гипотезой, для подтверждения которой потребуются проведение специальных полевых исследований. Тем не менее, оно хорошо согласуется с данными о наличии в водосборном бассейне следов нескольких прорванных оползневых перекрытий крупнейших рек региона.

Выводы

Приведенные примеры катастрофических прорывных паводков, произошедших в доисторические времена в долинах Памирских рек, показывают масштабы последствий, которые могут сопровождать гипотетический прорыв крупных подпрудных озер в этом регионе, как существующих (Сарезское озеро), так и тех, которые могут образоваться в будущем. Следует заметить, что, учитывая малую продолжительность периода времени, для которого на Памире имеются данные о природных катастрофах, фактический возраст "доисторических" событий может составлять первые тысячи и, даже, сотни лет.

Эти данные могут использоваться для проверки и калибровки расчетных моделей прорыва крупных завальных плотин и прохождения возникающих при этом наносоводных паводков и селей, используемых при оценке опасности прорывов существующих завальных плотин.

Список литературы

- Государственный водный кадастр СССР. 1990. Часть 1. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. вып. XII Таджикская ССР. Л. Гидрометеоиздат
- Степанов Б.С., Степанова Т.С. 1991. Механика селей. Эксперимент, теория, методы расчета. М., Московское отделение Гидрометеоиздата. 379 с.
- Степанов Б.С., Яфязова Р.К. 2014. Селевые явления Юго-восточного Казахстана. Т. 3. Селевые процессы и селетехнические сооружения. Алматы, 433 с.
- Evans S.G., Delaney K.B. 2011. Characterization of the 2000 Yigong Zangbo River (Tibet) Landslide Dam and Impoundment by Remote Sensing. In: Evans, S.G., Hermanns, R., Scarascia-Mugnozza, G., Strom, A.L. (Eds.), Natural and Artificial Rockslide Dams, 133. Lecture Notes in Earth Sciences, pp. 543-559.
- Ischuk A.R. 2011. Usoi Rockslide Dam and Lake Sarez, Pamir Mountains, Tajikistan. In: Evans S.G., Hermanns R., Strom A.L., Scarascia-Mugnozza G. (Eds.), Natural and Artificial Rockslide Dams. Lecture Notes in Earth Sciences, 133. Springer, Heidelberg, pp. 423-440.
- King J., Loveday I., Schuster R.L. 1989. The 1985 Bairaman landslide dam and resulting debris flow Papua New Guinea. Q. J. Eng. Geol. 22, 257-270.
- Shang Y., Yang Z., Li L., Liu D., Liao Q., Wang Y. 2003. A super-large landslide in Tibet in 2000: background, occurrence, disaster, and origin. Geomorphology 54, 225-243.
- Strom A.L. 2010. Evidence of momentum transfer during large-scale rockslides' motion. In: Williams A.L., Pinches G.M., Chin C.Y., McMorrان T.G., Massei C.I. (Eds.), Geologically Active. Proc. of the 11th IAEG Congress, Auckland, New Zealand, 5-10 September 2010, Taylor & Frensis Group, London, 73-86.
- Strom A., Abdrakhmatov K. 2018. Rockslides and rock avalanches of Central Asia: distribution, morphology, and internal structure. Elsevier. 449 p. ISBN: 978-0-12-803204-6.



Comprehensive analysis of surface characteristics of debris flow fans in Gilgit-Baltistan and Chitral regions of Pakistan using remote sensing

G. Amin, D. Bano, S. Wali, S. Shah

*Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in Pakistan, Islamabad, Pakistan,
gomal.amin@akdn.org*

Abstract. The northern part of Pakistan has faced severe climate change impacts during the last few decades. During these years there were huge debris flow and flash floods events which caused huge number of casualties and million dollars' economic losses. Debris flow (DF) and floods represent one of the major natural hazards that impact infrastructure, transport, economic losses, human lives, and regional economy. With continuous advancement in Remote Sensing (RS) field particularly in spatial and temporal resolution of image, its application in geosciences has become more widespread. Therefore, in this study, the potential of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM) and Sentinel-2 image collection was explored to perform analysis of characteristics of 5,535 DF fans over 5 districts of Gilgit-Baltistan and Chitral (GBC). The DF fans data was prepared by Aga Khan Agency for Habitat, Pakistan (AKAH, P) and retrieved from their database with approximate area of 309.2 km². Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) from 2000-2019 was evaluated to find connection between environmental parameters and debris flow activity. Different GIS platforms were used to analyze different topographic and morphometric parameters viz slope, aspect, elevation, Topographic Roughness Index (TRI), Plan curvature, Profile curvature, Total curvature, Topographic Wetness Index (TWI), Terrain Ruggedness Index, Texture and Topographic Position Index (TPI). Additionally, four environmental parameters, mean annual precipitation, land cover and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) were also analyzed. Moreover, all the parameters were evaluated against the debris flow hazard intensity classes (High, Medium, Low).

Key words: *debris flow fans, remote sensing, geomorphological characteristics, Gilgit-Baltistan and Chitral*

Cite this article: Amin G., Bano D., Wali S., Shah S. Comprehensive analysis of surface characteristics of debris flow fans in Gilgit-Baltistan and Chitral regions of Pakistan using remote sensing. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: "Promotion" LLC, 2020, p. 122–133.

Комплексный анализ геоморфологических характеристик селевых конусов выноса в Гилгит-Балтистане и Читрале (Пакистан) с использованием данных дистанционного зондирования

Г. Амин, Д. Бано, Ш. Вали, С. Шах

*Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Пакистане, Исламабад, Пакистан,
gomal.amin@akdn.org*

Аннотация. В последние десятилетия северной части Пакистана пришлось столкнуться с серьезными последствиями современных быстрых изменений климата. За этот период произошли катастрофические селевые потоки и ливневые паводки, которые привели к большому числу жертв среди населения и значительным экономическим потерям, которые оцениваются в миллионы долларов

США. Селевые потоки и ливневые паводки представляют собой одни из основных опасных природных процессов, которые угрожают инфраструктуре, транспорту, населению и региональной экономике Пакистана. В связи с постоянным прогрессом в области дистанционного зондирования, особенно в сфере, касающейся пространственно-временного разрешения снимков, применение его данных в геонауках получает все более широкое распространение. Поэтому в данном исследовании был рассмотрен потенциал использования данных ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) и космических снимков со спутника Sentinel-2 для анализа характеристик 5535 селевых конусов выноса в 5 районах Гилгит-Балтистана и Читрала. Данные о селевых конусах выноса были ранее подготовлены филиалом Агентства Ага Хана по Хабитат в Пакистане и собраны в единую базу данных. Для представленного исследования из нее были взяты данные на участок общей площадью примерно 309,2 км². Также использовались метеоданные CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) за 2000-2019 гг. с целью выявления связи между параметрами окружающей среды и активностью селевых потоков. Для анализа морфометрических параметров, таких как крутизна склонов, их экспозиция, высота, индекс шероховатости, плановая кривизна, кривизна профиля, общая кривизна, индекс топографической влажности, индекс расчлененности рельефа, текстура и индекс топографического положения, использовались различные геоинформационные программы. Кроме того, были проанализированы три параметра окружающей среды (среднегодовое количество осадков, почвенно-растительный покров и NDVI (нормализованный вегетационный индекс)). Все параметры были оценены по классам селевой активности (высокий, средний, низкий).

Ключевые слова: селевые конусы выноса, дистанционное зондирование, геоморфологические характеристики, Гилгит-Балтистан и Читрал

Ссылка для цитирования: Амин Г., Бано Д., Вали Ш., Шах С. Комплексный анализ геоморфологических характеристик селевых конусов выноса в Гилгит-Балтистане и Читрале (Пакистан) с использованием данных дистанционного зондирования. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 122–133.

Introduction

The mountain landscape with steep slopes and fragile geology experiences mass-wasting phenomena termed as Debris Flow. Debris Flow (DF) refers to debris allied flows and floods under gravity. This process is usually initiated at uninhabited and elevated altitudes and gets deposited in lower urbanized zones. Extreme velocity, longer runout distances and shear force places DF amongst the most hazardous mass movements [Hürlimann *et al.*, 2019]. Tremendous force is applied on the obstacles in the path and depositional area by DF having great velocity and mass. The land in the lower mountainous regions is usually habitable or it supports development works [Khan *et al.*, 2013].

Debris flow have always been of prime concern in the mountainous areas because of its ability to disrupt lives and damage infra-structure and environment at large. The cryosphere is prominently impacted by climatic warming which directly influences multiple phenomena in terms of frequency and magnitude of DF, glacial lake outburst floods (GLOFs), snow avalanches and landslides [Šilhán & Tichavský, 2017; Tomczyk & Ewertowski, 2017; Zaginaev *et al.*, 2019]. Also, the geomorphological processes have been impacted by melting glaciers thus resulting in increased debris falls, slides and flows, down wasting and back wasting of melting of dead ice. However, based on formation, fans or landforms are classified into two categories alluvial and colluvial [Tomczyk & Ewertowski, 2017]. As complex network of tributaries drains the valley slopes, the tributary junctions are sites of alluvial fans, debris cones and debris fans due to deposition of sediments. Moreover, the terraces of the valley flanks

formed by deposits of glaciofluvial, morainic, fluvial and lacustrine origin can be seen with present-day fans rest upon relict of these [Kamp Jr et al., 2004].

The northern Pakistan straddles the Hindukush–Karakoram–Himalaya (HKH) Range neighboring with China towards east and northeast, India to its south & southeast and Afghanistan towards north. Chitral district (~14751 km²) in the province of Khyber Pakhtunkhwa, and four districts from Gilgit-Baltistan viz Ghizer (~12043 km²), Gilgit (~4009 km²), Hunza (~11343 km²) and Nagar (~2993 km²) were selected as study area (Fig. 1). The study area is drained by famous Indus and Chitral river (also called Kabul River in Afghanistan). The flank of these rivers and other small tributaries provide livelihood opportunities and support human settlement, croplands, and small orchards. These areas are famous for large glacier bodies which are associated with various natural hazards. Valley facing slopes are most common geomorphic feature of northern areas, mostly are associated with flat floodplains formed relatively by merged high relief mountains. The modification of surface and formation of these landforms is frequent in the region due to meteorological, anthropogenic, geological structures and hydrological conditions [Khan et al., 2013]. This increased frequency has led to the formation of numerous distinct DF fans earlier and in recent times. Thus, it is of prime importance to conduct extensive research on DF fans for providing basic information of the process, which will assist in understanding and classification of hazards associated with it. The dominant wet season in the Gilgit-Baltistan and Chitral (GBC) extends from December to May, wettest being March and April. From December to mid-March, precipitation falls in the form of snow and afterwards rainfall dominates, although some spells of snowfall are recorded until early May usually up to 3,000 m asl elevation. Precipitation trend (annual mean) of study area from year 2000-2019 based on CHIRPS gridded data is presented in Fig. 2.

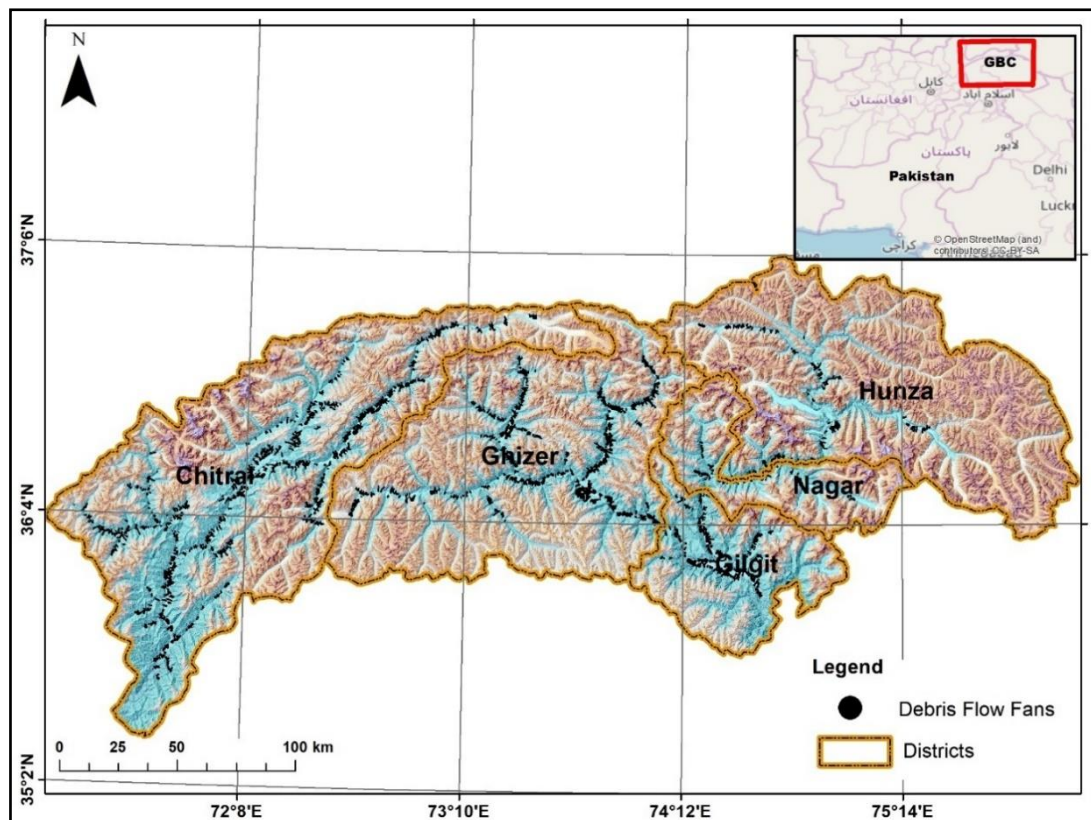


Fig. 1. Relief map of study area with spatial distribution of DF fans

DF fans hazard assessment is vital to manage danger and minimize damages it can cause, for which understanding of the surface morphology is of prime importance. The DF associated risk can be identified and assessed employing remote sensing technology on regional and local level [Kritikos & Davies, 2015; Shrestha et al., 2016; N. Zhang & Matsushima, 2018; Ali et

al., 2019; Jamil et al., 2019]. On regional level preliminary analysis regarding the characteristics of debris flow can be done. To achieve the objectives, different morphometric parameters viz Slope, Aspect, Elevation, Topographic roughness index (TRI), Plan curvature, Profile curvature, Total curvature, Topographic Wetness Index (TWI), Terrain Ruggedness Index, Texture and Topographic Position Index (TPI) were investigated against the DF hazard intensity. Moreover, environmental parameters such as mean annual precipitation, land cover and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) over the area of interest were evaluated against the DF hazard intensity (High, Medium and Low).

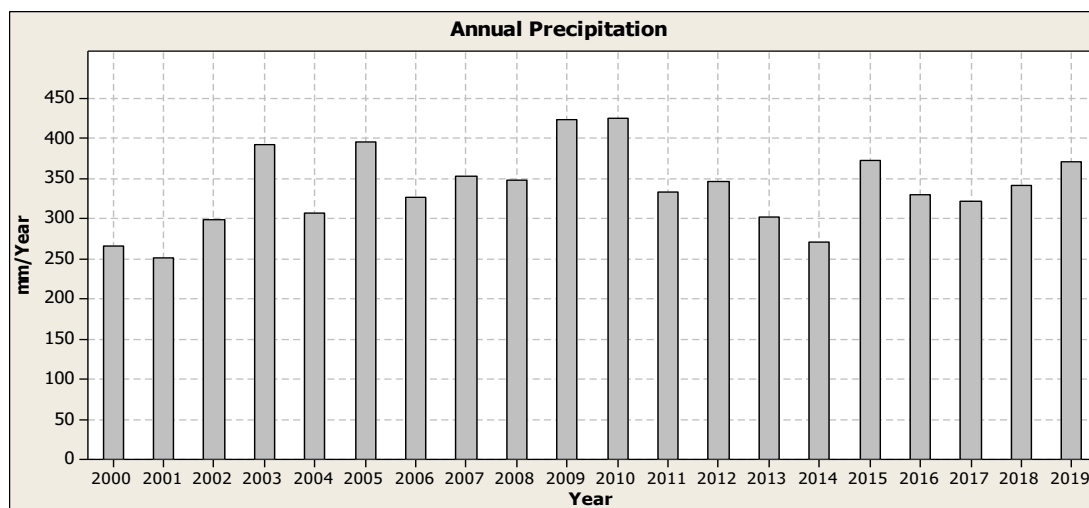


Fig. 2. Mean annual precipitation over selected districts

This study aims in 1) providing surface morphology of DF fans in northern Pakistan; 2) identification of various parameters influencing the DF fans on regional level; 3) assessment of environmental and morphological parameters in accordance with DF hazard intensity.

Brief review of the problem

In past few and limited geohazards studies were performed in northern areas of Pakistan due to limited resources and tough conditions. Majority of these studies were related to hazards associated with glaciers and outburst floods [*Jamil et al., 2019; Shah et al., 2019*]. Various researchers have found explanations of Quaternary sediments in the region [*Haserodt, 1968; Buchroithner, 1980*]. In the Eastern Hindu Kush region DF deposits were described by [*Wasson, 1978*] including an eye-witness account of a DF event on August 14, 1975 at Reshun, Chitral. A recent study was performed on landslide inventory and susceptibility mapping in Hunza-Nagar districts of Gilgit-Baltistan (GB) [*Bacha et al., 2018*] and has discussed major causative factors triggering landslides including debris flows in mountainous areas. Another study along the International Karakoram Highway was performed by Yang, Zhu, Zou, & Liao (2011) using fuzzy evaluation method to investigate glacier induced debris flows. The debris flows in the region are triggered due to unique geology, geomorphology and landform conditions characterized by steep mountain slopes, as mentioned in various studies [*Bacha et al., 2018; Ali et al., 2019; Y. Zhang et al., 2019*].

After brief literature review of the study area, it was noticed that majority of research was centered around susceptibility mapping of landslides using various models as discussed above. Moreover, no previous study described debris flow fans on large regional scale making the current study first ever in the region describing the characteristics of debris flow fans, various geophysical factors and its exposure.

Method and data

We derived topographic and geomorphological metrics from Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM) with 30m resolution. The environmental parameters were derived from cloud free Sentinel-2 satellite image composite (May 1 – September 30, 2019) having resolution of 10 m, and Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) rainfall dataset which incorporates 0.05° resolution satellite derived rainfall with in-situ station data to create gridded rainfall time series for trend analysis and environmental monitoring [Funk, 2015]. The DF fans were retrieved from Hazard Vulnerabilities and Risk Assessment (HVRA) database maintained by AKAH Pakistan. HVRA starts with development of community level hazard inventory and historic profile of hazards and their impact, development of baseline data on most hazardous sites for further investigation. After field investigations by AKAHs technical teams, the data is digitally presented using GIS platforms. Using the collected data, the DF fans were categorized into hazard class based on DF hazard return period and intensity data collected from communities using questionnaire. Here the return period is the frequency of DF with reference to time i.e. < 10 years, > 30 years and 10 - 30 years, while intensity corresponds to high, medium and low. Finally, based on return period and intensity all the DF fans were categorized into three hazard classes which are High, Medium and Low.

Environmental Parameters

Sentinel-2 Surface reflectance product (Band: B2-B8, B11 and B12) was retrieved from Google Earth Engine (GEE) for image classification in the study area for year 2019 (1st May-30th September). The image classification over the study region was used to extract the surface condition of DF fans. NDVI was calculated using band B4 and B8 to distinguish the surface of DF fans into barren land and vegetation using the historical satellite data of S-2 from 2014-2019 in GEE platform. The reason to calculate this parameter was to recognize any active DF fan and to investigate the intensity and return period. The greater the NDVI value the lower risk of DF, and vice versa [Y. Zhang *et al.*, 2019]. Additionally, annual mean precipitation from CHIRPS (2000-2019) was used to analyze the precipitation trend and amount of rain DF fans received.

Geomorphic Parameters

The different morphometric including topographic parameters were measured such as slope, aspect and elevation in ArcGIS 10.7. While, the surface curvature (plan curvature, profile curvature and total curvature) were derived too using DEM in ArcGIS. It should be noted that slope and curvature are the first and second-order local derivatives of the topographic surface, respectively [Deng *et al.*, 2008].

In addition, the topographic wetness index, terrain ruggedness index, texture and topographic position index (TPI) were derived using SAGA platform. Here the topographic roughness index (TRI), terrain ruggedness Index which is defined as the mean difference between a central pixel and its surrounding cells indicates soil saturation and water content it can retain [Lindsay *et al.*, 2019; Nicu, 2018]. Moreover, the topography of mountainous area can vary from smooth to irregular texture. Roughness metrics that characterize surface complexity can be analyzed using the topographic roughness index and texture [Lindsay *et al.*, 2019]. Therefore, terrain roughness index parameter was used to differentiate the local land features on the scale of the microrelief. The TPI quantifies terrain roughness by subtracting the mean elevation of a defined neighborhood from each cell [Deng *et al.*, 2008; Elkadiri *et al.*, 2014; Walk *et al.*, 2019]. Depending on the scale of the neighborhood, the TPI enables discrimination of local differences in elevation within a landform [Walk *et al.*, 2019]. The TRI has been calculated in ArcGIS using a smoothed DEM of 10 × 10 pixel based on relative topographic position index which reflect terrain ruggedness matrix and local elevation index [Lindsay *et al.*, 2019; Sahani, 2019].

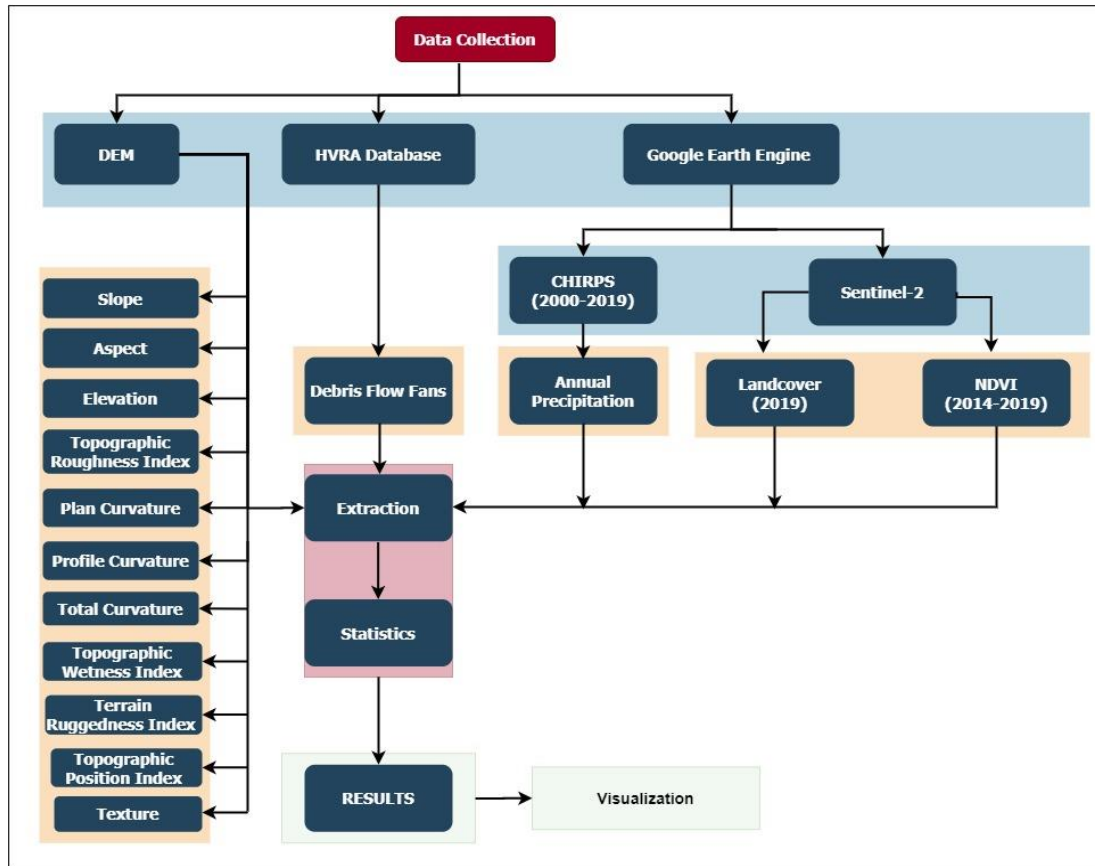


Fig. 3. Flowchart of the methodology for analysis of characteristics of DF fans in GBC

A total of 5,535 DF fans of various size were acquired from AKAHs HVRA database prepared after extensive field investigation. A detailed description of various parameters used in this research are presented in Table 1.

Table 1. Features, types & units, source and processing platform of calculated geomorphic properties of DF fans.

Features	Type and unit	Data source	Processing
Slope	Continuous (°)	DEM	Arc GIS
Aspect	Continuous (°)	DEM	Arc GIS
Elevation	Continuous (m)	DEM	Arc GIS
Plan curvature	Quantitative	DEM	ARC GIS
Profile curvature	Quantitative	DEM	ARC GIS
Total curvature	Quantitative	DEM	ARC GIS
Topographic Roughness Index	Quantitative	DEM	Arc GIS
Topographic Wetness Index	Quantitative	DEM	SAGA
Terrain Ruggedness Index	Quantitative	DEM	SAGA
Topographic Position Index	Quantitative	DEM	SAGA
Texture	Quantitative	DEM	SAGA
NDVI	Quantitative	Sentinel-2	GEE
Land cover	Nominal	Sentinel-2	GEE
Mean annual precipitation	mm/year	CHIRPS	GEE

Analysis

A total of 5,535 DF fans over 5 districts of GBC from AKAH database were retrieved database which covers an approximate area of 309.2 km², where the spatial distribution is shown in Fig. 1.

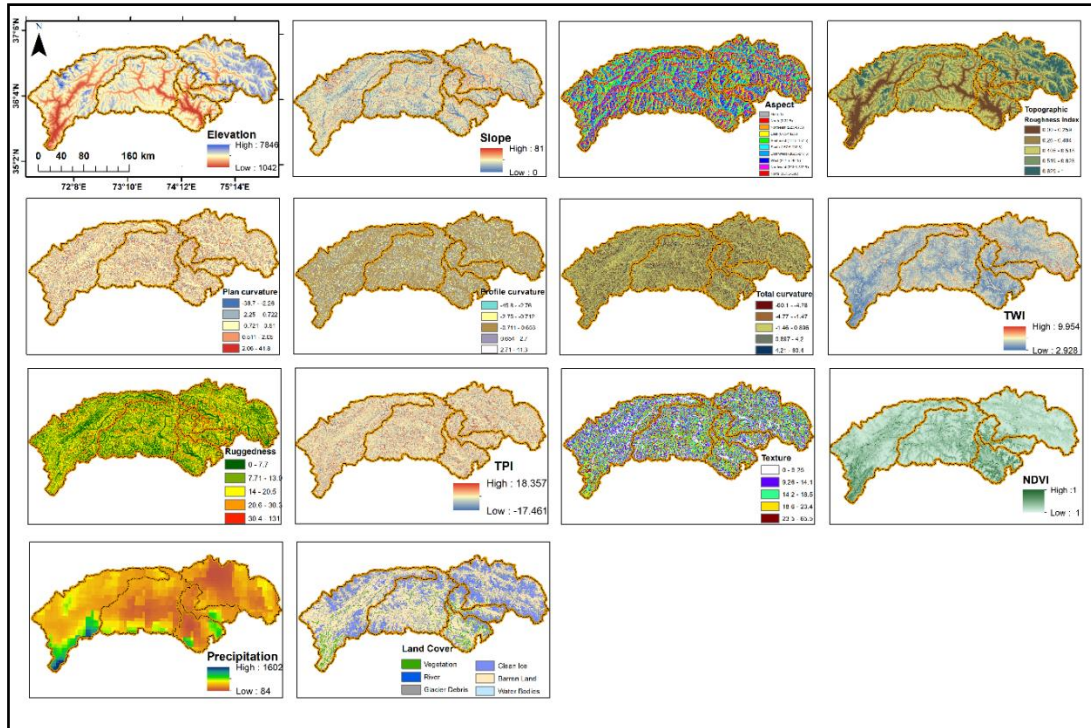


Fig. 4. Map panel showing different parameters calculated in study area for DF fan analysis

Characteristics of debris flow fans

Based on the comprehensive RS interpretation of the DF fans in the study area, different morphological and environmental characteristics of the DF fan are calculated and analyzed (Fig. 4 & Table 2). The results showed that DF fans in the study area are mostly located at mean elevation of 2278m with mean slope of 15.5°. The relatively high slope angle (51.4° maximum) indicates that deposition of sediments from the upper streams dominate the constructing processes of the DF fans and other landforms.

Curvature of slope is responsible for controlling the flow of water during rainfall. Curvature was measured based on planar profiles. Concave slopes with high negative values tend to retain water for a longer period after rainfall and this causes loosening of top layer soil [Negi *et al.*, 2020]. The mean NDVI in the region indicated that the DF fans comprised of intermediate green vegetation which include grasses and wastelands [Zeng *et al.*, 2020], which is in good agreement with field observations.

Characteristics of debris flow hazard intensity

The analysis of DF hazard in GBC identified 1581 DF fans with high intensity and high frequency making them a potential hazard in the region. However, the most predominant class is medium intensity with generational return period with total of 1984 counts. Also, the results showed that DF are recursive geohazards in the study area (Table 3).

Table 2. Statistics of different parameters extracted over DF fans

Parameters	Mean	StDev	Minimum	Maximum	Median
Slope	15.447	8.1	1.288	51.467	13.689
Aspect	180.41	79.82	3.15	357.63	177.92
Elevation	2278	542.5	1068	3733.7	2301.5
Plan curvature	-0.07287	0.24146	-2.4157	1.88244	-0.03605
Profile curvature	0.13195	0.3012	-4.58525	5.2989	0.08347
Total curvature	-0.20498	0.46557	-6.21894	6.46769	-0.12957
Topographic Roughness Index	0.18539	0.08104	0.00453	0.40124	0.18854
Topographic Wetness Index	5.2138	0.6203	3.4761	7.5399	5.2087
Terrain Ruggedness Index	6.0094	3.4284	0.7431	25.8225	5.1652
Topographic Position Index	-0.2734	0.33655	-3.25954	1.43234	-0.20623
Texture	9.6009	4.3993	0.8469	27.2214	8.9882
NDVI	0.40019	0.2095	-0.05383	0.90239	0.40075
Mean annual precipitation	304.93	116.64	98.83	868.61	304.82

Table 3. Characteristics & frequency matrix of DF fans in the study area

		Return Period			
Intensity		Frequent (< 10 years)	Generational (10-30 years)	Rare (> 30 years)	Grand Total
	High	1581	93	0	1674
	Low	0	79	1716	1795
	Medium	39	1984	43	2066
	Grand Total	1620	2156	1759	5535

Fig. 5 shows the visual impression of selected geomorphological and environmental parameters evaluated against the DF hazard intensity. The histogram of profile curvature indicates that hazard intensity classes have linear slope. The mean value of high DF intensity class indicates less planar surface as compared to other hazard intensity classes (Fig. 5a). The results show that all three DF hazard classes have negative value for total curvature. While, the high hazard class has lower values indicating the presence of DF fans in channels and valleys (Fig. 5b). As the plan curvature illustrates the curvature in the horizontal plane, the positive value indicates concave contour while negative value indicates convex contour across the surface. The results show that the DF fans in our study area have negative plan curvature, which makes it clear that DF fans are found across the valleys not along the ridges (Fig. 5c). Moreover, the profile of high hazard class shows that high hazard class is least concave as compared to other hazard classes (Fig. 5a). The slope angle of DF fans shows that high DF intensity class has larger value of slope as compared to others which slope over 18° are potentially susceptible to DF hazards (Fig. 5d). While the mean aspect angle for the DF fans shows that they have south facing angle (174°-180°), which indicates that south facing slopes are more prone to DF (Fig. 5e). The TPI values for DF fans depict very low value indicating the position of DF fans in valleys with lower slope angle (Fig. 5f).

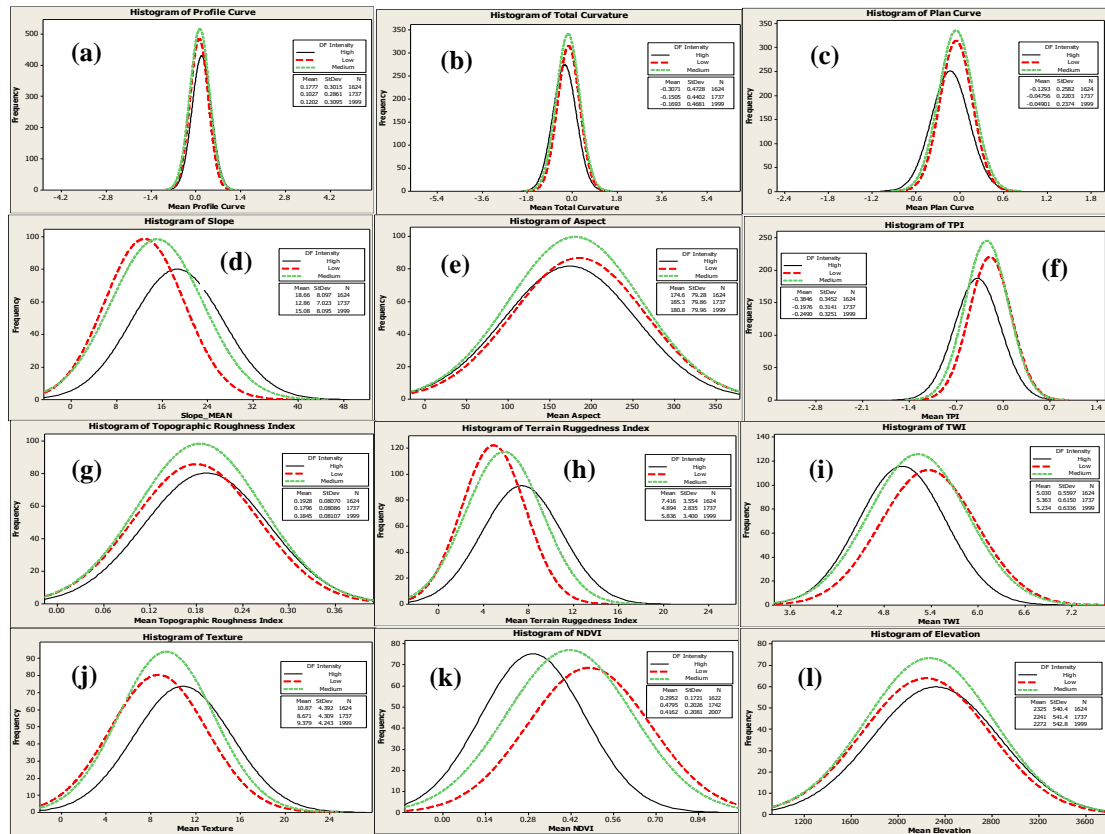


Fig. 5. Histogram (normal curve) of selected geomorphological and environmental parameters evaluated against the DF Hazard Intensity. where, (a) Profile curvature, (b) Total curvature, (c) plan curvature, (d) Slope, (e) Aspect, (f) TPI, (g) Topographic roughness index, (h) Terrain ruggedness Index, (i) TWI, (j) Texture (k) NDVI and (l) Elevation.

Topographic roughness index and terrain ruggedness index both describes the texture of area (Fig. 5g). Our analysis shows that the high hazard class has higher values for both roughness and ruggedness indexes which validate our results that high DF intensity class has coarse surface as compare to other (Fig. 5g and h). The high values of TWI represent wet areas and low values dry areas. The results showed that DF fans with high intensity are dry as compare to their mean TWI values (Fig. 5i). While the texture of DF fans indicates high DF hazard class has higher value of texture as compared to other making it clear that high DF intensity fans have coarse surface, indicating the presence of larger boulders and rocks (Fig. 5j). The observed NDVI value for DF fans depicts that the high intensity hazard class has lower value (0.29) compared with the other DF intensity classes (Fig. 5k). This indicates that there is sparse vegetation on high DF intensity fans. The reason behind this is the surface of DF fans is barren, rocky, coarse and with irregular gullies making it difficult for vegetation to grow or also indicating that the return period is high. The elevation for hazard intensity classes remains between 2272 to 2241 (Fig. 5l). The histogram for elevation depicts that high hazard class DF fans are located at higher elevations, while low hazard class DF fans at lower elevation as compare to other. The medium class DF fans are placed in between the high and low elevation.

To understand the impact of precipitation over DF fans it was observed that the annual mean precipitation was approximately 304.9 mm/year (Fig. 6). Variations in precipitation pattern can damage vegetation in climatic conditions of study area [Rasul *et al.*, 2012]. However, the observed rain is enough for sustaining vegetation and making the barren land greener. In general, it is said that, places which gain more rainfall have high vegetation index and vice versa. However, it is very eminent that in most of the cases the DF can be triggered due to excessive rainfall [Wu *et al.*, 2020; Y. Zhang *et al.*, 2019], ultimately damaging the vegetation and other resources.

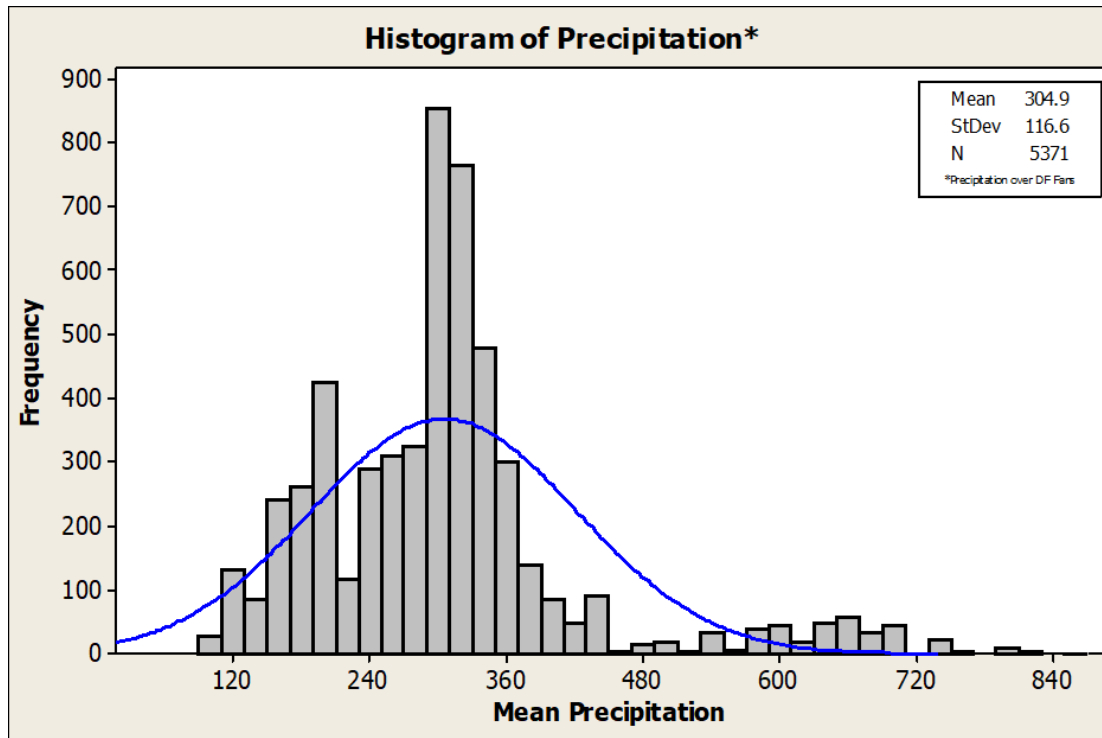


Fig. 6. Mean Annual Precipitation over DF fans with normal curve.

Land cover of debris flow fans

The development of debris flow in the study area has a long history [Khan et al., 2013; Wasson, 1978]. The number and scale of debris flow outbreaks in each debris flow gully are different, and the geographic environment in the vicinity of DF fan varies and is influenced due to human activities, making the shapes of DF fans different. The DF fans were evaluated for landcover classes (Table 4). The landcover results (Fig. 4) indicated that larger number of DF fans accounted in barren land and comparable number are on area with vegetation. As the NDVI analysis (Table 2) showed DF fans don't have dense vegetation but sparse green cover, validating our landcover results. Presence of glacier debris class indicates the presence of glacier debris fans in the region, while the presence of DF fans in urban area is concern.

Table 4. Landcover classes evaluated against DF fans.

	Landcover Class						Grand Total
	Vegetation	River	Glacier Debris	Clean Ice	Barren land	Urban	
DF Fans count	2458	27	449	4	2473	124	5535
Percent DF Fans	44.41	0.49	8.11	0.07	44.68	2.24	100

Conclusions

This research documented the surface morphology of DF fans (5535 in number) in Chitral and selected districts of Gilgit-Baltistan using various geomorphological and environmental parameters, majority of which were never envaulted in the region before. Based on DF hazard intensity and return period, all the fans were categorized into three classes viz Medium (37.33%), Low (32.43%) and High (30.24%) having total area of 309.2 km². It shows that the debris flow fan in the study area are dominated by the medium intensity fans.

Satellite based image classification proved very vital to assess the surface cover of DFs. Our analysis shows that among different landcover classes barren land and vegetation have highest count of DF fans with 44.41% and 44.68%, respectively. The analysis of geomorphological parameters suggests that the surface of DF fans to be coarse, rocky, having ability to retain a minimal amount of water content, with mean slope angle of 18 degree and present along the valleys/tributaries.

The urban areas located in the high DF hazard zones are limited in number but is a big concern due to threat to human lives. The NDVI values over DF fans can be taken as good sign, as the increased vegetation reduces the sediments movement through these gullies and small streams as they keep soil intact over DF fan surface. This it is concluded that the method implemented is robust and easy for calculating surface characteristics of DF fans in mountainous areas.

Acknowledgements

The authors would like to thank NASA and ESA for providing open-source satellite data, and Google Earth Engine team for providing cloud computing platform. Authors also acknowledge the AKAH Pakistan efforts in developing a comprehensive HVRA database and providing research platform. Authors also would like to acknowledge Mr Deo Raj Gurung for his review and suggestions.

References

- Ali, S., Biermanns, P., Haider, R., & Reicherter, K. [2019]. Landslide susceptibility mapping by using a geographic information system (GIS) along the China-Pakistan Economic Corridor (Karakoram Highway), Pakistan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(5), 999–1022.
- Bacha, A. S., Shafique, M., & van der Werff, H. [2018]. Landslide inventory and susceptibility modelling using geospatial tools, in Hunza-Nagar valley, northern Pakistan. *Journal of Mountain Science*, 15(6), 1354–1370.
- Buchroithner, M. F. [1980]. An outline of the geology of the Afghan Pamirs. *Tectonophysics*, 62(1–2), 13–35.
- Deng, Y., Wilson, J. P., & Gallant, J. C. [2008]. Terrain analysis. *The Handbook of Geographic Information Science*, 417–435.
- Elkadiri, R., Sultan, M., Youssef, A. M., Elbayoumi, T., Chase, R., Bulkhi, A. B., & Al-Katheeri, M. M. [2014]. A Remote sensing-based approach for debris-flow susceptibility assessment using artificial neural networks and logistic regression modeling. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(12), 4818–4835.
- Haserodt, K. [1968]. Zur quartären Vergleitscherung des pakistanischen Hindukusch (Chitral). *Eiszeitalter Und Gegenwart*, 19, 302–303.
- Hürlimann, M., Coviello, V., Bel, C., Guo, X., Berti, M., Graf, C., Hübl, J., Miyata, S., Smith, J. B., & Yin, H. Y. [2019]. Debris-flow monitoring and warning: Review and examples. *Earth-Science Reviews*, 199.
- Jamil, A., Khan, A. A., Bayram, B., Iqbal, J., Amin, G., Yesiltepe, M., & Hussain, D. [2019]. Spatio-Temporal Glacier Change Detection Using Deep Learning: A Case Study Of Shishper Glacier In Hunza. *International Symposium on Applied Geoinformatics*, 5. <https://www.researchgate.net/publication/337720130>
- Kamp Jr, U., Haserodt, K., & Shroder Jr, J. F. [2004]. Quaternary landscape evolution in the eastern Hindu Kush, Pakistan. *Geomorphology*, 57(1–2), 1–27.
- Khan, M. A., Haneef, M., Khan, A. S., & Tahirkheli, T. [2013]. Debris-flow hazards on tributary junction fans, Chitral, Hindu Kush Range, northern Pakistan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 720–733.
- Kritikos, T., & Davies, T. [2015]. Assessment of rainfall-generated shallow landslide/debris-flow susceptibility and runout using a GIS-based approach: application to western Southern Alps of New Zealand. *Landslides*, 12(6), 1051–1075.
- Lindsay, J. B., Newman, D. R., & Francioni, A. [2019]. Scale-optimized surface roughness for topographic analysis. *Geosciences (Switzerland)*, 9(7).

- Negi, H. S., Kumar, A., Rao, N. N., Thakur, N. K., Shekhar, M. S., & Snehmani. [2020]. Susceptibility assessment of rainfall induced debris flow zones in Ladakh–Nubra region, Indian Himalaya. *Journal of Earth System Science*, 129(1).
- Nicu, I. C. [2018]. Application of analytic hierarchy process, frequency ratio, and statistical index to landslide susceptibility: an approach to endangered cultural heritage. *Environmental Earth Sciences*, 77(3).
- Rasul, G., Mahmood, A., Sadiq, A., & Khan, S. I. [2012]. Vulnerability of the Indus delta to climate change in Pakistan. *Pakistan Journal of Meteorology*, 8(16).
- Sahani, N. [2019]. Application of analytical hierarchy process and GIS for ecotourism potentiality mapping in Kullu District, Himachal Pradesh, India. *Environment, Development and Sustainability*, 0123456789.
- Shah, A., Ali, K., Nizami, S. M., Jan, I. U., Hussain, I., & Begum, F. [2019]. Risk assessment of shishper glacier, hassanabad hunza, north pakistan. *Journal of Himalayan Earth Sciences*, 52(1), 1–11.
- Shrestha, F., Uddin, K., Bikash Maharjan, S., & Ratna Bajracharya, S. [2016]. Application of remote sensing and GIS in environmental monitoring in the Hindu Kush Himalayan region. *AIMS Environmental Science*, 3(4), 646–662.
- Šilhán, K., & Tichavský, R. [2017]. Snow avalanche and debris flow activity in the High Tatras Mountains: New data from using dendrogeomorphic survey. *Cold Regions Science and Technology*, 134, 45–53.
- Tomczyk, A. M., & Ewertowski, M. W. [2017]. Surface morphological types and spatial distribution of fan-shaped landforms in the periglacial high-Arctic environment of central Spitsbergen, Svalbard. *Journal of Maps*, 13(2), 239–251.
- Walk, J., Stauch, G., Bartz, M., Brückner, H., Walk, J., Stauch, G., & Bartz, M. [2019]. Geomorphology of the coastal alluvial fan complex Guanillos, northern Chile. *Journal of Maps*, 15(2), 436–447.
- Wasson, R. J. [1978]. A Debris Flow at Reshūn, Pakistan Hindu Kush. *GEOGRAFISKA ANNALER*, 60(3/4), 151–159.
- Wu, S., Chen, J., Xu, C., Zhou, W., Yao, L., Yue, W., & Cui, Z. [2020]. Susceptibility Assessments and Validations of Debris-Flow Events in Meizoseismal Areas: Case Study in China's Longxi River Watershed. *Natural Hazards Review*, 21(1), 1–13.
- Yang, Z., Zhu, Y., Zou, D. H. S., & Liao, L. [2011]. Activity degree evaluation of glacial debris flow along international Karakorum Highway (KKH) based on fuzzy theory. *Advanced Materials Research*, 261–263, 1167–1171.
- Zaginaev, V., Petrakov, D., Erokhin, S., Meleshko, A., Stoffel, M., & Ballesteros-Cánovas, J. A. [2019]. Geomorphic control on regional glacier lake outburst flood and debris flow activity over northern Tien Shan. *Global and Planetary Change*, 176(November 2018), 50–59.
- Zeng, L., Wardlow, B. D., Xiang, D., Hu, S., & Li, D. [2020]. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111511.
- Zhang, N., & Matsushima, T. [2018]. Numerical investigation of debris materials prior to debris flow hazards using satellite images. *Geomorphology*, 308(2017), 54–63.
- Zhang, Y., Ge, T., Tian, W., & Liou, Y.-A. [2019]. Debris Flow Susceptibility Mapping Using Machine-Learning Techniques in Shigatse Area, China. *Remote Sensing*, 11(23), 2801.



Лито-структурное картирование селеопасных зон западного Дарваза (Таджикистан и Афганистан) по данным Sentinel и с использованием методов дистанционного зондирования

Дж.Х. Аминов^{1,2}, А.Р. Фазылов¹, Дж.Х. Аминов^{3,4}, Ю. Мамаджанов⁵,
М.З. Кобулиев², Дж.Б. Ниязов¹

¹Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан, javhar1985@gmail.com

²Синьцзянский институт экологии и географии Китайской академии наук, Урумчи, Китай, kobuliev@list.ru

³Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан, jovid.aminov@outlook.com

⁴Институт исследования Тибетского плато Китайской академии наук, Пекин, Китай

⁵Научно-исследовательский центр экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе), Душанбе, Таджикистан, petrology@mail.ru

Аннотация. Для исследования оползней, являющимися одним из факторов формирования селевых потоков в условиях экстремальных, критических пороговых значений количества жидких осадков, а также анализа устойчивости склонов, носителем ключевой информации являются геологические карты. Существенное значение для осмысления подобных рисков стихийных бедствий имеет литологическая и структурная информация, содержащая сведения о типе породы и геоморфологических условиях. Исследуемая территория - район Дарваз является одной из уязвимых зон, подвергающейся рискам стихийных бедствий и, в том числе частым селепроявлением. В частности, 9 июля 2017 года сель, сошедший с гор левобережного афганского Дарваза и спровоцировавший оползень, перекрывший русло реки Пяндж, привел к человеческим жертвам на афганской территории и к разрушению жилых объектов на территории Таджикистана. Данное исследование для литологического и структурного картирования с помощью методов улучшения изображения осуществлено с применением набора спутниковых снимков Sentinel, включая радары с синтезированной апертурой (SAR)-S1A и оптический S2A. При этом распознавание и разграничение литологических единиц на оптических изображениях в исследуемой области достигнуто путём определения наиболее подходящей цветовой композиции и независимых компонентов из анализа независимых компонентов (ICA). Анализ линеаментов на радарных снимках для структурного картирования в исследуемой области осуществлён посредством соотношения компонентов и определением оптимальных параметров для автоматического их выявления с помощью комбинации алгоритмов обнаружения контуров и связывания линий. Отражены результаты сравнения полученных изображений с существующими геологическими картами и затенённым рельефом района исследования – Дарваза.

Ключевые слова: Дарваз, сель, оползень, дистанционное зондирование, Sentinel 1A, Sentinel 2A, улучшение изображения, геологическое картирование, цветные композиции

Ссылка для цитирования: Аминов Дж.Х., Фазылов А.Р., Аминов Дж.Х., Мамаджанов Ю., Кобулиев М.З., Ниязов Дж.Б. Лито-структурное картирование селеопасных зон западного Дарваза (Таджикистан и Афганистан) по данным Sentinel и с использованием методов дистанционного зондирования. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 134–145.

Litho-structural mapping of debris flow hazard zones of Western Darvaz (Tajikistan and Afghanistan) from Sentinel data using remote sensing techniques

J.H. Aminov^{1,2}, A.R. Fazilov¹, J.H. Aminov^{3,4}, Y. Mamadjanov⁵, M.Z. Kobuliev², J.B. Niyazov¹

¹*Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology, National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan, javhar1985@gmail.com*

²*Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, China, kobuliev@list.ru*

³*Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology, National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan, jovid.aminov@outlook.com*

⁴*Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China*

⁵*Research Center for Ecology and Environment of Central Asia (Dushanbe), Dushanbe, Tajikistan, petrology@mail.ru*

Abstract. The landslides are one of the factors, which trigger formation of debris flows under extreme, critical threshold values of the amount of liquid precipitation. For investigation of landslides, as well as analysis of the stability of the slopes, the key sources of information are geological maps. The lithological and structural information has significant value for understanding these disaster risks containing the information about the type of rock and geomorphological conditions. The study area - Darvaz region is one of the vulnerable areas at risk of natural disasters and, in particular, frequent debris flows. In particular, on July 9, 2017, the debris flow that came down from the mountains of the left-bank of the Panj River - Afghan Darvaz and instigated a landslide, thus blocking the channel of the Panj River and leading to human casualties on Afghan territory and to the destruction of residential facilities on the territory of Tajikistan. The study for lithological and structural mapping through image enhancement techniques is carried out using the Sentinel satellite dataset, including Synthetic Aperture Radar (SAR) -S1A and optical S2A. Wherein, the recognition and discrimination of lithological units from optical images in the study area achieved by determining the most suitable color composition and independent components from the independent component analysis (ICA). The analysis of lineaments on radar images for structural mapping in the study area are implemented through the component ratioing and determination of the optimal parameters for automatic extraction of lineaments with a combination of edge detection and line-linking algorithms. The obtained results are compared with the existing geological and shaded relief thematic maps of the study area.

Key words: *Darvaz, debris flow, landslide, remote sensing, Sentinel 1A, Sentinel 2A, image enhancement, geological mapping, color composites*

Cite this article: Aminov J.H., Fazilov A.R., Aminov J.H., Mamadjanov Y., Kobuliev M.Z., Niyazov J.B. Litho-structural mapping of debris flow hazard zones of Western Darvaz (Tajikistan and Afghanistan) from Sentinel data using remote sensing techniques. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 134–145.

Введение

Дистанционное зондирование и его результаты чрезвычайно востребованы для проведения геологических исследований.

Геологические карты являются носителем ключевой информации для исследования оползней, являющимися одним из факторов формирования селевых

потоков в условиях экстремальных и критических пороговых значений количества жидких осадков, а также анализа устойчивости склонов.

Наиболее распространённым методом составления геологических карт было использование данных, полученных наземными исследованиями при организации полевых наблюдений.

В горных районах, где многие местности труднодоступны, качество и точность традиционного картирования недостаточно высокие. В настоящее время, разработанные методы дистанционного зондирования открыли новую эру в литологическом картировании. Дистанционное зондирование и ГИС-методы могут быть интегрированы для распознавания типов горных пород и линеаментов. Наряду с этим для картирования зон минерализации и исследования почвенного слоя весьма эффективно используются методы спектрального и пространственного улучшения снимков и их цифровая обработка, включая преобразованное пространство признаков данных - анализ независимых компонентов (ICA) и анализ главных компонентов (PCA), соотношение полос, цветовые композиции (натуральные или искусственные), растяжение декорреляции и спектральный индекс [eg. *Ali et al., 2013; Asadzadeh et al., 2016*].

Картирование линейных структурных сегментов, которые называются «линеаментами» на поверхности Земли, всегда было важной частью любого структурно-геологического исследования. Линеаменты раскрывают архитектуру подстилающих пород, образовавшихся в результате различных тектонических (деформационных) процессов на протяжении всей геологической истории региона [*Ramli et al., 2010*]. Ввиду того, что традиционные методы наземного картирования сложны и трудоемки, их эффективность для структурно-геологических исследований многих горных районов, в том числе для данного района исследований, низкая. Таким образом, возникла необходимость в разработке автоматических, менее трудоемких подходов для геологического картирования подобных регионов, используя при этом спутниковые снимки, а также вычислительное программное обеспечение и алгоритмы.

Линеаменты обычно встречаются в виде границ с тональными различиями на спутниковых изображениях и большинство подходов обнаружения основаны на методах улучшения краев и фильтрации [eg. *Pour et al., 2014; Fagbohun et al., 2017*].

В существующих исследованиях были предложены два основных метода идентификации линейных элементов и извлечения их из данных дистанционного зондирования.

Первый метод подразумевает улучшение и визуальную интерпретацию линейных структурных сегментов с использованием методов улучшения снимков, а именно: соотношение спектральных полос снимков, слияние изображений, фильтры направленного движения и обнаружение краёв, позволяют создать линейную векторную карту с использованием методов ручной оцифровки [*Eldosouky et al., 2017*]. Несмотря на эффективность, этот метод довольно трудоемкий и требует от пользователя оцифровки линеаментов вручную.

С другой стороны, вторая методика позволяет обнаруживать и автоматически выявлять линейные сегменты с использованием компьютерного программного обеспечения и алгоритмов, в конечном итоге создавая карту линеаментов [eg. *Kim et al., 2004*]. Автоматический подход выявления линейных объектов включает в себя как ручную визуализацию, так и автоматическое извлечение линейных элементов с использованием такого программного обеспечения, как PCI GeoAnalyst, Geomatica и алгоритм Canny [*Marghany et al., 2010*] и Matlab [*Rahnama et al., 2014*]. Наиболее широко используемым программным обеспечением для автоматического извлечения линеаментов является модуль LINE в составе PCI Geomatica [*Hung et al., 2005b*].

Ручные и автоматизированные методы извлечения линеаментов могут дать надежные результаты. Ручной метод широко используется для валидации линеаментов, извлеченных автоматизированным методом [eg. *Aminov et al., 2019*]. Однако ручная интерпретация улучшенных изображений для извлечения структурной информации может быть сложной задачей, которая требует много времени и сильно зависит от качества анализа и опыта экспертов [*Masoud et al., 2006*]. Следовательно, автоматические

методы извлечения линементов стали более полезными в последние несколько десятилетий.

В настоящее время развитие и прогресс в геоинформационных системах (ГИС) и методов дистанционного зондирования позволяют использовать различные источники данных и методы для характеристики линементов.

Спутники Sentinel являются частью космической программы Copernicus, действующей в Европейском космическом агентстве (ESA). Программа направлена на то, чтобы заменить прошлые миссии по дистанционному зондированию и обеспечить непрерывность данных для исследования атмосферы, а также мониторинга океана и суши. Для этого используются шесть различных спутниковых миссий, сосредоточенных на разных аспектах наблюдения Земли. Среди этих шести миссий Sentinel-1 (S1) и Sentinel-2 (S2) предоставляют обычные снимки дистанционного зондирования, полученные SAR и оптическими датчиками, соответственно [Berger et al., 2012].

Памир и его окрестности – это один из горных регионов, труднодоступных для наземных исследований. Этот район является западным продолжением тибетско-гималайского региона и остается геологически наименее изученной территорией. Отчасти это связано со сложным рельефом и климатом данного региона, которые затрудняют доступ во время наземных съемок. Следует отметить, что геологические карты, составленные в ходе наземных изысканий в 20-м веке, являются предметом споров и требуют пересмотра.

Основной целью данного исследования является применение методов дистанционного зондирования в литологическом и структурном картографировании в зонах с опасным и катастрофическим схождением селевых потоков (рис. 1).

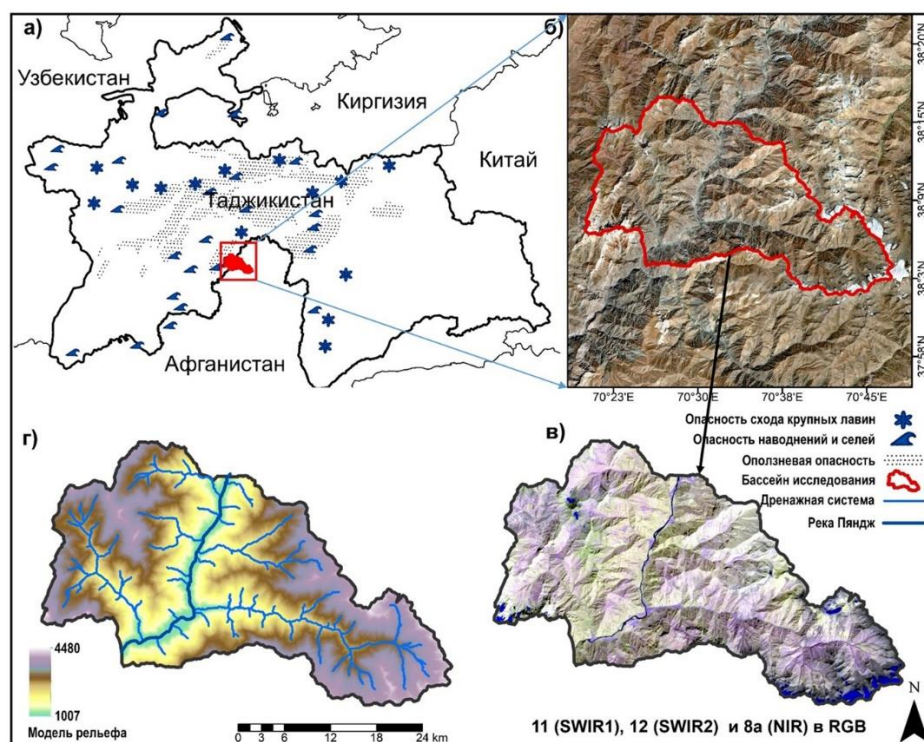


Рис. 1. Карта расположения исследуемой территории и проявления стихийных бедствий в Таджикистане [источник: КОСПРТ] (а). Изображение натуральной цветовой композиции исследуемой области (б). Изображение ложной цветовой композиции (в). Карта модели рельефа и дренажной системы (г)

Fig. 2. The location map of the study area and the manifestation of natural disasters in Tajikistan [source: CEPGRT] (a). The true color composite image of the study area (б). False color composite Image (в). Drainage and elevation model map (г)

Реализация поставленной цели осуществлена с использованием данных Sentinel-1A и Sentinel-2A, доступных современных методов и программного обеспечения для пространственного и спектрального анализа. Такой комплексный подход исследований позволяет реализовать картирование разнообразных типов горных пород, при этом различая их друг от друга, а также очерчивая линейные особенности в данной области исследования с использованием данных дистанционного зондирования.

Геологическое строение района исследования

Район исследования расположен на границе Афганистана с Таджикистаном, относительно русла трансграничной реки Пяндж и охватывает бассейны четырёх её притоков, которые впадают в неё с обеих сторон (рис. 1).

Административно этот участок входит в состав Дарвазского района Таджикистана и Шикаиского района Афганистана. В геологическом отношении исследуемый бассейн притоков реки Пяндж входит в состав северо-памирской тектонической зоны и с востока примыкает к Дарвазскому сдвигу, который является юго-западным продолжением основного памирского надвига. Находясь в зоне глубинного разлома, рассматриваемый участок характеризуется интенсивной деформацией горных пород, выражающаяся в их складчатости и нарушением многочисленными разломами (рис. 2б). Стратиграфически район исследования состоит из отложений нижнего и верхнего палеозоя (ордовик — пермь), которые прорываются ниже - карбоновыми гранитоидами и верхнепермскими габбродиоритами и диоритами. Ордовикские отложения представлены морскими терригенными отложениями (глинистые сланцы, песчаники). Разрез ниже-карбоновых отложений состоит в основном из эффузивных и туфогенных образований, однако в нижней части разреза основные эффузивы перекрываются морскими терригенно-карбонатными отложениями (известняки, глинистые сланцы, песчаники). Верхне-карбоновые отложения в основном состоят из терригенно-карбонатных отложений (известняки, сланцы, песчаники, конгломераты). Нижняя пермь представлена переслаиванием известняков с песчаниками и конгломератами. Стратиграфический разрез завершается небольшим обнажением палеогеновых песчаников, алевролитов и конгломератов (рис. 2б).

Описание данных

Набор спутниковых данных, охватывающий район исследования, включает в себя снимки Sentinel-1A (S1A) и Sentinel-2A (S2A). В данном исследовании было использовано изображение S2A с T42SXH номером, снятым 09 сентября 2018 года, обладающее всеми пространственными и спектральными характеристиками, соответствующими продукту уровня L1C (L1C) S2A мультиспектральный инструмент. Спектральные каналы включают в себя четыре полосы с пространственным разрешением 10 м (2, 3, 4 и 8a), шесть полос с разрешением 20 м (5, 6, 7, 8b, 11 и 12) и три полосы по 60 м (1, 9 и 10). В исследовании также использовалось радарное изображение с синтезированной апертурой (SAR) S1A, полученное с помощью интерферометрического режима широкого диапазона (IW) на восходящей орбите и двойной поляризации (вертикальная передача, вертикальный приём VV и вертикальная передача, горизонтальный приём VH) 16 августа 2019 года. Использованный S2A MSI в качестве продукта L1C и изображения S1A SAR C-диапазона (5,405 ГГц) были получены бесплатно с веб-сайта Copernicus - центр открытого доступа [ESA]. Кроме того, для орторектификации радарного изображения и анализа затенённого рельефа использовалась SRTM модель рельефа.

Предварительная обработка и улучшение изображений

Этап предварительной обработки изображений является важным для уменьшения атмосферного эффекта, существующего на оптических изображениях дистанционного

зондирования [Tempfli et al., 2009]. Данная обработка была выполнена для мультиспектральных данных S2A, с целью улучшения качества необработанных изображений, используемых в этом исследовании. Радарное изображение также было предварительно обработано фильтрацией и коррекцией местности (орторектификация), с целью уменьшения существующего шума и геометрического исправления изображения.

Полученный набор данных S2A L1C был атмосферно скорректирован с использованием процессора Sen2Cor версии 2.5.5 [European Space Agency, 2017]. Процессор Sen2Cor выполняет предварительную обработку продукта данных TOA L1C и применяет классификацию изображений с коррекцией атмосферы, рельефа местности и перистых облаков с последующим преобразованием в орто-изображения второго уровня (L2A), со значениями отражения от поверхности (reflectance) нижней части атмосферы (BOA). Полученный набор данных BOA охватывает полосы 2 - 7, 8, 8a, 11 и 12. Прибрежная аэрозоль - полоса 1 (60 м), водяные пары - полоса 9 (60 м) и перистые облака - полоса 10 (60 м) были исключены процессором атмосферной коррекции. Кроме того, набор данных изображения был пространственно изменён для уменьшения размера изображения, с целью охвата заданной области исследования.

Радарный снимок SAR S1A был также предварительно обработан с помощью модуля обработки Sentinel-1 программы SNAP версии 7.0.0 [Sentinel-1 Toolbox], разработанный ESA. На этом этапе в первую очередь была применена фильтрация подавления спекл-шума, что позволило сохранить структуру данных изображения путём фильтрации однородных поверхностей и сохранения краёв, что важно в исследованиях в области структурной геологии. Для этой цели был применён уточнённый фильтр Ли [Lee, 1981], который широко используется для уменьшения спекл-эффекта на изображениях SAR. Спекл-шумы на изображениях SAR генерируются когерентной интерференцией волн, обратно рассеянных от шероховатой поверхности Земли, что усложняет проблему интерпретации изображений [Lee et al., 1999].

Вместе с тем, для достижения изображения, геометрически представляющего реальную поверхность Земли, выполнена коррекция местности (геокодирование и орторектификация снимка), используя при этом метод Range-Doppler Terrain Correction.

Такой подход был реализован использованием цифровой модели рельефа (SRTM) с пространственным разрешением 3 угловых секунды (90 м), рекомендуемой для радарных данных.

В результате предварительной обработки данных были получены снимки, содержащие два слоя: амплитуды (A) и интенсивности (I) в поляризациях VV и VH соответственно. Компоненты (A и I) содержат информацию об амплитуде и фазе обнаруженного сигнала и хранятся в разных слоях. Слой (A) обозначает положение момента времени в цикле формы волны переданного микроволнового сигнала датчиком, тогда как слой (I) обозначает измеренную интенсивность обратного рассеяния сигнала датчиком. Объединение компонентов (A и I) осуществлено с использованием так называемой методики определения соотношения.

Методика исследования

Обработка изображений, реализованная в этом исследовании, включает в себя построение изображения с использованием ложной цветовой композиции (FCC), анализа независимых компонентов (ICA) и автоматического выявления линейных элементов. На FCC изображениях, полосы 8, 8a, 11 и 12 оказались более информативными для литологического разграничения, чем полосы 2, 3, 4, 5, 6 и 7 набора данных S2A. ICA является методом извлечения признаков, целью которого является поиск набора некоррелированных компонентов, максимально независимых друг от друга [Jutten et al., 1991; Yang et al., 2014a]. Каждая компонента содержит спектральную информацию, соответствующую определенному признаку в исходном изображении.

Установлено, что метод ICA, по сравнению с PCA, оказался более применимым для характеристики, а также для классификации литологических единиц [Yang et al., 2014b].

Автоматическое выявление линеаментов осуществляется в двух этапах обработки. Первым этапом является обнаружение краёв, дающих информацию об областях резких изменений значений соседних пикселей, тогда как второй этап позволяет обнаружить линии [Adiri et al., 2017]. Реализация двух этапов обработки осуществлена с использованием модуля LINE программы PCI Geomatica, используемого для автоматического извлечения линеаментов [Abdullah et al., 2010; Qari, 2011]. В этом модуле применяются методы фильтрации и свёртки изображения для увеличения резкости и выявления линейных структур, тогда как извлечение (картирование) выявленных линеаментов проводится путём прослеживания смежных пикселей похожей яркостной интенсивности. При этом, важным является определение оптимальных параметров для выявления и извлечения линеаментов. Параметры для данного исследования подбирались путём анализа спектральной характеристики использованного снимка и существующей литературы (таблица). Более подробно методика и алгоритм обработки радарных снимков для выявления и извлечения линеаментов описаны в работе [Aminov et al., 2019].

Подготовленное изображение S1A-VH исследуемой области использовалось в качестве входных данных модуля LINE для составления карты линеаментов (рис. 4а).

Таблица. Примененные значения параметров модуля LINE

Table. Applied values of LINE module parameters

Пороговые параметры и единицы		Значения		
		по умолчанию	предложены	применены
1	RADI (в пикселях)	10	3-8	8
2	GTHR (в диапазонах, 0-255)	100	10-70	60
3	LTHR (в пикселях)	30	10-50	20
4	FTHR (в пикселях)	3	2-5	3
5	ATHR (в градусах)	30	3-20	15
6	DTHR (в пикселях)	20	10-50	20

Предполагается иллюминация растровой поверхности, заданная с разным азимутом и высотой солнца. Границы между затенёнными и не затенёнными участками могут указывать на наличие линеаментов [Masoud et al., 2006; Saadi et al., 2011]. Поэтому, анализ карты затенения рельефа (shaded relief), извлеченной из цифровой модели рельефа (DEM), способствует выявлению линеаментов. Поэтому тематическая карта с затенённым рельефом была получена из модели рельефа и улучшена путём применения минимально-максимального растяжения вдоль цветовой шкалы. Азимут, который указывает на относительное положение Солнца вдоль горизонта, и высотный угол, указывающий на угол возвышения Солнца над горизонтом, были выбраны по умолчанию. Задача была выполнена с использованием инструмента «Hillshade» в программном обеспечении ArcMap.

Результаты

Методы предварительной обработки изображений - радиометрическая калибровка и атмосферная коррекция для снимков Sentinel-2A (S2A) и спекл-фильтрация и коррекция местности для изображений Sentinel-1A (S1A), позволили предварительно улучшить и подготовить их для дальнейшего анализа.

В соответствии со спектральными характеристиками используемого изображения S2A, наилучший литологический контраст отображается цветовой композицией полос 11, 12 и 8 или 8a в RGB соответственно. Подобные спектральные каналы были определены как более информативные, используемые в геологических исследованиях для выделения литологических единиц посредством составного изображения в ложном цвете [Aminov et al., 2018]. Как показано на рис. 1в, представленная комбинация полос позволяет разграничить слои конгломератов и диоритовые тела по их ярким цветам; а туфогенные породы имеющие также яркий цвет, позволяют хорошо отличать их от известняковых пород.

Результаты независимых компонентов, полученные с помощью анализа независимых компонентов, и интерпретированная информация от этих компонентов, относящаяся к спектральным каналам, содержащим литологическую информацию (рис. 2а), показывают, что независимые компоненты IC1, IC4 и IC5 могут интерпретироваться как связанные с определенными литологическими единицами в пределах области исследования.

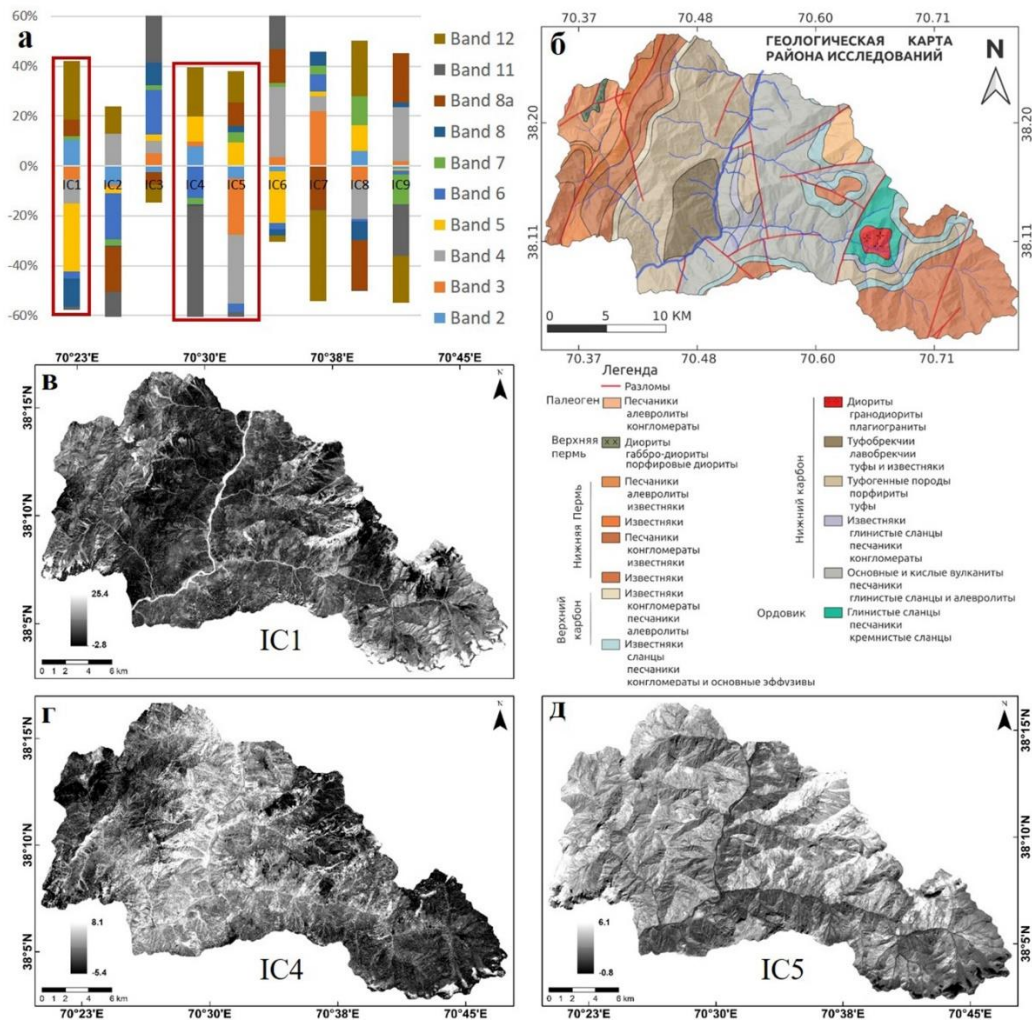


Рис. 3. Результаты, полученные с помощью метода ИСА, применённого к предварительно обработанным данным: а) 100% составная диаграмма, показывающая значение элементов на независимых компонентах; б) Геологическая карта района исследования; в)–д) карты, показывающие значения на IC 1, 4, 5 соответственно

Fig. 4. The obtained results using the ICA method applied to preprocessed data: a) 100% stacked diagram showing the loadings of elements on independent components; b) Geological map of the study area; v) - d) maps showing values on IC 1, 4, 5, respectively

Например, некоторые из известняков отличаются на IC1 своими положительными значениями, тогда как туфогенные породы, основные и кислые вулканы отличаются отрицательными значениями (рис. 2в). Аналогично, IC4 различает диоритовые, туфогенные породы, основные и кислые вулканы по их положительным значениям, а песчаники и конгломераты по их отрицательным значениям (рис. 2г). Конгломераты лучше всего можно отличить от известняков, туфогенных пород, основных и кислых вулканических пород на IC5 по их соответственно положительным и отрицательным значениям (рис. 2д). FCC изображение из этих независимых компонентов было сделано путем назначения IC5 для красного цвета, IC4 для зеленого и IC1 для синего компонентов RGB (рис. 3). Это FCC изображение хорошо показывает отличия различных горных пород, поскольку оно содержит большую часть данных, отражающих литологические изменения. Это изображение оказалось значимым для различения пород, где каждый тип породы имеет свой определенный цвет.

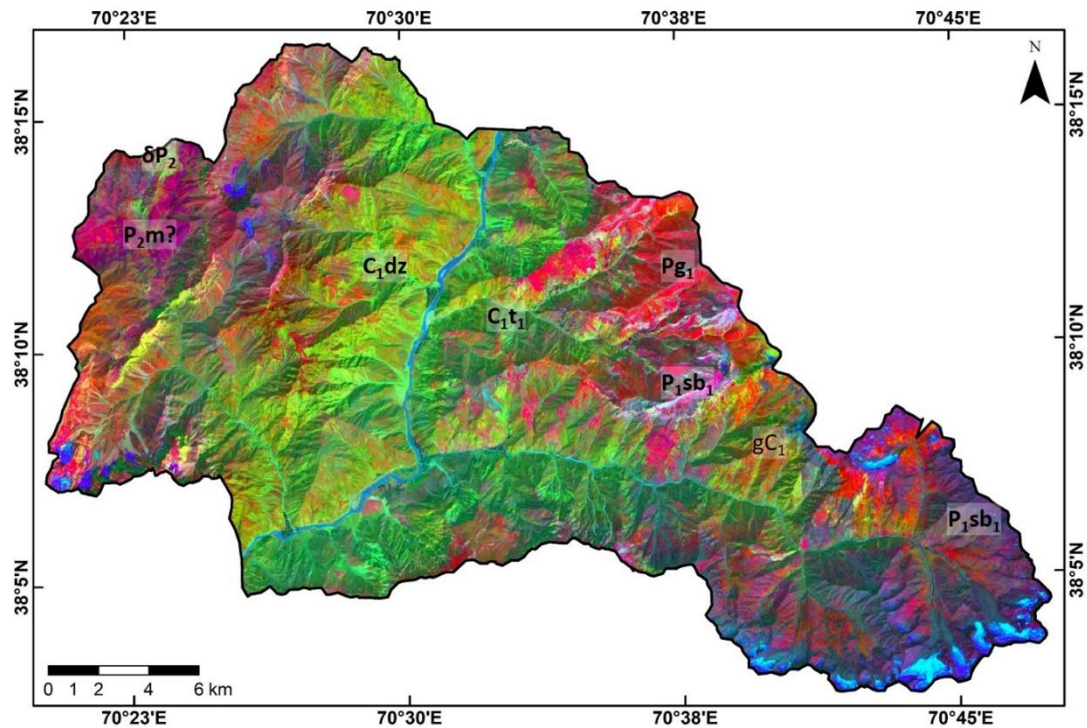


Рис. 5. Цветовая композиция, полученная от независимых компонентов из анализа IC на снимке Sentinel-2A (IC5, C4, IC1 в R, G, B) исследуемой области. C1t1 -Основные и кислые вулканы, песчаники; P1sb1 –Известняки; P2m? -Песчаники, алевролиты, конгломераты; δP2 -Диориты, порфиновые диориты; C1dz -Туфогенные породы, порфириты, туфы; Pg1 -Конгломераты, песчаники, алевролиты; gC1 -Диориты, гранодиориты, плагиограниты

Fig. 6. Color composite of independent components from the IC analysis on Sentinel-2A image (IC5, C4, IC1 в R, G, B) of the study area. C1t1 - Basic and felsic volcanics, sandstones; P1sb1 – Limestones; P2m? -Sandstones, siltstones, conglomerates; δP2 -Diorites, porphyry diorites; C1dz - Tuffaceous rocks, porphyrites, tuff; Pg1 - Conglomerates, sandstones, siltstones; gC1 -Diorites, granodiorites, plagiogranites

В процессе исследований проанализирована также корреляция между выделенными линеаментами и затенением освещения путём наложения автоматически извлеченных линеаментов (рис. 4б) на тематическую карту с затенённым рельефом. На основе полученных результатов анализа с визуальной интерпретацией установлено, что линеаменты, извлечённые с помощью автоматической процедуры из изображения в поляризации VH S1A, подготовленного с помощью соотношения компонентов (рис. 4а, б), расположены между затенёнными и не затенёнными участками, наклонами и даже в

областях, не имеющих значения, классифицируемых как область затенения, имеющая откосы и структурные особенности (рис. 4в).

Следовательно, подтверждается высокая чувствительность радарных данных S1A к геоморфологическим структурам.

В исследованиях, посвященных анализу и картированию линеаментов, классификационная карта по плотности линеаментов широко используется для корреляционного анализа с выявленными структурами с геологической информацией и их интерпретации в контексте геологического строения и истории развития исследуемого района [eg. Hung et al., 2005b; Fagbohun et al., 2017]. Классификационная карта предоставляет информацию о концентрации линеаментов на единицу площади [Mostafa et al., 1995]. Карты плотности линеаментов в этом исследовании получены с извлеченных линеаментов для анализа дисперсионной картины линеаментов (рис. 4г).

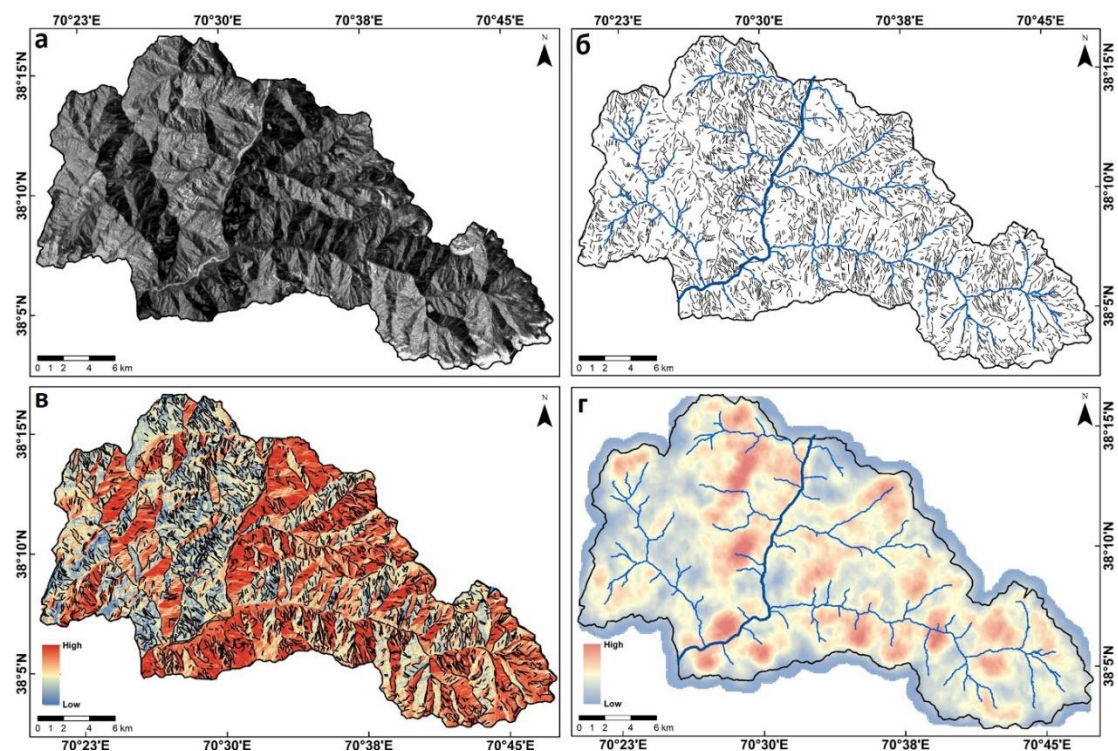


Рис. 7. а) Подготовленное изображение в поляризации S1A-VH путём соотношения (ratioing) двух компонентов. б) Карта автоматически извлечённых линеаментов района исследования. в) Суперпозиция извлечённых линеаментов на затененный рельеф. г) Карта плотности извлечённых линеаментов

Рис. 8. а) Prepared image in S1A-VH polarization by ratioing of two components. б) Map of automatically extracted lineaments of the study area. в) Superposition of the extracted lineaments on the shaded relief. г) Density map of the extracted lineaments

Более высокие значения плотности на карте представлены красным цветом, а более низкие значения - синим. Большинство значений высокой плотности линеаментов (рис. 4г) находятся в северной части изображения, где в основном обнажаются туфогенные породы, конгломераты и тела диоритов. Зоны более высокой плотности линеаментов могут отражать угол наклона горных склонов, которые контролируются литологическим строением района исследования. Следовательно, более высокая плотность линеаментов в северной части исследуемого участка может означать более высокий уровень деформации горных пород в этой части района исследования.

Выводы

В результате данного исследования достигнута основная цель – получение наиболее достоверной литологической и структурной информации о селеопасной зоне с использованием наборов оптических и радарных снимков Sentinel и цифровой обработки полученных изображений.

В процессе исследования внедрена техника цифровой обработки спутниковых снимков для литологического и линеamentного картирования селеопасной территории в приграничном между Таджикистаном и Афганистаном районе (запад Памирского плато).

Результаты обработки данных были сопоставлены с имеющейся геологической картой исследуемого района в масштабе 1: 200 000 [Власов, 1963 Таджикистан] и 1: 500 000 [USGS, Афганистан]. Изображение композита ложного цвета (11, 12 и 8) из снимка S2A и цветное композитное изображение независимых компонентов (IC5, IC4 и IC1) обеспечивают отличного качества различие между разными литологическими единицами в исследуемом районе.

Полученные результаты позволили выявить более мелкие тела и обнажения литологических единиц, ранее не нанесённые на картах во время предыдущих наземных картографических исследований, выполненных в основном в двадцатом столетии, и способствовали повышению точности существующих карт для исследованного района.

Следует отметить, что изображение S1A позволило довольно точно выявить и извлечь линеamentы из поляризации VH. Это подтверждает эффективность радарных изображений при автоматическом извлечении линеamentов, что в равной мере относится также к VH поляризации S1A и тому, что компоненты амплитуды и интенсивности этого изображения объединены вместе. Линеamentы, извлеченные из S1A, показывают высокую корреляцию с резкими изменениями в областях склона и затенения.

Полученные результаты могут быть использованы при анализе и оценке опасности схождения оползней и развитии селепроявлений исследуемых территорий, горно-предгорной зоны.

Благодарности

Авторы благодарны Европейскому космическому агентству (ESA) за предоставление данных Sentinel-1 и Sentinel-2.

Список литературы

- Abdullah A., Akhir J.M., et al. (2010). Automatic mapping of lineaments using shaded relief images derived from digital elevation model (DEMs) in the Maran–Sungi Lembing area, Malaysia. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 1-9
- Adiri Z., el Harti A., et al. (2017). Comparison of Landsat-8, ASTER and Sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of Sidi Flah-Bouskour inlier, Moroccan Anti Atlas. *Adv. Space Res.*, 60, 2355–2367.
- Ali S. A., Ali U. (2013). Litho-Structural Mapping of Sind Catchment (Kashmir Basin), NW Himalaya, using Remote Sensing and GIS Techniques. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. Vol. 4, No. 7, 1325-1330.
- Aminov J., Chen X., et al. (2018). Evaluation of Remote Sensing Techniques for Lithological Mapping in the Southeastern Pamir using Landsat 8 OLI Data. *Int. J. Geoinform.*, 14, 1–10.
- Aminov J., Xi C., et al. (2019). Comparison of multi-resolution optical Landsat-8, Sentinel-2 and radar Sentinel-1 data for automatic lineament extraction: A case study of Alichur area, S-E Pamir. *Remote Sensing*. 11, 778. <https://doi.org/10.3390/rs11070778>.
- Asadzadeh S., de Souza Filho C. (2016). A Review on Spectral Processing Methods for Geological Remote Sensing. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*. Vol. 47. 69-90. doi:10.1016/j.jag.2015.12.004.
- Berger M., Moreno J., et al. (2012). ESA's sentinel missions in support of Earth system science. *Remote Sensing of Environment*, 120, 84-90

- Eldosouky A. M., Abdelkareem M., et al. (2017). Integration of remote sensing and aeromagnetic data for mapping structural features and hydrothermal alteration zones in Wadi Allaqi area, South Eastern Desert of Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 130, 28-37
- European Space Agency, Level-2A Prototype Processor for Atmospheric terrain and Cirrus Correction of Top-of-Atmosphere Level 1C Input Data. Available online: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/> (accessed on 22 October 2017).
- European Space Agency. The Copernicus Open Access Hub website. Available online: <https://scihub.copernicus.eu/> (accessed on 20 Feb.2020).
- Fagbohun B. J., Adeoti B., et al. (2017). Litho-structural analysis of eastern part of Ilesha schist belt, Southwestern Nigeria. *J. Afr. Earth Sci.*, 133, 123–137.
- Hung L.Q., Batelaan O., et al. (2005b). Lineament extraction and analysis, comparison of LANDSAT ETM and ASTER imagery. Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam, 5983, 59830T
- Jutten C., Herault J. (1991). Blind Separation of Sources, Part I. An Adaptive Algorithm Based on Neuromimetic Architecture, *Signal Processing*. Vol. 24(1), 1-10.
- Kim G. B., Lee J. Y., et al. (2004). Construction of lineament maps related to groundwater occurrence with ArcView and Avenue™ scripts. *Computers & Geosciences*, 30, 1117-1126
- Lee J. S. (1981). Refined Filtering of Image Noise Using Local Statistics. *Comput. Graph. Image Process.*, 15, 380–389.
- Lee J. S., Mitchell G. R., et al. (1999). Polarimetric SAR Speckle Filtering and Its Implication for Classification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 37, 2363–2373.
- Marghany M., Hashim M. (2010). Lineament Mapping Using Multispectral Remote Sensing Data Research. *J. of Applied Sci.*, 5, 126-130
- Masoud A., Koike K. (2006). Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt. *J. Afr. Earth Sci.*, 45, 467–477.
- Mostafa M. E., Qari M.Y.H. (1995). An exact technique of counting lineaments. *Eng. Geol.*, 39, 5–15.
- Pour A. B., Hashim M. (2014). Structural geology mapping using PALSAR data in the Bau gold mining district, Sarawak, Malaysia. *Advances in Space Research*, 54, 644-654
- Qari M. H. T. (2011). Utilizing Image Processing Techniques in Lithologic Discrimination of Buwatah Area, Western Arabian Shield, *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 4, 13-24. doi:10.1007/s12517-009-0049-x.
- Rahnama M., Gloaguen R. (2014). TecLines: A MATLAB-Based Toolbox for Tectonic Lineament Analysis from Satellite Images and DEMs, Part 1: Line Segment Detection and Extraction. *Remote Sens.*, 6, 5938-5958
- Ramli M. F., Yusof N., et al. (2010). Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: a review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69, 215-233
- Saadi N. M., AbdelZaher M., et al. (2011). Integrated remote sensing data utilization for investigating structural and tectonic history of the Ghadames Basin, Libya. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 13, 778–791.
- Sentinel-1 Toolbox, S.T. Available online: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1> (accessed on 22 October 2017).
- Tempfli K., Kerle N., et al. (2009). *Principles of Remote Sensing*, 4th ed.; The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, (ITC): Enschede, The Netherlands.
- USGS projects in Afghanistan Available online: <https://afghanistan.cr.usgs.gov/> (accessed on 09 Jan. 2020).
- Yang J., Cheng Q. (2014a). A Comparative Study of Independent Component Analysis with Principal Component Analysis in Geological Objects Identification. Part II : A Case Study of Pinghe District, Fujian, China. *Journal of Geochemical Exploration*. Vol. 149, 136-146. doi:10.1016/j.gexplo.2014.11.014.
- Yang J., Cheng Q. (2014b). A Comparative Study of Independent Component Analysis with Principal Component Analysis in Geological Objects Identification, Part I: Simulations. *Journal of Geochemical Exploration*. Vol. 149, 127-135. doi:10.1016/j.gexplo.2014.11.
- Власов Н. Г. (1963). Геологическая карта СССР (Шит # J-42-XVII), масштаб 1:200000.
- Комитет охраны окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан. Доступно онлайн: http://tajnature.tj/?page_id=156&lang=ru, (доступ к официальному веб-сайту 17. Янв. 2020).



Badswat glacial lake outburst flood and debris dammed lake: a case study

W. Anwar¹, D. Karim¹, U. Wahab¹, K. Din¹, D.R. Gurung²

¹Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in Pakistan, Gilgit, Pakistan,
waheed.anwar@akdn.org

²Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, Dushanbe,
Tajikistan

Abstract. The Glacial Lake Outburst Flood (GLOF) associated with melting of glaciers and sudden breach of moraine is a common threat in the high mountain landscape. Some of these events are associated with inclement weather, when prolonged precipitation along with warmer than usual atmospheric temperature plays a role in triggering the event. The events like the Badswat GLOF from Badswat glacier in the upper reaches of Ghizer district in Gilgit Baltistan gave no pre indication of any development prior to massive GLOF on 17 July 2018. The event was preceded by persistent precipitation for a week. The deluge of debris from the event blocked the Ishkoman river and resulted in impoundment of water creating 1140 meters long and 750 meters wide artificial lake in just a matter of hour. Unlike similar event that occurred from Karumber glacier a few kilometers upstream in the past in the region, debris surge from Badswat GLOF event continued for 12 days at infrequent intervals between event. This subsequently submerged 30 households, a school, and more than 65 acres of productive land. This paper presents the findings of assessment, response of AKAH and the response of the community following the event, which has lot of learnings going ahead.

Key words: GLOFs, debris dammed lake, climate change, mountain hazard

Cite this article: Anwar W., Karim D., Wahab U., Din K., Gurung D.R. Badswat glacial lake outburst flood and debris dammed lake: a case study. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 146–156.

Прорыв ледникового озера Бадсват и сформированного в результате подпрудного озера

В. Анвар¹, Д. Карим¹, У. Вахаб¹, К. Дин¹, Д.Р. Гурунг²

¹Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Пакистане, Гилгит, Пакистан,
waheed.anwar@akdn.org

²Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, Душанбе,
Таджикистан

Аннотация. Прорывы ледниковых озер (GLOF), связанные с таянием ледников и внезапными разрушениями моренных перемычек, являются распространенной угрозой в высокогорных ландшафтах. Триггерами некоторых из этих прорывов являются неблагоприятные погодные условия, когда длительное выпадение осадков накладывается на более высокие, по сравнению с нормальными, температуры атмосферного воздуха. Например, такое событие, как масштабный прорыв 17 июля 2018 г. ледникового озера Бадсват, расположенного у ледника Бадсват в высокогорной зоне округа Гхизер в Гилгит-Балтистане, не имело никаких индикаторов, позволявших его спрогнозировать. Этому событию предшествовали продолжительные осадки, выпадавшие в течение недели. Сель, вызванный данным прорывом, подпрудил реку Ишкман. В результате в ее долине в течение нескольких часов сформировалось подпрудное озеро длиной 1140 м и шириной 750 м. В отличие

от прошлого аналогичного события, произошедшего в этом регионе в нескольких километрах выше по течению у ледника Карумбер, сходы селевых потоков с ледника Бадсват происходили в течение 12 дней с нерегулярными интервалами. Это событие имело разрушительные последствия: было затоплено 30 домовладений, школа и более 65 акров плодородных земель. В данной работе представлены результаты проведенной оценки, меры, предпринятые Агентством Ага Хана Хабитат, и реакция местного населения на произошедшее событие, которое преподнесло много уроков.

Ключевые слова: прорывы ледниковых озер; озеро, подпруженное селевыми отложениями; изменения климата; опасные процессы в горах

Ссылка для цитирования: Анвар В., Карим Д., Вахаб У., Дин К., Гурунг Д.Р. Прорыв ледникового озера Бадсват и сформированного в результате подпружного озера. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 146–156.

Introduction

Climate change has significantly changed the landscape of High Asia region, particularly the areas where glaciers are abundantly found [Iturrizaga, 2005]. Gilgit-Baltistan (GB), a region in the northern Pakistan is unique in a way that it is located at lap of three mighty mountain ranges, the Karakorum, Hindukush, and the Himalayas. There are more than 5000 glaciers feeding the Indus from 10 sub-basins through different tributaries ranging from few tens of meters to more than 70 km long [Rasul, 2011]. These alpine glaciers are renewable natural freshwater storehouse that benefits hundreds of millions of people downstream [Shah and Kanth, 2013]. These glaciers and glacial lakes are source of life support system as well as potential threat in terms of sudden release of accumulated glacier melt, also called glacial lake outburst flood (GLOF). The GLOF, a phenomenon characterized by release of huge volume of water as a result of an outburst of a glacial lake, is one of the catastrophic natural hazards in high mountain landscape [Ives, 1986]. According to glacier inventory developed by ICIMOD in 2005 based on RS/GIS studies over this glaciated domain, there are over 2500 glacial lakes formed and 52 of them were identified as potentially dangerous from the point of GLOF. Even the small glacial lake associated with hanging glaciers poses a high potential for breaching resulting in a GLOF [Ashraf et al., 2012]. Devastating glacier lake outbursts in the last two centuries are especially well known from the Karakoram- Hindukush Mountains. They are one of the most important types of current geomorphological processes below an altitude of 4500 m. In historical times, about 22 tributary glaciers formed ice-dammed lakes in the upper Indus catchment area, from which 12 dams were responsible for outburst floods [Hewitt, 1998].

Owing to global warming glaciers in the area experienced enhanced retreating since the second half of the 20th century [Das and Meher, 2019]. This phenomenon has accounted for the formation of many disastrous glacial lakes confined by unstable moraine dams. The loss of significant glaciers in Afghanistan and Pakistan may become more serious progressively unless warming generates greater marine evaporation that augments precipitation [Schroder et al., 2004]. The effects of global warming in mountain areas are visibly manifested by shrinking of mountain glaciers and reduced snow cover duration [Barry, 2002]. The GLOFs are just not associated with high retreat rate of the glaciers [Harrison et al., 2018; Khan et al., 2019] as change in pattern of rainfall also plays key role. Monsoon downpour triggered outburst flood in July 2010 from Booni Gole Glacier located in Hindukush caused extensive erosive damage to agricultural land and human settlements along the flow channel. It used to store water under the terminus of the glacier and produce surge either by accelerated melting of snow/ice or by intense rainfall [Rasul, 2011].

This study follows the timeline of how an unforeseen GLOF event unfolded in a remote village of Gilgit-Baltistan region of Pakistan, its subsequent implications and response by the

Aga Khan Agency for Habitat (AKAH) and community to respond to such an unprecedented hazardous episode.

Study Area

Badswat village is in Ghizer District of Gilgit-Baltistan region geographically defined by longitude 36°32'23.70"N and latitude 74°2'8.87"E. The Badswat glacier is located 1.1 kilometers in northeast of the Badswat village. The main glacier trunk with south west to north east orientation has length of 6.8 kilometers and average gradient of 16.12° and is fed by four tributary glaciers. The glacier came got highlighted after it triggered a GLOF in 2015. The intensity and the implications were substantially low as compared to the event occurred in 2018. The stream from the glacier flows into Ishkoman river which eventually joins Gupis river to form Gilgit river.

Weather in the region is cold and moist with warm summers. The annual temperature ranges from -15 °C to 20 °C. The monthly average rainfall is between 4 to 26 mm and high rainfall period is recorded in June and July as per Pakistan Meteorological Department (PMD). High rainfall coupled with high temperature induced snow and glacier melt increasing the stream flow in the Ishkoman and Badswat Rivers.

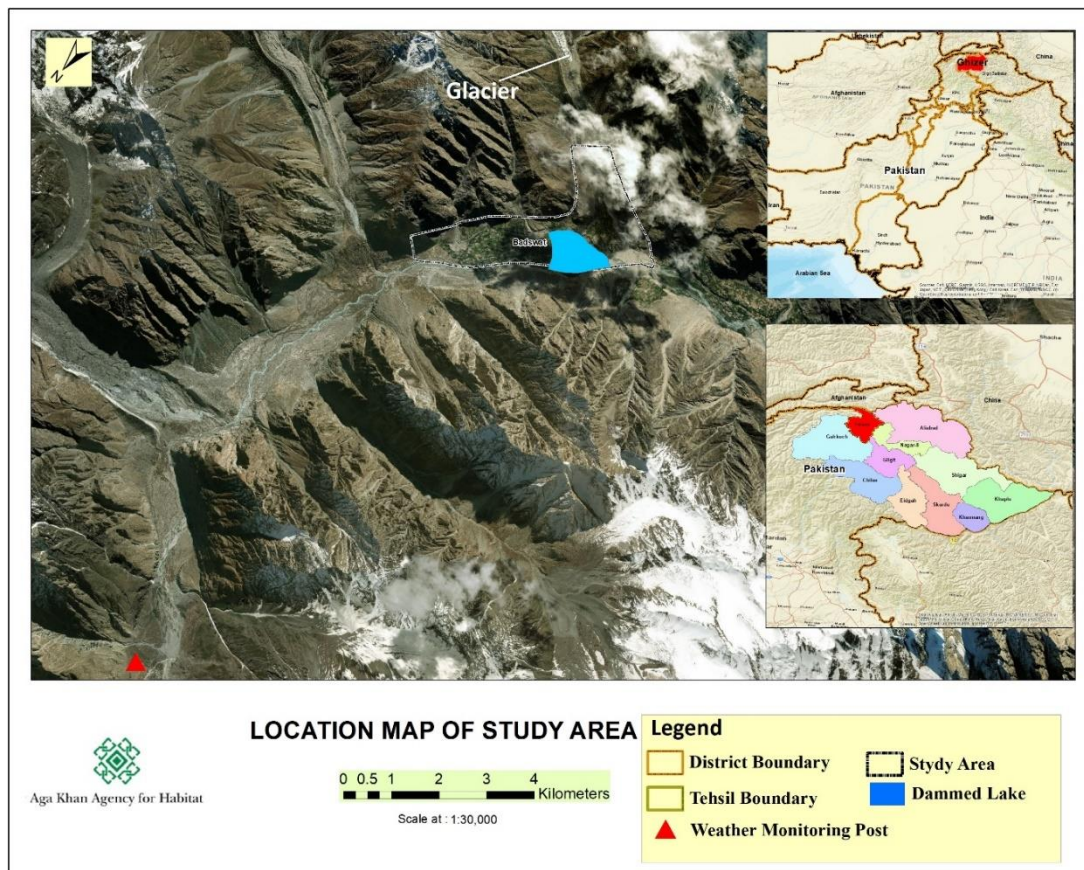


Fig. 7. Location map of Badswat village with district boundaries

Brief Review of the Problem

According to the statistics of global vulnerability index, Pakistan is ranked among 10 countries hard-hit by climate change where large segments of its population are extremely poor and are highly vulnerable to the negative impacts of climate change. The GB region particularly has been bearing the ever-increasing effects of global climate change, it is the hotspot of climate change in true sense. Glaciers and snow are the most sensitive indicators of global warming with immediate response time influencing glacier health and subsequent contribution of melt

water to sea level rise [Rasul, 2011]. As the glacier retreat a depression is created between retreating snout and moraine dam which is filled up by melt water from glacier and snow. Thus, these lakes are formed on the glacier terminus due to retreating processes of glaciers [Meyer et al., 1993]. Supra glacial lake can be seen through satellite imagery and aerial surveys but not englacial lakes or water lodged in subglacial conduits which do not show sign of threat has been source of flooding.

In addition, GB has extreme arid environment and slopes are poorly vegetated, thus intense precipitation on the slopes and gorges results in run off. As the slopes have plenty of exposed debris because of weathering, slope degradation, glacier and eolian processes, there is likely to occur debris flows. The events range in nature and size from mere run offs in the creek, to catastrophic events by flash flooding or sudden release of glacier melt [Hughes, 1986]. For instance, debris of Shishkat in Hunza in 1976 [Goudie et al., 1984], Debris flow in Gupis 1980 [Hughes, 1986]. One thing is common in these events i.e. all of them dammed the river consequently creating a lake. These events have destroyed roads, houses, lands, livestock, thus negative implications were countless as these events affected already economical fragile communities, depriving them from livelihood.

On 17 July 2018 a GLOF from Badswat glacier occurred with no early sign of threat. It was revealed on the following day through satellite images that the actual origin of the event was tributary glacier of the Badswat glacier which fed the glacier approximately 2.3 kilometers up the main trunk from the snout. The debris transported by the GLOF blocked the Ishkoman river which created an artificial lake. Successive GLOF events continued to occur till 29th of July. Each event strengthened the blockade at the nullah. The lake continued to grow inundating houses, school, orchards, agriculture land and road in upstream. The village is connected through one access road which was also damaged disconnecting village for 3 months. As lake started to grow chance of dam outburst was also anticipated, which led to evacuation of people from low lying areas of 3 downstream villages.

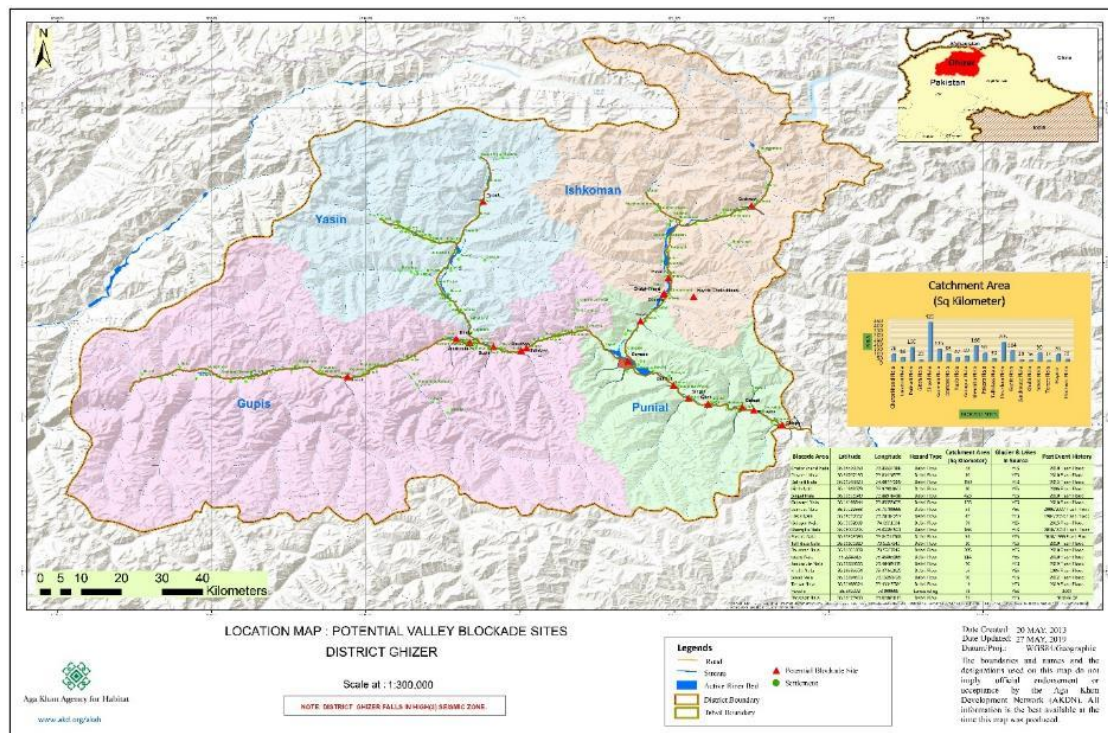


Fig. 2. Map showing the potential blockade sites in Ghizer district of Gilgit Baltistan. Source: AKAH, Pakistan

Method and Data

Post Disaster Assessment

To collect primary data on the scale and genesis of the event, helicopter surveys on 26th and 27th July were carried out by senior geologists, engineers, and disaster first responders. The aerial photographs gave required perspective on origin of the event. A team comprising of geologist and engineers was deployed in the field after 10 days to collect data on blockade nature, properties of debris, growth of lake upstream and assess glacier situation. Since the event did not occur from the main glacier but from a tributary, and access to the location was a big challenge and UAV really came handy. Big part of the assessment involves focus group discussions with elders and notables and interviews of eyewitnesses in the village.

Temperature and Precipitation Data

To simulate the breach mechanism, the local meteorological data from weather monitoring post (WMP) has been used which is located in Matramdan village located 8 kilometers upstream of the study area (Fig. 1). The WMPs were installed as part of a project led by AKAH, Pakistan principally to forecast the snow avalanches in winters by keeping track of local weather conditons. The weather data that comprised of solid and liquid precipitation, wind speed and direction and maximum minimum temperature, have been used to disseminate early warning against snow avalanches for community to keep them from harm's way. In summer, these data are analysed to monitor riverine and flash floods in the area. The graph below shows (Fig. 3) maximum and minimum temperature and rainfall preceding to the event that occurred on 17th July 2018.

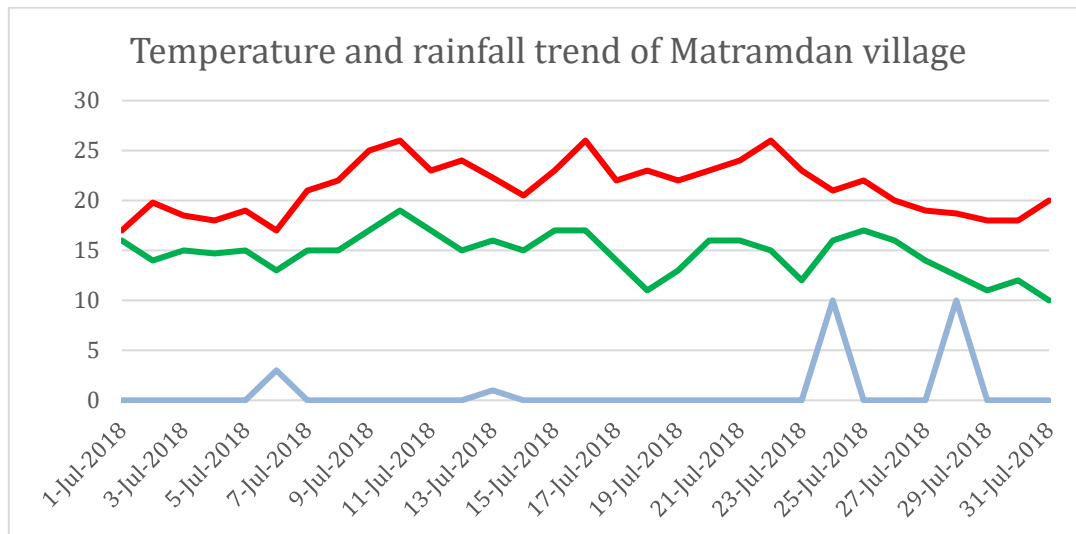


Fig. 3. Graph showing the temperature and rain fall trend WMP data from Matramdan village. Red trendline shows the maximum temperature whereas green line is for minimum temperature and blue line depicts rainfall. Data Source: AKAH Pakistan

Analysis and Results

It was indicated after initial HVRA in 2013 that presence of colossal glaciers with very high sediment load along the lateral moraine in the catchment area could trigger remote geo-hazards such as GLOF, which could not only erode the banks (margins) but also result secondary hazard such as formation of artificial lake by blocking the Ishkoman River. In 2015, it happened exactly what was anticipated causing moderate flood event which choked the river path. As a result, 6 houses and a pedestrian bridge were affected. This event is unmatched with the GLOF of July 2018, which deposited massive debris at the mouth of the nullah which led

to creation of a massive lake by blocking Ishkoman river and resulted in impoundment of water creating 1140 meters long and 750 meters wide artificial lake in just a matter of an hour. Apparently 34 houses were submerged, and the effects were far reaching. It has been found out that local climate played a key role in triggering the GLOF, intermittent rainfall and raised temperature preceding the event was primary trigger. From graph shown in Fig. 3 it can be observed that there have been recurrent rainfall days from start of the first week which continued up to the day of the event. During the rainfall days on 7th and 13th July the temperature plummeted from the general trend. Then temperature started to rise from 8th July which indicating clearer weather.

The intermittent rainfall prior to the event followed by increase in temperature may have raised the level of water in crevasses and sub glacier conduit. Rasul et al., 2014 also studied the effects of rainfall and subsequent rise in temperature in increasing in melt water.

Lake Formation Process, Rate of Growth, Chronology



Fig. 4. Repeat photograph of lower Badswat village: top (pre event, March 2016) and bottom (post event, July 2018). Photo credit: AKAH, Pakistan

At 6:45 pm local time a GLOF event occurred on 17th July 2018 from the Badswat glacier and resultant debris was of such massive volume that it blocked the Ishkoman River. It instantly swept 4 houses down the valley and blocked the river forming a lake in upstream. After almost an hour at 7:55 pm overflow of river started but not for long, as second wave of debris flow came and strengthened the blockade followed by third wave of debris flow at 12 pm. The blockage remained for almost 2 hrs. and 15min and overtopped the barrier. As a result, 30 households in upstream of the blockage in Badswat Payeen were submerged under the lake along with 1 government school, 1 Religious Education Centre (REC) and 500 kanals of cultivable land and 235 kanals of orchards with both fruit and non-fruit trees. While on the downstream of the blockage 11 houses were buried under the debris. Moreover, 3 houses were damaged due to erosion and collapse of the banks along the Badswat stream by the GLOF. The 3.2 kilometers section of the road and 1 bridge connecting Badswat was also swept by the flood and as a result the whole valley remained disconnected from rest of the district for three months.



Fig. 5. Repeat photograph of Badswat village left taken in March 2016 and right taken in July 2018. (Photo credit: AKAH Pakistan)

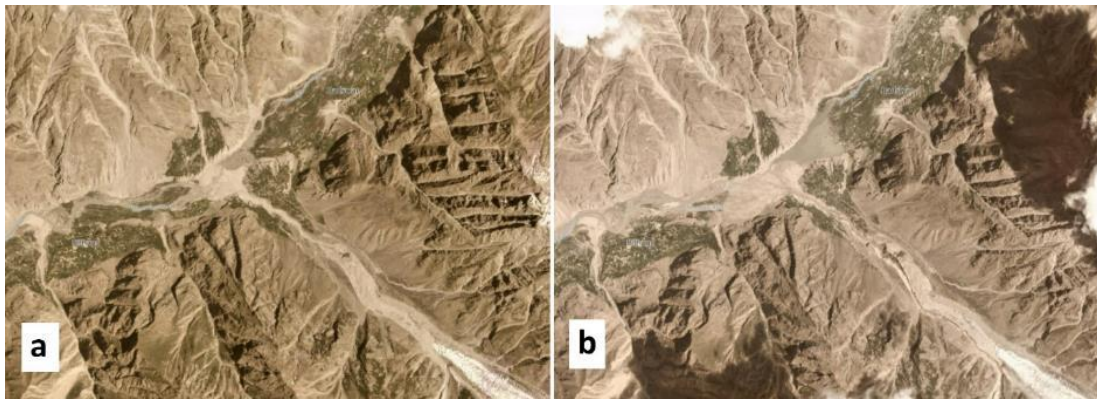


Fig. 6. (a) satellite image of village taken on 13 July 2018; (b) image of 20 July 2018 after the event, lake can be seen. (Source: Planet Lab)

Situational analysis

The blockage has a length of 500m and a width of 1500m out of which around 1000m of debris is spread downstream and around 500m upstream.

The weather was quite hot for several days and in the morning of 18th July rainfall was recorded as displayed in Fig. 3. Sunny conditions for almost a week increased the rate of melting of the glacier and the rain on glacier further amplified melting. The higher discharge of water stored at snout ultimately increased the hydrostatic pressure which is one of the reasons for trigger of the GLOF. When the internal conduit was filled with water, hydro-static pressure it built up releasing the water in the form of flood after glacier break. When flood hit the main trunk of Badswat glacier it teared through the ice mass and eroding it and the lateral marines. The debris surges from the GLOF arrived at the partially blocked Karumbar River and completely blocked resulting in an artificial lake. The flood persisted for around 12 days with surging, choking, and blocking the river, heightened the barrier.

Causes of GLOF

In times when intensive weather elements persist for long, they trigger massive outbursts even from glacier that does not have pre-existing lakes.

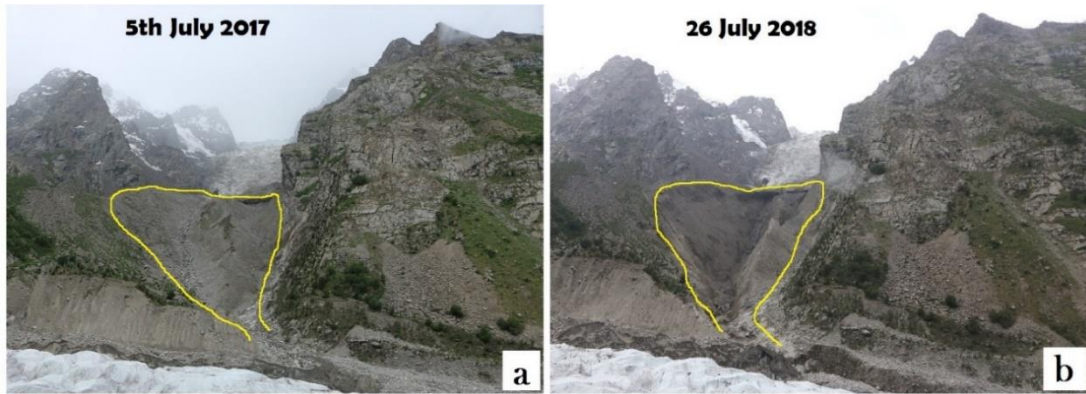


Fig. 7. (a) Photograph of tributary glacier in July 2017, (b) taken in July 2018. Sediment erosion can clearly be seen after the GLOF marked by yellow lines. Photo credit AKAH, Pakistan

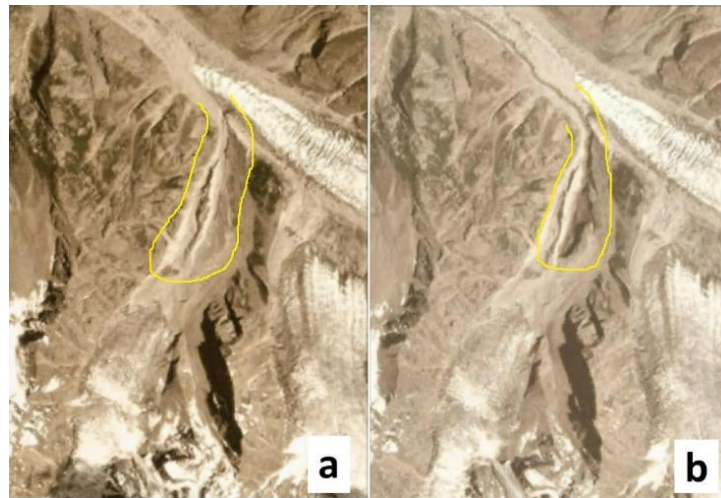


Fig. 8. (a) satellite image of GLOF trigger location in 13 July 2018; (b) image of 20 July 2018 after the GLOF had occurred. (Source: PlanetLabs)

Badswat glacier, being very unstable showed its notorious behavior previously. This glacier is being fed by more than four tributary glaciers in its catchment. Glacial melt from each tributary is then dispensed into main trunk of Badswat glacier. One of the inlets (tributary glacier) on south eastern ridge, which is sun facing had responded more abruptly to the weather elements lately than any other glacier in this valley. Features show us that, a GLOF has occurred initially from this tributary, a sudden outbreak of large volume of water has cut the left lateral moraine and ice of the main trunk of Badswat glacier creating a gully (Fig. 9b).

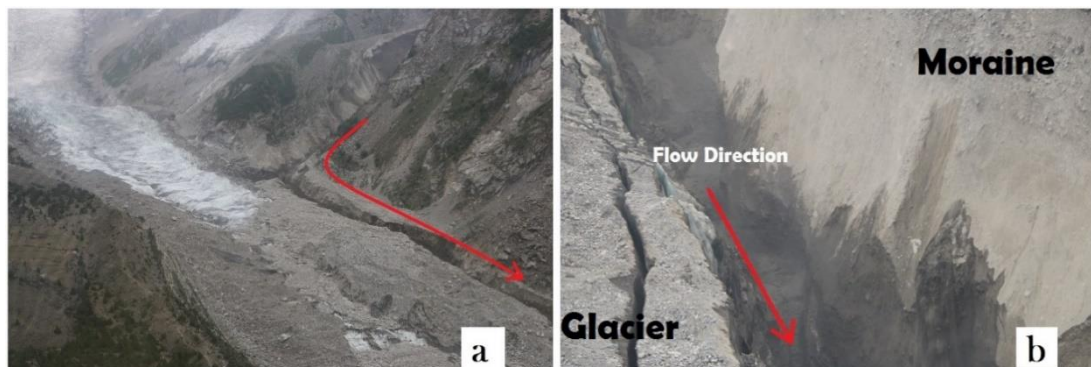


Fig. 9. (a) The main glacier trunk of Badswat and newly formed gully by GLOF from Tributary glacier (b) aerial photo shows direction of flow of GLOF and adjacent ice and Debris banks. Photo Credit AKAH Pakistan

This sudden outbreak of glacier melt took shape of a GLOF when it reached the mouth of Badswat nullah and blocked the Ishkoman River that runs perpendicular to it. This event is however not nascent as similar event has occurred in the same month three years ago, what is surprising is the magnitude and the continuity of debris flows followed by the GLOF of 17 July's. The series of debris flows continued for twelve days with infrequent intervals between each event. These series of debris flow episodes are most probably due to temporary blocking and subsequent outburst events. Temporary blockage was due to collapse of steep moraine wall that was destabilized due to undercutting by the flood. When blocking debris and ice could not retain the pressure of impounded water it burst, which could be observed for next twelve days.

AKAH's Response

Construction of Shelters

The AKAH relief operation started very next day of the event, the event was sudden and intense, the community had no option other than run for their life leaving everything behind. The lake started to form just after the GLOF had occurred and immediately engulfed most of the houses in the impact zone. Although community of Badswat supported the affected people by providing accommodation, however 8 families were shifted to makeshift tents which were provisioned from nearby AKAH emergency stockpile. The technical team was deployed to assess the glacier and find land to construct shelters for the families whose houses were submerged. The target was to shift each of the family into winterized shelters before the brutal winters. It took roughly about three months to complete 50 shelters for the families who were affected and for those whose houses were in high risk zone.



Fig. 10. Shelters under construction. Photographs credit: AKAH Pakistan

Restoration of the Drinking and Agriculture Water

Soon after the GLOF event AKAH deployed its Disaster Assessment Response Team (DART). The team highlighted the problems community faced following the event. Since most of the dwellers rely solely on agriculture as a source of livelihood. The only irrigation channel which supplied the irrigation water to roughly 264 Kanals of arable land was damaged severely. Another team was also sent to look for the options to restore the irrigation channel or find some other ways to provide irrigation water to the community. The team immediately installed 3 inches pipeline to provide essential water supply for drinking and irrigation purposes.

Conclusion

This work documents the event of Badswat glacier outburst and subsequent events which unfolded making bad situation even worst. It is an attempt to correlate the effect of local weather on glaciers which apparently show no sign of threat. The supra glacial lakes can be assessed and monitored in situ or remotely but englacial lakes are hard to identify. Only way to gauge the complexity of such glacial lake is to have keen eye for the events like Badswat.

The Badswat GLOF is just a tip of an iceberg, as the Ishkoman valley houses more than dozens of glaciers larger than the Badswat glacier which need just a little push to trigger GLOF. Ongoing climate change and unprecedented weather conditions could prove the last nail in the coffin. It is to understand that primary hazard as in case of Badswat GLOF can activate secondary hazards by blocking and creating artificial lake, which abruptly increases the exposure of community to disaster provided with incapability to cope with the hazard. Thus, a development of inventory of glaciers in the region and detail assessment of glaciers which have shown unusual behavior both land based and airborne is need of the time, so that effective disaster management/planning could be done way ahead of the disaster.

Acknowledgements

The authors like to express their gratitude to Mr. Nawab Ali Khan CEO, Mr. Salman Shah Head of Emergency Management and Dr. Nazir Ahmed Regional Program Manager (Gilgit) of Aga Khan Agency for Habitat, Pakistan for their continuous support in overall process from reconnaissance to the final draft, we specially thank Mr. Amir Ali (GIS officer) for developing maps on such a short notice. We are grateful indeed to the community of Ishkoman valley for their time and facilitation. We also would like to thank PlanetLabs and EOS Landviewer for providing access to their high-resolution imagery.

References

- Ashraf A., Naz R., Roohi R. (2012) Glacial lake outburst flood hazards in Hindukush, Karakoram and Himalayan Ranges of Pakistan: implications and risk analysis, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 3:2, 113-132,
- Barry, R.G., 2002: Changes in Mountain Climate and Glacio-hydrological Responses. *Mountain Research Development*. 10, PP. 161-170.
- Bishop M.P., Shroder Jr J.F., Haritashya U.K., Bulley H.N.N., 2007: Remote Sensing and GIS for Alpine Glacier Change Detection in the Himalaya. *Development in Earth Surface Processes No. 10 "Mountains Witnesses of Global Changes"*. Elsevier Publishers, pp 209-234.
- Das L., Meher J.K. 2019. Drivers of climate over the Western Himalayan region of India: A review *Earth-Science Reviews*, 102935.
- Goudie A.S., Brunsten D.N., Collins D.N., Derbyshire E., Ferguson R.I., Hashmet Z., Jones D.K.C., Perrot F.A., Said M., Waters R.S. et al., 1984. The geomorphology of the Hunza Valley, Karakoram Mountains, Pakistan. In: K.J. Miller (Ed.), *The International Karakoram Project*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., pp. 359-410.
- Harrison S., Kargel J. S., Huggel C., Reynolds J., Shugar D.H., Betts R.A., Emmer A., Glasser N., Haritashya U.K., Klimeš J., Reinhardt L., Schaub Y., Wiltshire A., Redmi D., Vilímek V. 2018. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere*, 12, p. 1195-1209.
- Hewitt K. 1998: Himalayan Indus Streams in the Holocene: Glacier-, and Landslide-"Interrupted" Fluvial Systems. In: Stellrecht I. (ed.): *Karakorum -Hindukush-Himalaya: Dynamics of Change*. Part I, Culture Area Karakorum, *Scientific Studies* 4(1): 3-28.
- Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguera M., van der Linden P.J. et al. (eds.). 2001. *Climate Change. 2001: The Scientific Basis*, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, ISBN 0-521-80767-0 (pb: 0-521-01495-6).
- Hughes R., Nash D. 1986. The Gupis debris flow and natural dam, July 1980. *Disasters* 10(1): 8-14.

- Ives J.D. 1986. Glacial Lake outburst floods and risk engineering in the Himalaya: A review of the Langmoche Disaster, Khumbu Himal, 4 August 1985. Occasional paper 5. Kathmandu, Nepal: International Centre for Integrated Mountain Development.
- Khan S.A.R., Jian C., Zhang Y., Golpîra H., Kumar A., Sharif A. 2019. Environmental, social and economic growth indicators spur logistics performance: From the perspective of South Asian Association for Regional Cooperation countries. *Journal of Cleaner Production*, 214, p. 1011-1023.
- Khan A.N. 2011. Analysis of flood causes and associated socio-economic damages in the Hindukush region. *Natural hazards*, 59(3), p.1239-1260.
- Larsen O., Oliver J., Casiles Lanuza E. 2014. Developing a disaster risk insurance framework for vulnerable communities in Pakistan: Pakistan disaster risk profile. Report No. 16. Bonn: United Nations University Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS).
- Meyer P., Itten K.I., Kellenberger T., Sandmeier S., Sanmeier R. 1993. Radiometric correction of topographically induced effects on Landsat TM data in an Alpine environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 48, p. 17–28.
- Rasul G., Chaudhry Q.Z., Mahmood A., Hyder K.W., Qin Dahe. 2011. Glaciers and Glacial Lakes under Changing Climate in Pakistan. *Pakistan Journal of Meteorology*, Vol. 8, Issue 15.
- Rasul. G, Din, K., S. Tariq, A. Mahmood 2014, Temperature and Precipitation: GLOF Triggering Indicators in Gilgit-Baltistan, Pakistan. *Pakistan Journal of Meteorology*, Vol. 10, Issue 20: Jan, 2014
- Shah A.A.S., Kanth T.A.G. 2013. Impact of glaciers on the hydrology of Kashmir Rivers: a case study of Kolahoi Glacier.
- Shroder Jr J.F., Bishop M.P., Bulley H.N.N., Haritashya U.K., Shrestha J.A., Shrestha M.L., Shrestha A.B. Wake P.A. 2004. Recent trends and potential climate change impacts on glacier retreat/ glacial lakes in Nepal and potential adaptation measures. *OECD Global Forum on Sustainable Development. Development and Climate Change Paris, France. OECD*, p. 5-14.



Centralized national landslide database for the Kyrgyz Republic: initial steps

R. Arnhardt¹, D. Boon¹, S. Erokhin², V. Zaginaev², N. Smith¹, A. Simister¹, K. Lawrie¹,
M. Krabbendam¹

¹British Geological Survey, Edinburgh, United Kingdom

²State Committee for Industry, Energy and Subsoil Use, Bishkek, Kyrgyzstan,
erochin@list.ru

Abstract. Central Asian countries such as the Kyrgyz Republic and Tajikistan are exposed to high-intensity landslides triggered by seismic and hydro-meteorological events. For example, the earthquake-triggered Khait rock avalanche in 1949 caused between 5000–28 000 casualties in Tajikistan. Similar notorious cases have occurred in the Kyrgyz Republic: The Kainama loess flow in 2004 damaged road infrastructures and buried 11 houses with 33 people. To manage disaster risk efficiently, up-to-date landslide inventory data is required to support national-scale risk assessments. Research on landslide processes is often carried out on regional scales, with monitoring done at site-scale. Bringing this multi-scale data together into one central, national database would improve efficiency and provide a stable digital repository for existing and future data. It is also useful to inform engineering projects and building and testing landslide susceptibility models. The British Geological Survey (BGS) has been collaborating with the State Committee for Industry, Energy and Subsoil Use of the Kyrgyz Republic (SCIECU) to develop a Geoscience Data Index (GDI) including a centralized national database for the country that enables data visualization and integration with other key datasets. The data model is generic, and can be tailored to the needs of other countries like Tajikistan, and provides support such as analysis in open source GIS environments and assessing impacts on infrastructure and populations more efficiently.

Key words: landslides, Kyrgyz Republic, database, PostgreSQL

Cite this article: Arnhardt R., Boon D., Erokhin S., Zaginaev V., Smith N., Simister A., Lawrie K., Krabbendam M. Centralized national landslide database for the Kyrgyz Republic: initial steps. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 157–160.

Создание централизованной национальной базы данных по оползням Кыргызской Республики: первые шаги

Р. Арнхардт¹, Д. Бун¹, С. Ерохин², В. Загинаев², Н. Смит¹, А. Симистер¹, К. Лори¹,
М. Краббендам¹

¹Британская геологическая служба, Эдинбург, Великобритания

²Государственный комитет промышленности, энергетики и недропользования,
Бишкек, Кыргызстан, erochin@list.ru

Аннотация. Страны Центральной Азии, такие как Кыргызская Республика и Республика Таджикистан, подвержены высокоинтенсивным оползням, вызванным сейсмическими и гидрометеорологическими явлениями. Например, землетрясение, спровоцировавшее Хаитскую каменную лавину в 1949 г., привело к жертвам в количестве от 5000 до 28000 человек в Таджикистане. Аналогичные печально известные случаи произошли и в Кыргызской Республике: лессовый поток (оползень) в селе Кайнама 2004 г. повредил дорожную инфраструктуру, а его отложения полностью разрушили 11 домов с 33 жителями. Для эффективного управления рисками стихийных бедствий необходимы обновленные данные

кадастра оползней, которые будут использоваться для оценки рисков в национальном масштабе. Исследования оползневых процессов часто проводятся в региональном масштабе, а мониторинг осуществляется в масштабе участка. Объединение этих разномасштабных данных в одну центральную национальную базу повысит эффективность и позволит создать стабильное цифровое хранилище для уже имеющихся и будущих данных. Полезно также информировать разработчиков инженерных проектов, а также строить и тестировать модели восприимчивости к оползням. Британская геологическая служба (BGS) сотрудничает с Государственным комитетом промышленности, энергетики и недропользования Кыргызской Республики (ГКПЭН) в области разработки Индекса данных геонаук (GDI), включающего централизованную национальную базу данных по стране, которая позволяет визуализировать данные и интегрировать их с другими ключевыми наборами данных. Модель данных является универсальной и может быть адаптирована к потребностям других стран, таких как Республика Таджикистан, и обеспечивать поддержку в различных отраслях, таких как анализ в среде ГИС с открытым исходным кодом и более эффективную оценку воздействия на инфраструктуру и население.

Ключевые слова: оползни, Кыргызская Республика, база данных, PostgreSQL

Ссылка для цитирования: Арнхардт Р., Бун Д., Ерохин С., Загинаев В., Смит Н., Симистер А., Лори К., Краббендам М. Создание централизованной национальной базы данных по оползням Кыргызской Республики: первые шаги. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 157–160.

Introduction

The State Committee for Industry, Energy and Subsoil use of the Kyrgyz Republic (SCIECU) and the British Geological Survey (BGS) working towards to develop a Geoscience Data Index (GDI), geographical information system (GIS) that acts as a portal to geospatial datasets and digital data indexes.

The vision is to hold open geospatial data on a central server and allows SCIESU staff to access the digital data holdings. This approach will facilitate data query, analysis and reporting. Due to the high landslide risk in the country, one of the components of the project is to develop a national landslide database that enables visualize and analyze data in GIS environments, web map tools and data portals.

Landslides in the Kyrgyz Republic

The high-frequency and often high-intensity of landslides in the Kyrgyz Republic, mostly located on the southern part of the country, shown in Fig. 1, poses a significant risk to people, the environment and infrastructure.

SCIESU has been given the remit to study these natural disasters by means of different techniques such as drones. A landslide catalogue exists which records more than 1000 events mainly held as Excel spreadsheets. Previous research efforts have resulted in development of the Tian Shan geohazards database by Havenith et al, 2015. Also, [Strom & Abrakmatov, 2018] compiled a bedrock landslide database for the country. Unification of such important inventories in a central data store by using a robust database management system will enable improved geo-hazard and risk assessment, reducing investor risk to the benefit of society.

Using PostgreSQL instead of Excel spreadsheets

Although utilizing spreadsheets is convenient for making a first inventory, this approach it is not suitable for slope management purposes, such as recording monitoring data, storing information about accomplished remediation works, or impact data for developing building

fragility curves. Within the project, it is intended to use PostgreSQL – a robust and open source software, PostgreSQL database has several advantages over Microsoft Excel for building landslide inventories, as presented in Table.

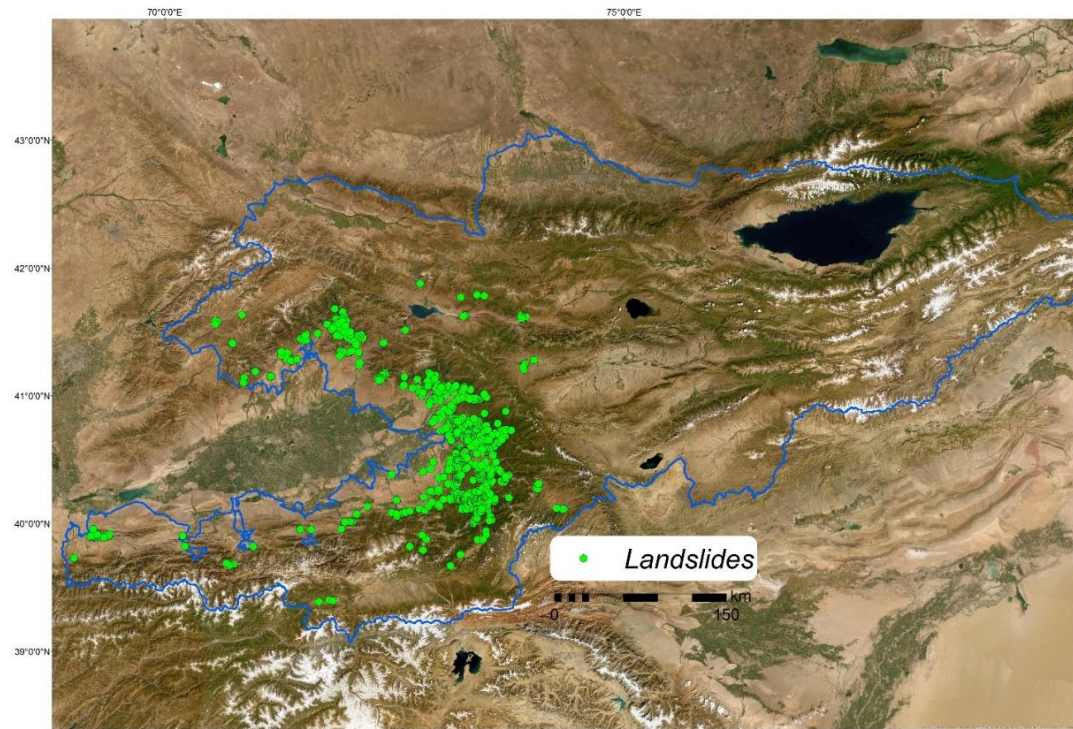


Fig. 1. Geographical location of landslides (Ministry of Emergency Situations in the Kyrgyz Republic, 2017)

Table. Comparison of the MS Excel and PostgreSQL

Feature/Benefit	MS Excel	PostgreSQL
CAPACITY store unlimited data	No	Yes
SECURITY stored in servers with backup protocols	No	Yes
VERSIONING Used by multiple users simultaneously	No	Yes
CONSTRAINTS Controlled for data quality	No	Yes
IMPORT and EXPORT Easy, can be imported from other sources	Yes partly/No	Yes
USER INTERFACE Forms and reports can be created and integration with GIS	No	Yes

The current state of the Landslide Database

The requirements of a future national database are reviewed and a new data model proposed that honours existing inventories. Fig. 2 shows a generic model of the database which is being developed collaboratively between the two institutes.

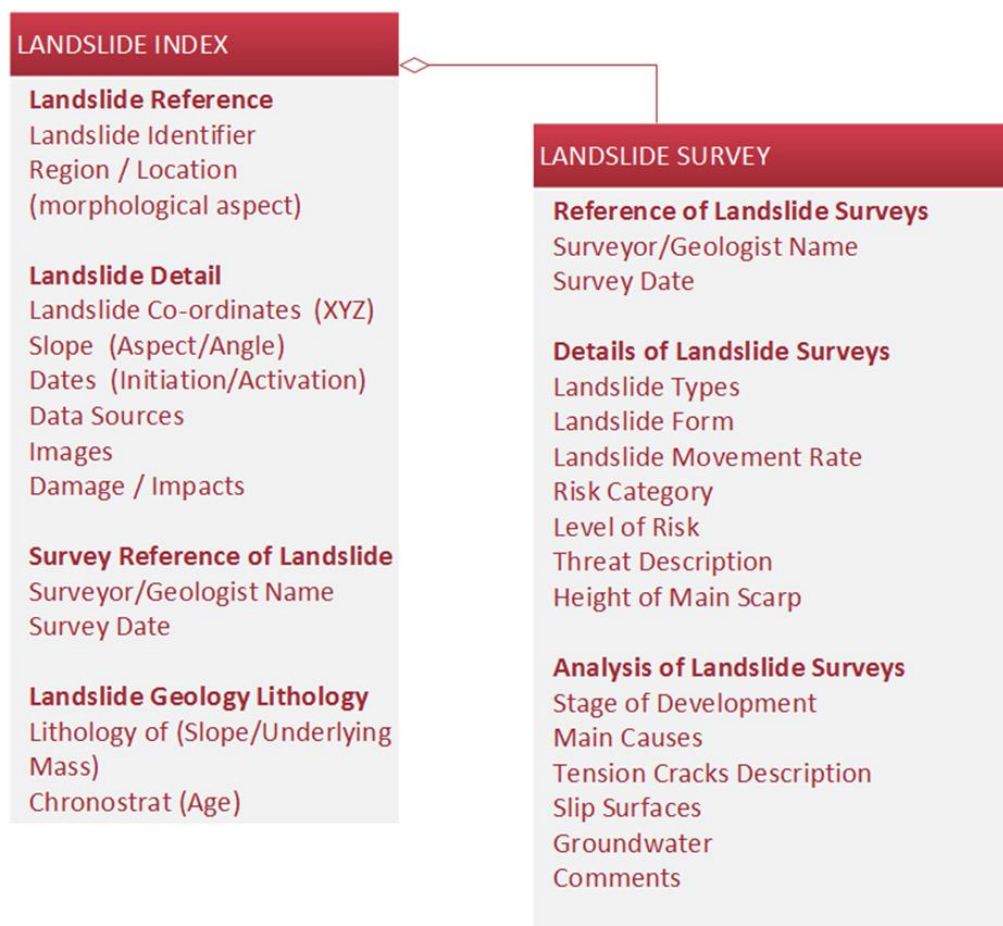


Fig. 2. Generic model of the landslide database

Conclusion

The southern part of Kyrgyz Republic is prone to large-scale landslides which cause threat to population and infrastructure. To try to tackle the issue, BGS and SCIESU working collaboratively to develop a national landslide database which will allow to integrate with other datasets and visualize data in GIS. Due to this reason, an open-source database management system PostgreSQL was selected. As an initial step, a generic data model was created considering existing landslide inventories from various sources. In a current stage, a final version of the landslide data model is being completed and will be implemented into PostgreSQL. Future considerations are front-end development and carry out testing procedures in the country.

References

- Havenith, H.B., Strom, A., Torgoev, I., Torgoev, A., Lamair, L., Ischuk, A., Abdrakhmatov, K. 2015. Tian Shan geohazards database: earthquakes and landslides. *Geomorphology*. 649, 16-31.
- Report of the Ministry of the Emergency Situations of the Kyrgyz Republic, 2017
- Strom, A., Abdrakhmatov, K. 2018. *Rockslides and rock avalanches of Central Asia*. Elsevier. 458 p.



Результаты инженерно-геологической оценки селевых потоков суб-водосборного бассейна Сурхдара и прилегающих территорий (долина реки Иляк, Таджикистан)

М.М. Азимшоев¹, Р.А. Бобов², Ё.С. Лалбеков¹, Ш.Ф. Валиев³, Б.А. Алидодов³

¹Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, Душанбе, Таджикистан, muslim.azimshoev@akdn.org, yormamad.lalbekov@akdn.org

²Организация Ага Хана по развитию, Душанбе, Таджикистан
ruslan.bobov@akdn.org

³Таджикский национальный университет, Душанбе, Таджикистан,
VALIEV_SH@mail.ru, aliba-14@mail.ru

Аннотация. В 2017 году по проекту комплексного улучшения здоровья и местообитаний (ИНИ) в Илякской долине Таджикистана, который финансировался Швейцарским агентством и Фондом Ага Хана проводилась инженерно-геологическая оценка селевого бассейна Сурхдара и прилегающих территории. Использовался комплексный подход при изучении всех факторов селеобразования и их взаимодействия с целью обоснованного прогноза селевых явлений и разработки мероприятий по борьбе с ним. При инженерно-геологической оценки целого бассейна были использованы данные аэровизуального обследования, полевых маршрутных работ, детального картирования территории и разработаны инженерные мероприятия по снижению риска селевых потоков.

Ключевые слова: водосборный бассейн, селевые потоки, оползневые процессы, селеобразующие факторы, гидрологические условия, геологические процессы

Ссылка для цитирования: Азимшоев М.М., Бобов Р.А., Лалбеков Ё.С., Валиев Ш.Ф., Алидодов Б.А. Результаты инженерно-геологической оценки селевых потоков суб-водосборного бассейна Сурхдара и прилегающих территорий (долина реки Иляк, Таджикистан). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 161–169.

Outcomes of engineering-geological assessment of the debris flow hazard of Surkhudara sub-catchment and adjacent area (Ilyak River valley, Tajikistan)

М.М. Azimshoev¹, R.A. Bobov², Y.S. Lalbekov¹, Sh.F. Valiev², B.A. Alidodov²

¹Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan, muslim.azimshoev@akdn.org, yormamad.lalbekov@akdn.org

²Aga Khan Development Network, Dushanbe, Tajikistan, ruslan.bobov@akdn.org

³Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan, VALIEV_SH@mail.ru, aliba-14@mail.ru

Abstract. In 2017 under the project of INHI which was financed by SDC and AKDN was done geological survey in Ilyak valley. During this assessment was done integrated assessment of debris flow with all elements in Surkhudara watershed. This includes complex assessment approaches all facts of debris flow impact and predictions and mitigations projects for them. For assessment was used satellite images, field data collections mapping and development of mitigation projects for debris flows.

Key words: watershed, debris-flows, landslide processes, mudflow forming factors, hydrological conditions, geological processes

Cite this article: Azimshoev M.M., Bobov R.A., Lalbekov Y.S., Valiev Sh.F., Alidodov B.A. Outcomes of engineering-geological assessment of the debris flow hazard of Surkh dara sub-catchment and adjacent area (Ilyak River valley, Tajikistan). In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 161–169.

Введение

Известно, что более 93% территории Таджикистана занимают горы, в пределах которых широко развиты эрозионные процессы. В связи с этим в горных районах ведение и развитие сельского хозяйства имеют свои ограничения и часто подвержены природным рискам. Климатические особенности горных районов располагают к интенсивному физическому и инсоляционному выветриванию, интенсивной эрозии, значительному поверхностному стоку при ливневых дождях и в конечном итоге к частой повторяемости селевых явлений. Паводки, сели, эрозия почв в Таджикистане носят всеобщий характер [*Шарабаев, Ашууров, 1972*].

Селевые потоки бассейна Сурхдара и прилегающих территории относятся к числу наиболее грозных стихийных явлений Илякской долины в Таджикистане. Они ежегодно наносят огромный ущерб народному хозяйству и населению района. Это стало основной причиной проведения оценки риска селей в этой территории. Отличительной особенностью проведённых исследований, является комплексный подход к изучению всех факторов селеобразования и их взаимодействия с целью обоснования прогноза селевых явлений и разработки мероприятий по борьбе с ними. Работы по оценке селевой опасности водосборного бассейна Сурхдара включали в себя:

- а) производство инженерно-геологического обследования селеопасных участков;
- б) составление геологической карты угроз на площади в 29,5 км² с отображением возможного сценария современных геологических процессов и разработка рекомендуемых инженерных мероприятий для уменьшения риска.

Методика выполнения полевых работ включала в себя проведение инженерно-геологических маршрутов с целью выяснения природных факторов способствующих активизации селей и геолого-структурных особенностей современных геологических процессов (литологический состав пород, типы геологических образований, системы трещины на оползне-опасных склонах, прогнозирование селевых явлений и фотографирование).

Инженерно-геологические маршруты проходились как в крест простирания основных структур, так и по их простиранию. При производстве геологических маршрутов особое внимание было уделено селевым очагам, развитию трещиноватости в породах, поскольку трещиноватость является весьма важным фактором, образующим зоны ослабления для развития геологических процессов. Маршруты сопровождалось описанием типов пород с определением их взаимоотношения, текстуры, структуры характерных для исследуемой площади.

Изучение всех факторов селеобразования и их взаимодействия с целью обоснования прогноза селевых явлений и разработки мероприятий по борьбе с ними проводилось по структурно технологической схеме (рис. 1).

Селеобразующие факторы исследуемой территории

Экзогенные геологические процессы, широко распространённые в горных районах, чаще всего приурочены к зонам высокогорья и среднегорья. Нередко экзогенные геологические процессы (оползни, обвалы, осыпи и т.д.) принимают участие в процессе селеобразования. Поэтому при инженерно-геологических исследованиях очень важно оценить селеобразующие факторы (рис. 2).

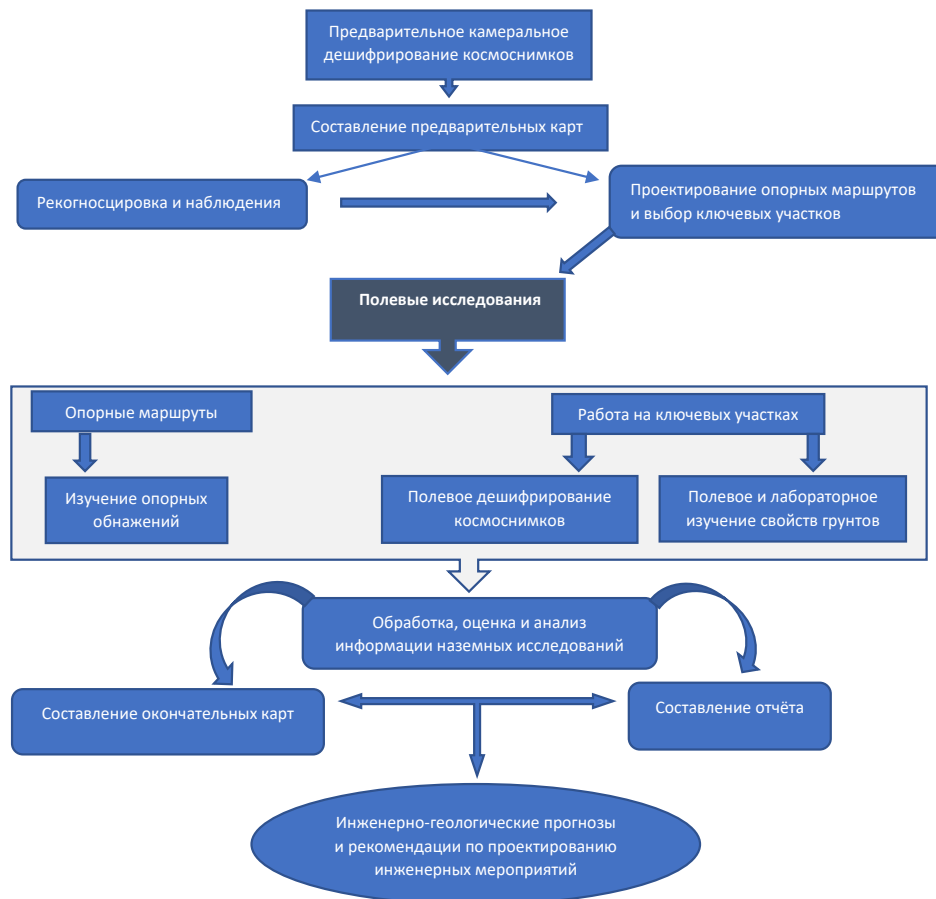


Рис. 1. Структурно-технологическая схема инженерно-геологических исследований для оценки экзогенных геологических процессов бассейна Сурхдара

Fig. 1. Structural and technological scheme of engineering-geological research for the assessment of exogenous geological processes in the Surkhudara watershed



Рис. 2. Селеобразующие факторы бассейна р. Сурхдара и прилегающих к нему территорий

Fig. 2. Mud-forming factors of the Surkhudara watershed and adjacent territories

Разнообразные природные факторы, влияющие на формирование селевых потоков, можно подразделить на геологические, гидрогеологические, почвенно-растительные и обусловленные деятельностью человека [Садов, 1972].

Геологические процессы

Селевые потоки бассейна Сурхдара и прилегающих территории, происходят обычно на оползневых склонах в периоды выпадения дождей. Рыхлый материал переувлажняется, приобретает свойство текучести и в виде отдельных грязевых оплыви, оползней и оползней- потоков попадает в русло реки или сая.

Все оползни, развитые в лёссах и лёссовидных породах, отличаются большой подвижностью. Поэтому оползшие массы продвигаются гораздо дальше подошвы склона, а языки оползней часто подпруживают и перегораживают русла временных и постоянных водотоков [Садов, 1972]. Оползневые деформации на склонах бассейна Сурхдара и прилегающих территорий вызывают перемещение рыхлообломочного материала в русло водотоков и приводят к образованию временных запруд, при прорыве которых формируются селевые потоки (рис. 3).



Рис. 3. Формирования селей в бассейне Сурхдара за счёт оползня: а) начальная стадия развития оползня, б) скольжение лёссовидных суглинков по поверхности песчаников и известняков, в) произошедший сель за счёт оползня. Фото Азимшоева М.М.

Fig. 3. The formation of mudflows in the Surkhdar basin due to a landslide: a) the initial stage of the development of a landslide, б) sliding of loess-like loams over the surface of sandstones and limestones, в) mudflows that occurred due to landslides. Photo by M.M. Azimshoev

Гидрологические условия

Вторым условием формирования селей является образование на площади каждого селеопасного бассейна достаточного количества воды для смыва или сноса и перемещения по руслу рыхлообломочного материала в виде русловых потоков. Без воды селя бить не может [Флейшман, 1970]. Одним из необходимых условий формирования селевых потоков является наличие интенсивного поверхностного стока в русла постоянных и временных водотоков, возникающие в результате ливней [Садов, 1972]. Гидрологические условия в горных районах, оказывает существенное влияние на процессы формирования селей.

Наиболее интенсивная селевая деятельность в исследуемом районе, наблюдается в март, апрель и май, когда выпадает большое количество атмосферных осадков и происходит наибольшее увлажнение почв (рис. 4).

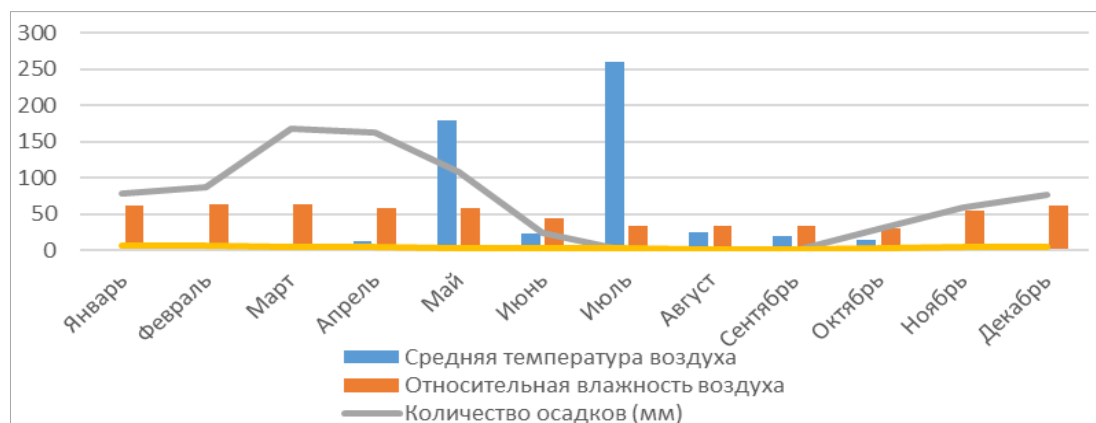


Рис. 4. Основные гидрометеорологические показатели Файзабадского района

Fig. 4. Main hydrometeorological features for the Fayzabad District

Антропогенный фактор

В последние годы решающее значение при активизации селей имеет человеческая деятельность (рис. 5). В настоящее время склоны исследуемого района оголилась от растительности и вырубки деревьев. Неправильная распашка склона и нерегулируемый выпасть скота создают условия для возникновения новых промоин и оврагах. В свою очередь овраги становятся очагами зарождения и транзита грязевых и грязекаменных селевых потоков, которые разгружаясь в устьевой части, образуют обширные конусы выносов, что несёт угрозу объектам народного хозяйства. Лесной массив на склонах селевых бассейнов является самым действенным средством предотвращения селей и обеспечения безопасности жителей кишлаков.

Почвенно-ботанические факторы

Эти факторы играют в селеобразовании чрезвычайно большую роль. Горные водосборные бассейны, склоны которых покрыты высокоствольным густым лесом с мощной корневой системой, как правило, никогда не бывает селеопасным. Даже при отсутствии леса, кустарниковый и просто травянистый покров хорошо защищает поверхность горных пород от выветривания и разрушения [Флейшман, 1970]. В исследуемом районе плохо развиты почвы. Растительность в этом районе развита очень слабо, в основном в верхних частях склонов (рис. 6).



Рис. 5. Антропогенные факторы (вырубка леса) в оврагах и на склонах бассейна р. Сурхдара. Фото Ё.С. Лалбекова

Fig. 5. Anthropogenic factors (deforestation) in ravines and on the slopes of the Surkhudara watershed. Photo by Y.S. Lalbekov

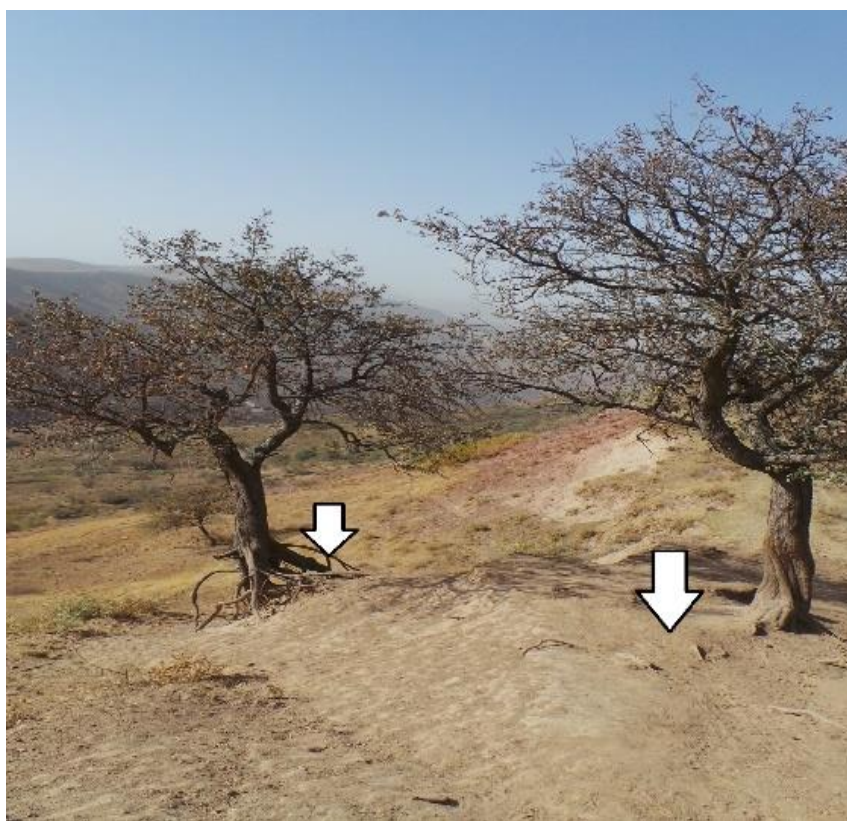


Рис. 6. Деградация почвенно-растительного слоя в верхней части склона. Фото Ё.С. Лалбекова

Fig. 6. Degradation of the soil-vegetation layer in the upper part of the slope. Photo by Y.S. Lalbekov

Результаты оценки селей

Для образования селя нужны ливни после засушливого периода, которые способны сразу же захватить большое количество рыхлого материала, накопившегося на склонах [Сергеев, 1978].

На исследуемом участке селевые выносы ежегодно разрушают и повреждают дороги и мосты (рис. 7).



Рис. 7. Разрушенные селем мосты и берегоукрепительные сооружения. Фото М.М. Азимшоева

Fig. 7. Bridges and bank protection structures destroyed by mudflows. Photo by M.M. Azimshoev

В результате инженерно-геологической оценки селевых потоков были уточнены положения ключевых участков и рекомендованы противоселевые мероприятия для защиты народнохозяйственных объектов. В процессе работ выявлены ряд новых дешифровочных признаков селей, позволяющих картировать площадь между маршрутами на труднодоступных участках местности. Окончательные карты условий формирования селей, составленные с использованием космоснимков Google Earth Pro и программа ArcMap, отличаются большой точностью и более полным отображением геологических процессов (рис. 8).

Таблица. Уязвимые кишлаки бассейна р. Сурхдара и прилегающих к нему территорий

Элементы риска уязвимости 6 кишлаков								
№	Названия кишлаков	Количество домов	Население	Количество домов в зоне риска	Дома в зоне риска, %	Население в зоне риска, чел.	Население в зоне риска, %	Вид угрозы
1	Сурхдара	87	604	14	16	77	13	сель
2	Боги Мири	263	1377	118	45	476	35	сель
3	Файзабад	394	2428	41	10	257	11	сель
4	Кенджаобод	92	546	–	–	–	–	–
5	Кенгали	182	1449	–	–	–	–	–
6	Кухсор	24	118	–	–	–	–	–

Заключение

Современные геологические процессы играют важную роль в селеобразовании исследуемого участка. Они участвуют в формировании рыхлообломочного материала и масс горных пород на склонах, способствуют его перемещению в русла водотоков и тем самым непосредственно влияют на характер селевого процесса. Сели по типу являются преимущественно грязевыми и грязекаменными. Породы, слагающие бассейн Сурхдара и прилегающие территории, являются слабыми к разрушению, с поверхности выветрили, трещиноватые и часто раздробленные, что способствует образованию у подножий склонов шлейфов осыпей и обрушенных обломков пород, являющиеся материалом селевых потоков. Основным фактором образования селей является климатический – частые ливневые дожди.

При инженерно-геологическом исследовании, в водосборном бассейне были зафиксированы 12 селевых потоков, 4 из которых имеют вероятность потенциальной угрозы жилым зонам кишлаков.

Трёхлетние наблюдения за селевыми потоками показали, что образование селей бассейна Сурхдара и прилегающих к нему территории происходит в одних и тех же руслах водотоков. Для уменьшения риска селевых потоков жилым зонам кишлаков бассейна Сурхдара были рекомендованы следующие инженерные мероприятия:

- запретить строительство жилых домов и объектов в селеопасной зоне;
- произвести посадку деревьев и кустарников на склонах, где зарождаются сели;
- расчистка и отвод селевых русел от жилой зоны;
- строительство селеотводящих и селезащитных сооружений по саям Сурхдара, Тукур, Шарифобод и Хучак селевого бассейна Сурхдара.

Список литературы

- Азимшоев М.М., Лалбеков Ё.С. Инженерно-геологическая оценка природных угроз водосборного бассейна Сурхдара. Отчёт. 2018. 3,17,18 с.
 Пересухин В.И. Оползни Таджикистана. Душанбе: Дониш. 1976. 34 с.
 Садов А.В. Аэрометоды изучения селей. М.: Недра, 1972. 126 с.
 Сергеев Е.М. Инженерная геология. М.: Издательство Московского университета. 1978. 384 с.
 Флейшман С.М. Сели. Ленинград: Гидрометеиздат., 1970. 312 с.
 Шарабаев В.А., Ашуров С. Обуздание селевых стоков. Душанбе: Ирфон, 1972. 67 с.



Mapping and modelling of glacial lake outburst flood (GLOF) of Deran glacial lake, Ishkoman Valley, Ghizer District, Pakistan using GIS and remote sensing

D. Bano, S. Wali, S. Shah, A. Hussain

*Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in Pakistan, Islamabad, Pakistan,
dilshad.bano@akdn.org.*

Abstract. Northern part of Pakistan hosts world's largest glaciers and peaks in HKH region. These natural resources are not only a priceless source of livelihood for the local people but also poses various threats due to different phenomena like avalanches and glacier lake outburst floods (GLOF). Global warming, climate change and human activities are major factors that causes the melting of these glaciers as a result glacier recedes and develop lakes that raises water levels in downstream water ways. Such glacier lake outburst floods are one of the major disasters in these mountain regions. In this study, GLOF assessment and mapping was conducted using GIS and Remote Sensing techniques with ground truthing. Change detection technique like NDWI was performed on Landsat imagery for last two decades and flood modeling was executed using HEC-RAS based on ground data and RS. Temporal change in lake volume was increased to 60% which was calculated using surface volume tool in ArcGIS. Lake area has been extended to 31.18 % whereas ice and Glacier cover has been receded from 42.62% to 21.91%. GLOF modelling for two scenarios shows number of critical and priority infrastructure at risk like bridges, transformers, community centre, school, houses and agriculture land. The outcomes of the study will provide the base for the development of community preparedness plans and safety strategies with risk reduction measures.

Key words: *Deran, Gilgit Baltistan, GLOF, HKH, HEC-RAS, GIS, NDWI*

Cite this article: Bano D., Wali S., Shah S., Hussain A. Mapping and modelling of glacial lake outburst flood (GLOF) of Deran glacial lake, Ishkoman Valley, Ghizer District, Pakistan using GIS and remote sensing. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: "Promotion" LLC, 2020, p. 170–182.

Картографирование и моделирование прорыва ледникового озера Деран (долина Ишкоман, округ Гхизер, Пакистан) с использованием ГИС и данных дистанционного зондирования

Д. Бано, С. Вали, С. Шах, А. Хуссаин

*Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Пакистане, Исламабад, Пакистан,
dilshad.bano@akdn.org.*

Аннотация. В северной части Пакистана находятся крупнейшие в мире ледники и высочайшие вершины региона Гиндукуш-Гималаи. Эти природные ресурсы являются не только бесценным источником заработка для местного населения, но и создают различные угрозы, связанные с такими опасными природными явлениями, как лавины и прорывы ледниковых озер (GLOF). Глобальное потепление, изменение климата и деятельность человека являются основными факторами, вызывающими таяние этих ледников и, как следствие, их отступление, что в свою очередь приводит к формированию озер, прорыв которых приводит к резкому увеличению уровня воды в реках ниже по течению. Такие паводки, формирующиеся в результате прорыва ледниковых озер, являются одним из основных бедствий в данных горных регионах. В настоящем исследовании оценка и картографирование прорывов ледниковых озер были проведены с использованием методов ГИС и дистанционного

зондирования с последующей верификацией полевыми наблюдениями. Методика обнаружения изменений, например, NDWI, была выполнена по снимкам Landsat в течение последних двух десятилетий, а моделирование паводков проводилось с использованием программы HEC-RAS на основе наземных данных и данных дистанционного зондирования Земли. Временные изменения объема озера достигали +60%, что было рассчитано с помощью инструмента «Surface Volume» в ArcGIS. Площадь озер увеличивалась до 31,18%, в то время как ледяной и ледниковый покров уменьшился с 42,62% до 21,91%. Моделирование GLOF для двух сценариев показывает количество критически важных и приоритетных объектов инфраструктуры, подверженных риску, таких как мосты, трансформаторы, общественный центр, школа, дома и сельскохозяйственные угодья. Результаты исследования послужат основой для разработки планов по подготовке местных жителей и стратегий безопасности по снижению риска.

Ключевые слова: Деран, Гилгит-Балтистан, прорыв ледникового озера, регион Гиндукуш-Гималаи, программа HEC-RAS, ГИС, нормализованный разностный индекс воды (NDWI)

Ссылка для цитирования: Бано Д., Вали С., Шах С., Хуссаин А. Картографирование и моделирование прорыва ледникового озера Деран (долина Ишкоман, округ Гхизер, Пакистан) с использованием ГИС и данных дистанционного зондирования. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 170–182.

Introduction

The northern areas of Pakistan are hosting some of the world's largest and famous mountain ranges including Himalayas, Karakoram and Hindukush (HKH). These ranges contain over 5000 snow laden glaciers that supply huge volume of water through 10 sub basins and other various tributaries that feed the mighty Indus. The ICIMOD's glacier inventory developed in 2005 using remote sensing and geographical information technologies identified that the nature and health of the HKH glaciers are changing year by year due to change in temperature and climate, these variations resulted in melting of centuries old glaciers and lead to formation of lakes in glacier's lap, there are over 2000 glacier lakes and among them 52 glacier lakes are considered to be dangerous enough to cause glacier lake outburst floods for communities living in low lying areas in the HKH region [Rasul, 2015].

The GLOF events are catastrophic as huge loads of debris and mud flows in the downstream sweeping the infrastructure, houses and croplands even in scores of life losses if they happen without any alert signal. For mountain population, GLOF is a great hazard which has been reinforced by climate change in terms of frequency and vulnerability in Gilgit-Baltistan region. UNDP in 2007 reported that in Gilgit-Baltistan the frequency of glacier lake outburst floods is higher as it has been recorded over 30 disaster events in last two centuries. Such disasters include the GLOF events occurred in Gupis valley during 1994, when a GLOF blocked the Ghizer river and river blockade formed a huge lake, this event took five lives and damaged livelihoods and properties of population living in downstream. Another event in 1999 in the same extent lead to form a current famous lake i.e. Khalti lake. Similar events of various intensity have occurred during 2007, 2008 and 2009 from Ghulkin glacier [PMD, 2016]. GLOF events are also common in Shimshal valley, as it hosts few of the largest glaciers like Khurdopin and Virjirab glaciers. One of GLOF events in 2017 has inundated the low-lying hamlets in Shimshal Centre, Aminabad and Farmanabad and damaged road, bridges and crop land. Analysis of lake through satellite images revealed that the flood was result of Khurdopin glacial lake outburst, which is a frequent phenomenon in the valley. Similar events were occurred in Passu during 1985 and 2009, Yarkhun Lusht in 2002, Brep in 2005, Sonoghore in 2007 and Booni in 2010. Baibary Lake in Hinarchi glacier Bagrot valley generated a significant flood in May 2014 and damaged the link bridge over Bagrot River near Sat village when it burst due to

warm weather sustained more than seven days with clear sky conditions. Datochi Glacier and Bilchar glacier located in Bagrot valley generated outburst floods in July-August 2015 triggered by monsoon downpour with lightning/thunderstorm and caused huge erosive damage to agricultural land, link roads, suspension bridges and human settlements along the channel. GLOFs from Ghulkin glacier, Gojal valley in upper Hunza has also followed the similar mechanism in the past with the frequency of 5 outbursts in year 2008 [FOCUS, 2013].

Table 1. Historical GLOF events in Gilgit Baltistan

Event Year	GLOF Location	River
1994	Sosot/Gupis	Gilgit
1999	Khalti/Gupis	Gilgit
2000	Shimshal	Hunza
2000	Kand/Hushe	Indus
2005	Sosot/Gupis	Gilgit
2007	Ghulkin	Hunza
2007	Passu	Hunza
2008	Ghulkin	Hunza
2008	Ghulkin	Hunza
2008	Ghulkin	Hunza
2008	Ghulkin	Hunza
2009	Ghulkin	Hunza
2012	Sosot/Gupis	Gilgit
2017	Khurdopin	Shimshal

Source: Archer 2001, UNDP 2007, NARC 2008, Pamir Times June 2008. FOCUS, 2012

The analysis of GLOF event has revealed that the events were linked with rise in temperature and high intensity rainfall along with human activities which formed new surface and sub-surface glacier lakes at ablation zone [Bajracharya et al., 2007].

Glacial lake and Glacial lake outburst flood (GLOF)

A glacial lake is a large reservoir of water in, on or near the glacier created by glacial processes as glaciers melts at frontal zone, it creates the empty space which is filled by melt water which eventually become a lake due to gradual accumulation of water. They may be either ice dammed, or moraine dammed. Glacial lakes can be found almost all over the world with glaciated regions. Most theories reveal that glacial lakes began to form with glacier retreat all over the world near the end of last glacial period. Most of the glacial lakes in HKH region are the result of glacier ice and snow melting and deposition of unstable lateral moraines due to increasing temperatures that lead to more glacial lakes in times to come [Rasul et al., 2011].

Glacial Lake Outburst Flood (GLOF) is a sudden release of huge amount of debris mix water from the glacial lake flows downstream [ICIMOD, 2011]. The GLOF process is supported by the wreckage of glacier ice, the breakdown of moraines due to erosion and gradual leakage of water reduces the strength of lake to contain water, therefore the pressure exerts by the water force lead to the outburst and form a debris flow or flash flood. The intensity of possible flood depends on the speed of outflowing water or the discharge rate and the volume of the water which is usually high in cases of GLOF's, so the higher the volume and discharge rate, maximum would be the severity of flood downstream [Worni et al., 2012].

Glacial lake mapping and GLOF modelling using RS and GIS

There are number of approaches to assess various parameters to understand the nature of glacial lake during field surveys which may include observations by visual records, photography, understand local geology, physical settings of the site, physiography of the lake

outlet, lake dimensions and stability of moraines and its composition. Bathymetric data is another critical parameter to consider for GLOF as lake depth is used to estimate the volume of the water released in case of GLOF which can be collected by using advance technology and Boat and Sounder method [Khanal et al., 2015].

In general, most of the glacial lakes are found at high altitudes due to which it is difficult to reach physically for detailed assessments, investigations, mapping and monitoring [Anand, 2014]. It also needs extensive time, resources in terms of human and financials therefore, the remote sensing data and GIS techniques provide great help. Freely available satellite imagery of Landsat and Sentinel are used to monitor the temporal change of glacial lakes. The normalise water index (NDWI) and modified normalise water index (MNDWI) are frequently used indices to extract lake using satellite data [Huggel et al., 2004].

The Geographical Information System (GIS) and remote sensing (RS) tools and techniques supports the detailed study, analysis and monitoring of various features of glaciers and glacier lakes as most of the glacier lakes are located at high altitudes that are difficult to assess physically. The assessments of some critical characteristics of glaciers like snow line, moraine type, lake area etc can be easily identify on remote data i.e. satellite images. The remote sensing data of high spatial resolution i.e. Digital Terrain Model (DEM) and freely available software's i.e. HEC-RAS and HEC-GeoRAS can be used to model the possible GLOF and identification of low-lying at-risk features. The results of the remote sensing data coupled with ground truthing can be best approach for GLOF mapping and modelling [Banerjee, 2003].

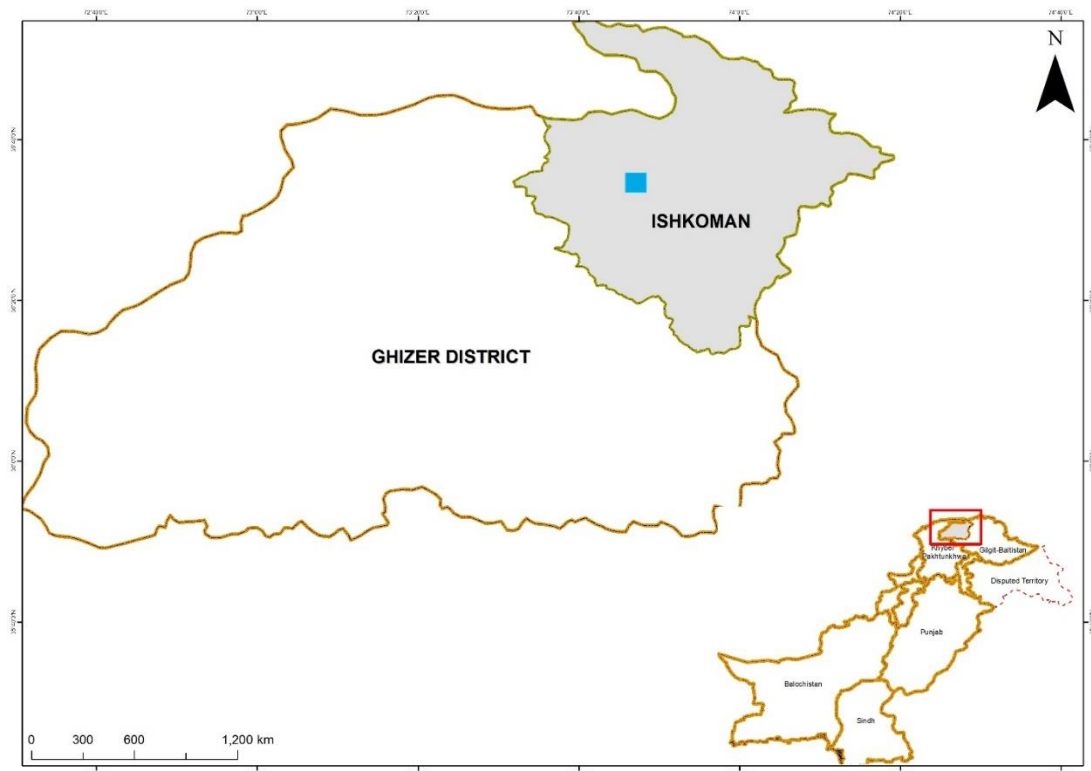


Fig. 1. Map of study area showing location of Deran Lake

The study is focused on the mapping and modelling of glacier lake outburst flood from Deran glacier in Ishkoman valley in high mountain region of Gilgit Baltistan. Deran glacial lake is in NE of Gutulti watershed at elevation of 3436m a.s.l in Tehsil Ishkoman District Ghizer. The site is located at a ground distance of 148 km away from Gilgit city. Deran glacial lake is accessible by foot from Gutulti village. The coordinate of study is lat. 36.593767°N and long. 73.811659°E.

Brief review of the problem

Gilgit-Baltistan is in the lap of the world's highest mountain ranges, namely Karakorum, Himalayas and Hindukush, having more than 5000 of glaciers and hazardous glacial lakes [ICIMOD, 2005]. Deran glacial lake is developed at the terminus of Deran Glacier, located in the Gutulti watershed Ishkoman valley in Hindukush mountain ranges in north of Pakistan. Deran Glacier generated outburst floods in 2003 triggered by high melting of glacier with increase the volume of glacial lake and caused huge erosive damage to forest land, agricultural land, link roads, suspension bridges and water channel along the mainstream. Deran watershed having four glaciers and three glacial lakes. Out of three, Deran glacial lake is one of the potential lake due to temporal increase of size and volume of water.

Deran Nala hosting four parallel glaciers. Gradient of eastern glacier is relatively high, and it looks like hanging position. This glacier is highly deformed without any debris covers material. The glacier tongue is thinning, and glacier ice mass is moving upward. Potential could not be physically assessed because of inaccessibility. On southern side along the right lateral moraine a medium sized glacial lake exists. This lake has been developed by push moraine of hanging glacial tributary moving from northward and the lateral moraine of another glacier from its western side. The melt water at supra and en-glacial conduits pour down into the lake and discharges from it in less amount. The lake is bounded by stable moraines and low probability of its outburst, because both adjacent glaciers are retreating phase. Central glacier is located between the two glaciers. The snout of glacier is covered by debris materials and is susceptible for partially blockage of the glacier run off due to avalanches hazard which are triggering from the northern avalanche run out zone. Small ponds observed along their lateral moraine.

Downstream valley is narrow and highly exposed to GLOF, all infrastructures which are located along the banks of the main perennial stream are under the great threat of this hazard. Any potential GLOF/flash floods from the glacier can reach down the villages and may cause heavy damages along the valley banks. Based on the situation, it was necessary to assess the situation in detail to understand the expected damages to downstream and prepare mitigation accordingly.

This study aims to 1) analyze temporal changes in the glacial lake using time series (1991-2015) remote sensing data; 2) to develop Glacier Lake Outburst Flood (GLOF) scenarios and to identify downstream inundation zones. The research also explains that the formation of the moraine glacial lakes is the complex natural process which can modify the downstream land topography and flood plain environment and pose a potential of financial losses. Therefore, it's very important to understand the whole mechanism of lake development, variations and changes occurred due to climatic and anthropogenic activities, elements that may initiate an outburst, route of the outflowing flood water. A model has the capability to predict all those parameters to find approximate time and situations of GLOF onset to ensure the downstream settlements are prepared enough to handle any disastrous conditions.

Method and data

The study is focused on the future possibilities of GLOFs from Deran glacier lake. The process was carried out by conducting couple of extensive ground surveys during 2015 for the collection of data needed for glacier lake mapping and GLOF modelling. The surveys included the profiling of cross section of river, assessment of flood plain, historical flood zones, flood safety structures, participatory risk assessment with community by interviews and group discussions.

Remote sensing data from Landsat satellite for the year 1991, 1996, 2001, 2009 and 2015 were acquired from USGS website for free of cost, for the identification and temporal delineation of water bodies (Glacial Lakes) and mapping of land cover changes and the Digital Terrain Model (DTM) of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) with 10m resolution was clipped to area of interest and used in flood modeling to calculate glacial lake volume to develop GLOF simulation to anticipate downstream risk.

Field data collection for river profiling

River cross section data was collected using GPS and Range finder, due to unavailability and remoteness of the study area to carry heavy machinery like Total Station, manual and simplified approach was used for river profiling. Water discharge was calculated using “Float Method”, the steps of discharge calculation was repeated thrice for each flow to ensure accuracy. The standard equation (eq.1) was used for discharge calculation.

$$Q = V \times A \quad (1)$$

where Q - discharge, V - velocity, A - width×depth.

Delineation of glacial lake

Remote sensing and GIS are the most used technologies of current age that have been proven to have capabilities to assess and investigate water bodies and to monitor changes in glaciers and glacial lakes. The free access and availability of satellite images/data for a large geographical area for different time/years that helps to monitor the changes to understand the phenomenon and easy interpretation of data are the common reasons of widespread use of RS technology. In this study, Landsat images were selected to assess the lake dynamics and monitor the spatial and temporal changes to investigate the situation due to availability of reasonable spatial resolution of 30m. Three snow and cloud free scenes of Landsat-5 Thematic Mapper (TM) for year 1991, 1996 and 2010, two scenes of Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) for year 2000, 2005 and one scene of Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) for year 2015 from the month of August were acquired from USGS website [<https://earthexplorer.usgs.gov>]. The field work was conducted in summer season to collect data as lake has its maximum volume due to high melting and rains and higher discharge rate. The chances of lake outburst and overflow increases in summer due to greater volume and erosion of moraines.

In this study, Normalized Difference Water Index (eq.2) proposed by McFeeters in 1996 was used for delineation of glacial lake. Modified Normalized Water Index (MNDWI) was also used to validate the NDWI results. These indices indicate the presence of water, NDWI values ranges between -1 to +1. Most of the water features are found closed to +1 value. McFeeters set “zero” as the threshold value for water bodies. The values towards -1 indicate the vegetation and bare soil or land features [McFeeters, 1996].

The equation used for NDWI calculation is:

$$NDWI = (GREEN-NIR) / (GREEN+NIR). \quad (2)$$

It was noticed that the McFeeters index was unable to distinguish water feature from built-up as at some locations where water body and soil co-exists; the reflectance values are mixed up and difficult to differentiate the actual area of water body. To solve such accuracy issue and to ensure satisfactory results, a Modified Normalized Water Index (MNDWI) was proposed by Xu in 2006, in which NIR band was replaced with SWIR band. MNDWI can depress the built-up and other background features information effectively while express water feature information and make it possible to accurately extract water body information from the target area due to higher reflectance in Green and MIR bands. The threshold value for MNDWI was set to Zero like NDWI but the manual editing brought more refinement and accuracy in delineation of water bodies [Aggarwal et al., 2013].

The equation for MNDWI calculation is as under:

$$MNDWI = (GREEN-MIR) / (GREEN+MIR). \quad (3)$$

Extensive manual editing and delineation of lake was carried out using Google Earth images and adjusted with reference data i.e. photographs and ground observations for mapping the final lake.

Lake depth and volume

The depth of the lake is generally measured using highly sophisticated methods and tools or by applying commonly used “Boat and Sounder” method, but due to unavailability of Boat and other equipment’s, Weighted Cord Method was used with GPS device, the Inverse Distance Weighted Interpolation (IDW) was choose based on the literature, as for many aquatic studies IDW was applied due to its exactness which gives the depth values for the unknown points based on the distance of surrounding known points. The surveyed GPS points were converted into lake boundary and attribute was generated with elevation information, the Triangular Irregular Network (TIN) created and volume of the lake and area was calculated using surface volume tool in 3-D Analyst toolbar of ArcGIS. The results were copied in MS excel for further analysis and generate graphs.

Land cover mapping

Temporal land cover of Gutulti watershed was mapped using unsupervised classification on Landsat images of 1991 and 2015 in ArcGIS interface. The area of each class was calculated using Field Calculator in Spatial Analysis tool and graphs were develop in MS Excel.

GLOF Inundation Mapping

Flood inundation zones in case of GLOF were generated in HEC-RASS Software using unsteady flow method based on the river profile and bathymetric data and high resolution DTM surface and GLOF risk maps were created in ArcGIS environment.

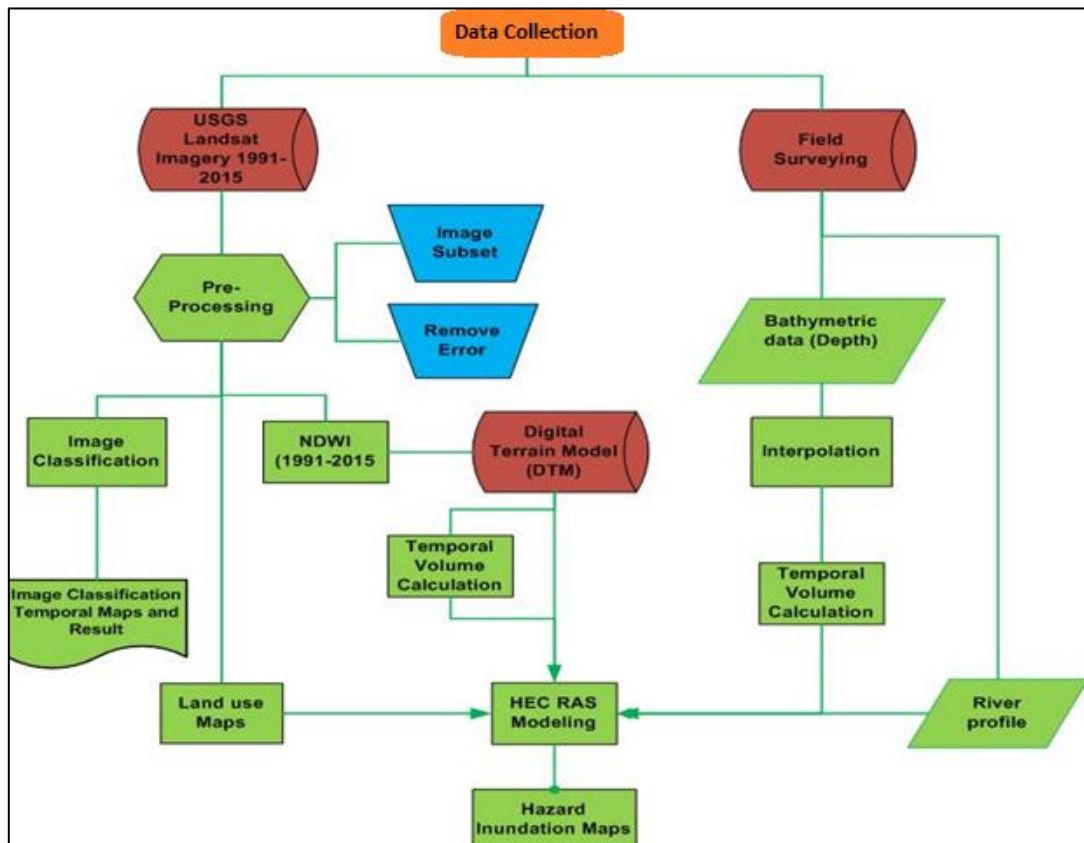


Fig. 2. Flow chart of the methodology for the mapping and modelling of GLOF

Analysis

The assessment and field surveying coupled with remote sensing method revealed that the Deran lake was increased in size and depth due to high melting and degradation of forest cover and rangeland that increased the chances of GLOF events and ultimately flooding in low lying areas.

In general, both natural forces and human actions convert these natural processes into disasters. Natural forces like increase of temperature and change in precipitation pattern coupled with human activities like high livestock density, free grazing, over exploitation of forest products (especially for fodder and fuel wood) conventional farming, forest depletion and weak relationships result changes in localized climate and its impacts.

In 1991, Deran Lake has an area of 7987.34 sq.m which was taken as baseline for further comparison. This was increased up to 11633.68 approximately 15% change in area in 1996, which further increased to 14806.82 (approx. 19%) in 2001. In 2009, it goes up to 19300.65 (24 %) and in 2015 it reached to 24337.22 which is 31% increase in lake area. The statistics shows the gradual increase in size of Deran lake over the study timeline.

Table 2. Temporal change in Deran Lake area between 1991 and 2015

Year	Area (Sq.m)	% Change
1991	7987.34	-
1996	11633.68	14.90
2001	14806.82	18.97
2009	19300.65	24.72
2015	24337.22	31.18

The temporal change in lake area between 1991 to 2015 can be observed in below images.

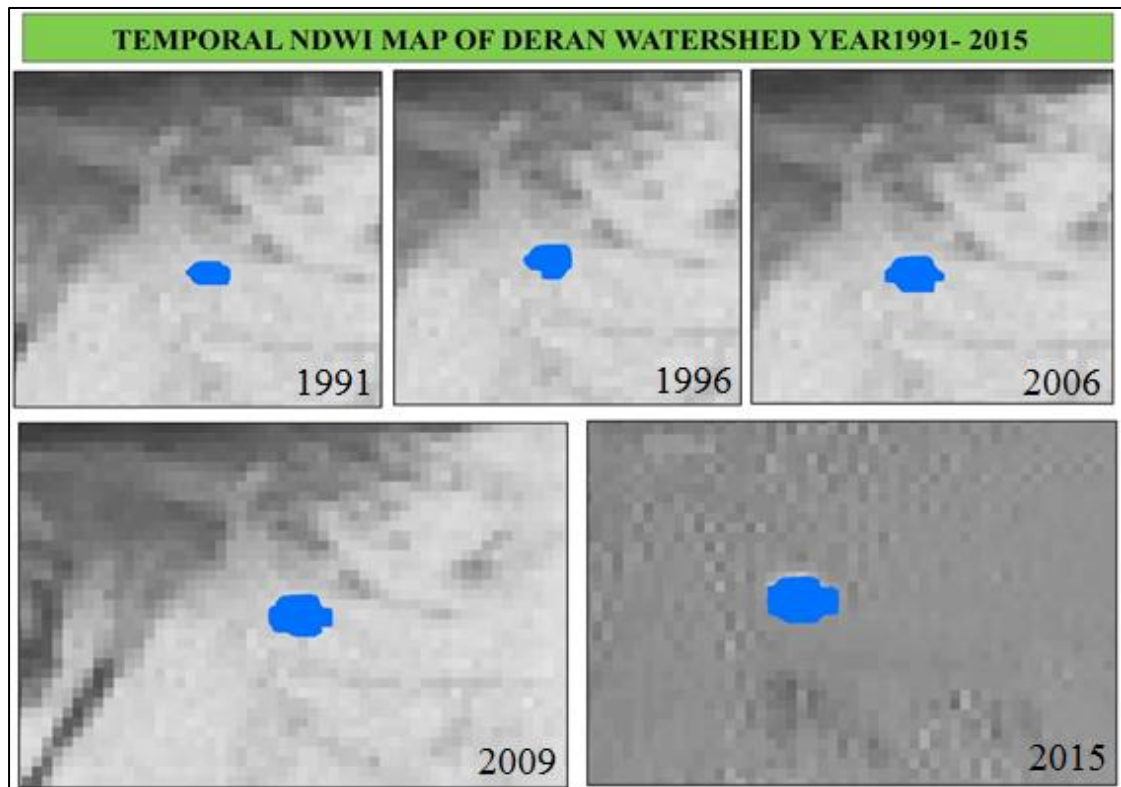


Fig. 3. Map shows the gradual development of Deran Lake from 1991-2015

The NDWI results were supported by the findings of the interviews and discussions conducted during field surveys about historical records that the ablation area of the glacier has witnessed a severe melting in last few years that weaken the glacier ice sheet and gradual melting lead to the formation of small water ponds and later on the combination of all small ponds converted into a huge lake with massive volume and bigger in size.

Deran glacial lake shows the visible change in area (Fig. 4) that indicates the climate change impact on this part of the world. The threat of GLOF hazard to downstream community is also increase with respect to temporal enlargement in lake size.

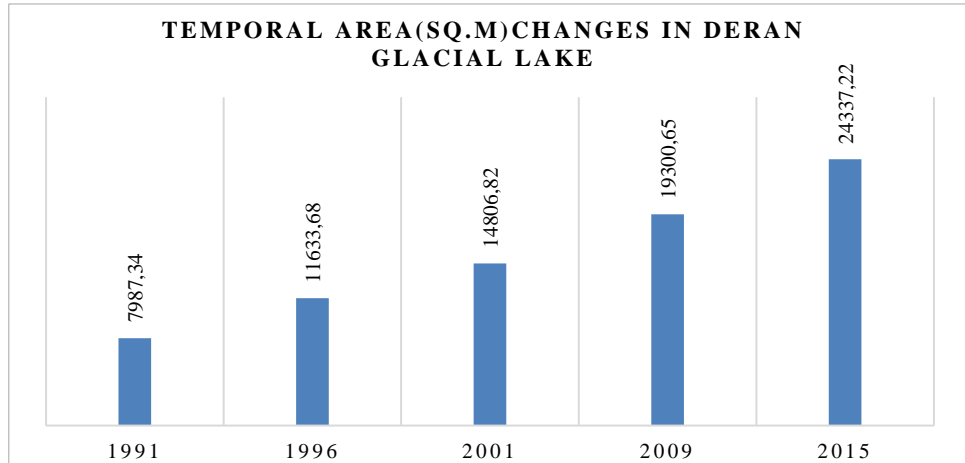


Fig. 4. Temporal change in lake area during 1991 to 2015

The GPS points containing the latitude, longitude and depth values were interpolated in ArcGIS environment using Inverse Distance Weighted Interpolation (IDW). The polygon of a shoreline boundary of the Lake was created using survey points and populated the attribute with elevation information (i.e. Z Values). The Lake boundary or shoreline depth was taken as “Zero”. The output surface resulted from the interpolation was converted into Integer and created a surface of Triangular Irregular Network (TIN). A volume of the Lake and area was calculated using surface volume tool in 3-D Analyst toolbar of ArcGIS. In 1990, the volume was 98695.8 m³, while it increases to 128202.5 m³ in 1996. In 2001, it was further increased to 145040.4 m³ and reached at 159021.9 cubic meter in 2009 and 163852.6 m³ in 2015 respectively as shown in (Fig. 5).

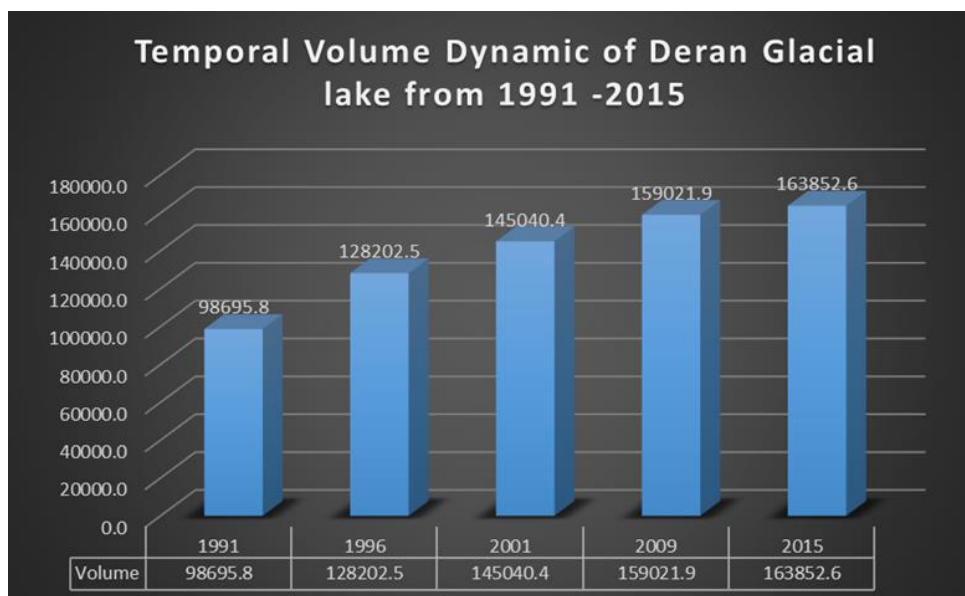


Fig. 5. Temporal change in volume in Deran Lake

The distribution of different land cover and their percentage in 1991 is presented in (Fig. 6). Major percentage of the watershed is covered by Glacier and snow cover (40.62 %), rangeland (36.06 %), with barren land (22.43%), Forest/Vegetation (0.88 %) and water bodies (0.01 %). The area covered by glacier and snow cover is 100.0043, rangeland 88.7817, barren land 55.2159, forest and vegetation 2.162 and water bodies 0.0141 sq.km respectively.

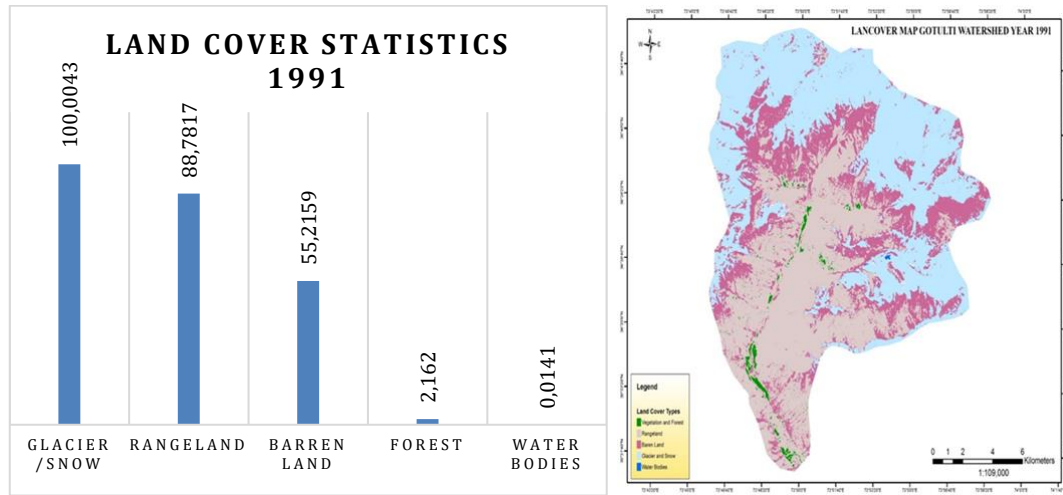


Fig. 6. Land use and land cover statistics in 1991 in Gutulti Watershed

The distribution of different land cover in 2015 is presented in the (Fig. 7), where it shows major percentage of the watershed is covered by barren land (52.82%), rangeland (23.36%), Glacier and snow cover (21.19%), Forest/Vegetation (1.91%) and water bodies (0.01%). The area covered by barren land is 130.49, rangeland 57.70, glacier and snow cover are 54.12, forest and vegetation 47.1 and water bodies 0.02 sq.km respectively.

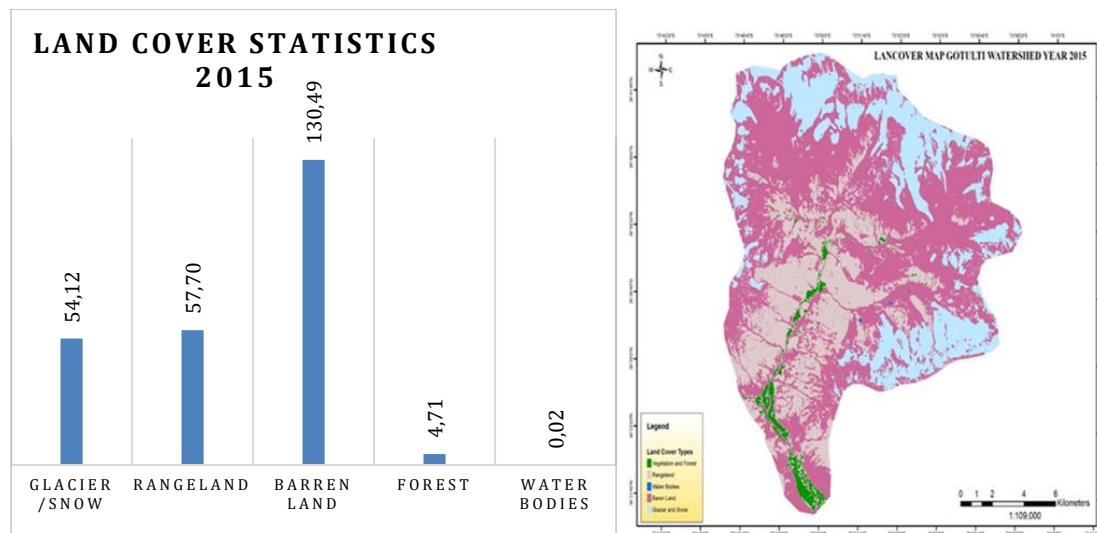


Fig. 7. Land use and land cover statistics in 2015 in Gutulti Watershed

GLOF map was generated using unsteady flow method in HEC-RAS software using lake volume, river profile and DTM data. Map (Fig. 8) shows two scenarios of flood zones if it triggers. 1st scenario is based on release of 56000 m³ water from glacial lake with data time interval of 10 minutes. The GLOF exposures statistic are 384.17 acres of forest and vegetation, two houses, one bridge and Stockpile in Faizabad Ishkoman, Govt School, a community centre and a transformer in Ishkoman Payeen and eight houses, one bridge and one transformer in Tushkin village.

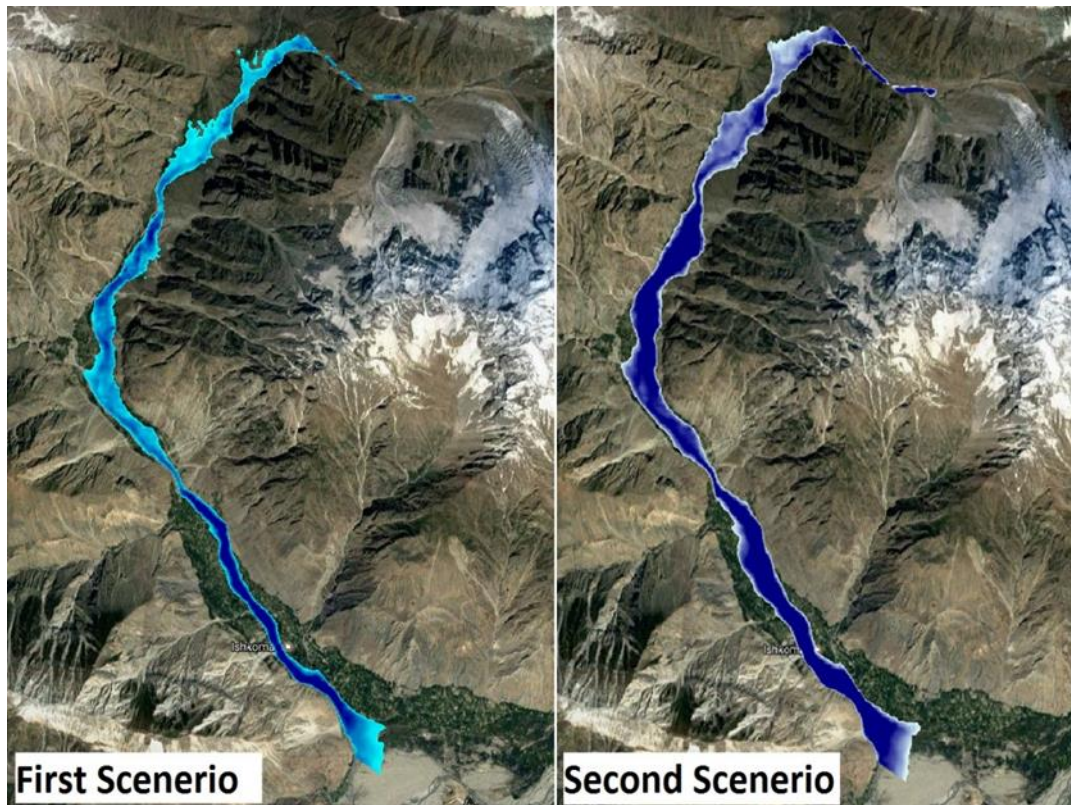


Fig. 8. Map shows the expected flood extents downstream in Gutulti valley

The second GLOF scenario is based on release of 56000 m³ water from the lake with time interval of 10 minutes. The GLOF exposures statistic are 438.39 acres of forest and vegetation, four houses one bridge, depot, a community centre and Stockpile in Faizabad Ishkoman, AKES School, Govt school, community centre, Flour Mill, two bridges, Timber factory and transformer in Ishkoman Payeen and twenty four houses, one Mosque, one Private School, two shops and a transformer in Tushkin village.

The GLOF risk maps (Fig. 9) were developed by integration of GLOF inundation zone with infrastructure data collected during ground surveys.

Conclusions

The assessment of a glacier lake outburst flood risk in a step wise systematic method including field surveys and community discussions coupled with desk study using remote sensing resulted in a comprehensive picture of the hazard exposure and the susceptibility of downstream vulnerable communities. The findings can be a good base for the policy makers and planners to adopt feasible interventions and safety measures or mitigation. The present study applied the methodology of lake outburst and simulate the flood scenarios to model the expected GLOF's and foresee the anticipated risk. The study shows a significant impact on critical infrastructures and lifelines of downstream communities. The real time losses can be high if indirect damages are considered, as the intensity and magnitude of GLOF can vary. Therefore, a comprehensive data especially the geotechnical parameters for moraine glacier lake can significantly enhance the findings.

Based on the analysis of the data collected during the study revealed that the Glaciers in Deran nallah is in retreating phase as the indication of end moraine along the valley witnesses. The total catchment and ablation zone of the glacier is 22.6 Sq. Km and its Snow Equilibrium line limit is 4070 m a.s.l. The gradient of the glacier varies in different parts. The snout is very steep, in the middle portion it is gentle, and the accumulation zone is very steep. The lake has been developed by push moraine of hanging glacial tributary moving from northward and the lateral moraine of another glacier from its western side. The lake extent has been increased to

31.18 % since 1991 to 2015 due to high temperatures and added the water volume up to 60%. As a result of high melting, the ice and glacier cover has been receded from 42.62% to 21.91% in study timelines i.e. 1991 to 2015. The findings help us to recommend that a thorough investigation of the carrying capacity of lake should be carried out and a plan for at risk communities downstream should be in place to avoid future losses.

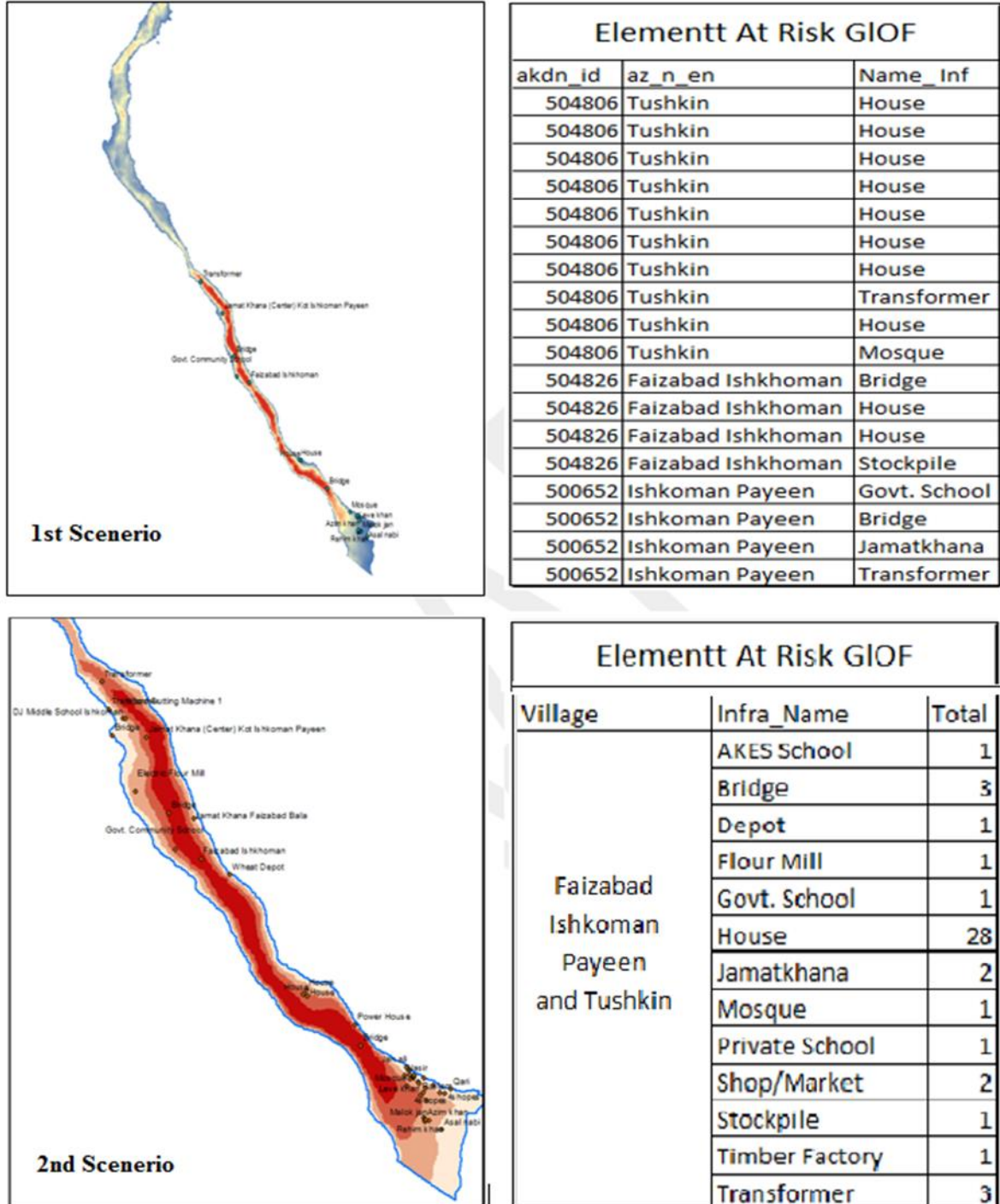


Fig. 9. GLOF risk map shows downstream infrastructure at risk

Acknowledgements

The authors are grateful to the HVRA colleagues of department of emergency management to conduct the assessment of Deran Glacier and lake, Authors also thank to ESA and NASA for the provision of free open source satellite data for analysis.

References

- Aggarwal, A., Jain, S., Lohani, A., & Jain, N. (2013). Glacial lake outburst flood risk assessment using combined approaches of remote sensing. GIS and dam break modelling Natural Hazards and Risk Published online.
- Anand, A. 2014. Glacial Lake Outburst Flood Hazard Assessment in a Part of Uttarakhand, India.
- Bajracharya, S. R., Mool, P. K., & Shrestha, B. R. (2007). Impact of climate change on Himalayan glaciers and glacial lakes: Case studies on GLOF and associated hazards in Nepal and Bhutan: International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD).
- Banerjee AK (2003) Nanda Devi Biosphere Reserve: the landscape plan of management (Part-1). Ministry of Environment and Forests. Government of India, New Delhi. Campbell, J. G., & Pradesh, H. (2005). Inventory of glaciers, glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) affected by global warming in the mountains of India, Pakistan and China/Tibet Autonomous Region. International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD).
- FOCUS (2013). A Report on Rapid Visual Assessment of Twenty Glaciers in Gilgit-Baltistan and Chitral. <http://akrsp.org.pk/wp-content/themes/akrsp/img/pdf/Progress-Review-2013-14.pdf>. Assessed on 08 April 2019.
- ICIMOD (2005). Application of Remote Sensing and GIS in Environmental Monitoring in the Hindu Kush Himalayan Region. AIMS Environmental Science.
- Huggel, C. et al (2004). An Assessment Procedure for Glacial Hazards in the Swiss Alps. Canadian Geotechnical Journal.
- Khanal, N. R. et al (2015). A comprehensive approach and methods for glacial lake outburst flood risk assessment, with examples from Nepal and the trans-boundary area. International Journal of Water Resources Development.
- PMD (2016) Cryosphere Monitoring in Northern Pakistan- Role of Pakistan Meteorological Department.
- Rasul, G. and Q. Z. Chaudhry, 2015: Glaciers and Glacial Lakes under Changing Climate in Pakistan, Vol. 8, Issue 15, Pakistan Journal of Meteorology
- UNDP. (2007). Human Development Report 2007/2008.
- Worni, R. (2012). Glacial Lakes in the Indian Himalayas - From an Area-Wide Glacial Lake Inventory to on-Site and Modeling Based Risk Assessment of Critical Glacial Lakes



Прорывоопасность завально-оползневых озер Тянь-Шаня

С.А. Ерохин, В.В. Загинаев

*Институт водных проблем и гидроэнергетики Национальной академии наук
Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызстан, erochin@list.ru, zagivit@mail.ru*

Аннотация. Прорывы завально-оползневых озер водно-глинистой разновидности обычно протекают спокойно, не бывают катастрофическими, в отличие от прорывов водно-ледовых озер, так называемых, завально-оползневых озер каменных глетчеров, прорывы которых обуславливают формирование селевых потоков огромной мощности, представляющих большую угрозу, для жителей горных долин и подгорных равнин. В данной работе приведены данные о случаях прорывов завальных озер, образованных обычными водно-глинистыми оползнями, а также озер, образованных вследствие перекрытия долины водно-ледовых оползней каменных глетчеров на территории Кыргызстана (Тянь-Шань). Описана механика прорывного процесса и приведены примеры прорывов для обоих случаев.

Ключевые слова: *завально-оползневые озера, прорывоопасность, каменные глетчеры, селевой поток, Кыргызстан, Тянь Шань*

Ссылка для цитирования: Ерохин С.А., Загинаев В.В. Прорывоопасность завально-оползневых озер Тянь-Шаня. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 183–193.

The outburst hazard of the landslide-dammed lakes of the Tien Shan

S.A. Erokhin, V.V. Zaginaev

*Institute of Water Problems and Hydropower Energy, National Academy of Science of
Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan, erochin@list.ru, zagivit@mail.ru*

Abstract. Outburst floods from landslide-dammed lakes of a water-clay variety usually proceed quietly, are not catastrophic, unlike outbursts of water-ice lakes, the so-called landslide-dammed lakes of rock glaciers, the outbursts of which cause the formation of debris flows of great power, which pose a great threat to inhabitants of mountain valleys. This paper presents data on the cases of outbursts of landslide dammed lakes formed by ordinary water-clay landslides, as well as lakes formed as a result of the overlap of the valley of water-ice landslides of rock glaciers in Kyrgyzstan (Tien Shan). The mechanics of the outburst process are described and examples of outbursts for both cases are given.

Key words: *landslide-dammed lake, outburst hazards, rock glaciers, debris flow,
Kyrgyzstan, Tien Shan*

Cite this article: Erokhin S.A., Zaginaev V.V. The outburst hazard of the landslide-dammed lakes of the Tien Shan. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 183–193.

Введение

Завально-оползневые озера образуются в горных долинах в случае перекрытия их от борта до борта мощными оползневыми завалами (рис. 1). Выше завала скапливается

вода, формируется ванна озера, которая постепенно заполняется по мере водопритока из верхних участков долины [Ерохин и Загинаев, 2016]. Плотины таких озер представлены рыхлообломочным оползневый материал с большим содержанием глинистых и пылеватых частиц, который является почти абсолютным водоупором, способным задержать всю поступающую из вышележащей части долины воду [Ерохин и Загинаев, 2017]. Поэтому в озерах этого подтипа почти нет подземного стока, а весь водоприток идет на пополнение объема озера, скорость роста которого зависит от расхода водопритока.



Рис. 1. Выше завала оползня из боковой долины, в долине Кайнома, на северо-западных предгорьях Ферганского хребта образовалось завально-оползневое озеро объемом около 300 тыс. м³. Фото С.А. Ерохина

Fig. 1. The landslide lake was formed above the landslide dam from the lateral Kainoma valley, on the north-western foothills of the Fergana range with a volume of about $300 \times 10^3 \text{m}^3$. Photo by S.A. Erokhin

Объем таких озер может составлять от нескольких десятков тысяч до нескольких миллионов куб. метров. Так, по расчетам И.А. Торгоева объем завально-оползневого озера на участке Кургон-Джар в долине р. Кара-Ункур на момент его максимального наполнения 8 апреля 2018 г. составил 8,6 млн м³ [Торгоев, 2018]. Оползень-поток, из сильно разжиженной рыхлообломочной массы с большим содержанием глины, вышел из боковой левой долины в главную долину реки Кара-Ункур и заблокировал оползневый завалом высотой до 20-30 м. русло реки Кара-Ункур и всю ее современную пойму от борта до борта (рис. 2). Река была перекрыта на одни сутки, а затем, начался размыв плотинной перемычки по правому борту долины.

Объект исследования

Объектом исследования являются завально-оползневые озера, расположенные в горах Тянь-Шаня, на территории Кыргызской Республики (включая Северный и Западный Тянь-Шань). Всего по всей стране насчитывается порядка 38 завально-оползневых озер. Из них 23 озера расположены в южных областях Ошской (10 озер) и Джалал-Абадской (13 озер). 15 озер приходятся на северные области: Иссык-Кульская (5), Нарынская (3), Чуйская (7) [Ерохин и др., 2020].

Методика

Для понимания механики прорывов завально-оползневых озер, расположенных на территории Кыргызской Республики были изучены архивные материалы: отчеты полевых исследований, опубликованные статьи, аэрофотоснимки, а также фотоснимки с полевых работ и аэровизуальных обследований последних десяти лет.

Результаты

Объем каждого завально-оползневого озера нарастает до предела, определенного высотой гребня плотинной перемычки. В зависимости от величины притока период наполнения озера длится от нескольких часов до нескольких суток. По мере поступления воды уровень озера поднимается до гребня плотинной перемычки. На этом уровне из максимально наполненной ванны озера начинается перелив воды, в процессе которого формируется русло перелива.

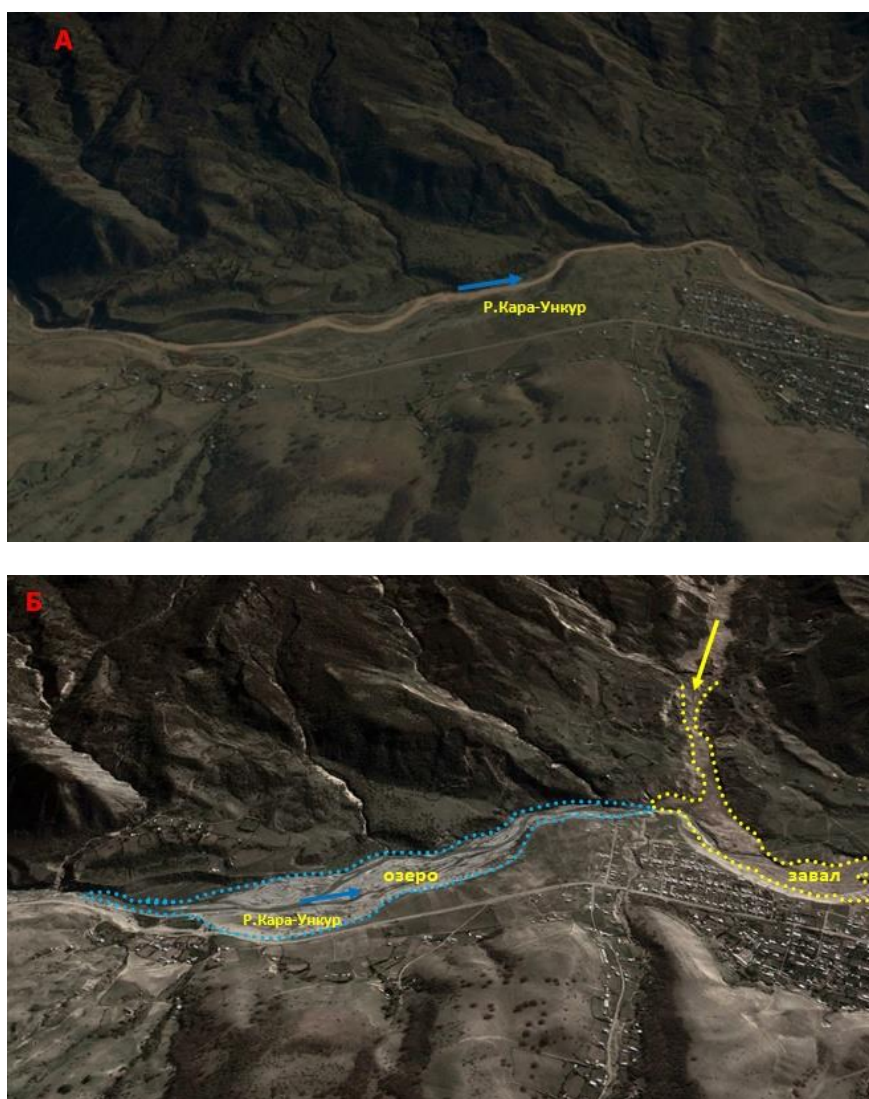


Рис. 2. Долина реки Кара-Ункур на участке Кургон-Джарю: А-до образования и прорыва завально-оползневого озера (съемка 1.11.2016); Б - после прорыва завально-оползневого озера (съемка 22.10.2017). Источник: Google Earth

Fig. 2. Valley of the Kara-Unkyur river in the Kurgon-Dzharyu area: A-before the formation and outburst of the dammed landslide lake (1.11.2016); Б - after the breakthrough of a landslide lake (22.10.2017). Source: Google Earth

Для озер завально-обвальных и завально-селевых период формирования русла перелива является самым прорывоопасным. Так как, постепенное углубление русла на этих озерах переходит в лавинообразное увеличение его сечения. Происходит трансформация спокойного русла перелива в бурно развивающийся прорывной проран. Естественно ожидать, что и на завально-оползневых озерах будет происходить тот же процесс: внезапного размыва оползневой дамбы с формированием гидродинамической волны прорыва огромной разрушительной силы. Поэтому местные жители, которым угрожает затопление при прорыве оползневого озера, с помощью МЧС и других хозяйствующих организаций, искусственно углубляют это русло с целью сброса воды из озера и устранения угрозы его прорыва (рис. 3).

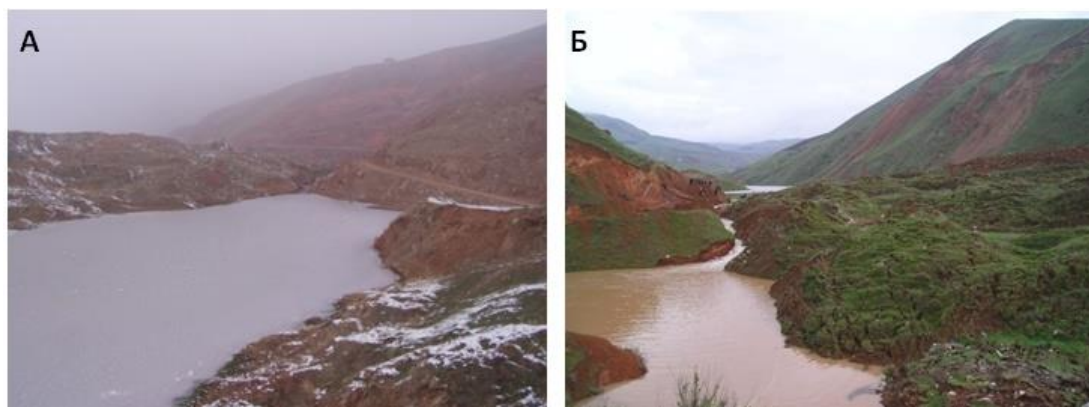


Рис. 3. В плотинах завально-оползневых озер искусственно устроены каналы поверхностного стока для сброса воды из озера и устранения угрозы его прорыва борта. А – озеро в долине реки Каратуз (Жалал-Абадская область); Б – озеро в долине реки Будалык (Ошская область). Фото Ерохина С.А.

Fig. 3. In dams of landslide lakes, surface runoff channels were artificially arranged to discharge water from the lake and eliminate the threat of its side outburst. A - lake in the Karatuz valley (Jalal-Abad region); B - lake in the Budalyk valley (Osh region). Photo by Erokhin S.A.

Однако перелив воды на плотинах завально-оползневых озер обычно не бывает катастрофическим. По крайней мере, не было еще отмечено случая, чтобы прорывной поток трансформировался в селевой с катастрофическими последствиями для населения. В результате прорыва крупных завально-оползневых озер, типа озера на участке Кургон-Джар в долине р. Кара-Ункур (см. рис. 2), образуются паводки с аномально высокими расходами, зона поражения которых не выходит за пределы речной поймы и первой надпойменной террасы. Но далеко не все завально-оползневые озера прорывают и дают паводки. Для прорыва необходимо, чтобы энергии потока перелива через плотинную перемычку было достаточно для эрозионного размыва отложений, слагающих плотину. Однако оползневые отложения являются весьма устойчивыми к эрозии, поэтому на многих обвально-оползневых озерах, типа озера в долине Кайнома (рис. 4), углубление русла перелива не происходит, так как водоток по этому руслу имеет столь незначительный расход, что его мощности не достаточно для размыва вязких глинистых оползневых отложений. Между притоком воды в озеро и стоком из него устанавливается равновесие, которое подкрепляется устойчиво стабильной глубиной русла перелива. Это равновесие может продолжаться сотни и даже тысячи лет, при условии, что величина расхода притока воды в озеро не будет превышать предела, при котором размывающая энергия водостока из озера будет выше эрозионной устойчивости оползневых отложений, слагающих плотину. Следовательно, нарушение равновесия может быть нарушено, если произойдет переполнение озерной ванны, вследствие приноса в неё больших объемов воды паводками или селевыми потоками.

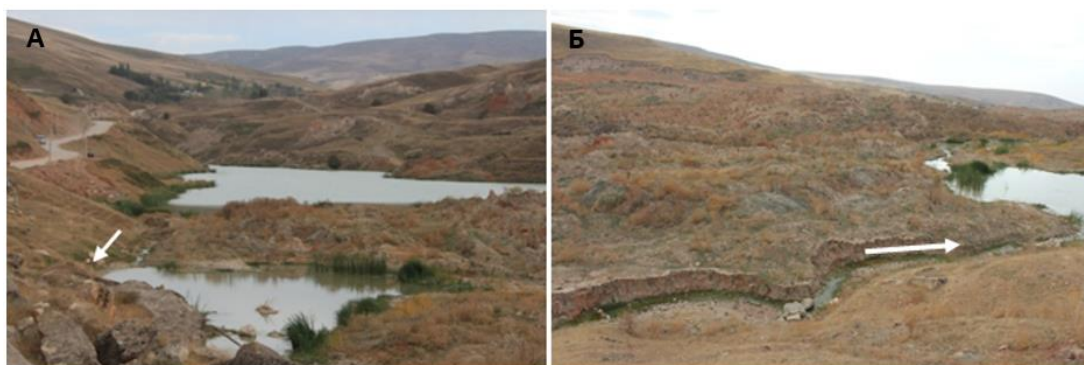


Рис. 4. Завально-оползневое озеро в долине Кайнома имеет поверхностный сток (А) через искусственный канал стока (Б). Углубление канала не наблюдается, так как энергии потока перелива недостаточно при расходе около 10 л/с (на момент обследования озера 12.09.2018) для размыва вязких оползневых отложений. Фото С.А. Ерохина

Fig. 4. Landslide-dammed lake has a surface runoff in the Kainoma valley (A) over an artificial runoff channel (B). Deepening of the channel is not observed, since the energy of the overflow is insufficient at a flow rate of about 10 l/s (September 12, 2018) for erosion of viscous landslide deposits. Photo by S.A. Erokhin

Таким образом, вышеприведенная информация позволяет сделать вывод о том, что завально-оползневые озера являются прорывоопасными при формировании русла поверхностного стока, в ближайшие часы после заполнения озерной ванны. В случае сохранения озера после формирования поверхностного стока его прорывоопасность понижается почти до нуля, так как вероятность моментального поступления в озеро больших объемов воды ничтожно мала.

Интереснейшей разновидностью озер завально-оползневого подтипа являются озера перигляциальной зоны с плотинами из столкнувшихся каменных глетчеров (рис. 5) боковых долин.

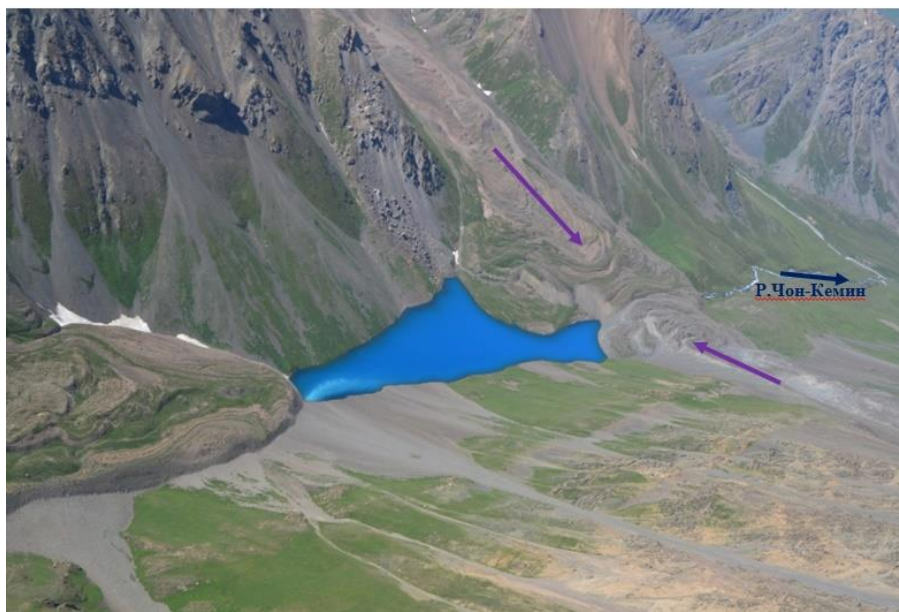


Рис. 5. Завально-оползневое озеро Джасылкель в верховьях долины реки Чон-Кемин, на стыке хребтов Кунгей-Алатау и Заилийский Алатау. Фото С.А. Ерохина

Fig. 5. Landslide lake Zhasylkel in the the Chon-Kemin valley, at the connection of the Kungey-Alatau and Zailiyskiy Alatau ranges. Photo by S.A. Erokhin

Механизм движения каменных глетчеров – медленное оползание вниз по долинам, благодаря пластично-текучим свойствам погребенных и подземных льдов. Каменные глетчеры противоположных боковых долин, выползая навстречу друг другу, смыкаются на дне главной долины, как это произошло в верховьях долины Чон-Кемин на участке формирования озера Джасылкель (рис. 5). Благодаря водоупорным свойствам каменных глетчеров они могут удерживать талую ледниковую воду, из которой формируются озера, выше участка смыкания каменных глетчеров.

В отличие от обычных водно-глинистых оползней водно-ледовые оползни каменных глетчеров образуют плотины, внутри которых могут формироваться подземные каналы стока. Они обеспечивают некоторую долговечность озера, например озеро Джасылкель (рис. 5), однако в случае их закупорки неизбежен его прорыв. Поэтому озера каменных глетчеров, как и озера моренно-ледникового типа, являются прорывоопасными в период подземного стока из озера, и резко снижают свою прорывоопасность после формирования у них поверхностного стока. Достоверность этого заключения подтверждается результатами анализа прорыва озера Ортокель в долине реки Иссык-Ата на северном склоне Кыргызского хребта (рис. 6). В раннем голоцене каменные глетчеры из боковых так тесно сомкнулись своими языками на днище главной долины, что полностью перекрыли течение реки Иссык-Ата. Выше участка смыкания образовалось озеро Ортокель объемом до 6,5 млн м³.



Рис. 6. Завально-оползневое озеро Ортокель после прорыва стало проточным и непрорывоопасным. Фото С.А. Ерохина

Fig. 6. Ortokel landslide-dammed lake became flowing and non-dangerous after the outburst. Photo by S.A. Erokhin

Сток из озера на первом этапе его развития был подземным и достаточно интенсивным, чтобы не допустить перелива воды через гребень плотины. Образовалось равновесие между притоком воды в озеро и её оттоком через подземные каналы стока, поэтому период первого этапа развития был весьма длительным. Возможно несколько тысяч лет. Об этом говорят значительные (1-3 м) накопления озерного песка на дне ванны озера (рис. 7) и хорошо сохранившиеся пятна озерной супеси по её бортам (рис. 8), по которым фиксируется уровень максимального наполнения озера.



Рис. 7. Дно озера Ортокель покрыто мощным (1-3 м) слоем озерного песка. Фото С.А. Ерохина

Fig. 7. The bottom of Ortokel Lake is covered with a thick (1-3 m) layer of lake sand. Photo by S.A. Erokhin



Рис. 8. Уровень максимального наполнения озерной ванны фиксируется по хорошо сохранившимся пятнам озерной супеси на её бортах. Фото С.А. Ерохина

Fig. 8. The maximum level of the lake recorded by the well-preserved patches of lake sandy loam on its sides. Photo by S.A. Erokhin

Длительный период развития озера закончился его прорывом после смены подземного стока на поверхностный. Причиной прорыва мог стать моментальный приток в озеро большого объема воды или селевой суспензии, что привело к резкому подъему его уровня и формированию мощного потока перелива через гребень плотинной

перемычки. В процессе перелива образовался глубокий прорывной проран, через который стекла почти вся вода озера (рис. 9).

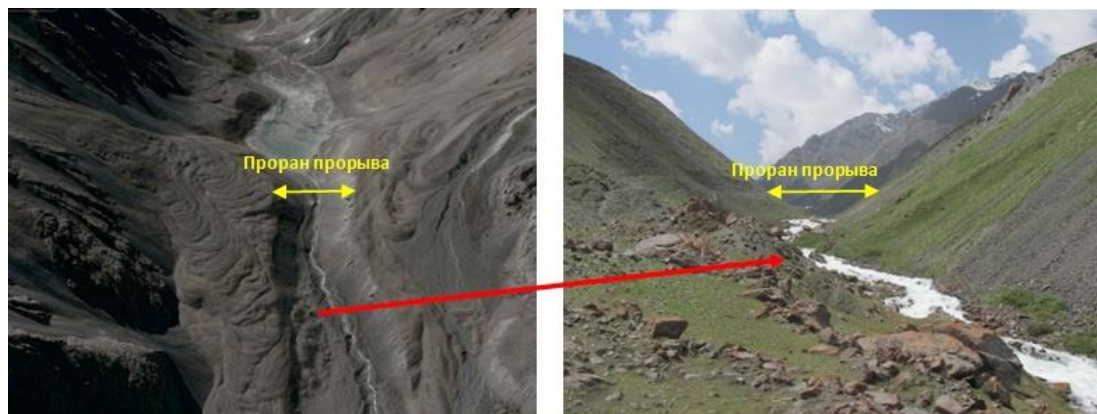


Рис. 9. В процессе перелива образовался глубокий прорывной проран, через который произошло опорожнение озера Ортокель. Фото С.А. Ерохина

Fig. 9. the deep outburst ravine was formed during the overflow, through which Ortokel Lake was outbursted. Photo by S.A. Erokhin

После прорыва озеро стало проточным и не прорывоопасным. Его ванна заполняется водой эпизодически в половодье.

Прорыв этого крупного озера был катастрофически быстрым с формированием мощного прорывного потока расходом до 1-1,5 тыс. м³/сек. Это заключение подтверждается следующими фактами:

- 1) формирование длинного и глубокого, с V-образным поперечным сечением прорана прорыва озера (рис. 9 и 10);
- 2) образование обширного селевого конуса выноса в устье прорана прорыва озера, при его выходе в котловину нижележащего озера Аякель (рис. 10);



Рис. 10. В устье длинного и глубокого, с V-образным поперечным профилем, прорана после прорыва озера Ортокель образовался обширный селевой конус выноса. Источник: GoogleEarth

Fig. 10. An extensive debris flow fan was formed at the mouth of a long and deep ravine with a V-shaped transverse profile, after a outburst of the Ortokel Lake. Source: GoogleEarth

3) поток такой мощности не мог не трансформироваться в селевой поток ниже по долине. На пути своего движения он глубоко врезался в рыхлообломочные отложения днища долины Иссык-Ата, подрезал её борта, поэтому борта долины крутые, почти вертикальные, с высотой уступа подреза 20-30 м (рис. 11);



Рис. 11. Подрезанный селевым потоком левый борт долины Иссык-Ата. Высота уступов подреза 20-30м. Фото С.А. Ерохина

Fig. 11. The left side of the Issykata valley eroded by a debris flow. The height is 20-30m. Photo by S.A. Erokhin

4) селевой поток, образованный прорывным потоком озера Ортокель, был уникальным по своей мощности. На всем протяжении долины реки Иссык-Ата, до её слияния с рекой Туюк-Иссыкатынский, он выпалал глубокий (3-10 м) и широкий (40-60 м) селевой лоток (рис. 12). Но даже в это большое сечение лотка селевая масса не вмещалась. Она была настолько велика, что выплескивалась за его пределы. Поэтому по берегам русла реки Иссык-Ата прослеживаются навалы селевого глыбово-каменного материала (рис. 13).

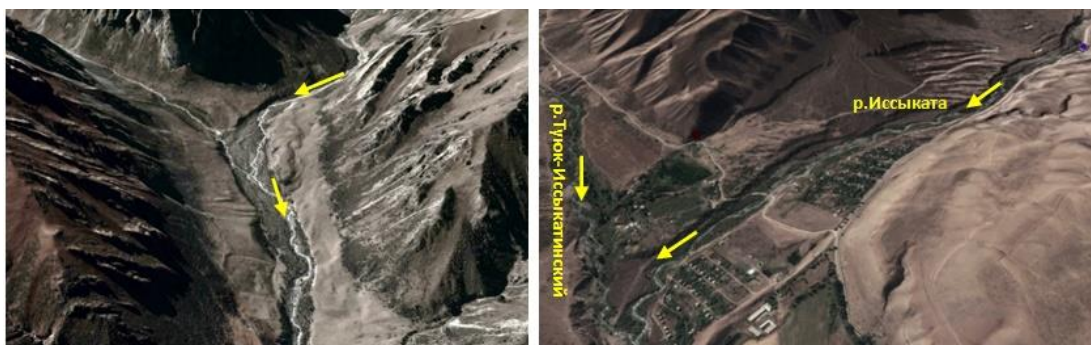


Рис. 12. На всем протяжении долины реки Иссык-Ата, после прорыва озера Ортокель, образовался селевой лоток с крутыми, почти вертикальными бортами, высотой 5-20 м. Источник: GoogleEarth

Fig. 12. a debris flow channel with steep vertical sides, 5-20 m high, was formed throughout the Issykata valley after the outburst of Ortokel Lake. Source: GoogleEarth



Рис. 13. Навалы и россыпи глыбово-каменного селевого материала по берегам русла реки Иссик-Ата. Источник: GoogleEarth

Fig. 13. Block-stone deposits of debris flow material along the banks of the Issykata River. Source: GoogleEarth

Образование селевого потока огромной мощности показывает уникальные, очень опасные, возможности прорывов завально-оползневых озер каменных глетчеров, так называемой водно-ледовой разновидности. Они представляют большую угрозу для жителей горных долин, в отличие от довольно спокойных прорывов завально-оползневых озер водно-глинистой разновидности.

Заключение

Из рассмотренных примеров прорывов завально-оползневых озер, следует, что наибольшую опасность для населения и территорий представляют прорывы из озер образованные вследствие оползания каменных глетчеров. Так как в завальном теле последних возможно появление подземных каналов, и как в случае с озером Джасылкель при последующей закупорке подземных каналов стока, возрастает угроза последующего прорыва.

Селевой поток, образованный прорывным потоком озера Ортокель, был уникальным по своей мощности. На всем протяжении долины реки Иссик-Ата, до её слияния с рекой Туюк-Иссыкатинский, он выпалал глубокий (3-10 м) и широкий (40-60 м) селевой лоток [Ерохин и др., 2020]. Но даже в это большое сечение лотка селевая масса не вмещалась, а выплескивалась за его пределы. По берегам русла реки Иссик-Ата прослеживаются навалы селевого глыбово-каменного материала. Настолько была велика селевая масса. Образование селевого потока огромной мощности показывает уникальные, очень опасные, возможности прорывов завально-оползневых озер водно-ледовой разновидности. Они представляют большую угрозу для жителей горных долин в отличие от довольно спокойных прорывов завально-оползневых озер водно-глинистой разновидности.

Поэтому изучению прорывоопасности завально оползневых озер необходимо уделить особое внимание и продолжать изучение в будущем.

Список литературы

- Ерохин С.А., Загинаев В.В. Технологии оценки прорыва типов моделей плотин горных озер и вызванных ими селевых георисков в Тянь-Шане. Современная техника и технологии в научных знаниях. Материалы докладов VIII Международной конференции молодых ученых и студентов. Бишкек, 2016. С. 118-124.
- Ерохин С.А., Загинаев В.В. Прогноз прорывоопасности горных озер Кыргызстана на основе их каталога. Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории КР. Бишкек, МЧС КР, 2017. С. 627-639.
- Ерохин С.А., Чонтоев Д.Т., Загинаев В.В. Прорывоопасные озера Кыргызстана. Изученность, типизация, критерии оценки прорывоопасности, методика и рекомендации. Бишкек, 2020, 272 с.
- Торгоев И.А., Алёшин Ю.Г., Суеркулов К. Анализ оползневых факторов массовой активизации оползней в Кыргызстане в 2017 году. Научно-инженерный центр «ГЕОПРИБОР» НАН КР. Мониторинг, прогнозирование опасных процессов и явлений на территории Кыргызской Республики. Издание пятнадцатое с изменениями и дополнениями. МЧС КР. 2018, с. 676-679.



Тенденции прорывоопасности в развитии горных озер Кыргызстана

С.А. Ерохин, В.В. Загинаев

*Институт водных проблем и гидроэнергетики Национальной академии наук
Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызстан, erochin@list.ru, zagivit@mail.ru*

Аннотация. Из несколько тысяч горных озер Кыргызстана в настоящее время выделено 374 озера, которые в разные периоды своего развития были отнесены к прорывоопасным и занесены в каталог прорывоопасных озер Кыргызстана. По генезису и составу своих плотин прорывоопасные горные озера разделяются на типы и подтипы, каждый из которых имеет свои критерии прорывоопасности. На основе критериев прорывоопасности определяется категория их прорывоопасности: от 1-ой, самой опасной, до 4-ой. По характеру и особенностям изменений категории прорывоопасности горные озера разделяются на 8 группы 5 подгрупп. Тенденции в развитии озер каждой группы и подгруппы позволяет прогнозировать ход их дальнейшего развития и возможность их прорывов.

Ключевые слова: *прорывоопасные озера, генезис и состав плотин, типы и подтипы, критерии, категории, группы, подгруппы, тенденции, прогноз*

Ссылка для цитирования: Ерохин С.А., Загинаев В.В. Тенденции прорывоопасности в развитии горных озер Кыргызстана. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 194–207.

Trends of outburst hazard for the dynamics of mountain lakes in Kyrgyzstan

S.A. Erokhin, V.V. Zaginaev

*Institute of Water Problems and Hydropower Energy, National Academy of Science of
Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan, erochin@list.ru, zagivit@mail.ru*

Abstract. There are several thousand mountain lakes in Kyrgyzstan. 374 lakes are currently identified in some different periods of their development they were classified as hazardous and included to the catalog of potentially hazardous lakes in Kyrgyzstan. According to the genesis and composition of their dams, outburst-hazardous mountain lakes are divided into types and subtypes, each of which has its own categories of hazards. The category of their outburst hazard have determined based on the outburst criteria: from the 1st, the most dangerous, to the 4th. By the nature and characteristics of changes in the category of outburst hazard, mountain lakes are divided into 8 groups and 5 subgroups. Trends in the development of lakes of each group and subgroup allows predicting their further development and the possibility of their outburst potential.

Key words: *hazardous lakes, genesis of dams, types of lakes, forecast, categories of hazard*

Cite this article: Erokhin S.A., Zaginaev V.V. Trends of outburst hazard for the dynamics of mountain lakes in Kyrgyzstan. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 194–207.

В пределах Кыргызстана насчитывается почти две тысячи горных озер [Ерохин, 2001]. Их развитие зависит от прочности их плотин. Многие из озер прорывают свои

плотины и формируют прорывной поток, весьма опасный для жителей горных долин и прилегающих к горным хребтам подгорных равнин [Ерохин и Диких, 2003]. Для предупреждения этой опасности, её уменьшения и устранения было направлено наше изучение горных озер Кыргызстана. При этом на первый план выступал фактор устойчивости их плотин, а главными критериями устойчивости были генезис, состав и строение этих плотин [Ерохин, 2009].

По устойчивости своих плотин и возможности их разрушения и прорыва горные озера разделяются на непрорывоопасные и прорывоопасные. Первых значительно больше, чем вторых. 50-60% озер имеют прочные ригельные плотины из крепких скальных пород, еще 20-30% образовались в глубоких западинах на площади развития древних морен (типа Арабельских сыртов Внутреннего Тянь-Шаня) и также являются устойчивыми. Лишь 20-30% от общего числа озер имеют непрочные плотины, состоящие либо из моренно-ледниковых образований, либо из рыхлообломочных слабосвязанных отложений [Ерохин и Черны, 2011]. Такие плотины могут разрушаться под действием ряда факторов. В этом случае происходят прорывы озер, которые зачастую сопровождаются катастрофическими последствиями для жителей нижерасположенных долин и равнин.

По генезису и составу своих плотин горные озера разделяются на следующие типы. Непрорывоопасные: 1) тектонические; 2) моренные; 3) ригельные 4) завальные. Прорывоопасные: 1) ледниковые; 2) моренно-ледниковые; 3) моренные; 4) завальные (см. рис. 1).

В составе некоторых типов прорывоопасных озер выделяются подтипы, отличающиеся друг от друга (внутри типа) генезисом своих плотин, морфологией озерных ванн, условиями питания и стока [Керемкулов, Цукерман, 1985].

1. В составе ледникового типа озер выделяются: термокарстовые и подпруженные озера, озера протаивания и внутриледниковые емкости.

2. В составе моренно-ледникового типа выделяются озера внутриморенных депрессий и термокарстовых воронок.

3. В составе завального типа выделяются озера завально-обвальные и завально-селевые.

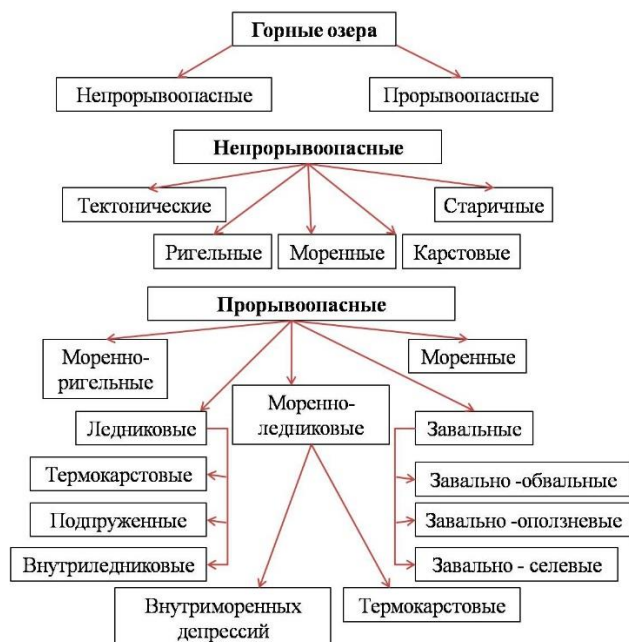


Рис. 1. Классификация горных озер Кыргызстана по прорывоопасности

Fig. 1. Classification of mountain lakes in Kyrgyzstan

Каждый тип и подтип прорывоопасных озер имеет свои критерии прорывоопасности. Количество критериев и методика их определения изменяется в зависимости от детальности исследования озер. На основе критериев прорывоопасности определяется категория их прорывоопасности. В таблице 1 приводится характеристика наиболее важных критериев прорывоопасности горных озер по категориям их прорывоопасности, в соответствии с уровнем возможностей их исследования в настоящее время.

Таблица 1. Критерии категорий прорывоопасности озер различных типов и подтипов

Table 1. Criteria of categories of lake outburst-susceptibility of different types and subtypes

Тип озера	Подтип озера	Категория опасности	Критерии прорывоопасности
Ледниковый	Термокарстовый и подпруживания	1	Внутриледниковый канал стока; очаг выклинивания воды в его устье; просадки ледника вдоль канала стока; увеличение объема озера в десятки и сотни раз в период таяния ледника, прорывы озера в прошлом.
		2	Внутриледниковый канал стока; увеличение объема озера в несколько раз; прорывы озера в прошлом.
		3, 4	Внутриледниковый канал стока.
	Внутриледниковый	1	Мощный ледопад в нижней (концевой) части ледника; прорывы в прошлом; резкие изменения в режиме стока с ледника.
		2	Ледопад в нижней (концевой) части ледника; резкие изменения в режиме стока с ледника.
		3,4	Ледопад в нижней (концевой) части ледника.
Моренно-ледниковый	Внутриморенных депрессий	1	Подземный сток; просадки на теле плотины и вдоль ложбины подземного стока; амплитуда колебания уровня озера до нескольких метров; ледник спадает в озеро уступом; эрозионный овраг на внешнем склоне плотины; очаг выклинивания в вершине оврага.
		2	Подземный сток; просадки плотины вдоль ложбины подземного стока; амплитуда колебания уровня озера до нескольких метров; эрозионные промоины на внешнем склоне плотины; выклинивание воды у подножия внешнего склона плотины.
		3	Подземный сток; просадки вдоль ложбины подземного канала стока; выклинивание воды у подножия внешнего склона плотины.
		4	Подземный сток.
	Термокарстовые	1	Подземный сток; сформирован канал подземного стока, вдоль которого проседает поверхность плотины; эрозионный овраг в устье подземного канала стока; очаг выклинивания в вершине оврага.

Тип озера	Подтип озера	Категория опасности	Критерии прорывоопасности
		2	Подземный сток; сформирован канал подземного стока, вдоль которого проседает поверхность плотины; эрозионный овраг в устье подземного канала стока; выклинивание воды у подножия внешнего склона плотины.
		3,4	Подземный сток.
Моренно-ригельный		1	Подземный сток; просадки на теле плотины и вдоль ложбины подземного стока; амплитуда колебания уровня озера до нескольких метров; эрозионный овраг на внешнем склоне плотины; очаг выклинивания воды в вершине оврага; ледник спадает в озеро уступом; высокая вероятность подъема уровня озера выше скального порога ригеля.
		2	Подземный сток; просадки плотины вдоль ложбины подземного стока; амплитуда колебания уровня озера до нескольких метров, эрозионные промоины на внешнем склоне плотины; выклинивание воды у подножия внешнего склона плотины; высокая вероятность подъема уровня озера выше скального порога ригеля.
		3	Подземный сток; эрозионные промоины на внешнем склоне плотины; выклинивание воды у подножия внешнего склона плотины; малая вероятность подъема уровня озера выше скального порога ригеля.
		4	Подземный сток; малая вероятность подъема уровня озера выше скального порога ригеля.
Моренный		1	Подземный сток; эрозионный овраг на внешнем склоне плотины; очаг выклинивания подземного канала стока в вершине оврага.
		2	Подземный сток; эрозионный овраг на внешнем склоне плотины
		3,4	Подземный сток.
Завальный	Обвальнй	1	Подземный сток; эрозионный овраг на внешнем склоне плотины; очаг выклинивания подземного канала стока в вершине оврага; выклинивание воды у подножия внешнего склона плотины, возможность переполнения озера.
		2	Подземный сток; эрозионный овраг на внешнем склоне плотины; выклинивание воды у подножия внешнего склона плотины, возможность переполнения озера.

Тип озера	Подтип озера	Категория опасности	Критерии прорывоопасности
		3	Подземный сток; выклинивание воды у подножия внешнего склона плотины, возможность переполнения озера.
		4	Подземный сток, возможность переполнения озера.
	Селевой	1	Отсутствие стока; резкий подъем уровня воды в озере и его переполнение.
		2	Подземный сток; объем от первых десятков до нескольких сотен тысяч куб. метров, высокая вероятность переполнения озера.
		3,4	Подземный сток; объем в несколько десятков тысяч куб. метров, малая вероятность переполнения озера.
	Оползневой	1	Отсутствие стока; резкий подъем уровня воды в озере и его переполнение.
		2	Подземный сток; объем в несколько десятков тысяч куб. метров; высокая вероятность переполнения озера.
		3,4	Подземный сток, объем в несколько десятков тысяч куб. метров; малая вероятность переполнения озера.

Первоначально прорывоопасность озер оценивалась по трем категориям (наиболее прорывоопасная – первая). Однако в последние 5 лет появилась необходимость ввести еще и четвертую категорию, в которую попадают озера, уже прошедшие в своем развитии прорывоопасную стадию. Но они еще сохранили значительный объем воды и при кардинальных изменениях природных условиях (землетрясении, обвале и оползании горных склонов, селевых потоках) могут снова стать прорывоопасными. Категория прорывоопасности озера может изменяться в процессе его развития, а также при изменении природных условий.

Из несколько тысяч горных озер Кыргызстана в настоящее время (2020 год) выделено 374 озера, которые в разные периоды своего развития были отнесены к прорывоопасным и занесены в каталог прорывоопасных озер Кыргызстана. По территории республики они расположены следующим образом: в Джалалабадской области – 26 озер; в Иссык-Кульской области – 170 озер; Нарынской области - 18 озер; в Ошской и Баткенской областях - 65 озер; Таласской области - 21 озеро; в Чуйской области – 73 озера (см. рис. 2).

Каталог прорывоопасных озер Кыргызстана постоянно пополняется новыми данными по озерам, как уже включенными в каталог ранее, так и по новым озерам, которые образовались в последние годы. Анализ и систематизация информации, включенной в каталог позволяет проследить изменения в развитии озер, выявить тенденции в процессе этого развития и спрогнозировать возможность их прорывов в будущем.

Одним из вариантов такого анализа стал мониторинг изменений категорий прорывоопасности озер за последние пятнадцать лет, с 2006 по 2020 гг. По характеру и особенностям изменений категории прорывоопасности горные озера разделяются на 8 групп. В 3-ей и 6-ой группах дополнительно выделяются подгруппы в зависимости от их нарастающей или убывающей прорывоопасности (таблица 2).

Сходство тенденции в развитии озер внутри каждой группы позволяет прогнозировать ход их дальнейшего развития и возможность их прорывов.

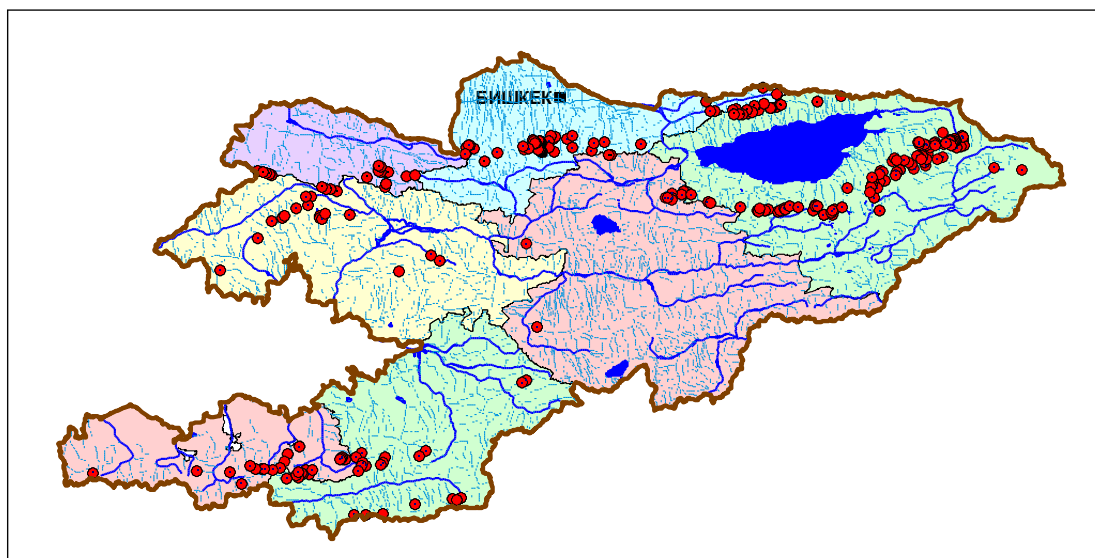


Рис. 2. Расположение прорывоопасных озер на территории Кыргызстана

Fig. 2. Location of outburst-hazardous lakes on the territory of Kyrgyzstan

Таблица 2. Признаки, критерии и прогноз прорывоопасности озер каждой группы

Table 2. Signs, criteria, and forecast of lake outburst-susceptibility in each group

Но- мер груп- пы озер	Главный признак группы озер	Главный признак подгруппы озер	Особенности каждой группы озер	Критерии прорыво- опасности каждой группы озер	Прогноз прорывоопас- ности на 5- 10 лет
1	Озера с почти ежегодными опорожнениями (рис. 3)		Озера ледникового типа с внутриледниковыми каналами стока	1. Наполнение озер.	Прорывоопасность 1-ой категории
2	Озера, сохраняющие высокую степень прорывоопасности после частичного опорожнения (рис. 4)		Моренно-ледниковые озера с постоянным наполнением озерных ванн	1. Разработка подземных каналов стока. 2. Наполнение озер. 3. Просадка плотинных перемычек	Возможно увеличение прорывоопасности до 2-ой и 1-ой категорий
3	Озера, сохраняющие прорывоопасность 3-ей категории после частичного или полного опорожнения (рис. 5)	3.1. Озера с нарастающей прорывоопасностью. Наполнение выше прорывного уровня (рис. 6)	Моренно-ледниковые озера внутриморенных депрессий. Возможно наполнение в течение 2-3 месяцев и обязательный прорыв	1. Наполнение озер. 2. Разработка подземных каналов стока.	Увеличение степени прорывоопасности
		3.2. Озера с затухающей прорывоопасности			Уменьшение степени

		воопас- ностью. Наполне- ние меньше прорывного объема (рис. 7)			прорывоопас- ности
4	Озера после частичного или полного опорожнения перешли в стадию спокойно стабильного развития, с маловероятной возможностью нового прорыв – 4-ая категория (рис.8)		Озера моренно- ледниковые внутриморенных депрессий и термокарстовых воронок, а также завально- каменноглетчер- ные. Восстановление их прорывоопасности возможно только при значительном изменении природных условий	1. экстре- мальное событие. 2. Наполне- ние озер.	Затухающая прорывоопас- ность
5	Озера без прорыва, в течении последних 10-15 лет сохраняют признаки устойчиво непрорывоопас- ного развития, 4-ой категории (рис. 9)		Моренно- ледниковые озера внутриморенных депрессий. Постоянно сохраняют в своих ваннах некоторый объем воды даже в зимний период.	1. экстре- мальное событие. 2. Наполне- ние озер.	Затухающая прорывоопас- ность
6	Озера без прорыва, в течении последних 10-15 лет сохраняют признаки прорывоопасно- го развития Прорывоопас- ность оценивается 3- ей категорией (рис.10)	6.1. Озера с подземным стоком (рис11)	Моренно- ледниковые озера внутриморенных депрессий.	1. Разработ- ка подземных каналов стока. 2. Наполне- ние озера.	Увеличение степени прорывоопас- ности до 2-ой или 1-ой категорий
		6.2. Озера с поверх- ностным стоком (рис.12)			Переход в спокойно устойчивую стадию затухающего развития с 4-ой категорией прорывоопас- ности
		6.3. Озера со скальным ригелем в основании плотины (рис.13)			
7	Озера без прорыва, в течении последних 5-10 лет сохраняют признаки высокой степени прорывоопас-		1. Моренно- ледниковые озера внутриморенных депрессий с затрудненным подземным стоком. 2. Ванна озера расширяется за	1. Разработ- ка подземных каналов стока. 2. Наполне- ние озера.	Возможно увеличение прорывоопас- ности до 1-ой категории

	ности, 1 и 2 категории (рис. 14)		отступающим ледником.	3. Просадка плотинных перемычек.	
8	Озера без прорыва, но с признаками высокой степени прорывоопасности в последние 1-3 года (рис. 15)		Моренно-ледниковые озера внутриморенных депрессий с неустойчивым подземным стоком, с большими колебаниями объема.	1. Наполнение озера 2. Разработка подземных каналов стока	Прорывоопасность 1-ой или 2-ой категории



Рис. 3. Озеро Мерцбахера (И-100) сохранит высокую степень прорывоопасности в будущем

Fig. 3. Merzbacher will have a high level of outburst hazard in the future



Рис. 4. Озеро Четенды-джеруйское (И-81) прорывалось в 2013 году, но, по-прежнему, остается весьма прорывоопасным

Fig. 4. Chetynde Djerui (И-81) outbursting in 2013 and still is a dangerous



Рис. 5. Озеро Кольтор-тонское (И-35) до прорыва и его наполнение после прорыва 2018 г.

Fig. 5. Koltor-Ton lake before (a) and after (b) outburst in 2018

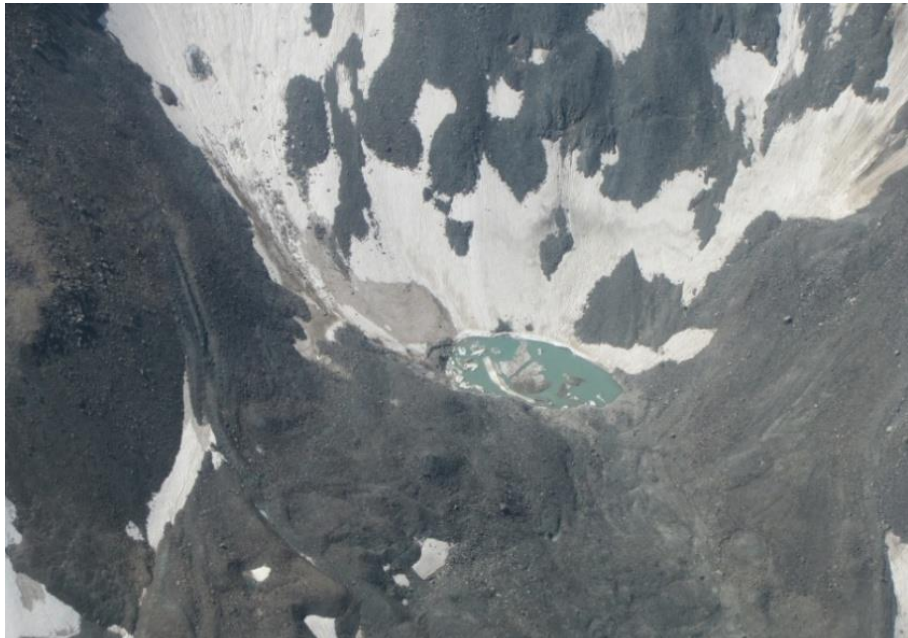


Рис. 6. Озеро Аtdжайлоо-шамсинское-восточное (Ч-61-б)

Fig. 6. Atdjailoo-Shamsy-east. Ch-61-b

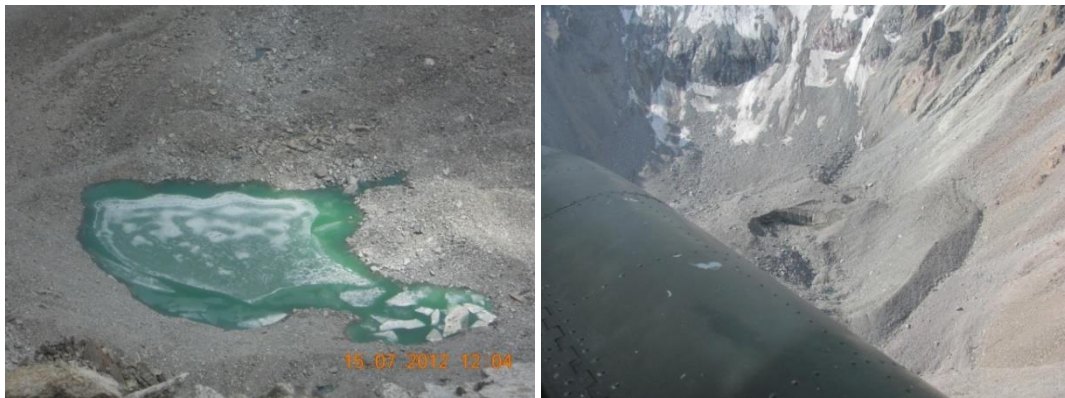


Рис. 7. Нестационарное озеро Тезтор (Ч-8) до прорыва 2012 и после прорыва в 2015 г.

Fig. 7. Nonstationary Teztor lake before 2012 (a) and after (b) outburst in 2015



Рис. 8. Выше селевого завала в верховьях долины реки Иссыката образовалось озеро Минжилки (Ч-41) (А). В 2013 году озеро прорвалось и перешло в пассивную фазу развития (Б)

Fig. 8. Minzhylki lake was formed in the upper part of Issyk-Ata valley above the debrisflow dam (A). The lake outburst in 2013, and became stable from this moment (B)



Рис. 9. Озеро Тамга (И-6) в течении последних 10 лет сохраняет признаки устойчиво непрорывоопасного развития

Fig. 9. Tamga Lake has a stable development position for the last 10 year



Рис. 10. Озеро Ирису (Ч-82) имеет подземный сток и неограниченный водоприток

Fig. 10. Irisu Lake (Ч-82) has a subsoil drainage and unlimited water source



Рис. 11. Прорывоопасность озера Каракунгей (Н-19) медленно нарастает, так как оно при подземном стоке имеет ограниченное питание

Fig. 11. Hazardous increase for Karakungei Lake because lake has a limited water source and subsoil drainage



Рис. 12. Озеро Чонкойсу (И-13) имеет неограниченный водоприток и поверхностный сток

Fig. 12. Chonkoisu Lake (И-13) has unlimited watersource and overflow drainage



Рис. 13. Плотина озера Терстор-восточное (Н-3) имеет в основании скальный ригель

Fig. 13. Dam of the Terstor East Lake (Н-3) consist of stable rock



Рис. 14. Оз. Петрова (И-76) и хвостохранилище золотодобывающего рудника Кумтор в 5 км ниже

Fig. 14. A tailing dump of the Kumtor gold mine 5 km below Petrov Lake (I-76)



Рис. 15. Ванна озера Туюкжар (Ч-63) при максимальном наполнении

Fig. 15. Tujkgar Lake bath at maximum filling

Таким образом, самыми опасными в настоящее время являются озера 1 и 8 групп, близко к ним, но все-таки несколько ниже, по уровню прорывоопасности находятся озера 2-ой и 7-ой групп.

Озера остальных четырёх групп в своем развитии либо еще не достигли пика прорывоопасности – это подгруппы 3.1 и 6.1, либо уже перешли его – это группы 4-ая, 5-ая и подгруппы 3.2; 6.2; 6.3.

Список литературы

Ерохин С.А. Гляциальные озера как гидроэкологические объекты и факторы их прорывоопасности. // В кн.: Вода и устойчивое развитие Центральной Азии. Бишкек: Фонд «Сорос-Кыргызстан», 2001, с. 93-98.

- Ерохин С.А., Диких А.Н. Оценка опасности действия селевых и паводковых потоков на территории Ала-Арчинского национального парка. Известия НАН КР, вып. 4. Бишкек, 2003, с. 130-139.
- Ерохин С.А. Мониторинг горных озер Кыргызстана. // Снижение риска природных катастроф в горах. Сб. трудов конференции. Бишкек: Salam, 2009, с. 34-40.
- Ерохин С.А., Черны М. Типы морено-ледниковых комплексов как критерии регрессии горно-долинного оледенения Тянь-Шаня. // Изменение климата и риски стихийных бедствий в горных районах. Сб. трудов конференции. Душанбе: Контраст, 2011, с. 65-66.
- Керемкулов В.А., Цукерман И.Г. Модель опорожнения моренного озера через грот // Селевые потоки, 1985, сб. 9, с. 59-70.



Glacier lake outburst flood modeling of Khurdopin glacier lake using HEC-RAS and GIS

A. Hussain¹, N. Nasab², D. Bano³, D. Karim³, W. Anwar³, K. Hussain⁴, N. Uddin⁵

¹Ministry of Climate Change, Islamabad, Pakistan, alamgeerh@gmail.com

²Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

³Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in Pakistan, Gilgit, Pakistan

⁴Forest Department of Gilgit-Baltistan, Gilgit, Pakistan

⁵Gilgit-Baltistan Disaster Management Authority (GBDMA), Gilgit, Pakistan

Abstract. Advancement of glaciers and dammed the river is common phenomena is glaciated region of worlds, especially Himalaya Hindu Kush (HKH) ranges. Region wise Karakorum is well known to formation of glacier lakes due to glacier damming of river and glacier lake outburst flood, particularly Shimshal valley has been affected by Glacier lake outburst flood (GLOF) in last 2 decades. Khurdopin glacier located in upper reaches of Shimshal village is one of the surging glaciers in Karakorum region. The glacier lakes release large amount of water abruptly under the glacier blocked area at 27th July till 03th August 2017 damages Shimshal road and bridges. This study includes Glacier lake outburst flood (GLOF) simulation modelling using HEC-RAS and GIS couple with field data acquired through aerial survey conduct under Aga Khan Development Network helicopter and field assessment were carried out with geologist and glaciologist expert from Aga Khan Agency for Habitat (AKAH) and Pakistan Meteorological Department (PMD) collectively. The finding of study revealed that Lake Area is 14.8 hectares in 24 November, 2017 with 476922 cubic meter volume of water, Satellite data also revealed that glacier advancement since October 2016 to November 2017. Glacier has blocked approximate 2.3 km length of Shimshal River. According to GLOF modeling results, total 3.21 square kilometre area submerge by GLOF. The velocity of flood in Shimshal village is high as compared to Farmanabad. The GLOF time arrival information shows that Shimshal village submerge 3.059 km² area while Farmanabad flooded 0.53 km² area with in sixty minutes.

Key words: GLOF, HEC-RAS, PMD, AKAH

Cite this article: Hussain A., Nasab N., Bano D., Karim D., Anwar W., Hussain K., Uddin N. Glacier lake outburst flood modeling of Khurdopin glacier lake using HEC-RAS and GIS. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe-Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: "Promotion" LLC, 2020, p. 208–220.

Моделирование паводка, сформировавшегося в результате прорыва ледникового озера Хурдопин, с использованием программы HEC-RAS и ГИС-технологий

A. Хуссаин¹, Н. Насаб², Д. Бано³, Д. Карим³, В. Анвар³, К. Хуссаин⁴, Н. Уддин⁵

¹Министерство по вопросам изменения климата, Исламабад, Пакистан, alamgeerh@gmail.com

²Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, Душанбе, Таджикистан

³Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Пакистане, Гилгит, Пакистан

⁴Департамент лесного хозяйства Гилгит-Балтистана, Гилгит, Пакистан

⁵*Управление по ликвидации последствий стихийных бедствий Гилгит-Балтистана, Гилгит, Пакистан*

Аннотация. Продвижение ледников и подпруживание рек – обычное явление в ледниковых регионах мира, особенно оно характерно для горных хребтов Гиндукуша, Каракорума и Гималаев. Регион Каракорума хорошо известен своими ледниковыми озерами, формирующимися вследствие подпруживания рек ледниками, а также их прорывами. В этом свете особенно стоит отметить долину р. Шимшал, в которой прорывы озер за последние 20 лет происходили неоднократно. Ледник Хурдопин, расположенный в верховьях р. Шимшал, является одним из пульсирующих ледников Каракорума. Так, в результате одной из его пульсаций произошло формирование подпрудного озера с последующими его прорывами, наблюдавшимися с 27 июля по 3 августа 2017 г. и сопровождавшимися выбросами больших объемов воды, что в итоге привело к разрушениям Шимшалского шоссе и мостов. Данное исследование включает в себя моделирование прорывного паводка с использованием программы HEC-RAS, ГИС-технологий и полевых данных, полученных в ходе аэрофотосъемки, проведенной с помощью вертолета Агентства развития Ага Хана Хабитат, а также полевую оценку, проведенную совместно со специалистами геологами и гляциологами из Агентства Ага Хана Хабитат и Метеорологического департамента Пакистана (PMD). Результаты исследования показали, что 24 ноября 2017 г. площадь озера составляла 14,8 га с объемом воды 476922 м³. Данные космосъемки также показали, что продвижение ледника происходило с октября 2016 по ноябрь 2017 гг. Ледник заблокировал р. Шимшал на участке длиной около 2,3 км. Согласно результатам моделирования прорывного паводка, общая площадь территории, подвергшейся воздействию, составил 3,21 км². Скорости потока в селении Шимшал были выше, чем в Фарманабаде. Время добегания паводка до селения Шимшал с затоплением 3,059 км² территории и до селения Фарманабад с затоплением в 0,53 км² территории составило 60 мин.

Ключевые слова: прорыв ледникового озера, программа HEC-RAS, Метеорологический департамент Пакистана (PMD), Агентство Ага Хана Хабитат (АКАН)

Ссылка для цитирования: Хуссаин А., Насаб Н., Бано Д., Карим Д., Анвар В., Хуссаин К., Уддин Н. Моделирование паводка, сформировавшегося в результате прорыва ледникового озера Хурдопин, с использованием программы HEC-RAS и ГИС-технологий. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 208–220.

Introduction

Advancement of glaciers and dammed the river is common phenomena is glaciated region of worlds, especially Himalayan Karakorum Hindu-Kush (HKH) ranges [Quincey *et al.* 2014; Hussain, 2019; Gillani, 2014]. Region wise Karakorum is well known for formation of glacier lakes due to glacier damming of river and glacier lake outburst flood [Khan *et al.*, 2011; Ashraf, 2014]. In extreme cases surging tongues of glaciers blocked rivers, streams and subsequently threatens downstream communities in case accumulated water breaks through the ice or discharges rapidly over the tongue or through Glacier curves [Ashraf *et al.*, 2012]. Since these tongues are often located in remote areas far away from the settlements itself adequate warning mechanisms are challenging [Round *et al.*, 2017].

Khurdopin glacier in Shimshal valley is surge type and a recent surge of the glacier measure using high resolution satellite imagery readily available at sub-weekly intervals able to assess changes on the glacier, monitoring of possible threats and make an assessment of probable future developments [Steiner *et al.*, 2018]. Glacier lake outburst flood (GLOF) is demonstrated by quick discharge of large volume of water with residues taken from glacier lake and that movement down along with river channel towards downstream settlements in the form

of flood upsurge [Gurung, 2017]. GLOF happened when lake break due to high pressure of stored water, seepage forces and shear stress factors that surpasses the strength of blocking material [Worni et al., 2013]. According to ICIMOD 2005 inventory of glaciers and glacier lakes which described that the trend of increase in temperature in the Himalaya, Karakoram and Hindukush (HKH) regions is higher than global average. The inventory has listed a total of 2420 glacier lakes that have been identified in ten (10) river basins and the maximum number of glacier lakes are identified in Gilgit River basin (614) followed by Indus (574) and Swat (255) and Shingo (238) river basin. In Gilgit River basin, out of 614 glacier lakes 380 lakes have been identified as major lakes which are about 62% of the total lakes. Around 93% of the lake area of the basin is contributed by these major lakes. There were 52 potentially dangerous lakes in HKH mountain regions of Pakistan, among these potentially dangerous lakes 16 lakes were identified in Karakoram ranges [Zaidi et al., 2013; ICIMOD, 2005].

Gilgit-Baltistan has witnessed around 35 GLOF events in past 200 years [Rasul, G. 2014]. In 1999, two GLOF events occurred in Sosot and Khalti villages in Tehsil Gupis. In 2000, GLOF events occurred in Shimshal valley. From the year 2007 to 2017 (Table 1), six consecutive Glacier floods events took place from the Ghulkin glacier only, which caused the destruction of the Karakoram highway and local property. GLOF event occurred from Khurdopin glacier [Din, Tariq et al., 2014; Hassan et al., 2020 and Richardson, Quincey, 2009]. In 2009, one GLOF event was triggered from the Passu glacier. In 2012, a GLOF event from Ghulkin glacier damaged hundreds of trees. Thus, HKH glaciers in general and the Karakoram glacier in particular, have generated more GLOF events in the area since 2007 [Ashraf et al., 2017]. It is imperative. Shimshal village was inundated by riverine floods from 27th July till 3 of August 2017. River level rose to double and flooded low lying areas in Shimshal Centre, Aminabad and Farmanabad which as reported damaged Shimshal road, Bridges and low-lying land in Shimshal village (AKAH Geologist) mentioned in Table 1.

Table 1. Historical GLOF events in Gilgit Baltistan

Date of the event	GLOF Location	River
29 July 1994	Sosot/ Gupis	Gilgit
6 August 1999	Khalti/ Gupis	Gilgit
10 June 2000	Shimshal	Hunza
27 July 2000	Kand/ Hushe	Indus
25 July 2005	Sosot/ Gupis	Gilgit
5 April 2007	Ghulkin	Hunza
6 January 2007	Passu	Hunza
2 April 2008	Ghulkin	Hunza
22 May 2008	Ghulkin	Hunza
24 May 2008	Ghulkin	Hunza
15 June 2008	Ghulkin	Hunza
26 March 2009	Ghulkin	Hunza
8 July 2012	Sosot/ Gupis	Gilgit
2010	Shimshal/ Khurdopin	Shimshal Stream
2017	Shimshal/ Khurdopin	Shimshal Stream

A glacier lake is water body formed on the surface, sub surface and near the glacier through glacier melting and retreating processes. When glacier melts, empty spaces were developed and filled by melt water and rapidly increases in volume of water [Yao et al., 2018]. Glacier lakes are classified based on their topographic location i.e. In glacier, Sub glacier, moraine dammed lakes and ice dammed lakes. Most glacier lakes in HKH regions formed through glacier retreat and advancement and dammed the rivers, the lake water controlled by unstable frontal lake moraine [Gardelle, 2011]. In 2007, IPCC reported that there will be increase in temperature in Himalayan region between 1° to 6°C by 2100 [Singh et al., 2005]. This resulted in the high melting of glacier ice and snow cover would reduce between 43-81% leaving behind more glacier lakes in the future [Banerjee, 2013; Rasul et al., 2011].

The physical characteristics of glacier lake outburst flood are the rapid release of large volume of debris laden water originates from an upstream glacier lake that flows down along stream or river course in the form of flash flood [ICIMOD, 2011]. The breach of the lake is caused primarily by the weakening of the lake capacity and strength to hold water that exerts force on the walls of the lake, leakage forces and stress due to overtopping of water flow. Other factors would be heavy rainfall and instant inflow of large volume of water from upstream water sources that leads to over flow of the water from the lake due to which soil erosion occurs from the dam front. The eroded material weakens the lake strength and ultimately leads to higher outflow of water in the form of flood. The outflowing water applies shear forces on the dam material and eroded debris that spreads downstream as bed load. These debris loaded flood water have a discharge rate of several thousand cubic meters per second. The severity of the flood is the function of the volume of released water, debris/material load and ground features of the basin of the watershed [Worni *et al.*, 2012].

Scenario base flood risk mapping is very important for local government, organizations to developed future flood plan and mitigation measures in flood plain area as well as will helpful for sustainable development like construction of hydropower plants and other critical infrastructures like bridges and houses [Merz *et al.*, 2007]. HEC-RAS is an integrated system of software, designed for interactive use in a multi-tasking environment. The system is comprised of a graphical user interface (GUI). Separate analysis components, data storage, management capabilities, graphics and reporting facilities (Brunner, G. W 1995). The HEC-RAS system contains one and two dimensional river analysis components for: (1) Steady flow water surface profile computations: (2) Unsteady flow simulation: (3) movable boundary sediment transport computations: and (4) water quality analysis. A key element is that all four components use a common geometric data representation and common geometric and hydraulic computation routines (Bates, 1996). The objective of this research was to perform GLOF simulation using unsteady flow analysis method in HEC-RAS environment of Khurdopin glacier lake based on 2017 flash flood scenario occurred from newly formed lake through damming of Khurdopin glacier of Shimshal river. GLOF hazard exposure and risk were calculated in Arc GIS environment.

Study area

Khurdopin newly form Glacier Lake (Fig. 1) is located in between Khurdopin and Virjerab glaciers in Shimshal valley situated in the North of Gilgit representing North Karakoram with approximately 70 km length and covering an area of 2763.5 km². The valley runs East-West direction parallel to Karakoram main ridge. The Shimshal settlement is located at a distance of 50 kilometres approximately Eastward from main Karakoram Highway and can be reached by passing through narrow gorges via un-metalled road completed in 2003-2004. The Shimshal settlement is located at an elevation of 3100 m a.s.l. and is one of the highest settlement in Gilgit-Baltistan (GB) with no proper infrastructure. There are four hamlets in Shimshal namely Farmanabad, Aminabad, Centre Shimshal, and Khizerabad with a total population of 2000 inhabitants residing in 250 houses approximately.

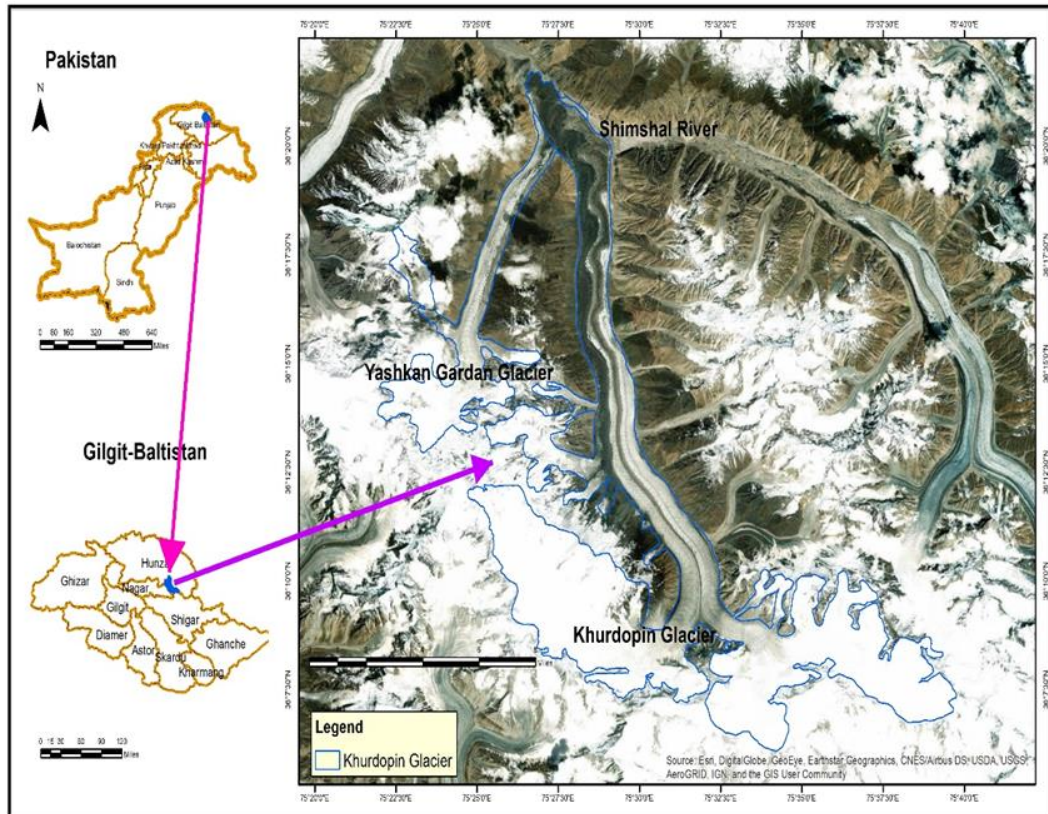


Fig. 1. Location map of study area

Methodology

Three tier methodologies were used to simulate the glacier lake outburst flood (GLOF) for Khurdopin glacier lake of Shimshal valley. The methodology steps include i) pre-processing ii) processing iii) post processing [Wang *et al.*, 2012]. Work flow diagram shows the detail of these steps. Pre- processing steps include acquire of high-resolution digital elevation mode (DEM) from FOCUS Pakistan and remove the error from DEM through sink and fill tool. Downloading and pre-processing of sentinel and Landsat satellite images as well as acquired field pictures through aerial survey through AKDN helicopter and filtering of field data acquired in collaboration of FOCUS Geologist, AKCSP engineers and glacier monitoring team (GMT) working under FOCUS Pakistan for monitoring of glacier lake [Yang *et al.*, 2016; Hussain A. & Hussain A. 2019; Shrestha *et al.*, 2010]. Processing steps include delineation of new formed glacier lake boundary through normalized difference water index (NDWI) and volume calculation using functional surface tool in Arc GIS environment [Huggel *et al.*, 2002; Hussain, Bano, 2019]. Terrain development using RAS Mapper is Geospatial tool (GIS) in HEC-RAS platform, prepared geometrical data in geometric window of HEC_RAS (5.0.0). Geometric data include creation of mesh (2D flow area) for two-dimensional modeling in HEC_RAS and set up of boundary condition (upstream and downstream), insert of unsteady flow data based on 2017 flood event discharge data and calculated outburst discharge data of Khurdopin glacier lake, after discharge data insert GLOF scenario was developed using 2-dimensional unsteady flow routing (full Saint Venant equation or also called as Diffusion wave equation). In unsteady flow analysis window, we have set up program to run, simulation time, and computational setting [Konan, 2018; Hussain *et al.*, 2018; Zaidi, 2013]. The results of flood surface i.e. flood depth; velocity and WSE were exported from RAS mapper, which imported in Arc map to calculated flood exposure like land cover flood exposure statistic using overlay of flood surface polygon with land use land cover shape file using intersection tool in arc map. Vulnerable road and bridge along Shimshal river were also identify and measured using overlay analysis tools in arc GIS environment [Khattak, 2016; Azouagh, 2018].

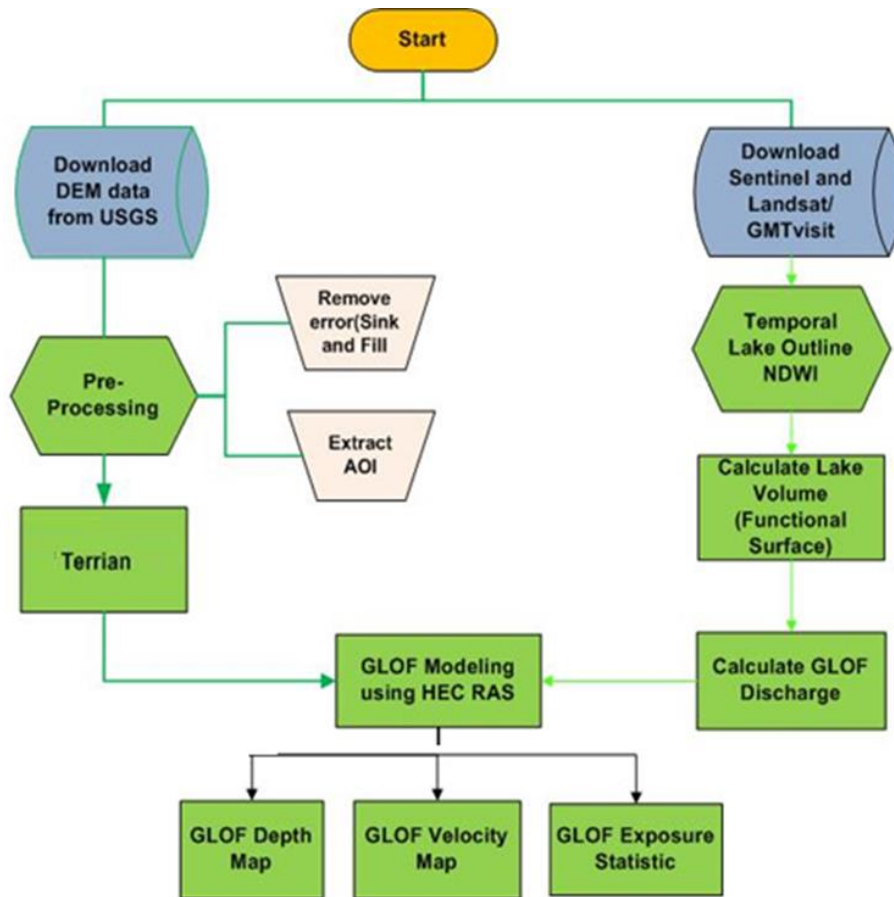


Fig. 2. The work flow diagram of research methodology

Results and discussion

The study was conducted with the aim to produce a glacier lake outburst flood model by the application of HEC-RAS, GIS and Remote Sensing approaches to assess and analyse the impact on downstream settlements in Shimshal valley [Shrestha, 2010; Zaidi, 2013]. Temporal satellite images and pictures of Glacier Lake were taken through of AKDN Helicopter of Khurdopin glacier revealed that the lake has been drained through underground water channel of glacier dammed site, which generate riverine flood from 27th July till 3rd August 2017 in Shimshal valley [Hussain, 2019].



Fig. 3. Temporal aerial photographs 16 June and 7 August of 2017 from Helicopter

River level rose to double and flooded low lying areas in Shimshal Centre, Aminabad and Farmanabad which as reported damaged Shimshal road, Bridges and low-lying land in Shimshal village (Geologist FOCUS Pakistan).

The advancement of glacier toward river has started since October 2016, In July 2017 glacier blocked 0.3 km² of river with volume of 6.2 million m³ furthermore, the movement of glacier drastically increase and blocked the river area 0.7 km² till 24 November 2017 with 23.8 million m³ volume of glacier deposits [Steiner *et al.*, 2018]. Fig. 4 show the glacier surge temporal view of Khurdopin glacier blocked the Shimshal river, pink line shows the glacier boundary before surge, yellow and red line shows the glacier surge and blocked area while blue polygon demonstrations the newly formed glacier lake temporal boundaries.

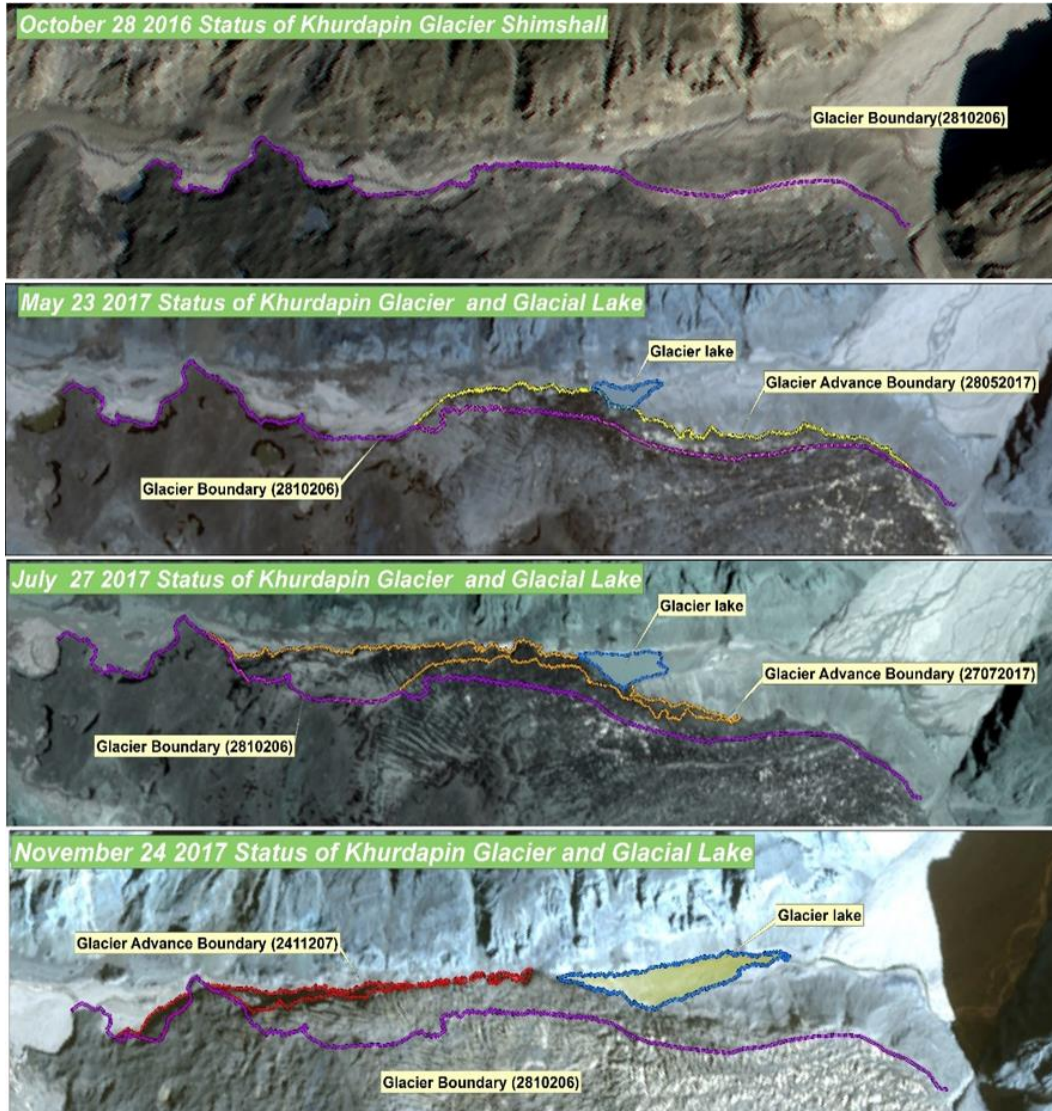


Fig. 4. Temporal view of Glacier blockage and Glacier Lake variation

Table 2. Glacier blocked area and volume statistics from 28 October 2016 to 24 November 2017

Date	Area, km ²	Volume (Glacier deposit), million m ³
23 May 2017	0.10	0.8
27 July 2017	0.27	6.2
24 November 2017	0.34	16.6

Glacier lake was formed at upper part between Virjerab and Khurdopin glacier. The Khurdopin glacier blocked 963-meter length of Shimshal river from 27 October, 2016 to 23 May, 2017 furthermore it blocked 1036-meter length of river from 24 May- 27 July 2017 and 365-meter length of river blocked by glacier from 27 July – 24 November 2017.

Table 3. Temporal river blockage by Khurdopin Glacier

Date	River blocked Length. m
27 Oct 2016- 23 May 2017	963
24 May- 27 July 2017	1036
27 July – 24 November 2017	365

Image analysis like delineation of glacier lakes was carried out by using normalized difference water index (NDWI) for calculation of glacier lake area for 24 November 2017. Digital elevation model (DEM) and glacier lake outline boundary of 24 November, 2017 was used to calculate the volume of lake using functional surface tool in Arc GIS environment. Total area of lake is 0.15 km² (14.8 hectare) with 476922 m³ volume of water (Table 4) [Watson *et al.*, 2018]. Fig. 5 shows lake area in blue polygon.

Table 4. Lake Area Coverage and Volume

Date	Area (Sq.km)	Shape_Area (Hectare)	Volume Lake (Cubic meter)
24 November 2017	0.15	14.8	476922

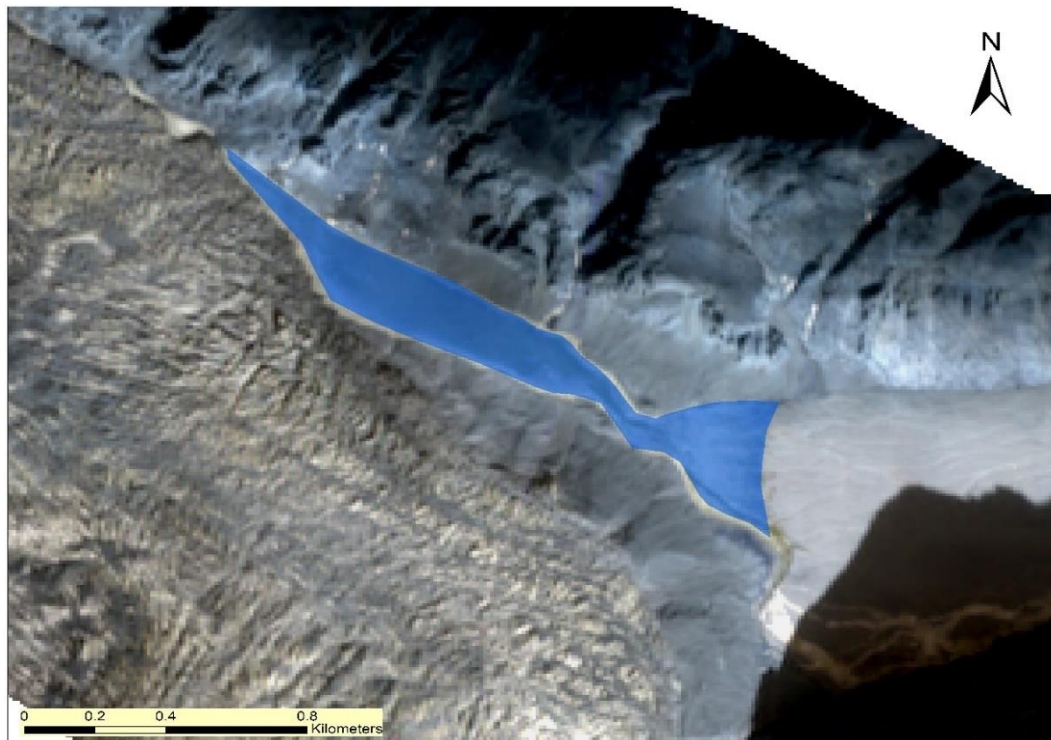


Fig. 5. Glacier lake boundary, 24 November 2017

Glacier lake outburst flood scenario developed based on 2017 flood event combined with GLOF discharge data calculated based on below scenarios occurred from the Khurdopin glacier lake. The projected outburst frontal moraine width is 110 m, depth is 10.23 m with 6.28 m/sec

velocity of water. The peak GLOF discharge in case of outburst of lake as per scenarios in Table 5 is 2155.3 meter/sec [Somos-Valenzuela et al., 2015].

Table 5. Peak Scenario Discharge Rate

Width (m)	Depth (m)	Velocity (m/sec)	GLOF discharge (m/sec)
110	10.23	6.28	2155.296

Glacier lake outburst flood first hit the Shimshal village affected the 3.21 square kilometre area according to peak scenario. The flood depth area varies with respect to topography below (Fig. 6) show the depth of GLOF 0-15 meter with flooded area is 1.91 while 0.79 sq.km area is submerged in Farmanabad village of Shimshal valley, the detail is shown in below graph depth in meter verse submerge area in sq.km the results show that Shimshal village is more affected than Farmanabad village. The flood depth of simulated show close coordination with real flood occurred in 2017 from Khurdopin glacier lake (Table 6).

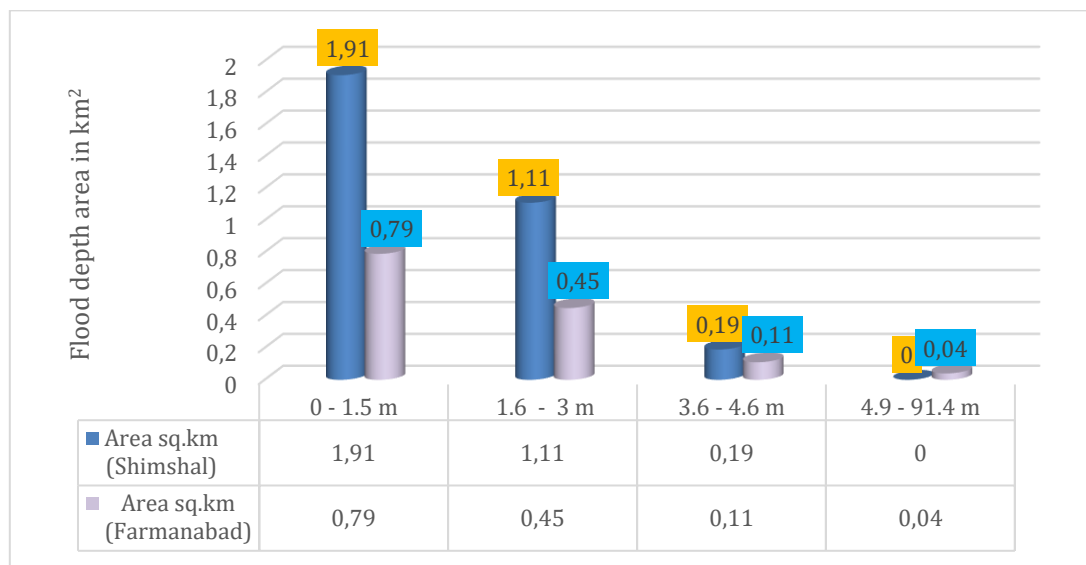


Fig. 6. GLOF depth in meter in Shimshal and Farmanabad village

Table 6. Comparison of Simulated and Real GLOF in specific location

GLOF (Simulated and Real)	Shimshal	Farmanabad	Floodplain area
Simulated GLOF depth in meter	1.5	3.2	4.7
Real GLOF depth in meter	1.7	3.4	4.8

GLOF depth map (Fig. 7) shows the flood depth surface of Shimshal and Farmanabad village and inundation area of agriculture, barren land and other infrastructures.

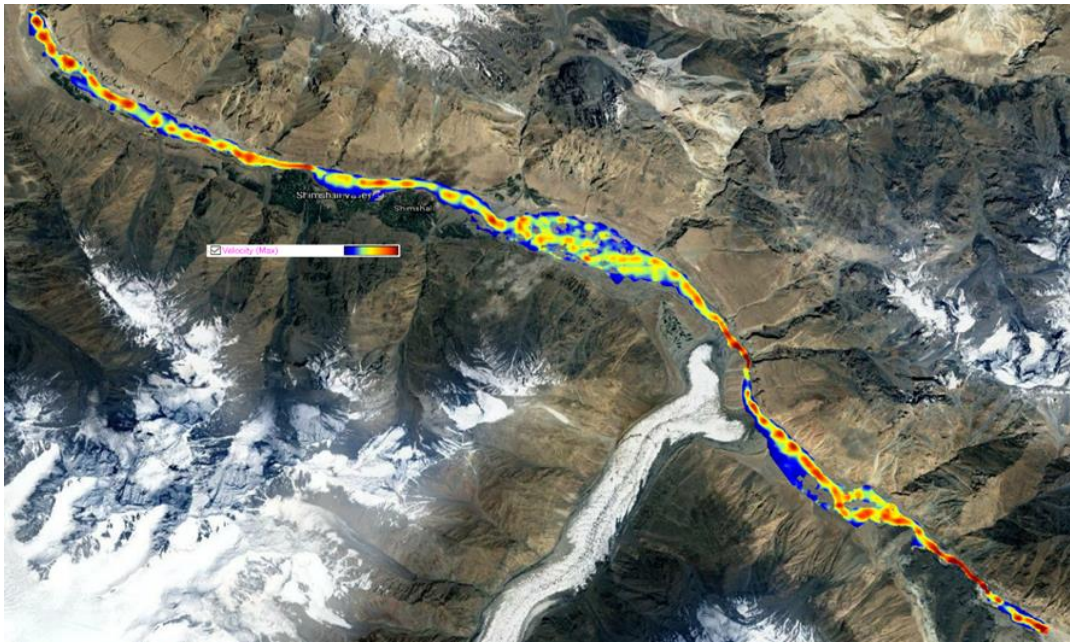


Fig. 7. GLOF depth map of 3 August

Velocity of GLOF is very critical parameter, which depicted about severity of damages, erosion. It is also useful for development of flood protective measure in flood plan area to reduce the flood intensity [Kreibich *et al.*, 2009]. The velocity of flood in Shimshal village is high as compared to Farmanabad due more steepness in flood plan of Shimshal with respect to Farmanabad (Fig. 8).



Fig. 8. GLOF velocity map of 3 August

Time arrival information of flood has been used for early warning for evacuation from flood hazardous area. The Fig. 9 show that GLOF hit first Shimshal village and submerge 3.059 km² area while Farmanabad flooded 0.53 km² area with in sixty minutes. The more area flooded in Shimshal village is due large flood plain are as compare to Farmanabad (Fig. 10) [Akbari *et al.*, 2010].

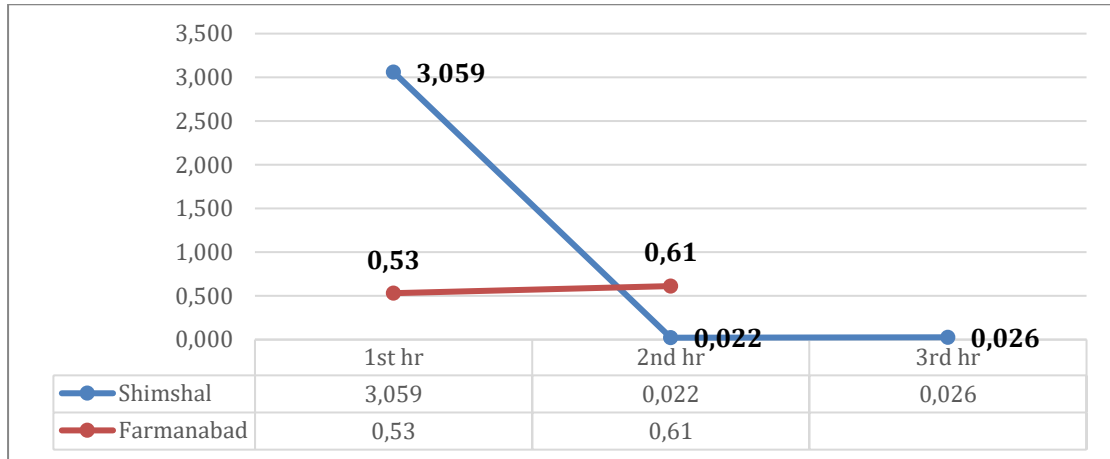


Fig. 9. GLOF time arrival information in hours (Shimshal and Farmanabad)



Fig. 10. GLOF time arrival map of 3 August

Conclusion

The finding of the present study concluded that the spatio-temporal investigation of satellite images shows the significant changes in newly formed Glacier Lake extent as result of Khurdopin glacier dammed the Shimshal River. The analysis revealed that Lake Area is 14.8 hectares in 24 November, 2017 with 476922 cubic meter volume of water. Satellite data also revealed that glacier advancement since October 2016 to November 2017. Glacier has blocked approximate 2.303 km length of Shimshal River. The size of lake will be increase in summer season due more melting of snow and glacier as well as rainfall also contributes to raise the volume of lake and create more chance of outburst event. According to GLOF modeling results, total 3.21 square kilometre area submerge by glacial lake outburst flood (GLOF) according to peak scenario. The velocity of flood in Shimshal village is high as compared to Farmanabad due more steepness in flood plan of Shimshal with respect to Farmanabad. The GLOF time arrival information show that Shimshal village submerge 3.059 km² area while Farmanabad flooded 0.53 km² area with in sixty minutes. The GLOF maps can be used as a basic tool for risk reduction measures i.e. identification of mitigation sites and village/town planning in future.

Acknowledgements

The authors thank the hazard vulnerability risk assessment HVRA Team of emergency department of Aga Khan agency for habitat (AKAH) and AKDN helicopter Mission (Mr. Adeel from AKF and Meteorologist from Pakistan Metrological Department (PMD) for their support to start the mapping and monitoring of glaciers in the Shimshal valley. I would like to acknowledge the glacier monitoring team (GMT), Umair GIS Analyst from Ministry of Climate Change government of Pakistan, which provide their assistance during field visit and data preparation of Khurdopin glacier.

References

- Akbari, G., & Firoozi, B. (2010, May). Implicit and explicit numerical solution of Saint-Venant equations for simulating flood wave in natural rivers. In 5th National Congress on Civil Engineering (p. 7). Iran: Feridowsi University of Mashhad.
- Ashraf, A., Roohi, R., Naz, R., & Mustafa, N. (2014). Monitoring cryosphere and associated flood hazards in high mountain ranges of Pakistan using remote sensing technique. *Natural hazards*, 73(2), 933-949.
- Ashraf, A., Naz, R., & Roohi, R. (2012). Glacier lake outburst flood hazards in Hindukush, Karakoram and Himalayan Ranges of Pakistan: implications and risk analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 3(2), 113-132.
- Ashraf A, NazR, Iqbal MB (2017) Altitudinal dynamics of glacier lakes under changing climate in the Hindu Kush, Karakoram, and Himalaya ranges, *Geomorphology* 283:72-79.
- Azouagh, A., El Bardai, R., Hilal, I., & el Messari, J. S. (2018). Integration of GIS and HEC-RAS in Floods Modeling of Martil River (Northern Morocco). *Eur. Sci. J*, 14, 12.
- Banerjee, B. P. (2013). GLOF Study Using Remote Sensing and Ground Based Measurement Techniques. Indian Institute of Remote Sensing.
- Brunner, G. W. (1995). HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 1.0. Hydrologic Engineering Center Davis CA.
- Din, K., Tariq, S., Mahmood, A., & Rasul, G. (2014). Temperature and precipitation: GLOF triggering indicators in Gilgit-Baltistan, Pakistan. *Pakistan Journal of Meteorology*, 10(20).
- Gardelle, J., Arnaud, Y., & Berthier, E. (2011). Contrasted evolution of glacier lakes along the Hindu Kush Himalaya mountain range between 1990 and 2009. *Global and Planetary Change*, 75(1-2), 47-55.
- Gillani, S. N. A. (2014). Degradation of Siachen Glacier in the context of volumetric decrease in Siachen, Baltoro and Biafo Glaciers of Pakistan. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 6(4), 871.
- Gurung, D. R., Khanal, N. R., Bajracharya, S. R., Tsering, K., Joshi, S., Tshering, P., ... & Penjor, T. (2017). Lemthang Tsho glacier Lake outburst flood (GLOF) in Bhutan: cause and impact. *Geoenvironmental Disasters*, 4(1), 17.
- Huggel, C., Kääb, A., Haeblerli, W., Teyssie, P., & Paul, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 316-330.
- Hussain, A (2019). A brief Communication of Shispar Glacier Surge in 2018, Hunza River Basin, Pakistan. *International Journal of Advanced Geosciences*, Vol 7, No 2 (2019).
- Hussain, A., & Bano, D. (2019). Temporal monitoring of Ghamu bar glacial lakes using remote sensing and GIS. *International Journal of Advance Geoscience*. (<https://www.researchgate.net/Publication/332981010>). <https://doi.org/10.14419/ijag.v7i1.20308>.
- Hussain, A., & Hussain, A. (2019) Gulkin glacial lakes assessment using geospatial techniques. *International Journal of Advance Geoscience*. (<https://www.researchgate.net>
- Hussain, A., Sagin, J., & Chun, K. P. (2018). A Remote Sensing Contribution to Flood Modelling in an Inaccessible Mountainous River Basin.
- ICIMOD, "Inventory of the Glaciers and Glacier Lakes of HKH Region," 2005.
- ICIMOD. 2011. Glacier Lakes and Glacier Lake Outburst Floods in Nepal, 1-109.
- Khan, K., Ashraf, C. M., & Faridi, R. (2011, October). Climate Change Effect On The Hunza Lake And Geomorphologic Status Of The Hunza River Basin, Gilgit-Baltistan, Pakistan. In 14th World Lake Conference, Austin (Vol. 31).

- Khattak, M. S., Anwar, F., Saeed, T. U., Sharif, M., Sheraz, K., & Ahmed, A. (2016). Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcGIS: a case study of Kabul River. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4), 1375-1390.
- Konan, A. N. G. (2018). Urban Flood modelling and Floodplain Mapping using ArcGIS, HEC-HMS and HEC-RAS in Abidjan city, Côte D'Ivoire–West Africa: Case study of the watershed of Bonoumin-Rivière Palmeraie (Master's thesis, PAUWES).
- Kreibich, H., Piroth, K., Seifert, I., Maiwald, H., Kunert, U., Schwarz, J., ... & Thieken, A. H. (2009). Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling? *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, 9(5), 1679-1692.
- Merz, B., Thieken, A. H., & Gocht, M. (2007). Flood risk mapping at the local scale: concepts and challenges. In *Flood risk management in Europe* (pp. 231-251). Springer, Dordrecht.
- PMD. (2016) Cryosphere Monitoring in Northern Pakistan – Role of Pakistan Meteorological Department. Available at: http://www.pmd.gov.pk/rnd/rndweb/rnd_new/glacier-monitoring.php. [Accessed 9 April 2019]
- Quincey, D. J., & Luckman, A. (2014). Brief Communication: On the magnitude and frequency of Khurdopin glacier surge events. *The Cryosphere*, 8(2), 571-574.
- Rasul, G. et al (2011). Glaciers and Glacier Lakes under Changing Climate in Pakistan, 8(15): 1-8.
- Round, V., Leinss, S., Huss, M., Haemmig, C., & Hajnsek, I. (2017). Surge dynamics and lake outbursts of Kyagar Glacier, Karakoram. *The Cryosphere*, 11(2), 723-739.
- Singh, P., & Bengtsson, L. (2005). Impact of warmer climate on melt and evaporation for the rainfed, snowfed and glacierfed basins in the Himalayan region. *Journal of Hydrology*, 300(1-4), 140-154.
- Shrestha, A. B., Eriksson, M., Mool, P., Ghimire, P., Mishra, B., & Khanal, N. R. (2010). Glacier lake outburst flood risk assessment of Sun Koshi basin, Nepal. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1(2), 157-169.
- Somos-Valenzuela, M. A., McKinney, D. C., Byers, A. C., Rounce, D. R., Portocarrero, C., & Lamsal, D. (2015). Assessing downstream flood impacts due to a potential GLOF from Imja Tsho in Nepal. *Hydrology & Earth System Sciences*, 19(3).
- Steiner, J. F., Kraaijenbrink, P. D., Jiduc, S. G., & Immerzeel, W. W. (2018). Brief communication: The Khurdopin glacier surge revisited - Extreme flow velocities and formation of a dammed lake in 2017. *Cryosphere*, 12(1), 95-101.
- Wang, W., Yao, T., Yang, W., Joswiak, D., & Zhu, M. (2012). Methods for assessing regional glacier lake variation and hazard in the southeastern Tibetan Plateau: a case study from the Boshula mountain range, China. *Environmental Earth Sciences*, 67(5), 1441-1450.
- Worni, R., Huggel, C., & Stoffel, M. (2013). Glacier lakes in the Indian Himalayas—From an area-wide glacier lake inventory to on-site and modeling based risk assessment of critical glacier lakes. *Science of the Total Environment*, 468, S71-S84.
- Worni, R. (2012). Glacier Lakes in the Indian Himalayas - From an Area-Wide Glacier Lake Inventory to on-Site and Modeling Based Risk Assessment of Critical Glacier Lakes, 468-469.
- Watson, C. S., King, O., Miles, E. S., & Quincey, D. J. (2018). Optimising NDWI supraglacial pond classification on Himalayan debris-covered glaciers. *Remote sensing of environment*, 217, 414-425.
- Yang, J., Townsend, R. D., & Daneshfar, B. (2006). Applying the HEC-RAS model and GIS techniques in river network floodplain delineation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(1), 19-28.
- Yao, X., Liu, S., Han, L., Sun, M., & Zhao, L. (2018). Definition and classification system of glacier lake for inventory and hazards study. *Journal of Geographical Sciences*, 28(2), 193-205.
- Zaidi, A. Z., Yasmeen, Z., & Siddiqui, M. D. (2013, June). Glacier Lake Outburst Flood (GLOF) risk mapping in Hunza River Basin (Pakistan) using geospatial techniques. In *2013 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)* (pp. 191-195). IEEE.



Debris Flow Pilot Risk Management – a case from Sherqilla in Hindukush Region of Gilgit-Baltistan, Pakistan

D. Karim¹, W. Anwar¹, G. Amin², Q. Rahim², D.R. Gurung³

¹Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in Pakistan, Gilgit, Pakistan,
deedar.karim@akdn.org

²Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in Pakistan, Islamabad, Pakistan

³Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, Dushanbe,
Tajikistan

Abstract. Debris flow is considered one of the most devastating natural hazards in the Himalayan Karakorum and Hindu-Kush mountain ranges. Pakistan is 5th in the list of most vulnerable countries in terms of climate change, and signs are evident in terms of frequent and high intensity climate hazards. The northern part of Pakistan including Ghizer district of Gilgit-Baltistan (GB) is highly vulnerable to debris flow hazard. Historical record suggests that most debris flows occurred during June to mid-August due to heavy rains around the monsoon season and during April-May due to snow melting. A high magnitude debris flow event occurred on 3rd April 2016 due to rapid and intensive rain in short period, never experienced before in recent history of GB. This event totally washed-out 20 houses and displaced people to live in makeshift tents and with host families. Simultaneously similar events on 3rd April occurred in other two villages namely Silpi and Oshikhundass within the same region and several houses damaged. These specific events are extreme with debris travelling far and wide and any future events will results be disastrous with new habitation coming up. Aga Khan Agency for Habitat (AKAH) undertook multiple risk mitigation measures such as channelization and piloted community-based early warning system.

Key words: *Karakorum, Hindu Kush, climate change, erratic rainfall, early warning system, debris flow, mitigation*

Cite this article: Karim D., Anwar W., Amin G., Rahim Q., Gurung D.R. Debris Flow Pilot Risk Management – a case from Sherqilla in Hindukush Region of Gilgit-Baltistan, Pakistan. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 221–233.

Пилотный проект по управлению рисками селевых потоков на примере селения Шеркилла в горах Гиндукуша (Гилгит-Балтистан, Пакистан)

Д. Карим¹, В. Анвар², Г. Амин², К. Рахим², Д.Р. Гурунг³

¹Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Пакистане, Гилгит, Пакистан,
deedar.karim@akdn.org

²Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Пакистане, Исламабад, Пакистан

³Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, Душанбе,
Таджикистан

Аннотация. Селевые потоки – одно из самых разрушительных стихийных бедствий в горах Гиндукуша, Гималаев и Каракорума. Пакистан занимает 5-е место в списке наиболее уязвимых к изменениям климата стран, и доказательство этого – высокая частота и интенсивность стихийных бедствий, связанных с этими изменениями. Северная часть Пакистана, включая округ Гхизер (Гилгит-Балтистан), весьма

уязвима в отношении опасности схода селевых потоков. Исторические данные свидетельствуют о том, что большинство селевых потоков происходило в период с начала июня по середину августа вследствие обильных дождей, выпадающих в сезон муссонов, и в период с апреля по май из-за таяния снега. Масштабный по объему и своим последствиям селевой поток сошел 3 апреля 2016 г. Он был связан с выпадением большого количества осадков за короткий период времени, чего еще ни разу не наблюдалось в новейшей истории Гилгит-Балтистана. Это событие привело к полному разрушению 20 домов и вынудило людей переселиться во временный палаточный лагерь и в дома к другим семьям. Одновременно с этим 3 апреля аналогичные события произошли в двух других селениях данного региона – Силпи и Ошихундас, где также пострадали несколько домовладений. Эти селевые потоки носили чрезвычайный характер, поскольку отложения были перемещены на большое расстояние и аккумуляровались на большой площади, что говорит о том, что и будущие события будут иметь катастрофические последствия в связи с появлением новых построек. Агентство Ага Хана Хабитат предприняло многочисленные меры по уменьшению рисков, такие как расчистка и организация новых русел, а также внедрение экспериментальной системы раннего оповещения для местного населения.

Ключевые слова: Каракорум, Гиндукуш, изменения климата, неравномерные осадки, система раннего оповещения, селевой поток, мероприятия по уменьшению угрозы и риска

Ссылка для цитирования: Карим Д., Анвар В., Амин Г., Рахим К., Гурунг Д.Р. Пилотный проект по управлению рисками селевых потоков на примере селения Шеркилла в горах Гиндукуша (Гилгит-Балтистан, Пакистан). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 221–233.

Introduction

Debris flows and flash floods are most destructive mass movement phenomena abundant in alpine environment [Dowling, Santi 2014]. The most common cause of these flows is saturation of debris with runoff during sudden and intense precipitation on high steep, poorly vegetated slopes [Nash et al., 1985; Georgakakos, 1986; Sweeney, 1992; Borga et al., 2007]. The mountainous region has plentiful supply of non-lithified sediments produced by weathering, slope degradation, and glacial processes, deluge of debris when moves down the slope causes loss of life, destruction to habitat and infrastructure. Climate change will have significant influence on the frequency of the mass movement particularly debris flow and flash floods [Winter et al., 2010; IPCC 2012; 2013; Gobiet et al., 2013]. Borga et al., 2014, illustrated the effect of climate change on debris flow with special reference to changes in rainfall intensity and pattern, in combination with increased temperatures, which is to increase the frequency and magnitude of debris flow, provided with ample amount of sediment. A warmer climate tends to increase rains, thus increasing the area contributing effectively to runoff [Stoffel and Beniston, 2006]. Likewise, [Tomczak & Ewertowski, 2017] have thoroughly studied the geomorphological processes and concluded that, receding glaciers have also influenced glacier associated hazards such as, debris falls, slides and flows, down wasting and back wasting of melting of dead ice.

Debris flows vary in size and nature, they include small creek activation on the scree slopes, catastrophic events produced by flash flooding and sudden outburst of glacial lake. The landscape evolution in high-mountain areas and is often strongly influenced by debris flows [Zimmerman & Haeblerli, 1992]. Debris flows have major role in shaping landscape of Gilgit Baltistan GB in Northern Pakistan. There have been events which had far reaching predicament such as debris flow of Shishkat in 1974 [Goudie et al, 1983] which dammed the river creating 12 km long artificial lake up ahead. Similarly, event of Gupis in 1980 created lake which extended 5 km upstream submerged two villages and rendered 500 people homeless [Nash et

al., 1985]. Moreover, recent GLOF event on 17th July 2018 from Badswat glacier brought huge sediment load blocking Ishkoman River forming an artificial lake, around 30houses submerged under the lake.

Communities in rural areas of GB particularly Ghizer district are by far most affected by debris flows. Ever increasing population, lack of land use planning has led people to settle in hazardous areas. As [*Chang et al., 2009; Tripathi et al., 2014*] put it, the mass wasting vulnerability has been increasing, in some way, result of encroachment into flood and debris flow prone areas worldwide. Sherqilla is one of the most vulnerable villages in district Ghizer which has been experiencing debris flows in past with limited damages. However, during the unusual and devastating rains on 3rd April 2016, a high magnitude debris flow event occurred in Sherqilla from Danjir nala Rahimabad living zone. As a result, 20houses were totally washed away and people were forced to leave in makeshift tents and host families. Considering the flashflood frequency and exposure of population AKAH, WWF and Gilgit Baltistan Disaster Management Authority (GBDMA) selected Sherqilla village for pilot intervention of Community Based Flood Early Warning System (CBFEWS) under Upper Indus Basin (UIB) initiative. Moreover, to reduce the risk of debris flow emergency funds were utilized to mitigate the immediate threat. This study encompasses detail insight into the impact of pilot mitigation project on infrastructure and human life and effectiveness of Early Warning System (EWS) based on risk management Plan.

Study area

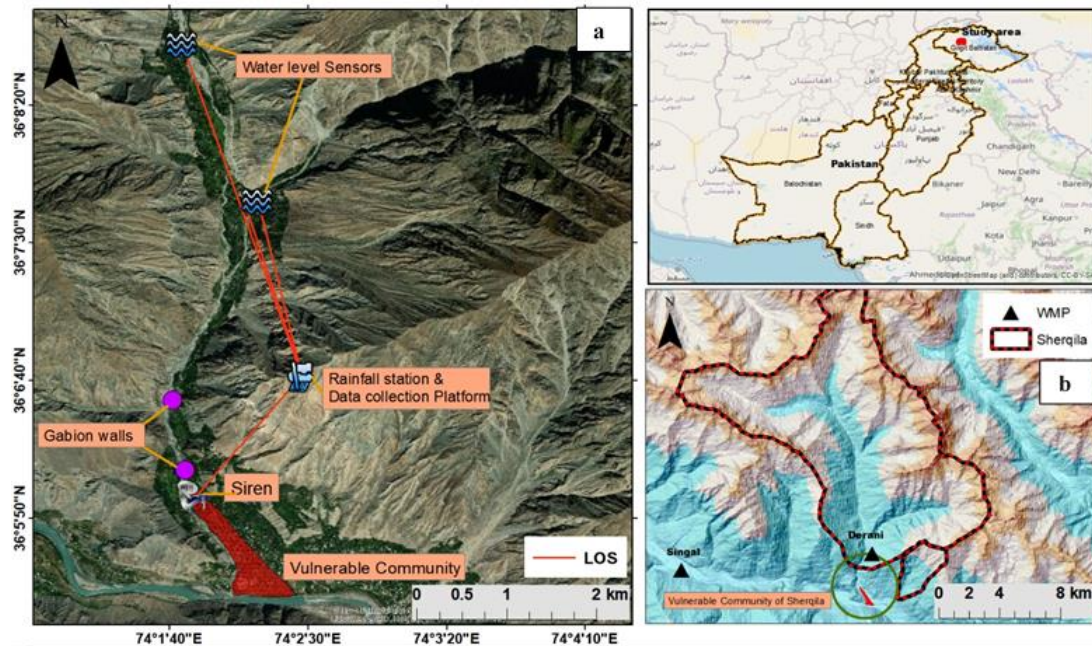


Fig. 1. a) Highlights the location of CBFEWS with its components and mitigation work done by AKAH to reduce flashflood risk. b) Map showing the location of Weather Monitoring Posts (WMPs), Derani and Singal

Sherqilla village is situated along the left bank (northern side) of Ghizer River providing home for 1500 household 12000 individuals at around 40 km west of Gilgit city. Most of the inhabited area (7 km stretched, 1.5 km widespred) is settled on debris fans and partially on the river terraces especially the lower areas along the river. A perennial stream named Derani nala along the NW end of the village is passing partially through settled areas. The stream is further divided into two valleys Derani and Bilchar with a catchment area of 163 km² covered with glaciers, rock glaciers and snowcapped peaks. This torrent is vulnerable for flashfloods and has history of floods and damages downstream, where CBFEWS installed for warning. Moreover, AKAH with the help of local government authorities initiated the channelization of a proper

track for debris flow at Danjir nala, and mitigation work (gabion walls) built at critical points in Derani perennial stream to reduce the risk of flashflood to settlements. Likewise, the already installed Weather Monitoring Posts (WMPs) at Derani and Singal village played a key role in this study.

Brief review of the problem

Rainfall-induced debris flow and landslides have potential to cause widespread damages, resulting in many fatalities and massive damages to economy around the world [Salvati *et al.*, 2010; Borga *et al.*, 2014; Melillo *et al.*, 2014].

The impacts of climate change and its influence on initiation of debris flow is debatable topic for many researchers [Matthews *et al.*, 2009; Bollschweiler and Stoffel, 2010; Jakob and Friele, 2010; Stoffel, 2010]. Some research studies documented that the global warming might influence the frequency of extreme rainfall events [Fowler and Hennessy, 1995; Easterling *et al.*, 2000; Fowler and Kilsby, 2003] and they concluded that such variations in climate might trigger more debris flow events in future.

There is a close association between the rainfall type and the occurrence of extreme events [Starkel, 1979]. The intensity of rainfall and duration, antecedent rainfall, and combination of both determine the rainfall pattern which trigger various debris flow events. Rainstorms of with extreme (high) intensity with short interval time may cause increase surface runoff due to inadequate infiltration and absorption of rainwater [Wieczorek and Glade, 2005].

Debris flow in glacier environment are caused by retreat of glacier snout, movement of unconsolidated material over barren land and occasionally ice-cored glacial sediments, which are mobilized by flash floods due to subsequent extreme rainfall, snowmelt, and glacial lake outbursts [Haeberli, 1992; O'Connor and Costa, 1993; Evans and Clague, 1994; Haeberli *et al.*, 1997]. Mountain ranges in northern area of Pakistan, hosts some of the world's largest mountain glaciers causing various hazards and disasters such as glacier dammed lakes [Jamil, 2019]. GLOF induced flashflood and debris flow from Badswat glacier in 2018 continued for 12 days resulting in deposition of huge sediment load blocking Ishkoman river forming an artificial lake. Luckily, no casualties reported as the event occurred during the daytime, if it would have happened at night damages would have been enormous.

Various debris flow events in these mountain ranges have caused number of deaths and economical damages, unfortunately there is limited literature on debris flow events triggered by glacier lakes, rain fall and snow melt. One of reason of limited studies in these remote areas is scarcity and unavailability of ground data which can be used for analysis of triggering factors such as rainfall and temperature. Installation of WMPs and EWS readily resolve this data gap in coming future.

Method and data

A combination of field and remote sensing data is employed for this study, rain fall data from Pakistan Meteorological Department (PMD) and WMP data of AKAH. The atmospherically corrected Sentinel-2 optical data (Band: B2-B8, B11 and B12) image data was acquired from Google Earth Engine (GEE) for calculating the snow cover area of study area for year 2016 (25th March-10th September). The S2 images were available as 12 UINT16 spectral bands representing SR scaled by 10000 with four spectral bands (Blue band (0.490 μm), Green band (0.560 μm), Red band (0.665 μm) and Near-infrared (NIR) band (0.842 μm)) at 10 m spatial resolution. A cloud free image collection was used to prepare composite with median *ee.Reducer* function. The median composite image was latter analyzed to derive snow cover of the area using supervised classification method utilized in GEE platform.

Along with sentinel-2 data, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM) was used to derive topographic features of study area such as slope and aspect in ArcGIS platform. The already available data on hazard vulnerability and risk assessment data is retrieved from the HVRA database of

AKAH Pakistan. Post mitigation work assessed through field studies and analysis of information through GIS and its impact deduced.

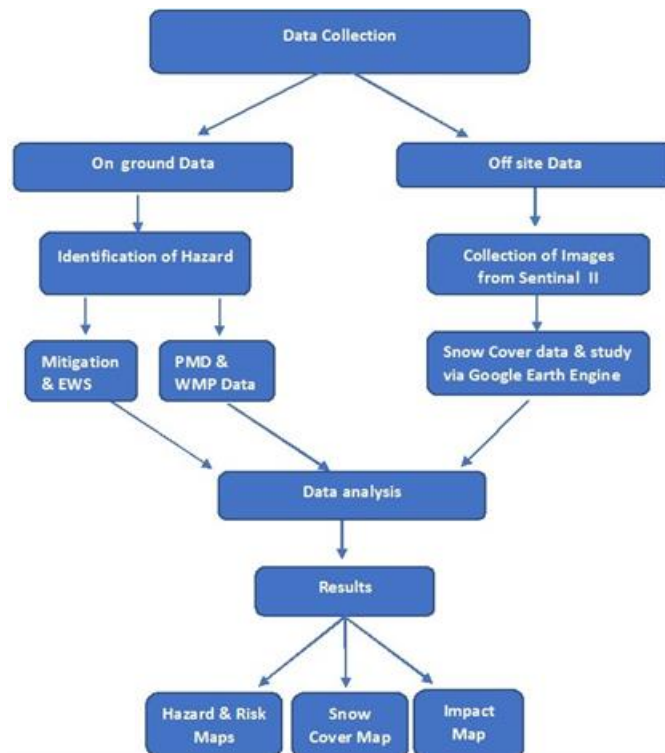


Fig. 2. Methodology flow chart for the study at Sherqilla

Analysis and results

Precipitation analysis

High-intensity precipitation at global scales [Beniston, 2009; Giorgi et al., 2011] supports the view that the global hydrological cycle is intensifying because of global warming and the associated increasing water vapor content and energy in the atmosphere. Consequently, in many areas, the flash flood and debris-flow hazard is expected to increase in severity, through the impacts of global change on climate, severe weather in the form of heavy rains and river discharge conditions [Kleinen and Petschel-Held, 2007; Beniston et al., 2011]. The frequency and intensity of the disaster events have increased in the last decade due to climate change and changes in the rain fall pattern. Rainfall or runoff can cause a soil mass to fail and can trigger debris flow [Iverson, 1997]. [Rasul et al., 2014] also studied the effects of rainfall and subsequent rise in temperature in increasing in melt water. The WMP data at Derani suggest that the 50mm intense rain fall coupled with the higher melting of the snow in short time has triggered the debris flow event on 3rd April 2016. Such events are also expected in near future if the erratic rain fall happens.

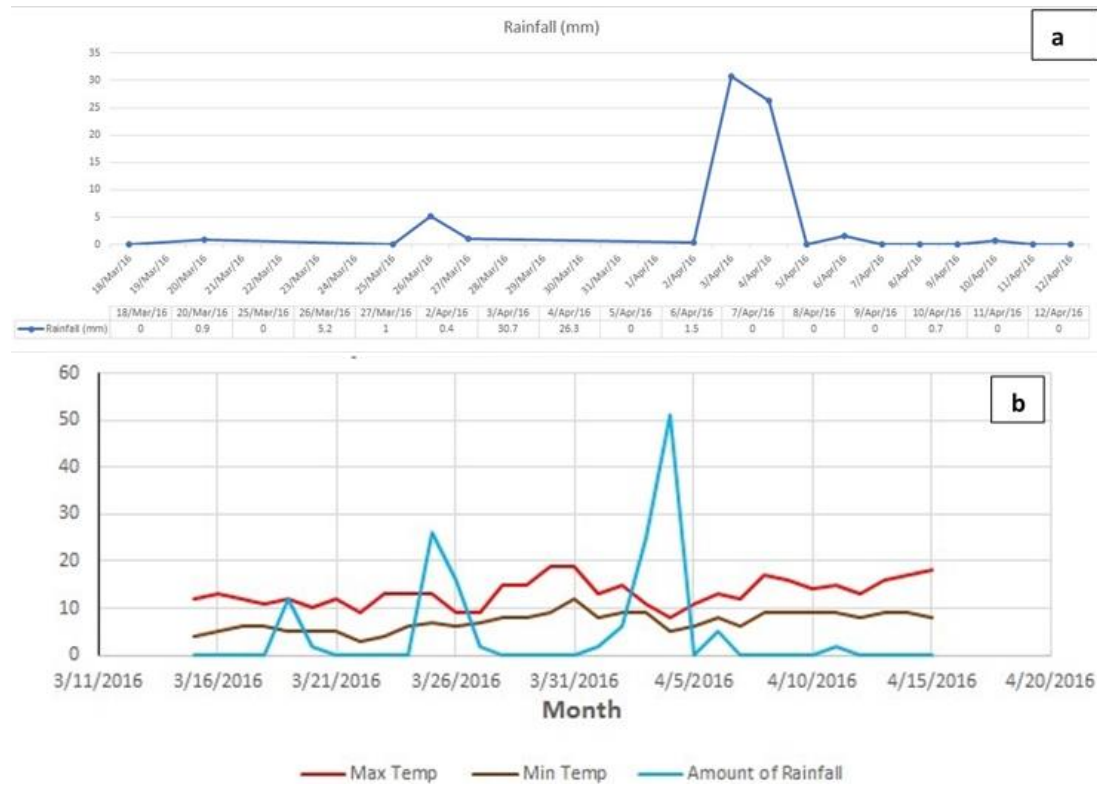


Fig. 3. a) The rain falls trend of Pakistan Meteorological Department (PMD) data of Gilgit station. b) Weather Monitoring post (WMP) data of Derani village by AKAH

Failure process

Rainfall, sometimes combined with snowmelt, is the main factor triggering most debris flows [Wieczorek and Glade, 2005]. Accurate rainfall data are crucial for early warning, as well as for defining rainfall thresholds and for predicting debris-flow volume [Nikolopoulos et al., 2014; Marra et al., 2016]. Short very intensive rain fall observed and recorded around 30.7mm at Gilgit PMD station, and above 50mm as recorded by WMP Derani, simultaneously debris flow & flashflood triggered on 3rd April 2016 at Oshikhundass (Gilgit), Sherqilla & Silpi in Ghizer district resulting in damages of houses, orchards and infrastructure. Rain fall coupled with the snow melt might have triggered the debris flow in Danjir nala of Sherqilla that damaged twenty houses and hundred became exposed to future events. Moreover, snow avalanches were also recorded at Derani village as highlighted in WMP data at the same time as thresholds were met. Many debris flows were triggered by locally intense convective rainfall characterized by a very small storm cell [a few kilometers or even less across; Underwood et al., 2016]. Similar phenomenon of localized rainfall had occurred in July 2006 in Gitch village at 5am early morning, a prayer facility collapsed, and 7 people died, however no rain observed in Sherqilla few km downstream. In the month of august same year limited rainfall observed at the catchment of Damass at around 12pm, in few minutes when viewed from upper Gahkuch a black snake of debris was moving down in Damass village damaging building, orchards, channel, roads etc.

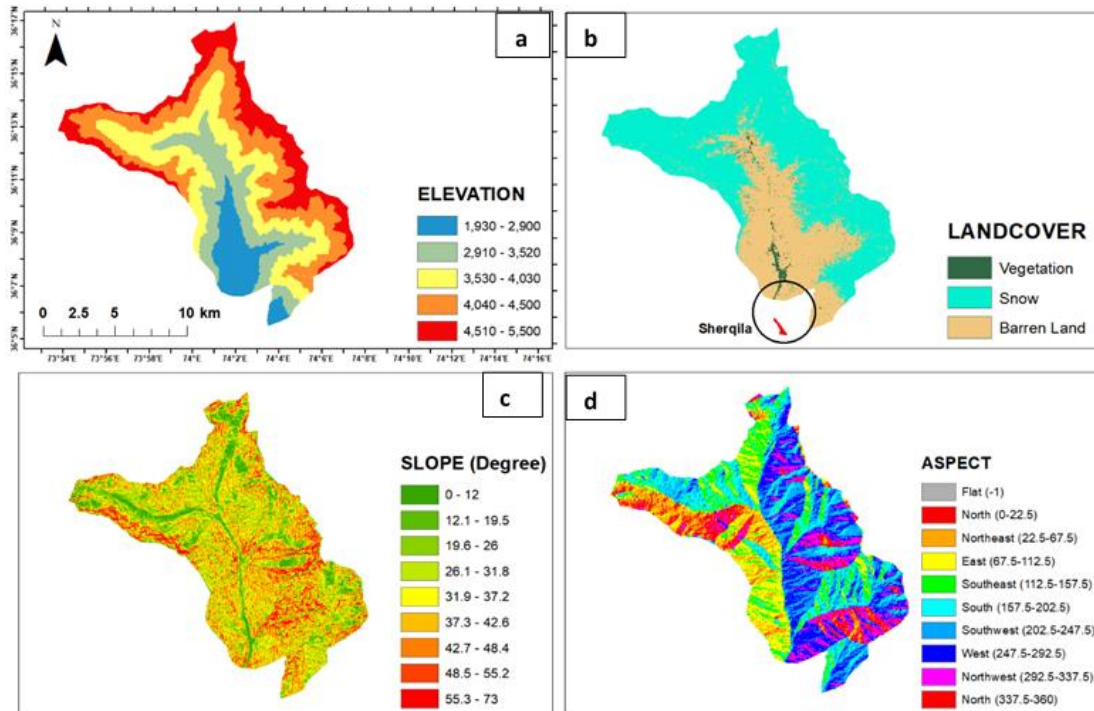


Fig. 4. a) Elevation map of both catchments Danjir & Derani. b) Showing landcover of the sources area. c) Display of variation in slope of the terrain. d) Presenting aspect of both the perennial & dry nala

Mitigation and Early Warning System

The rainfall triggered debris flow event in 2016 further aggravate the risk scenario. People were afraid of next event and reluctant to live in same place, they were planning to relocate to safer area, even they identified a placed for future settlement and AKAH conducted the assessment. Rebuilding or relocating of affected people to a new place is a very complex and sensitive issue as it often results in unintended negative social issues [Barenstein, 2015]. Moreover, settlement in a new area without any basic amenities such as water, electricity, and accessibility are very difficult and time taking. Considering the future risk, mitigation measures seemed only option, budget proposed and undertook the mitigation in 2017-18. Regulating the debris flow from catchment area down to the exit in river was a challenging engineering intervention. The catchment area 7.5km² was assessed for the possibility of cost effective and practically viable intervention. Feasibility of the channelization were conducted by the geologists and engineers of AKAH to verify the flow pattern, soil type, rock type and topo. They came up with the channelization of old debris track the ultimate option to regulate the flood to main Ghizer River. Keeping the previous flow pattern of debris and catchment orientation for the future debris, a channel with rectangular section was designed and excavated. A total length of 853.5m, average depth & width of 4m and 7.5m respectively with average gradient 15° from apex to bottom of fan. Around 23786 m³ soil was excavated and transported outside via loader tracker. The stone/small pieces of rocks and excavated soil were dumped on both sides of the channel to give it extra capacity, which almost double the depth of the channel.

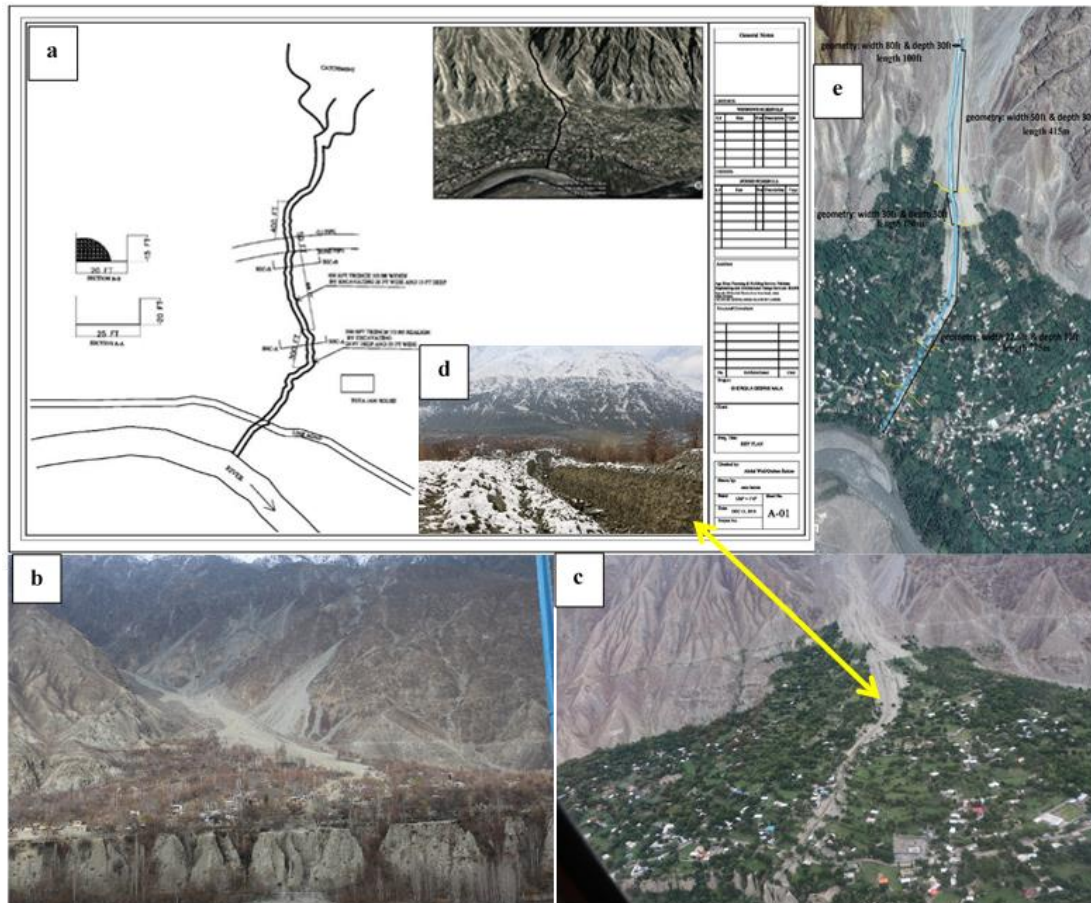


Fig. 5. a) Indicates the typical design of the mitigation for excavation of the channel. b) Northern view of the debris fan with the spread of the debris as viewed across Ghizer River in December 2016. c) Airborne view of the mitigation work as taken from AKDN Heli in July 2018 during aerial survey of Badswat GLOF. d) Southern view of mitigation work after completion in January 2019. e) Proposed design on Google Image

The designed system at Sherqilla included, Wireless Remote Terminal Unit (WRTU), Data Collection Platform (DCP), Audio Remote Terminal Unit (ARTU) and tipping bucket. The water content sensor is installed at a location elevated from the normal discharge of water, flood level increases and when touches it, transmit information through radio waves and GPRS to data collection platform. From here the information is transmitted to ARTU and siren activated to trigger alarm for early warning. After the capacity building on installation by the vendor at Islamabad a pre-feasibility survey for the installation of the early warning was conducted through remote sensing shown in Fig. 6b and the exact locations were identified for the fixing of the systems on the ground, which were installed on the pre-identified sites and the system was tested successfully. The community based early warning system installed at Sherqilla a populated village of district Ghizer from mid-May to mid-June 2017.



Fig. 6. a) Describes the early warning system and its components i.e. water content sensor, data collection platform, tipping bucket and siren system. b) Selection of site through the remote sensing to view the line of site for EWS. c) AKAH staff installing DCP at the identified site. d) Installation of water content by staff. Photo Credit AKAH Pakistan

Impact of risk management initiatives

During the 2016 debris flow event the flood marked its path across the fan and reached the Ghizer River damaging houses & infrastructure in the way. In case of future events the debris could divert in 180° direction from the apex of fan damaging all in the way down. Around 300 houses are dwelling on the fan were highly exposed, the excavation of channel and permitting a proper path for debris has reduced the risk of overtopping into settlements saving the precious lives, livelihood, agricultural lands of area 211,007 m² and other infrastructure as reflected on the post hazard map of Sherqilla. In addition, another intervention of gabion wall on the hotspots reduce the diversion of flood to village and agricultural land area 54,253 m² saved on NW side of village along the Derani perennial stream. Hazard dynamics were changed both size of high and medium hazard zones reduce whereas low hazard zone slightly increased as displayed in Fig. 7-8.

In all types of preparedness and response strategies, early warning systems play a key role. As such, early warning systems, specifically developed to generate and disseminate timely and meaningful warning evidence for event risk management, represent an essential part of an effective natural hazards preparedness tool [UNISDR, 2009; European Commission, 2007]. On the same lines AKAH installed CBFWEWS, ultimately enhanced the preparedness and capacity of vulnerable community. Ali, 2020 has expressed the success of pilot EWS, the National Disaster Management Authority (NDMA) recognized the success of CBFWEWS for Sherqilla, where an early warning transmitted by the system during the flood event at around 4 AM on 3 August 2017 as shown by in Fig. 9b, helped communities in Sherqilla evacuate to safer area with time lapse of 1hr. Fida Ali (CERT Captain), from Sherqilla, expressed the community's satisfaction of EWS: "Before installation of the system, we would spend entire nights at the upstream of Derani village, so that we could provide warning to downstream vulnerable community in Sherqilla. Now we can all sleep-in peace".

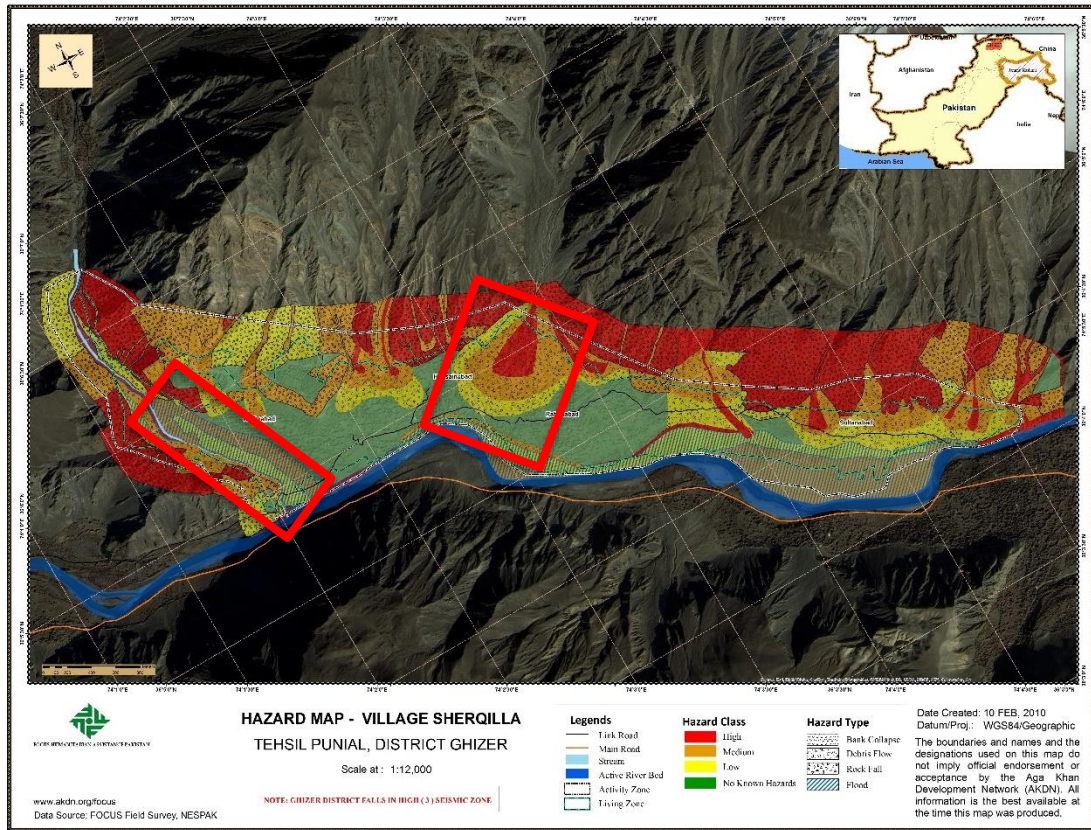


Fig. 7. Hazard map of Sherqilla before the mitigation work in the central portion (debris flow hazard dominant) and NW side of village (flashflood dominant)

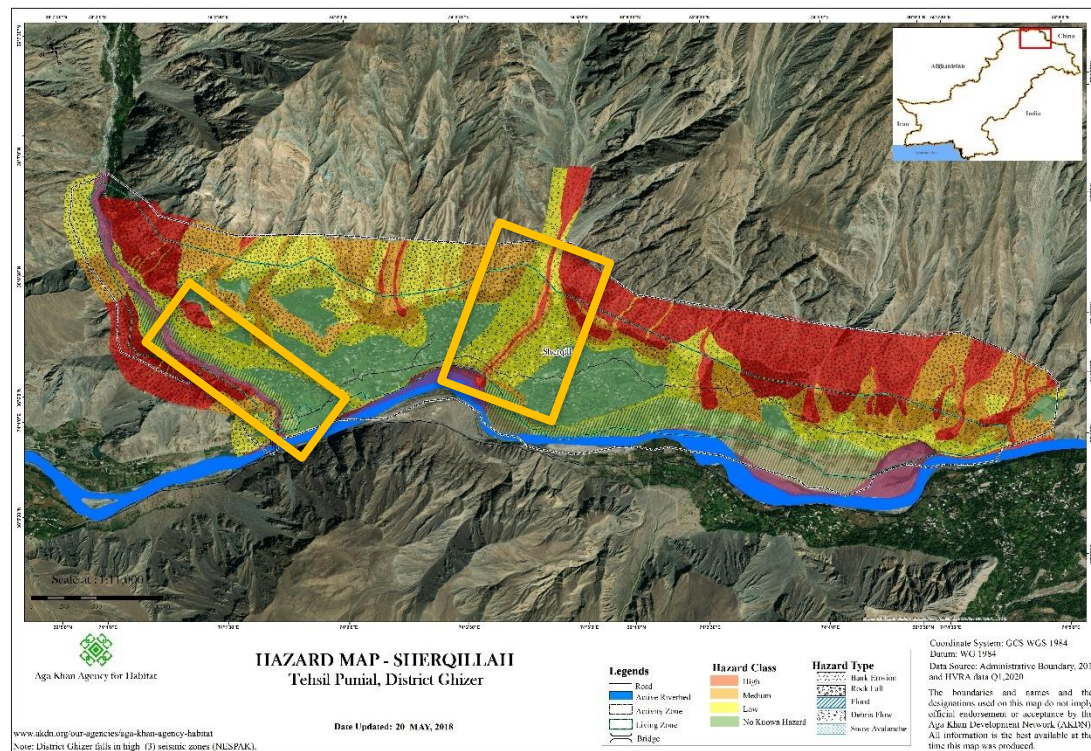


Fig. 8. Hazard map of Sherqilla indicating the reduced risk (medium to low) after the excavation of channel for debris in the central portion and NW side of village after construction of gabion structures

Table. Comparison of changes in the hazard dynamic after the imitation at Danjir nala

Before the mitigation		After the mitigation	
Hazard	Area, km ²	Hazard	Area, km ²
High	0.000065	High	0.00026
Low	0.000241	Low	0.000191
Medium	0.001437	Medium	0.00045
Total	0.001743	Total	0.000901

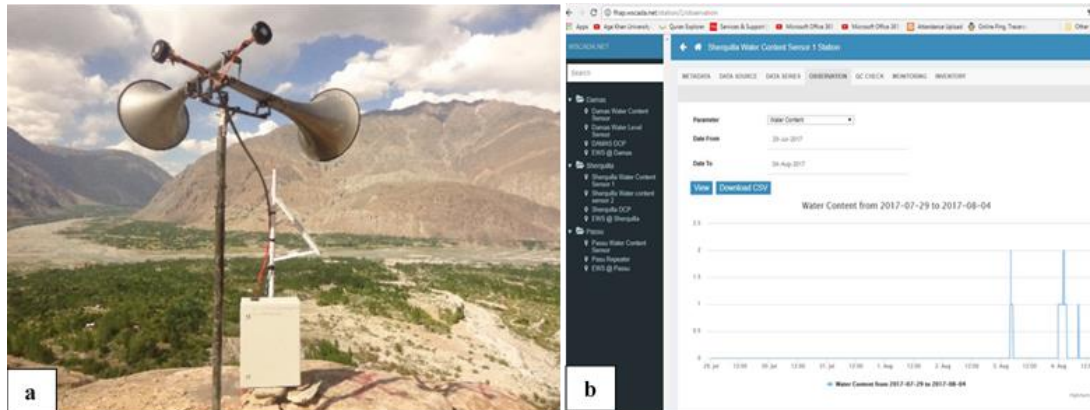


Fig. 9. a) A view of the siren system with ARTU. b) A screen shot of online portal indicating the trigger of siren on 3rd August 2017. Photo Credit: AKAH

AKAH interventions

Sherqilla village is one of the vulnerable villages of district Ghizer exposed to multi-hazards, debris flow and flashfloods being the dominant hazards. Soon after the flood AKAH Pakistan provided food and non-food items to the affected people and gave makeshift shelters to live. It was a challenge to regulate the stream of the intensive debris flow. Prior to this intervention the flow of debris has been freely spreading across the debris fan, damaging forest, agricultural land, houses, and other infrastructures. In 2017-18 mitigation work was initiated with the help of local government authorities, AKAH Pakistan spent around 9million PKR on excavation of channel to give a proper route to debris flow. While the government paid the compensation of the land to make it a successful pilot intervention.

AKAH Pakistan, WWF and GBDMA signed a tripartite agreement in June 2016 for co-implementation of “Installation of 2 Early Warning Systems” in flood prone areas of district Ghizer. In the same year after connection during monsoon a flashflood event occurred from Derani nala of Sherqilla during the night at around 4am as shown on Fig. 9b. It however did not damage any house but caused minor damages to irrigations channels, link roads, orchards, and trees. People timely evacuated to safer areas after the trigger of the early warning. The timely dissemination of early warning and evacuation of the people is a success story and vouch the success at Sherqilla.

Conclusion

The unusual debris flow event occurred at Sherqilla in the month of April triggered by erratic rain, which was one of its kind in the region. Such events cannot be ignored in future with changing climate. This combined effort by AKAH, government and local community reflect the risk management initiatives in terms of pilot mitigation and installation of early warning system. These initiatives provided the platform for upscale the early warning mechanism and experimental mitigation in the Gilgit-Baltistan which can be replicated in regional countries.

Acknowledgements

The authors would like to thank Nawab Ali Khan (CEO), Salman Shan (EM Head) and Dr. Nazir Ahmed (RPM) of Aga Khan Agency for Habitat (AKAH), Pakistan for encouraging us for this research work. We are especially thankful Syed Kamal Shah of PMD for providing weather data, Anila Sadar for analysis of WMPs data and Amir Ali for preparing GIS maps.

References

- Ali A, 2020. Sounding the bell: How the Community Based Flood Early Warning System is saving lives in Gilgit-Baltistan, 2nd April, ICIMOD staff article, www.icimod.org.
- Barenstein DJE. 2015. Continuity and change in housing and settlement patterns in post-earthquake Gujarat, India. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment* 6: 140–155.
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., Jakob, M., 2014. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *J Hydrol* 518, Part B, 194–205.
- Borga, M., Boscolo, P., Zanon, F., and Sangati, M.: Hydrometeorological analysis of the August 29, 2003 flash flood in the eastern Italian Alps, *J. Hydrometeorol.*, 8, 1049–1067, 2007.
- Beniston, M., 2009. Trends in joint quantiles of temperature and precipitation in Europe since 1901 and projected for 2100. *Geophys. Res. Lett.* 36, L07707.
- Beniston, M., Stoffel, M., Hill, M., 2011. Impacts of climatic change on water and natural hazards in the Alps: can current water governance cope with future challenges? Examples from the European ACQWA project. *Environ. Sci. Policy* 14, 734–743.
- Chang H, Franczyk J, Kim C. 2009. What is responsible for increasing flood risks? The case of Gangwon Province, Korea. *Natural Hazards* 48: 339–354.
- Dowling C, Santi P (2014) Debris flows and their toll on human life: a global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011. *Nat Hazards* 71:203–227.
- Easterling DR, Meehl GA, Parmesan C, Changnon SA, Karl TR and Mearns LO (2000) Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science* 289: 2068–2074.
- Evans, S.G., Clague, J.J., 1994. Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments. *Geomorphology* 10, 107–128.
- Fowler AM, Hennessy KJ (1995) Potential impacts of global warming on the frequency and magnitude of heavy precipitation. *Natural Hazards* 11: 283–303.
- Fowler HJ, Kilsby CG (2003) A regional frequency analysis of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000. *International Journal of Climatology* 23: 1313–1334.
- Georgakakos, K. P.: On the design of national, real-time warning systems with capability for site-specific, flash-flood forecasts, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 67, 1233–1239, 1986.
- Giorgi, F., Im, E.S., Coppola, E., Diffenbaugh, N.S., Gao, X.J., Mariotti, L., Shi, Y., 2011. Higher hydroclimatic intensity with global warming. *J. Clim.* 24, 5309–5324.
- Goudie, A.S. et al. (1983). *The Geomorphology of the Hunza Valley, Karakorum Mountains, Pakistan*. In the *Int. Karakorum Project*, Vol. 2, ed Miller, K.J. Cambridge University Press.
- Gobiet A, Kotlarski S, Beniston M, Heinrich G, Rajczak J, Stoffel M (2013) 21st century climate change in the European Alps – A review. *Science of the Total Environment*, in press.
- Haerberli, W., Wegmann, M., Vonder Muhll, D, 1997. Slope stability problems related to glacier shrinkage and permafrost degradation in the Alps. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 90, 407–414.
- IPCC (2012) *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. A special report of working group I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge UK
- IPCC (2013) *Summary for Policymakers*. Working Group, I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Iverson R (1997) The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics* 35: 245-296.
- Jamil, A., Khan, A. A., Bayram, B., Iqbal, J., Amin, G., Yesiltepe, M., & Hussain, D. [2019]. Spatio-temporal glacier change detection using deep learning: a case study of Shishper Glacier in Hunza. *International Symposium on Applied Geoinformatics*, 5.
- Kleinen, T., Petschel-Held, G., 2007. Integrated assessment of changes in flooding probabilities due to climate change. *Climatic Change* 81, 283–312.

- Marra, F., Nikolopoulos, E.I., Creutin, J.D., Borga, M., 2016. Space–time organization of debris flows-triggering rainfall and its effect on the identification of the rainfall threshold relationship. *J. Hydrol.* 541, 246–255.
- Matthews JA, Dahl SO, Dresser PQ, Berrisford MS, Lie O, Nesje A and Owen G (2009) Radiocarbon chronology of Holocene colluvial (debris-flow) events at Sletthamn, Jotunheimen, southern Norway: A window on the changing frequency of extreme climatic events and their landscape impact. *The Holocene* 19: 1107–1129.
- Melillo, M., Brunetti, M.T., Peruccacci, S., Gariano, S.L., Guzzetti, F., 2014. An algorithm for the objective reconstruction of rainfall events responsible for landslides. *Landslides* 1–10.
- Nikolopoulos, E.I., Crema, S., Marchi, L., Marra, F., Guzzetti, F., Borga, M., 2014. Impact of uncertainty in rainfall estimation on the identification of rainfall thresholds for debris flow occurrence. *Geomorphology* 221, 286–297.
- Nash, D., Brunsten, D., and Hughes, R. (1985). A Catastrophic Debris Flow Near Gupis, Northern Areas, Pakistan. International Conference on Soil Mechanics and Foundation
- O'Connor, J.E., Costa, J.E., 1993. Geologic and hydrologic hazards in glacierized basins in North America resulting from 19th and 20th Century global warming. *Natural Hazards* 8, 121–140. initiation in the Dolomite Alps of northeastern Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16, 509–528.
- Rasul, G, Din, K., S. Tariq, A. Mahmood 2014, Temperature and Precipitation: GLOF Triggering Indicators in Gilgit-Baltistan, Pakistan. *Pakistan Journal of Meteorology*, Vol. 10, Issue 20: Jan, 2014
- Starkel L (1979) The role of extreme meteorological events in the shaping of mountain relief. *Geogr Pol* 41:13–20
- Salvati, P., Bianchi, C., Rossi, M., Guzzetti, F., 2010. Societal landslide and flood risk in Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10, 465–483.
- Stoffel M, Bollschweiler M, Widmer S and Sorg A (2010) Spatiotemporal variability in debris-flow activity: A tree-ring study at Geisstriftbach (Swiss Alps) extending back to AD 1736. *Swiss Journal of Geosciences* in press.
- Sweeney, T. L.: Modernized areal flash flood guidance, NOAA Technical Report NWS HYDRO 44, Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, MD, October, 21 pp. and an appendix, 1992.
- Stoffel M, Beniston M (2006) On the incidence of debris flows from the early Little Ice Age to a future greenhouse climate: A case study from the Swiss Alps. *Geophys Res Letter* 33, L16404
- Tomczyk, A. M., & Ewertowski, M. W. [2017]. Surface morphological types and spatial distribution of fan-shaped landforms in the periglacial high-Arctic environment of central Spitsbergen, Svalbard. *Journal of Maps*, 13(2), 239–251.
- Tripathi R, Sengupta SK, Patra A, Chang H, Jung IW. 2014. Climate change, urban development, and community perception of an extreme flood: a case study of Vernonia, Oregon, USA. *Applied Geography* 46: 137–146.
- UNISDR, 2009. Terminology for Disaster Risk Reduction. <https://www.undrr.org/terminology> (last visited Oct 05, 2020).
- Underwood, S.J., Schultz, M.D., Berti, M., Gregoretti, C., Simoni, A., Mote, T.L., Saylor, A.M., 2016. Atmospheric circulation patterns, cloud-to-ground lightning, and locally intense convective rainfall associated with debris flow.
- Winter MG, Dent J, Macgregor F, Dempsey P, Motion A, Shackman L (2010) Debris flow, rainfall, and climate change in Scotland. *Q J Eng Geol Hydroge* 43:429–446.



Glacier hazard associated with surging glaciers – story of the Shishper Glacier from Hunza, Pakistan

D. Karim¹, I. Karim¹, W. Anwar¹, K. Uddin¹, A. Ali¹, D.R. Gurung²

¹Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in Pakistan, Gilgit, Pakistan,
deedar.karim@akdn.org

²Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, Dushanbe,
Tajikistan

Abstract. Glaciers in Karakoram like Khurdopin, Shishper and Gulkin are exhibiting surging phenomenon as a result of which hazard like Glacial Lake Outburst Flood (GLOF), flood and debris flow are real. The Shishper glacier which started surging from January 2018 till August 2019 covered around 2500m in total and achieved maximum average surge rate of 36m per day between 21st May to 25th June 2018. The surging glacier damaged newly constructed irrigation channel for hydro-electric generation unit due to which power shortfall was observed in central & lower Region of Hunza. In addition, intake-irrigation channel and drinking water supply for central Hunza was also damaged which created drought like situation, drying up thousands of orchards impacting livelihood of local community. The surging Shishper glacier blocked Muchowar valley in mid-November 2019 and resulted in formation of glacial lake which breached through a gradual release in June 2019 and January 2020 causing medium level flooding. The flood event of 23rd June 2019 resulted in estimated discharge of 3500cusecs which is thrice the peak discharge in summer. The flood event was much smaller than expected which may be due to low temperature during the months. With the ice mass from the surge still intact the problem is far from over. The cycle of lake formation and release of water could likely repeat again in future and regular monitoring of situation is important.

Key words: surging glacier, GLOF, Karakorum, Shishper, glacier dammed lake

Cite this article: Karim D., Karim I., Anwar W., Uddin K., Ali A., Gurung D.R. Glacier hazard associated with surging glaciers – story of the Shishper Glacier from Hunza, Pakistan. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 234–245.

Гляциальные опасности, связанные с пульсирующими ледниками, – история ледника Шишпер (долина р. Хунза, Пакистан)

Д. Карим¹, И. Карим¹, В. Анвар¹, К. Уддин¹, А. Али¹, Д.Р. Гурунг²

¹Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Пакистане, Гилгит, Пакистан,
deedar.karim@akdn.org

²Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, Душанбе,
Таджикистан

Аннотация. Ледники в Каракоруме, такие как Хурдопин, Шишпер и Гулкин, имеют пульсирующий характер. В результате, здесь существует реальная угроза прорывных паводков, наводнений и селевых потоков. В результате очередной пульсации ледника Шишпер, длившейся с января 2018 г. по август 2019 г., площадь ледника увеличилась на 2500 м. Средняя максимальная скорость подвижки достигала 36 м в сутки и наблюдалась с 21 мая по 25 июня 2018 г. Пульсация ледника повредила недавно сооруженный ирригационный канал ГЭС, из-за чего в центральной и нижней частях долины р. Хунзы наблюдались перебои с подачей электроэнергии. Кроме того, был поврежден водозаборный ирригационный канал и

прервана подача питьевой воды в центральную часть долины р. Хунза, что создало близкую по своим последствиям к засухе обстановку: пострадали тысячи фруктовых садов, что отрицательно сказалось на жизнеобеспечении местного населения. Пульсация ледника Шишпер в середине ноября 2019 г. привела к перекрытию долины р. Мучовар и образованию ледниково-подпрудного озера, которое прорывалось в июне 2019 и январе 2020 гг., вызвав тем самым наводнение среднего уровня опасности. Паводок 23 июня 2019 г. имел расход около 3500 м³/с, что в три раза превышало пиковый летний расход реки. Паводок оказался намного меньше, чем ожидалось, что может быть связано с низкой температурой в течение месяцев. С учетом того, что ледяная масса все еще остается в долине, проблема далека от решения. Цикл формирования озера и сброса воды из него, вероятно, может повториться в будущем, и регулярный мониторинг ситуации имеет большое значение.

Ключевые слова: пульсирующий ледник, прорыв ледникового озера, Каракорум, Шишпер, ледниково-подпрудное озеро

Ссылка для цитирования: Карим Д., Карим И., Анвар В., Уддин К., Али А., Гурунг Д.Р. Гляциальные опасности, связанные с пульсирующими ледниками, – история ледника Шишпер (долина р. Хунза, Пакистан). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 234–245.

Introduction

Global climate change is evident from receding glaciers that will have effects on downstream communities. Changes in cryosphere and corresponding impacts on physical conditions across high-mountain system is the most directly visible phenomena induced by global warming. This is also one of the primary reasons why glacier observations have been used for monitoring climate system for many years [Haberli 1990; Dyhrenfurth, 1955] was probably first to coin the term The Third Pole for the Hindukush, Karakorum Himalayan (HKH) region since it has the highest concentration of snow and glaciers outside the polar regions. Although global climate change is inducing glaciers retreat in general, some of the Karakorum glaciers are indeed surging. Hewitt, 2005 reported that most glaciers of the Karakoram Himalaya which receded from 1920s to early 1990s began surging in the late 1990s. [Copland et al., 2011] also came across various surge type glaciers during his study in Karakoram region. The Karakoram glaciers have received substantial scientific attention because of the anomalous regional mass balance [Kääb et al., 2015] and the large number of surging glaciers [Paul, 2015].

Typically, there are two phases in surging glacier having a certain year cycle. Active phase of glacier surge is characterized by large amounts of ice rapidly (by a factor of ten or more compared to normal flow velocities) gets transported from higher accumulation zone to a lower frontal area. It is followed by quiescent phase when ice flow slows or becomes stagnant allowing ice to melt over years to decades in the new ablation area while new snow and ice accumulate in the reservoir area, building up mass for a possible next surge [Jiskoot, 2011]. Downstream implications associated with surging glaciers are thoroughly discussed by [Kreutzmann, 1994; Iturrizaga, 1996, 1997]. Although these glaciers serve as important water resource for irrigation purposes, but dynamism of glacier terminus and associated floods possess threat to downstream villages. Most common phenomena associated with surging glacier activity is glacier-dammed lake and subsequent sudden release of lake water in a form of GLOFs. Glacier-dammed lakes are comparatively short-lived and often exists only for several months or years catastrophically draining ultimately. The lakes generally empty during summertime when meltwater discharge high [Iturrizaga, 2005].

Surges of Shishper Glacier have been documented since 1892–93 and the recent surges occurred in 1974 [Conway, 1894; Mason, 1930; Goudie, 1984; Hewitt, 2014]. During the surge events the lower tongue pushed further into the valley and blocked the proglacial flow of

Muchowar Glacier on several occasions resulting in an ice-dammed lake. Similar situation was observed and well documented in case of Khurdopin Glacier [Quincey and Luckman, 2014] and Kyagar Glacier [Round et al., 2017]. Sudden release of Shishper Lake had caused destruction of infrastructure in the downstream and threat still looms large. This article presents timeline of most recent surge event, monitoring of lake and subsequent outburst that resulted in destruction.

Study area

Hasanabad is resourceful village located adjacent to Aliabad town of Hunza district and at ~95km from Gilgit city. The studied Shishper glacier is located 5km NE of Hasanabad. The perennial Hasanabad stream originates from Muchowar and Shishper valley. Shishper glacier is one of the surging type glaciers mostly fed by the snow avalanches through the rugged mountain topography. Six tributary glaciers are contributing to this glacier, the main trunk has a length of around ~14.5 km with a catchments area of 110 km² and total of 344 km² including Muchowar valley. Hasanabad stream has a history of floods and GLOF events from surging of glacier of both glaciers in the valley. The study area is important from the point of electricity generation for Hunza Valley (Hasanabad power complex: 1200 KW (Phase-I, 200KW (Phase-II, and 500KW (Phase-III). The elevation ranges within the watershed from 2000 to 7,700m.a.s.l. While the mean annual precipitation is 125 mm and average temperature is 11 °C [Shah et al., 2019].

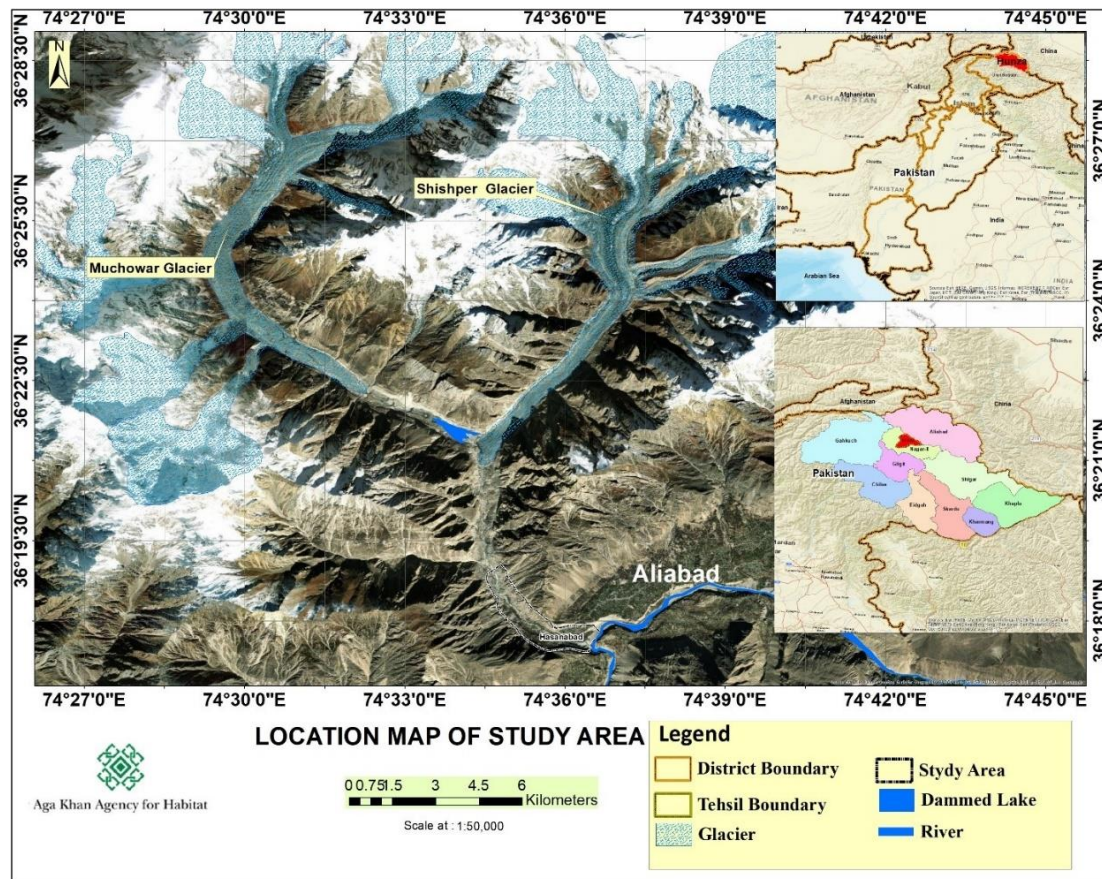


Fig. 1. Location map of study area of Shishper Glacier

Brief review of the problem

Shishper glacier has a long history of surging since the 1892–93 and the recent surges occurred in 1974 [Conway, 1894; Mason, 1930; Goudie, 1984; Hewitt, 2014]. However, in last surge both Muchowar and Shishper came in contact and space was not available to form lake,

but still flood occurred, and one person lost his life. The advance and retreat cycle for Shishper glacier is ~45 years (personal communication with local community) 20 years for Khurdopin [Hewitt and Liu, 2010; Quincey & Luckman, 2014], and 8 years for Gulkin (personal communication with local community). Probably there is a link between glaciers length, catchments area and weather that effect the flow cycle. [Falátková, 2016] assessed 38 cases of GLOF event due to breach of moraine dam across the Himalaya and reported ice avalanche falling into the lake (34%), hydrostatic pressure as a result of the lake level rise (20%), and melting of dead ice (14%) as three most common causes of GLOF in Asia. In case of Shishper, hydro-static pressure played a key role in release of the lake through the sub-glacial conduit, as active surge had impeded sub-glacially flow of water.

In the Karakoram and Hindukush Mountains, a seasonal pattern dominates the outburst chronologies. The failures of ice-dammed lakes mostly occurred between July and August during the time of the highest discharge and temperature. Most of the dams fail periodically with irregular possible return intervals of about 1-2 years. The lakes often drain in successive years due to internal changes in the ice barrier itself [Iturrizaga, 2005]. The Shishper lake emptied gradually through scrupulous release between 17th and 23rd June with high flood level of ~3500cuses as recorded at KKH bridge by AKAH on mid night of 22nd June 2019. It again formed in 1st week of October which drained in 3rd week of January 2020 when temperature was cold, a unique outburst case in winters. The Shishper lake drained with a discharge of 142 m³/s between 22–23 June 2019 as reported by the Pakistan Meteorological Department. [Hussain, 2018] stated that there is chance of drainage of the glacier dammed lake slowly through crevasses in summer season. The glacier dammed area has slope between 5-25° while upstream area where lake has formed has slope greater than 25°. This shows that the pressure of lake water on glacier blockage may have increased by day as water level/volume increased. The lake started to form again in October 2019 when temperature was below freezing, though the reservoir volume decreased due to the reduced height (10m) of the glacier (AKAH revised report 25th Dec 2019). According to [Rasul et al., 2011] huge amount of water was stored under snout of many glaciers during super floods of 2010 especially in case of Booni and Passu glaciers which caused mysterious outbursts in the past. A GLOF in month of January 2008 from Passu glacier was recorded with warm and muddy water, it was unique case of GLOF in winters and surprise for general and scientific community. Similar phenomenon occurred between 14th-18th January 2020 from Shishper and proglacial lake drained with maximum discharge ~1000 m³/sec and without damages.

Surging glaciers pose great threat to downstream communities, infrastructure, habitat, lives & livelihoods. If the glacier advances across river valleys it forms an ice-dammed lake with potential of devastating outburst floods [Ashraf et al., 2012; Quincey et al., 2014; Round et al., 2017; Steiner et al., 2018; Bhambri et al., 2019]. During the glacier surge it had damaged the under-construction channel and intake chamber of new hydropower, both channels and two intakes of water channel for Aliabad, and suspension bridge and pipeline ride over. In flood event of June 2019 intakes of hydropower station, channels, link road, KKH, agricultural land on both sides of stream eroded. [Hewitt et al., 2019] suggest that, monitoring of glacier surges, ice-dammed lake formation and drainage is essential. AKAH followed the same and monitored glacier both on ground, through drones and aerially in critical time.

Method and data

The Shishper glacier and formation of lake was brought to our notice by the local community. Immediately AKAH fielded experts from and visited Shishper glacier on 23rd November 2018 to assess the situation. The team interacted and interviewed local community members about the history of the surge, past GLOFs and damages. A detail report was prepared highlighting the possible future scenarios. Furthermore, benchmarks were signposted through color with numbers in field, and GPS coordinates were taken to measure the rate of surge of the glacier.

The GIS experts have developed temporal map of study area using Sentinel-2 and Landsat images. Online historical images were downloaded from land viewer

(<https://eos.com/landviewer>). Using ArcGIS software, the experts developed temporal maps for measuring movement of glacier and changes in size of the lake over the time.

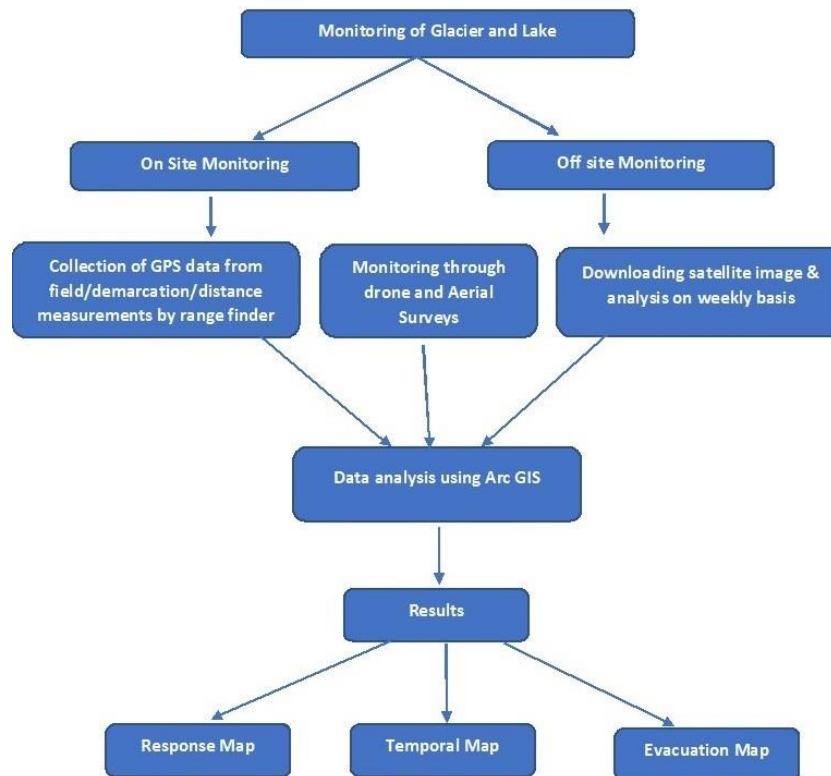


Fig. 2. Flow chart showing methodology adopted for the research work

Ground monitoring

During the initial assessment in mid-November benchmarks were established on visible features like boulders, walls of irrigation channel, bridge, and intake chambers with the distance measurements. By recognizing the relative positions of these “natural benchmark” a vector computation is possible allowing measuring local glacier displacements, limited only by the number of recognizable features. The glacier displacement was measured according to the new approach, already tested on Liligo Glacier in Karakoram, Pakistan [Diolaiuti *et al.*, 2003]. The dimensions were measured through the range finder from the same targets and rate of glacier surge calculated. Measurement of glacier front usually are based on repeat surveys (often along predefined bearings) from a reference point placed at a certain distance from the glacier, in order to measure fluctuations in time [Bonardi *et al.*, 2006]. Moreover, repeat photography by digital camera were deployed to visualize the changes and fluctuations in the trunk of glacier, and height of snout was analyzed using basic trigonometry considering angle from reference point to the top of the glacier snout measured with inclinometer. The discharge measurements were done using flow meter. The monitoring was made on weekly, biweekly, and monthly basis. However, visiting the glacier regularly by experts was not possible from Gilgit, therefore Community emergency response teams (CERTs) were trained on the monitoring of the glacier and equipment were provided for twice a week monitoring.



Fig. 3. a) Frontal view of snout and marked boulders for monitoring rate of glacier surge. b) CERT team taking measurements from the benchmarks during the training. c) AKAH geologist measuring velocity of water near snout by velocity meter while CERT team observing. Photo credit AKAH Pakistan

Monitoring through UAVs, remote sensing and aerial surveys

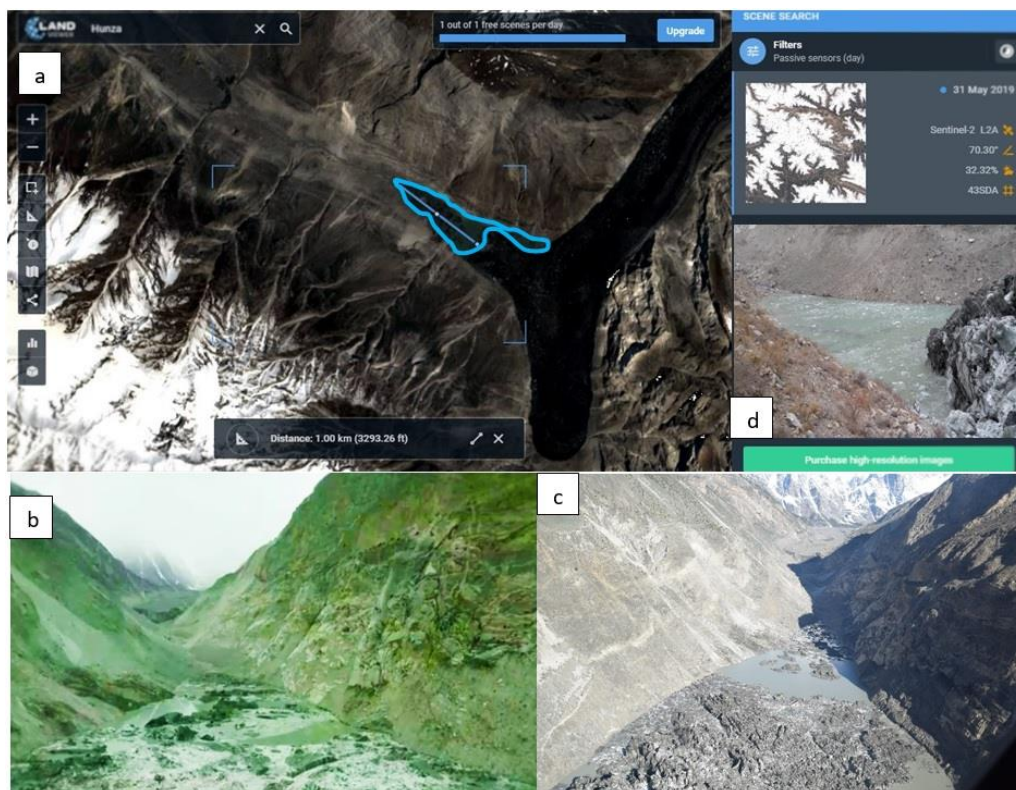


Fig. 4. a) Sentinel-2 L2A Image as of 31st May 2019 showing lake. b) Drone Image of Shishper glacier dammed lake taken on 20th May 2019. c) Aerial borne picture of lake taken on 25th May 2019. d) Image of developing lake on 25th November 2018 taken by Sher Khan tours & tracking expert from Aliabad Hunza

With the passage of time the glacier was growing laterally and vertically both upstream towards the Muchowar valley pushing the lake water and downstream to Hasanabad village. [Chang-chun *et al.*, 2011] mentions that as an important way of obtaining spatial data, UAV remote sensing has the following advantages: real-time measurement, flexibility in usage, high-resolution, low costs, and easy to collect data in unfavorable environmental conditions. With advancing of the glacier downstream the accessibility of the lake was not possible, so the only option to assess the lake was through UAVs and remote analysis of the satellite images.

Drone such as DJI Phantom4 from Gilgit Baltistan Disaster Management Authority (GBDMA) and DJI Mavic by Frontier Works Organization (FWO) were utilized for the remote assessment and monitoring of the glacier and dammed lake on weekly and bi-weekly basis. Land viewer based weekly images were another source of remote monitoring analysis of the notorious glacier and lake.

Analysis and results

Surge process and chronology, rate of lake growth

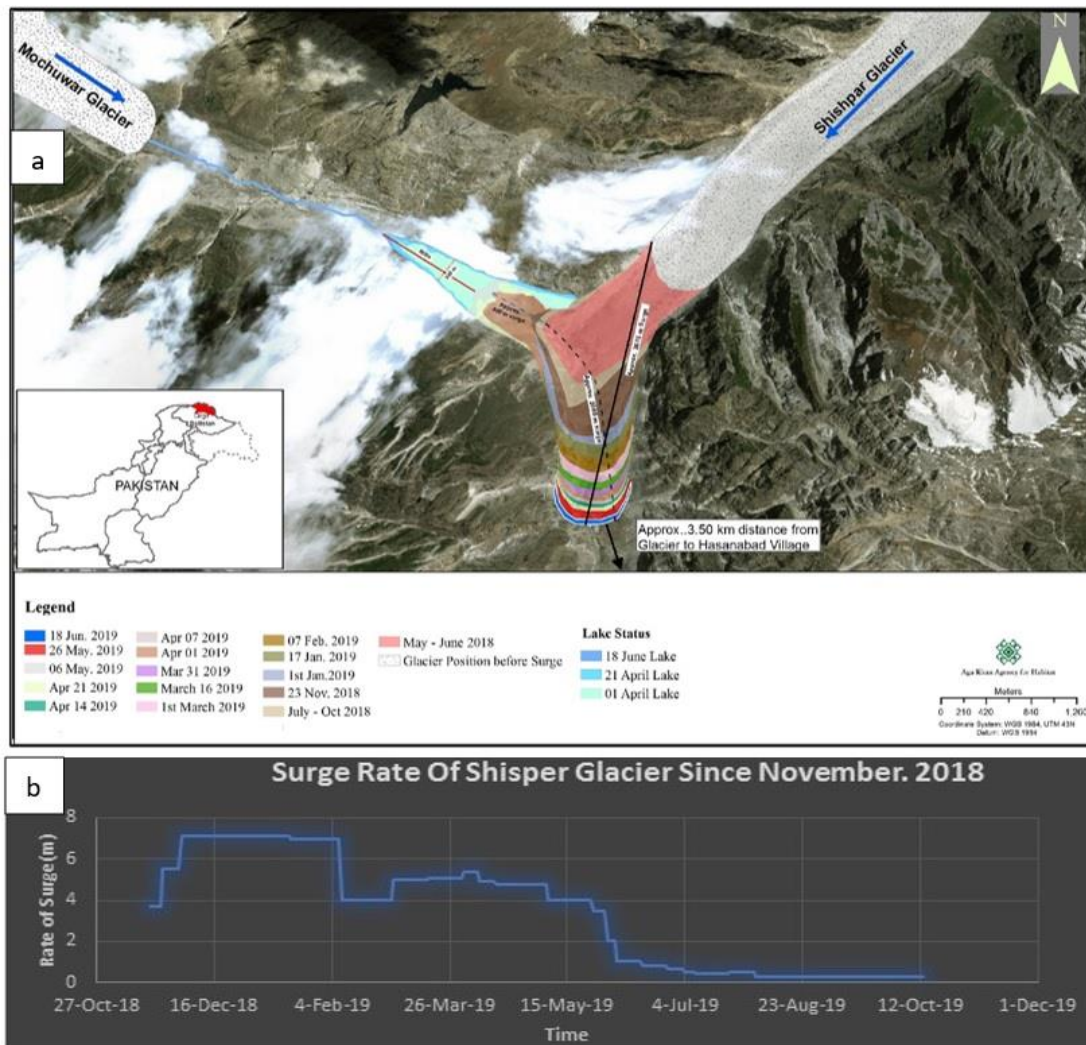


Fig. 5. a) Temporal map of Shishper glacier by AKAH show the surging of glacier and lake development over the time. b) Graph indicates rate of surge of Shishper glacier over the time. Data by AKAH

Ground surveys and maps advocated that the two tributaries Shishper and Muchowar glaciers retreated and had separated into distinct glaciers by 1954 [Paffen *et al.*, 1956; Hewitt *et al.*, 2019]. As a result of surge of Muchowar both glaciers met again before 1972, however local community witnessed that both glaciers connected in 1974 with no lake formation.

Shishper glacier was surging at a rate of 36m/day between 21st May- 25th June 2018 with a surge of ~1100m in 30th days. The glacier hit the opposite rocky mountain perpendicular to the direction of moving glacier on 17th November 2018, blocked the Muchowar valley forming a glacier dammed lake. After blockage in last week of November average rate of surge was 3.7m/day. The movement gradually increased with average rate peaking at 7m/day in Jan-Feb 2019, which declined sharply to 4m/day in March probably due to increased size of the basin. From mid-March again increase in movement noticed till 7th April, further the average rate steadily declined and reached ~1m/day as shown in Fig. 5b before the GLOF eventually happened. From May 2018-June 2019 the glacier has covered around 2.5-3 km, on the other hand it has pushed the lake ~600m towards the Muchowar glacier.

Failure process

Commonly glaciers experience a variety of trigger mechanism, such as surge waves due to avalanches and rock fall into the lake, moreover, calving of glacier, landslides and slope failures. Failure of subglacial and ice-dammed lake drainage through the progressive enlargement of subglacial channels due to frictional shear and erosion is also common [Nye 1976; Clarke, 1982]. Shishper glacier unlike Khurdopin glacier which drained when temperature increased in March, continued to surge with average rate of 5m/day, choking, blocking and release water in the form of minor floods. On the other side, water fluctuation in the stream was also experienced and minor flood on 11th June with 1100 cusecs of discharge. Partly cloudy weather condition from 20th May to 14th June 2019 created cooling effect and delayed the release of water. Finally sub glacial flow between 17th-23rd June 2019 occurred with peak flood recorded on mid night of 22nd June reflected on graph in Fig. 7. Reductions in temperature and increase in moisture and cloudiness, when coupled with the reductions in insolation in the ablation zone of the glacier can have a cooling effect, with decreased river runoff being the natural consequence [Fowler and Archer., 2004, 2006; Tahir et al., 2011; Forsythe et al., 2017; Bashir et al., 2017].

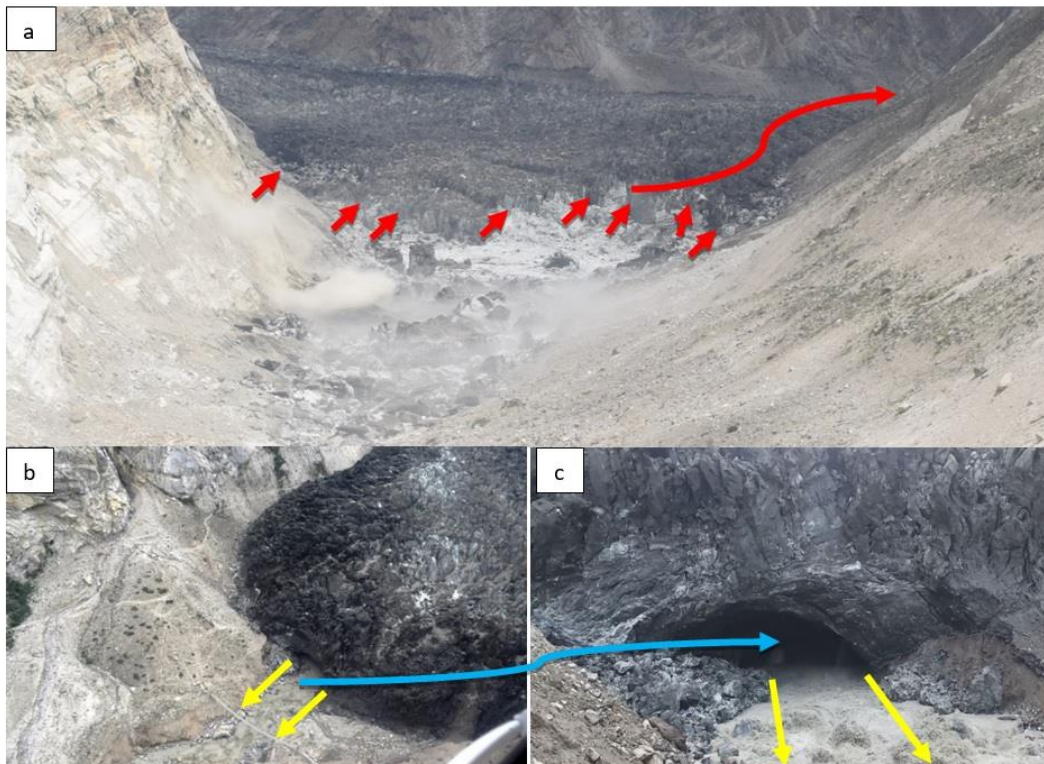


Fig. 6. a) Aerial picture taken on 23rd June 2019 downstream view of released dammed Lake from Muchowar glacier after release of water from the lake on with crevasses and openings. b) Airborne view of glacier outlet. c) Front view of outlet taken from the suspension bridge. Photo Credit AKAH Pakistan

Impact of surging glacier on downstream

During the rapid surge Shishper glacier engulfed ~850m channel section and intake chamber of newly constructed power station and intake. It also damaged segment of Aliabad-Hyderabad irrigation channel which was the only water supply source for ~5 Km² agricultural area of upper portion of Aliabad, Dourkhun and Hyderabad. Many trees in upper reaches which was over 30years old dried due to damage of channel and drought like situation. Moreover, 300meter pipeline of drinking water supply and suspension bridge were damaged. Blockage of water by the glacier also severely affected the hydro-power generation during the winters.

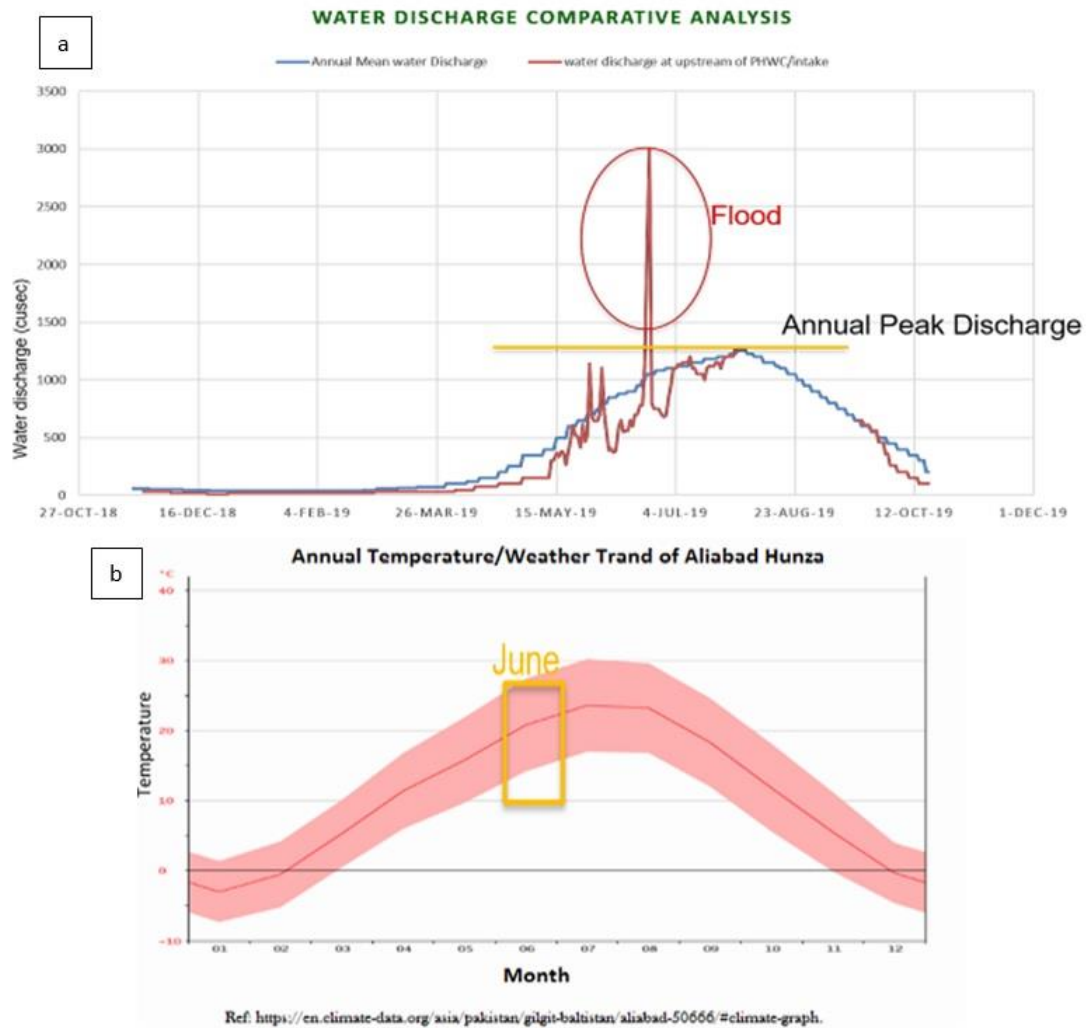


Fig. 7. a) Blue line in graph indicates the monthly mean discharge while the red line shows the normal and flood peak discharge data by AKAH Pakistan. b) Temperature trend for Central town of Hunza Aliabad by as recorded by Pakistan Meteorological Department (PMD)

Water release started from 17th June 2019 onwards and gradually increased continuously till 21st June, the flood peak discharge recorded at mid night of 22nd June which chronicled above 3000 cusecs at RCC bridge on KKH as shown in Fig. 7a. The flood discharge was estimated thrice of annual average peak water discharge of the stream, and eroded both banks of Hasanabad stream, damaged four irrigation channels, drinking water supplies, water channel of Hasanabad powerhouse, newly constructed retaining wall just upstream of the RCC bridge were completely damaged and 50 cattle's swept away. Agricultural land eroded on both side of the nullah due to this erosion and collapse caused blockage of KKH at two locations.

AKAH's interventions

Since the formation of lake in mid-November 2018, AKAH Pakistan closely monitored Shishper glacier through on-site field assessment, monitoring through benchmarks, repeat photography and remote sensing using free source latest satellite images of Landsat-8 and Sentinel-2L.

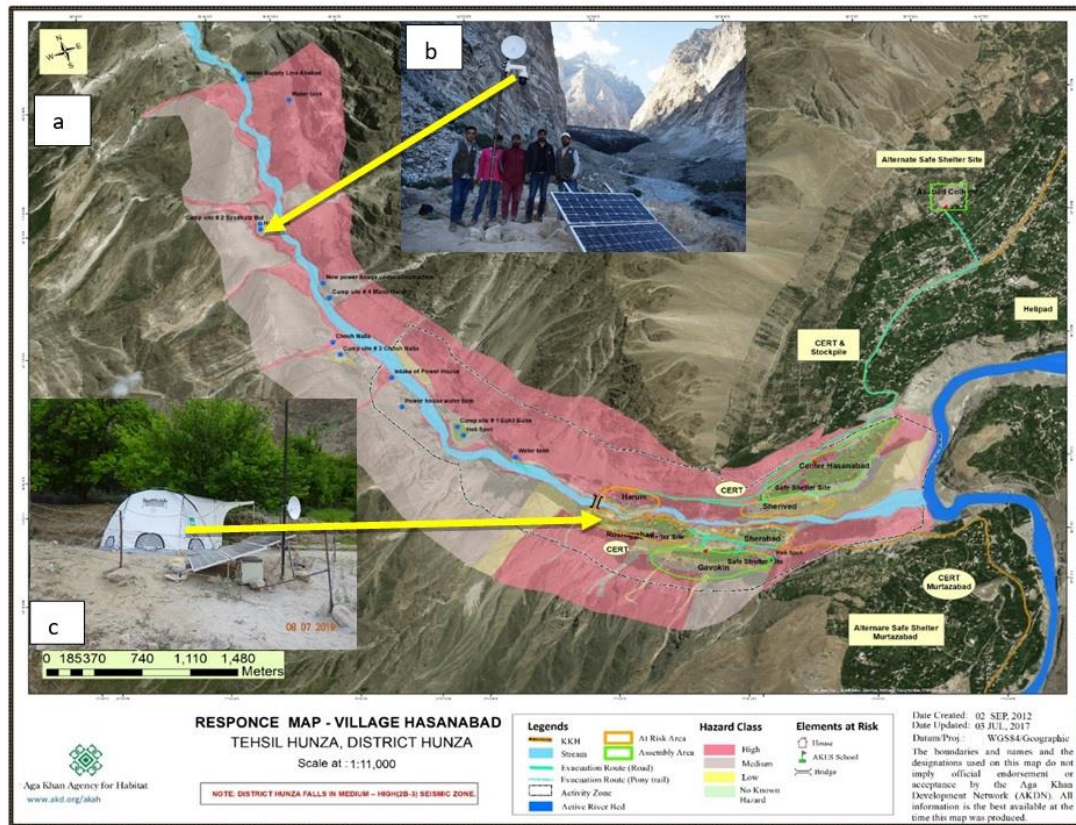


Fig. 8. a) Response map for Hasanabad considering GLOF, green areas identified as safer area, orange polygons are the vulnerable settlements, blue line demarcates the evacuation routes. b) The picture above in center shows the CCTC camera. c) Indicates the monitoring camp. Photo Credit AKAH Pakistan

The report with future scenarios was shared with Gilgit-Baltistan Disaster Management Authority (GBDMA), local government and AKDN agencies for further action and monitoring of the surging glacier. AKAH & GBDMA jointly conducted downstream vulnerability assessment, identified safer areas, safe evacuation routes for worst case scenario. The worst-case scenario relates to lake remains intact till May-June 2019 and more catastrophic outburst happens with possibility of overflow of lake coupled with piping resulting higher discharge and damaging flood. Awareness sessions, mock drill completed with the help of local government to prepare community to cope with disaster and follow safe evacuation routes to safer areas if flood happens.

The glacier dammed lake which was monitored through satellite images on weekly basis was not possible due to partly cloudy- cloudy weather conditions between 20th May to 14th June 2019. Aerial survey was conducted on 14th June followed by second aerial mission on 23rd June to see overall situation across the lake and glacier after release of water by sub-glacial flow. It was observed that lake has almost drained out and the Muchowar stream continuously flowing out sub-glacially from Shishper glacier.

With the increasing flood, CERT members were mobilized to monitor water discharge during the peak flood time to ensure quick response in case of any emergency or critical situation. Stockpile which includes all emergency equipment shifted on both sides of Hasanabad to response timely. The threat is not yet over as retreat of the Shishper glacier to it

previous position will take years. Considering the future threat and high probability for reformation of lake, regular monitoring and early warning system are inevitable. Consequently, AKAH installed CCTV based early warning system to give alert to the downstream community in case of flood to save the precious lives and livelihood.

Conclusion

Shishper glacier is a surge type glacier and has history of advancing and retreating cycle. The most recent surge and resultant outburst flooding event reminds us all about the threat that looms large in the highly glacierized terrain. Episodic outflow and timely action by AKAH, GBDMA and local government helped averted major disaster. The involvement of community volunteers in monitoring the situation proves the importance of taking on board communities in disaster risk reduction initiatives. Since the Muchowar glacier remains blocked the possibility of another episode of flood cannot be ruled out. While the threat is not yet over, regular monitoring of the situation is of paramount importance to formulate timely action.

Acknowledgments

The authors would like to thank Nawab Ali Khan (CEO), Salman Shan (EM Head) and Dr. Nazir Ahmed (RPM) of Aga Khan Agency for Habitat (AKAH), Pakistan for their continuous support in overall process from reconnaissance to the final draft. We are especially thankful to GBDMA and FWO for providing the drone images and contribution of Community Emergency Team (CERT) volunteers for monitoring glacier in critical times. We also would like to thank Planet Labs and EOS Land viewer for providing access to their high-resolution imagery.

References

- Ashraf A., Naz R. & Roohi R. (2012) Glacial lake outburst flood hazards in Hindukush, Karakoram and Himalayan Ranges of Pakistan: implications and risk analysis, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 3:2, 113- 132,
- Bhambri, R. et al. Ice-dams, outburst floods, and movement heterogeneity of glaciers, Karakoram. *Glob. Planet. Change* 180, 100–116 (2019).
- Bonardi, L., Catasta, G., Righetti, F., D'Adda, S., 2006. *Manuale di Osservazioni Glaciologiche. I Quaderni del Servizio Glaciologico Lombardo, 5. Servizio Glaciologico Lombardo, Milano, 47 pp.*
- Chang-chun, L.; Guang-Sheng, Z.; Tian-jie, L.; A-du, G., 2011, Quick image-processing method of UAV without control points data in earthquake disaster area: *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* Vol. 21, pp. 523-528.
- Clarke, G.K.C., 1982. Glacier outburst flood from 'Hazard lake', Yukon Territory, and the problems of flood magnitude prediction. *Journal of Glaciology* 28, 3}21.
- Copland, L.; Sylvestre, T.; Bishop, M.P.; Shroder, J.F.; Seong, Y.B.; Owen, L.A.; Bush, A.; Kamp, U. Expanded and recently increased glacier surging in the Karakoram. *Arct. Antarct. Alp. Res.* 2011, 43, 503–516.
- Conway, W. M. *Climbing and Exploration in the Karakoram Himalayas.* (T. Fisher Unwin, 1894).
- Dyhrenfurth, G. O. (1955). *The third Pole – The history of the High Himalaya* (1st UK Edition). London: Ex Libris, Werner Laurie.
- Diolaiuti, G., Pecci, M., Smiraglia, C., 2003. Liligo Glacier (Karakoram): reconstruction of the recent history of a surge-type glacier. *Annals of Glaciology*, 36: 168 – 172
- Falátková, K. 2016. Temporal analysis of GLOFs in high-mountain regions of Asia and assessment of their causes. *AUC GEOGRAPHICA* 51 (2): 145–154.
- Godone D. and Godone F. (2012). *The Support of Geomatics in Glacier Monitoring*:
- Goudie, A. S., Jones, D. K. C. & Brunnsden, D. Recent fluctuations in some glaciers of the Western Karakoram mountains, Hunza, Pakistan. In *The international Karakoram project* (ed. Miller, K. J.) 2, 411–455 (1984).
- Forsythe, N., Fowler, H. J., Li, X.-F., Blenkinsop, S., & Pritchard, D. (2017). Karakoram temperature and glacial melt driven by regional atmospheric circulation variability. *Nature Climate Change*, 7. <https://doi.org/10.1038/nclimate3361>

- Fowler, H. J., & Archer, D. R. (2006). Conflicting signals of climatic change in the upper Indus Basin. *Journal of Climate*, 19(17), 4276–4293. <https://doi.org/10.1175/JCLI3860.1>
- Haeberli, W., 1990. Glacier and permafrost signals of 20th century warming. *Annals of Glaciology*, 14, p 99-101.
- Hewitt, K, 2005. The Karakoram Anomaly? Glacier Expansion and the ‘Elevation Effect,’ Karakoram Himalaya. *Mountain Research and Development* Vol 25 No 4 Nov 2005: 332–340.
- Hewitt, K. and Liu, J.: Ice-Dammed Lakes and Outburst Floods, Karakoram Himalaya: Historical Perspectives on Emerging Threats, *Phys. Geogr.*, 31, 528–551, <https://doi.org/10.2747/0272-3646.31.6.528>.
- Hewitt, K, et.al., 2019. The hazardous 2017–2019 surge and river damming by Shishper Glacier, Karakoram. *Nature Research*, (2020) 10:4685
- Hewitt, K. *Glaciers of the Karakoram Himalaya, Glacial Environments, Processes, Hazards and Resources*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6311-1> (Springer Dordrecht, 2014).30. Meier, M. F. *Surging Glaciers—The Dilemma Continues*
- Hussain, A. 2018. A brief communication of Shishper glacier surge in 2018, Hunza river basin, Pakistan. *International Journal of Advanced Geosciences*, 7 (2) (2019) 124-128
- Iturrizaga, L. (1996): Über das Naturgefahrenpotential für die Hochgebirgssiedlung Shimshal (3080 m), Nord-West- Karakorum. – *Die Erde* 127 (3): 205–220.
- Iturrizaga, L. (1997): The Valley of Shimshal – A Geographical Portrait of a Remote High Mountain Settlement and its Pastures with reference to environmental habitat conditions in the North West Karakorum. – *GeoJ. Tibet and High Asia* IV, 42 (2/3): 305–328.
- Iturrizaga, L. (2005): Historical glacier-dammed lakes and outburst floods in the Karambar valley (Hindukush- Karakoram). *GeoJournal* (2005) 63: 1-47
- Jiskoot, H. Glacier surging. In *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers* (eds. Singh, V.P., Singh, P., Haritashya, U., Käab, A., Treichler, D., Nuth, C., and Berthier, E.: Brief Communication: Contending estimates of 2003–2008 glacier mass balance over the Pamir-Karakoram-Himalaya, *The Cryosphere*, 9, 557–564, <https://doi.org/10.5194/tc-9-557-2015>, 2015.
- Kreutzmann, H. (1994): Habitat conditions and settlement processes in the Hindukush-Karakoram. *Petermanns Geograph. Mitt.* 138 (6): 337–356.
- Mason, K. The glaciers of the Karakoram and neighbourhood. *Rec. Geol. Survey. India* 63, 214–278 (1930). Nye, J. F., 1976. Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels and veins. *Journal of Glaciology*, 17, 181–207.
- Paul, F., Strozzi, T., Schellenberger, T., and Käab, A.: The 2015 Surge of Hispar Glacier in the Karakoram, Remote Sens., 9, 888, <https://doi.org/10.3390/rs9090888>, 2017.
- Paffen, K. H., Pillewizer, W. & Schneider, H. J. *FORSCHUNGEN IM HUNZA-KARAKORUM: Vorläufiger Bericht über diewissenschaftlichen Arbeiten der Deutsch-Österreichischen Himalaya-Karakorum-Expedition 1954. Erdkunde* 1–33 (1956).
- Quincey, D. J. and Luckman, A.: Brief Communication: On the magnitude and frequency of Khurdopin glacier surge events, *The Cryosphere*, 8, 571–574, <https://doi.org/10.5194/tc-8-571-2014>, 2014.
- Quincey, D. J. & Luckman, A. Brief communication: On the magnitude and frequency of Khurdopin glacier surge events. *Cryosphere* 8, 571–574 (2014).
- Round, V., Leinss, S., Huss, M., Haemmig, C., and Hajnsek, I.: Surge dynamics and lake outbursts of Kyagar Glacier, Karakoram, *The Cryosphere*, 11, 723–739, <https://doi.org/10.5194/tc-11-723-2017>, 2017.
- Rasul, G., Q. Z. Chaudhry, A. Mahmood, K. W. Hyder, Qin Dahe. 2011. Glaciers and Glacial Lakes under Changing Climate in Pakistan. *Pakistan journal of Meteorology* Vol8, Issue 15
- Round, V., Leinss, S., Huss, M., Haemmig, C. & Hajnsek, I. Surge dynamics and lake outbursts of Kyagar Glacier, Karakoram. *Cryosphere* 11, 723–739 (2017).
- Shah, A., Ali, K., et al. (2019). Risk assessment of Shishper Glacier, Hasanabad Hunza, North Pakistan, *Journal of Himalayan Earth Sciences* Volume 52, No. 1, pp. 1-11.
- Steiner, J. F., Kraaijenbrink, P. D. A., Jiduc, S. G. & Immerzeel, W. W. Brief communication: The Khurdopin glacier surge revisited - Extreme flow velocities and formation of a dammed lake in 2017. *Cryosphere* 12, 95–101 (2018).
- Tahir, A. A., Chevallier, P., Arnaud, Y., & Ahmad, B. (2011). Snow cover dynamics and hydrological regime of the Hunza River basin, Karakoram range, northern Pakistan. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(7), 2275–2290. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2275-2011>
- The Contribution of Terrestrial Laser Scanner, *Laser Scanner Technology*, Dr. J. Apolinar Munoz Rodriguez (Ed.), ISBN: 978- 953-51-0280-9, InTech



Climatic risks and food security in the Khatlon Region of Tajikistan

A.S. Kodirov^{1,2}, U.A. Alizoda^{1,2}, A.A. Dorgaev^{1,2}

¹*Center for Innovative Development of Science and New Technologies, National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan, as.kodirov@gmail.com*

²*Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology, National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan*

Abstract. This investigation was conducted by support of joint Tajik-China project on “Investigation and study of water resources and utilization in Tajikistan”. Main goal of this Project is hydrological observation, water resources and utilization in Tajikistan. Khatlon Region is an administrative region within the Republic of Tajikistan. One of the three regions of the country, bordered in the north by areas of republican subordination, in the east - with the Gorno-Badakhshon Autonomous Region, in the south - with Afghanistan, in the west - with Uzbekistan. The administrative center is the city of Bokhtar. Khatlon area is 24,600 km², a population of 3,048,200 people (2016 year). The region is located on the southern spurs of Gissaro-Alai, administratively divided into 4 cities and 21 districts. Investigation of climate risks, water resources and food security in the Khatlon Region is very important question. Therefore, authors in this investigation tried to identify climate risks and factors of food security in the Khatlon Region. Investigation shows that for the period 2014-2018, in relation to 2009-2013, the temperature increased in the Khatlon Region to 0.6 °C. the highest temperature increases were observed in the areas of Muminabad, Norak and Dangara. In the mountainous regions of the Khatlon Region, the trend is increasing. For five years (2014-2018 versus 2009-2013), the warming trend in Khatlon Region was 0.7 °C in winter and 1.1 °C in summer.

Key words: *Khatlon Region, climate change, climatic risks, water resources, food security, hydrology, social-economic issues*

Cite this article: Kodirov A.S., Alizoda U.A., Dorgaev A.A. Climatic risks and food security in the Khatlon Region of Tajikistan. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhiyeva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 246–250.

Климатические риски и продовольственная безопасность в Хатлонской области Таджикистана

A.C. Кодиров^{1,2}, У.А. Ализода^{1,2}, А.А. Доргаев^{1,2}

¹*Центр инновационного развития науки и новых технологий Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан, as.kodirov@gmail.com*

²*Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан*

Аннотация. Данное исследование было проведено при поддержке совместного таджикско-китайского проекта «Исследование и изучение водных ресурсов и их использования в Таджикистане». Его основной целью является гидрологический мониторинг, изучение водных ресурсов и их использование в Таджикистане. Хатлонская область является единицей административно-территориального деления Республики Таджикистан. Это одна из трех областей страны. Она граничит на севере с областями республиканского подчинения, на востоке – с Горно-Бадахшанской автономной областью, на юге – с Афганистаном, а на западе – с Узбекистаном. Административный центр – город Бохтар. Площадь Хатлонской области составляет 24 600 км², население – 3 048 200 человек (на 2016 г.). Область

расположена на южных отрогах Гиссаро-Алая, административно разделена на 4 города и 21 район.

Изучение климатических рисков, водных ресурсов и продовольственной безопасности в Хатлонской области является очень важной задачей. Поэтому авторы данного исследования попытались выявить климатические риски и факторы продовольственной безопасности в Хатлонской области. Исследования показывают, что за период 2014-2018 гг., по сравнению с 2009-2013 гг., температура в Хатлонской области повысилась на 0,6°C. Наибольшее повышение температуры наблюдалось в г. Нурек, а также Муминабадском и Дангаринском районах. В горных районах Хатлонской области тенденция возрастает. В течение пяти лет (2014-2018 гг. по сравнению с 2009-2013 гг.) наблюдалась тенденция потепления в Хатлонской области на 0,7°C зимой и на 1,1°C летом.

Ключевые слова: Хатлонская область, изменения климата, климатические риски, водные ресурсы, продовольственная безопасность, гидрология, социально-экономические проблемы

Ссылка для цитирования: Кодиров А.С., Ализода У.А., Доргаев А.А. Климатические риски и продовольственная безопасность в Хатлонской области Таджикистана. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 246–250.

Food security issues have always been relevant to Tajikistan. Over the past two decades, Tajikistan has experienced a sharp increase in the intensity and frequency of extreme weather events. The expected consequences of melting glaciers can lead to a sharp increase in spring floods and other disasters in the short term, and in the long term to a significant reduction in the quantity and quality of water, which will affect agriculture and public health. These effects can potentially increase poverty and reduce a country's GDP.

According to the statistics compilation [*Статистический...*, 2018] for the period 2013-2017, an average of 2.3606 million people was employed in the economy, of which 1.52 million, or 64.4% of the population, were employed in the agricultural sector on average; Of these, about 75.1% are women and 24.9% are men. About 1 million people are constantly at risk of food insecurity and are subject to repeated climatic shocks (Fig. 1).

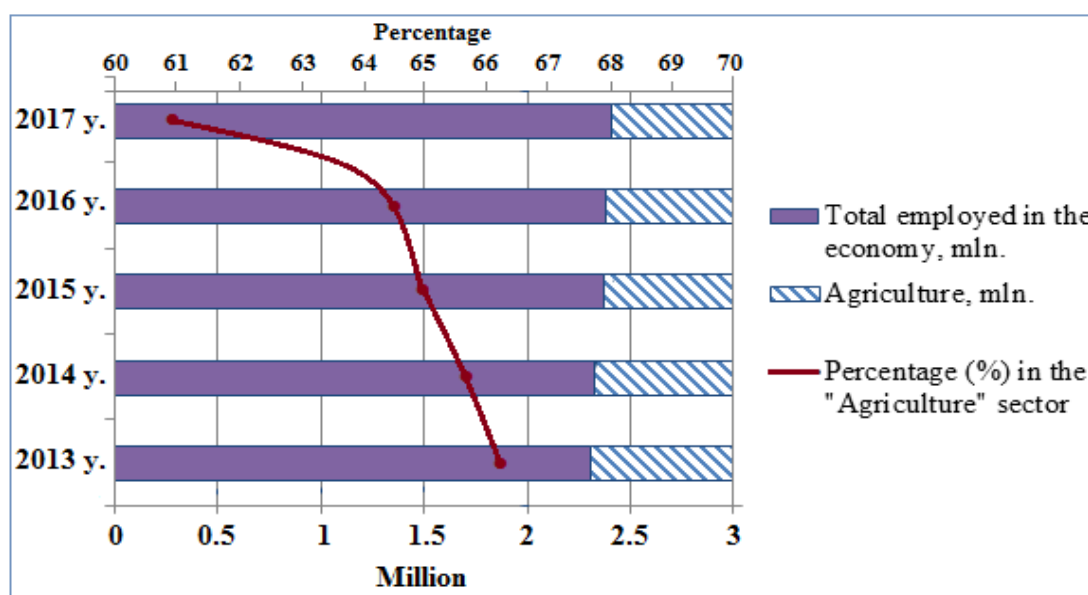


Fig. 1. Statistics of the population employed in the agricultural sector (for the period 2013-2017)

Рис. 1. Статистика населения, работающего в секторе сельского хозяйства (за период 2013-2017 гг.)

There are three main indicators through which it is possible to determine the impact of climate change on people's livelihoods (Fig. 2).

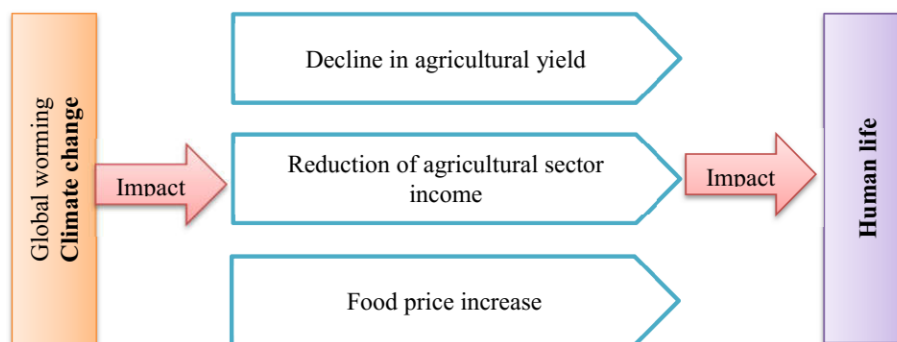


Fig. 2. Main indicators, determining the impact of climate change on people's livelihoods

Рис. 2. Основные индикаторы, определяющие влияние изменения климата на уровень жизни людей

Due to the low socio-economic development, weak mechanisms of the agricultural sector and weak mechanisms of inability to respond quickly to climate change, Khatlon Region is the most vulnerable to regional climate change in the country.

Khatlon Region possesses non-agricultural land such as rocks, talus and other uncomfortable land for use. Soils are almost universally susceptible to erosion processes.

Investigation shows that for the period 2014-2018, in relation to 2009-2013, the temperature increased in the Khatlon Region to 0.6 °C. the highest temperature increases were observed in the areas of Muminabad, Norak and Dangara. In the mountainous regions of the Khatlon Region, the trend is increasing. For five years (2014-2018 versus 2009-2013), the warming trend in Khatlon Region was 0.7 °C in winter and 1.1 °C in summer (Fig. 3).

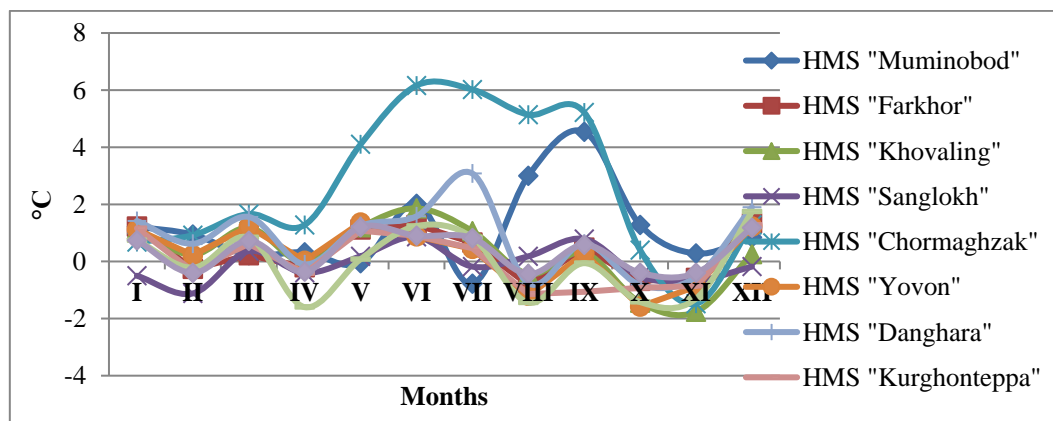


Fig. 3. Changes in air temperature in the Khatlon Region for the period 2014-2018 compared to 2009-2013

Рис. 3. Изменения температуры воздуха в Хатлонской области за период 2014-2018 гг. по сравнению с 2009-2013 гг.

Even today, the agrarian sector of Khatlon Region is facing great difficulties, such as lack of water, low productivity, losses from natural disasters. Unfortunately, this trend in the agricultural sector is increasing. Desertification of land is one of the urgent problems of the Khatlon Region, the reasons for which is a long period of salinization. Also, high air temperatures in the spring and summer led to desertification of the land. The above processes cause an increase in the need for land for irrigation. The traditional (obsolete) irrigation system in the Khatlon Region is one of the greatest challenges to food security.

Natural disasters in Tajikistan over the past 10-15 years have led to the deaths of about 1,200 people, causing damage to over 1 billion somoni [Третье..., 2014].

In total, for the month of May 2019, according to the Ministry of Emergency Situations of the republic, the following districts of the Khatlon Region suffered: Panj, Farkhor, Abdurahmoni Jomi, Khuroson and Vakhsh. At the same time, the elements claimed the lives of four people. The damage from mudflow to the Khatlon Region of Tajikistan was estimated at 19 million 540 thousand somoni for May 16-18 only [Комитет по чрезвычайным...].

Natural hydrometeorological phenomena caused significant damage to the agricultural sector of the Khatlon Region, and created a threat to the safety of the population.

We analyzed the main types of dangerous weather phenomena (high air temperature, fogs, dust storms, haze, strong winds, heavy rainfall) came to the following conclusions:

- The last twenty years have been characterized by elevated temperatures.
- In 1997, in the Shahritus district of the Khatlon Region, 50 days were observed with a temperature of +40°C.
- in 1997, 2002 and 2002, temperatures in the areas of Jaihun, Panj, Shahritus, Jaloliddini Balkhi, Nosiri Khusrav, Qubodiyon were also noted.
- Fogs, storms and fogs that occurred during 2016-2019 hindered the work of transports, contributed to the corrosion of metals (gates, doors) and land erosion.
- Heavy precipitation caused a sharp rise in water in rivers, floods, mudflow leashes and avalanches.

For example, in the summer (June 2, 2019) as a result of torrential rains caused mudflows to flow from foothill areas - the Khuroson district of the Khatlon Region. As a result of the flood, 18 household plots were flooded, one structure was destroyed and the bridge from the village to the Bokhtar-Dushanbe highway was partially destroyed.

Despite the efforts of the government and international organizations, rescue from natural disasters related to water, food risk, sustainable sources of income in the Khatlon Region remains an urgent problem (Table).

Table. Assessment of food security risks and vulnerability to climate change in Tajikistan [*Climate Risks, 2017*]

Таблиц. Оценка рисков продовольственной безопасности и уязвимости к изменениям климата в Таджикистане [*Climate Risks, 2017*]

№	Regions	Regional profile	Food security risk	Climate vulnerability
1	Regions of Republican Subordination	The temperature increased from +0.5°C to +1°C. The income of the population depends on employment opportunities, including agriculture.	- Zone with medium risk; - High risk area.	- Zone with medium risk; - High risk area.
2	Khatlon Region	The temperature increased from +0.5°C to +1°C. The income of the population depends on employment opportunities, agriculture (including livestock).	- Low risk area; - Zone with medium risk; - High risk area.	- Low risk area; - Zone with medium risk; - High risk area.
3	Soghd region	The temperature increased from 0° C to +0.5° C. The income of the population depends on employment opportunities, agriculture (including livestock).	- Low risk area; - High risk area.	- Low risk area; - Zone with medium risk; - High risk area.
4	Gorno-Badakhshan Autonomous Region	The temperature increased from 0° C to +0.5° C. The income of the population depends on employment opportunities, livestock and crop production.	- Low risk area; - High risk area.	- Zone with medium risk.

According to the UN Framework Convention on Climate Change, the average temperature rises from 1.8° C to 2.9° C by 2050. If the forecast comes true, it will negatively affect the state of water resources, the development of agriculture, transport and infrastructure, as well as the state of public health and the healthcare system in the country.

References

- Статистический ежегодник Республики Таджикистан // ТАЈСТАТ, Душанбе, 2018. 484 с.
- Третье национальное сообщение Республики Таджикистан по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата // Правительство РТ, ГУ «Гидрометеорологии». Душанбе, 2014. 167 с.
- Комитет по чрезвычайным ситуациям и гражданской обороне при Правительстве Республики Таджикистан. Официальный сайт. www.khf.tj.
- Climate Risks and Food Security in Tajikistan: A Review of Evidence and Priorities for Adaptation Strategies, WFP, 2017.



Оценка характеристик селевого потока 2015 года в долине ручья Барсемдара (Таджикистан)

В.А. Куровская¹, С.С. Черноморец¹, Т.А. Виноградова², К.С. Висхаджиева¹,
О.Н. Мавлоназаров³, Р.А. Бобов⁴

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва,
Россия, viktoriiakurovskaia@gmail.com

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, Душанбе,
Таджикистан

⁴Организация Ага Хана по развитию, Душанбе, Таджикистан

Аннотация. В июле 2015 года в долине ручья Барсемдара (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан) наблюдался массовый сход селевых потоков. В результате были разрушены и затоплены жилые зоны, социальные объекты и инфраструктура кишлака Барсем и соседних населенных пунктов. Кроме того, селевые отложения заблокировали реку Гунт с последующим образованием подпрудного озера максимальным объемом 4,0 млн. м³. В данной работе приводится количественная оценка характеристик селевого потока с помощью средств математического моделирования и кадров видеосъемки. Использовалась модель транспортно-сдвигового селеобразования, разработанная Ю.Б. Виноградовым для расчета приращения твердого материала, селевого расхода и плотности потока в зоне зарождения, а также трансформация расхода селея в долине. Кроме того, для оценки скорости селевого потока применялись данные видеосъемки. Для этого были выбраны видеозаписи прохождения одной из селевых волн в кишлаке Барсем, снятые очевидцами. Далее проводилась привязка местности к спутниковому снимку. Исходные данные о рельефе были получены с помощью цифровой модели рельефа ALOS, датированной 8 августа 2007 г. (разрешение 12.5 м). Оценка характеристик селеформирующих грунтов проводилась, в частности, с использованием СП 425.1325800 2018 года и литературных источников. Моделирование осуществлялось для трех вариантов изначального увлажнения. Расход селевого потока в замыкающем створе составил 379 м³/с для варианта с изначально сухим рыхлообломочным материалом, 1358 м³/с для материала, увлажненного до предела текучести, и 3794 м³/с для заполненного водой. Скорость фронта волны по данным видеосъемки составила 16.6 м/с, расход в замыкающем створе — 1536 м³/с. Следует учитывать, что это были кадры одной из 40 селевых волн. В настоящее время результаты представляют собой первичную оценку характеристик сошедшего селевого потока.

Ключевые слова: сель, моделирование, Памир, озеро Барсемкуль, видеосъемка

Ссылка для цитирования: Куровская В.А., Черноморец С.С., Виноградова Т.А., Висхаджиева К.С., Мавлоназаров О.Н., Бобов Р.А. Оценка характеристик селевого потока 2015 года в долине ручья Барсемдара (Таджикистан). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 251–264.

Assessment of debris-flow parameters for the 2015 debris flow event in Barsemdara stream valley (Tajikistan)

V.A. Kurovskaia¹, S.S. Chernomorets¹, T.A. Vinogradova², K.S. Viskhadzhieva¹,
O.N. Mavlonazarov³, R.A. Bobov⁴

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, viktoriakurovskaia@gmail.com

²Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

³Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

⁴Aga Khan Development Network, Dushanbe, Tajikistan

Abstract. In July 2015, in the valley of the Barsemdara stream (Gorno-Badakhshan Autonomous Region, Tajikistan), plenty of debris flows were observed. As a result, residential areas, social facilities, and infrastructure in Barsem village and neighboring settlements were destroyed and flooded. Besides, debris flow deposits blocked the Gunt River with the subsequent formation of a dammed lake with a maximum volume of 4.0 million m³. In this study, authors provide quantitative assessment of debris flow characteristics based on mathematical modeling and video records. Mathematical model of transport-shear debris flow process developed by Professor Yu. B. Vinogradov was used in this paper for calculating the increment of solid material, debris flow discharge and flow density in the initiation zone, and transformation of the flow in the valley. Moreover, video filming data allowed us to estimate the debris flow velocity. For this, frames of the one debris flow wave passing through the Barsem village, taken by eyewitnesses, were selected. The location was linked to a satellite image. Initial information about relief was obtained using the ALOS digital elevation model dated August 8, 2007 (resolution 12.5 m). The assessment of the debris-forming soils characteristics was carried out, in particular, using the set of rules 425.1325800 of 2018 and literary sources. Modeling was carried out for three cases for the initial moisturizing of friable material. The debris flow discharge in the outlet section was 379 m³/s for case with initially absolutely dry friable material, 1358 m³/s for moistened to yield strength, and 3794 m³/s for the one filled with water. The velocity of the wave front according to video filming was 16.6 m/s, the debris flow discharge in the outlet was 1536 m³/s. It should be considered that these were shots of one of the 40 debris flow waves. Currently, the results are an initial assessment of the characteristics of this debris flow.

Key words: debris flow, modelling, Pamir Mountains, Barsemkul lake, video records

Cite this article: Kurovskaia V.A., Chernomorets S.S., Vinogradova T.A., Viskhadzhieva K.S., Mavlonazarov O.N., Bobov R.A. Assessment of debris-flow parameters for the 2015 debris flow event in Barsemdara stream valley (Tajikistan). In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 251–264.

Введение

Территория Памира характеризуется наличием высоких поднятий, крутых склонов, глубоко расчленённого рельефа, а также снежного покрова и ледников, что приводит к интенсивному образованию селевых потоков. Активное освоение региона невозможно без всестороннего учета селей – одного из ведущих экзогенных факторов региона [Тулеев, 2002]. Целью данной работы является расчет характеристик селевого потока, сошедшего в долине ручья Барсемдара в июле 2015 года. Селевые отложения заблокировали реку Гунт с последующим образованием подпрудного озера

максимальным объемом 4,0 млн м³ [Черноморец и др., 2015]. Оценка количественных характеристик данного селя ранее не проводилась.

Использование математических моделей позволяет получить количественные характеристики селевого потока, что в дальнейшем может быть использовано при прогнозах и проведении превентивных мероприятий. Из-за сложности процессов формирования и движения селевых потоков было разработано большое количество математических моделей. В различных публикациях довольно часто для расчета селевых потоков используются модели, основывающиеся на уравнении движения вязкой жидкости Навье-Стокса в явном виде или в интегрированной по глубине гидравлической форме – уравнении движения Сен-Венана, например, FLO-2D [Petrakov et al., 2012], RAMMS [Bezjak et al., 2019], модель Т. Takahashi и Н. Tsujimoto [Takahashi, Tsumitomo, 1984]. Недостатком данных моделей является необходимая калибровка задаваемых параметров на основе исторических данных. Однако в большинстве случаев для рассчитываемых объектов отсутствуют сведения о предыдущих событиях, то есть калибровка производится путем экспертной оценки. Также существует такой тип моделей, как клеточные автоматы. В их основе лежит следующий принцип – закономерная смена состояний ячеек (мощность потока, максимальная глубина и т.д.) в направлении движения потока. Рассматриваемый тип моделей базируется на различных законах физики прежде всего на законах сохранения вещества, энергии и импульса [Михайлов, 2010]. Примером является модель CAMELOT [Dattilo, Spezzano, 2003]. В данном случае многое зависит от размеров клеток и уравнений, заложенный в основе. Кроме того, для расчета селевых потоков и оползней используются дискретные модели, где поток вещества состоит из структурных частиц – материальных точек или твердых тел. Уравнение движения задается из второго закона Ньютона [Михайлов, 2010]. В зависимости от поведения части в потоке модели могут быть одноэлементными (STONE, RocFall [Guzzetti et al., 2002]) и многоэлементными (DEBRIS [Михайлов, 2010; Михайлов, Черноморец, 2011]). Однако селевые потоки состоят не только из рыхлообломочного материала, большую роль играет водная составляющая. Рассмотрение селя в виде материальных точек приводит к упрощению процесса.

В данной работе использовалась транспортно-сдвиговая модель, разработанная Ю.Б. Виноградовым [Виноградов, 1980а]. В основе модели лежит уравнение увеличения расхода твердого материала, вовлекаемого в зарождающийся селевой поток по мере его продвижения по селевому очагу. Ранее было проведено сравнение модельных характеристик с данными наблюдений Чемолганских экспериментов, результаты были признаны удовлетворительными [Vinogradova, Vinogradov, 2017].

Объект исследования

Ручей Барсемдара расположен на территории Западного Памира и является правым притоком реки Гунт, относится к бассейну реки Пяндж. Он располагается в 15 км выше города Хорог, административного центра Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО) Таджикистана. В период с 16 по 20 июля было зарегистрировано как минимум 14 серий селевых волн в долине Барсемдара. Общее количество селевых волн по подсчетам [Keiler et al., 2018] колеблется от 30 до 40. Массовому сходу селевых потоков предшествовали период длительных положительных температур вкупе с интенсивным снеготаянием на леднике и в приледниковой зоне.

Площадь селевого вреза на моренном пьедестале Барсемдара который образовался в интервале высот 3800 – 4150 м у ледника Чирминтарман, составляет 72 тыс. м² [Докукин и др., 2019].

В ходе маршрутного обследования в августе 2019 г. совместно специалистами географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова и Агентства Ага Хана по Хабитат было установлено, что уступ ледника Чирминтарман, как минимум, имеет две ступени, на нижнюю из которых наложен лавинный снежник. Таяние снежника, по всей видимости, совместно со стоком с ледника и послужил импульсом к формированию селя. Авторы предполагают, что до схода селевого потока 2015 г. из выполаживания у

нижнего края ледника под правым бортом существовал сток. Сохранилась ложбина стока и конус выноса ниже по моренному пьедесталу. В процессе схода селевого потока сформировался новый каньон, расположенный под левым краем моренного пьедестала.

Протяженность селевого вреза (каньона) равняется 800 м, средняя ширина – 90 м, максимальная же – 400 м [Черноморец и др., 2015; Докукин и др., 2019], оценочная глубина составляет 50 м (рис.2).



Рис. 1. Очаг зарождения селя 2015 г. в верхней части долины р. Барсемдара ниже ледника Чирминтарман, 10.08.2019. Фото с квадрокоптера: С.С. Черноморец

Fig. 1. Origination site of the 2015 debris flow in the upper part of the Barsemdara River valley below the Chirmintarman Glacier, 10 August 2019. Photo from a quadcopter: S.S. Chernomorets



Рис. 2. Селевой врез, образовавшийся после катастрофы 2015 г., 10.08.2019. Фото с квадрокоптера: С.С. Черноморец

Fig. 2. Debris flow cut after the 2015 disaster, 10 August 2019. Photo from a quadcopter: S.S. Chernomorets

Протяженность пути селевого потока от очага до зоны разгрузки в районе слияния ручья Барсемдара с рекой Гунт составила 7250 м при среднем угле наклона 13,5°. По оценкам [Keiler et al., 2018] общий объем выноса селя составил 4,2 млн м³. Сформировавшийся конус вынос блокировал реку Гунт на высоте около 2 400 м. Общая площадь зоны аккумуляции составила 400 тыс. м². В результате образовалось подпрудное озеро площадью 378 тыс. м² и с максимальным объемом 4,0 млн м³ [Черноморец и др., 2015]. После прокладки канала площадь озера уменьшилась до 300 тыс. м² [Докукин и др., 2019].

Образовавшимся озером были затоплены около 70 хозяйств, более 2 км автодороги, соединяющей Таджикистан с Китаем и Киргизией, 5 мостов (из них 3 автомобильных и 2 пешеходных), медицинский пункт, школа, торговые точки, сады и плодородные земли, десятки километров оросительных сетей. Также была разрушена основная высоковольтная линия подачи электроэнергии от ГЭС Памир-1 [Черноморец и др., 2015].

Материалы и методы

Расчет характеристик селевого потока был выполнен с использованием модели транспортно-сдвигового селеобразования. Данная модель была разработана Ю.Б. Виноградовым по результатам экспериментов по воссозданию селевых потоков, проводившихся на территории Заилийского Алатау в верховьях реки Чемолган в 50 км от Алма-Аты в 1972-1975 гг. [Виноградов, 1980а,б]. Выбор модели был также обусловлен расчетом двух критических углов наклона, которые делят долину на три части с точки зрения возможности развития на них селевых процессов различного типа [Виноградов, Виноградова, 2010]. Первый критический уклон определяется выражением:

$$tg\alpha_1 = \frac{(p-p_0)(1-\varepsilon)}{p(1-\varepsilon)+p_0*\varepsilon} tg\varphi. \quad (1)$$

Второй критический уклон определяется аналогично, за исключением замены величины статического угла внутреннего трения (φ) на динамический (φ^*). Здесь использованы следующие обозначения: ρ - плотность селеформирующих грунтов, кг/м³; ρ_0 - плотность воды, кг/м³; ε - пористость селеформирующих грунтов в их естественном залегании, безразмерная величина; φ - статический угол внутреннего трения селеформирующих грунтов, °; φ^* - динамический угол внутреннего трения, °. В рассматриваемом случае плотность породы составила 2500 кг/м³, пористость –0.131, φ – 40 ° [СП 425.1325800.2018], φ^* – 22 ° [Никулин, 2009]. Средний угол наклона в долине ручья Барсемдара составляет 13.5 °, и попадает в диапазон первого и второго критических углов, что соответствует транспортно-сдвиговой модели селеобразования [Виноградов, Виноградова, 2010].

Данная модель была разработана для расчета селевых потоков высокой плотности. При ее создании были приняты следующие положения:

1. Коэффициент неустойчивости ПСМ (потенциальный селевой массив [Виноградов, 1980а]) задавался, как обратная величина известного в механике грунтов и инженерной геологии коэффициента устойчивости склонов массивов рыхлообломочных грунтов [Маслов, 1977].

$$K = tg\alpha/tg\varphi, \quad (2)$$

где α – угол наклона тальвега селевого очага, °; φ – статический угол внутреннего трения селеформирующих грунтов, °.

2. Элементарная потенциальная мощность потока (способность произвести работу на единице пути за единицу времени, Вт / м = кг · м/с³):

$$U = g[Qp_0 + (\zeta p_0 + p)G]sin\alpha, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; Q – расходы воды, м³/с; ρ_0 – плотность воды, кг/м³; ζ – отношение объема воды к объему твердого вещества в ПСМ, безразмерная величина; ρ – плотности селеформирующих грунтов (в ПСМ), кг/м³; G – расход твердого вещества, м³/с; α – угол наклона тальвега селевого очага, градусы.

3. Показатель подвижности селевой массы.

$$R = \frac{Q}{G} + \zeta - \theta_{nn}, \quad (4)$$

где Q/G – соотношение расходов воды и твердого вещества селеформирующих грунтов в движущемся по тальвегу селевого очага зарождающегося грязекаменного потока; θ_{nn} – отношение объема воды к объему твердого вещества, но на пределе текучести (неподвижности) смеси воды и селеформирующих грунтов [Виноградов, Виноградова, 2010]. Если принять следующее положение: приращение расхода твердого материала, вовлекаемого в зарождающийся селевой поток по мере его продвижения по тальвегу селевого очага, прямо пропорционально перечисленным выше трем аргументам, то получается:

$$dG/dl = A \cdot KUR = A \left(\frac{tg\alpha}{tg\varphi} \right) g \sin\alpha \times [Q \rho_0 + (\zeta \rho_0 + \rho)G] \left(\frac{Q}{G} + \zeta - \theta_{nn} \right). \quad (5)$$

Здесь A – коэффициент пропорциональности (м · с²/кг); l – расстояние по тальвегу селевого очага, м. На основании немногочисленных данных, полученных при искусственном воспроизведении селевых потоков в природных условиях, было определено, что коэффициент пропорциональности находится где-то в диапазоне $A=(3\div 5) \cdot 10^{-6}$ м · с²/кг, скорее всего несколько ближе ко второму значению, приведенному в скобках [Vinogradova, Vinogradov, 2017]. При дальнейшем преобразовании уравнение приобретает следующий вид:

$$l = \frac{\left[\frac{Q\rho_0}{\zeta\rho_0+\rho} \ln \frac{Q\rho_0+(\zeta\rho_0+\rho)G}{Q\rho_0+(\zeta\rho_0+\rho)G_0} - \frac{Q}{\zeta-\theta_{nn}} \ln \frac{Q+(\zeta-\theta_{nn})G}{Q+(\zeta-\theta_{nn})G_0} \right]}{A \frac{tg\alpha}{tg\varphi} g \sin\alpha [Q\rho_0(\zeta-\theta_{nn})+Q(\zeta\rho_0+\rho)]} + l_0, \quad (6)$$

где l_0 – расстояние до текущего участка, м; G_0 – начальное значение переменной G для определенного участка и результат расчета для ему предшествующего (для первого верхнего участка $G_0 = 0$).

Основное расчетное уравнение решается не относительно искомой функции G , а относительно аргумента l , что, естественно, приносит некоторые неудобства. Зато само решение уравнения (4) представляется элементарной вычислительной процедурой [Vinogradova, Vinogradov, 2017]. Расход селевого потока (Q_c) в процессе его движения в селевом очаге может быть получен из следующего выражения:

$$Q_c = Q + (1 + \zeta) * G. \quad (7)$$

В данном случае Q_c – расход воды, поступивший в селевой очаг, м³/с. Для оценки величин максимального расхода передового вала проводилось умножение данных расхода в замыкающем створе очага на коэффициент, в первом приближении близкий к 2.5 [Виноградов, Виноградова, 2010].

Плотность селевой массы потока в процессе его движения в селевом очаге определяется следующим образом [Виноградов, Виноградова, 2010]:

$$y = \frac{Q * \rho_0 + (\zeta * \rho_0 + \rho) * G}{Q + (1 + \zeta) * G}. \quad (8)$$

Движение селевого потока по долине неизбежно приводит к трансформации потока вследствие перегруженности речной долины рыхлыми отложениями.

Трансформация потока зависит от множества факторов: морфометрических и гидравлических характеристик селевого русла, мощности потока, его плотности, а также от состава и свойств селевой массы. Ю.Б. Виноградовым было предложено следующее: долина от очага до замыкающего створа разбивается на участки с приблизительно одинаковыми шириной и уклоном. Максимальный расход в конце каждого участка определяется по формуле [Виноградов, 1985]:

$$[Q_{cmax}]_k = [Q_{cmax}]_{k-1} * \exp \left[-c_2 * \frac{B_k * (l_k - l_{k-1})}{\cos \alpha * (tg \alpha - tg \varphi)} \right], \quad (9)$$

где $[Q_{c_m}]_{k-1}$ – максимальный расход (m^3/c) селевого потока в конце предшествующего участка; $c_2 = (1 \dots 4) 10^{-7} m^{-2}$ – коэффициент пропорциональности; B_k – ширина долины на расчетном участке, м; l_{k-1} , l_k – верхняя и нижняя точка, ограничивающая расчетный участок по длине селевого русла, м; φ – динамический угол внутреннего трения селевой массы, градусы; α^* – угол наклона расчетного участка селевого русла, градусы. В данной работе $c_2 = 0.000005$.

На основе имеющихся уравнений была реализована программа на языке программирования Python. Входными данными при моделировании являлись данные о рельефе и параметрах селеформирующих грунтов, а также расход воды в ручье: $Q = 25 m^3/c$; $\rho = 2600 kg/m^3$; $\rho_0 = 1000 kg/m^3$; $\alpha = 13.5^\circ$; $\varphi = 40^\circ$; $\varphi^* = 22^\circ$; $\zeta_1 = 0$; $\zeta_2 = 0.133$; $\zeta_3 = 0.2$. По данным маршрутного обследования в августе 2019 г., проведенного совместно специалистами географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова и Агентства Ага Хана Хабитат, расход в ручье Барсемдара был оценен в $15 m^3/c$. Расход воды, поступивший в селевой врез, составлял по оценкам $25 m^3/c$. В данной работе характеристики селеформирующих грунтов оценивались на основе СП 425.1325800 2018 года, материалов изысканий «Севкавгипроводхоза» [Никулин, 2009] и работ Ю.Б. Виноградова [Виноградов, Виноградова, 2010]. В качестве основных данных о рельефе территории использовалась цифровая модель рельефа ALOS датируемая 8 августа 2007 г. (разрешение 12.5 м). При моделировании селевого потока в долине ручья Барсемдара было выделено 4 участка в селевом врезе и 20 в долине с приблизительно одинаковыми уклонами и морфометрическими показателями.

Для оценки реальной скорости селевого потока были использованы данные видеосъемки, выполненной местными жителями в процессе схода селевых волн. Ранее данная методика применялась в работах [Arattano, Marchi, 2000; Berti et al., 2000; Соколова и др., 2019]. Для определения скорости селе по видеосъемке нужно знать расстояние и продолжительность прохождения волны. Необходимо использовать кадры, местоположение волны на которых можно определить на спутниковом снимке. С этой целью были выбраны две контрольные точки: одна – на повороте русла (рис. 4), а вторая – уже непосредственно перед выходом на конус выноса (рис. 5).

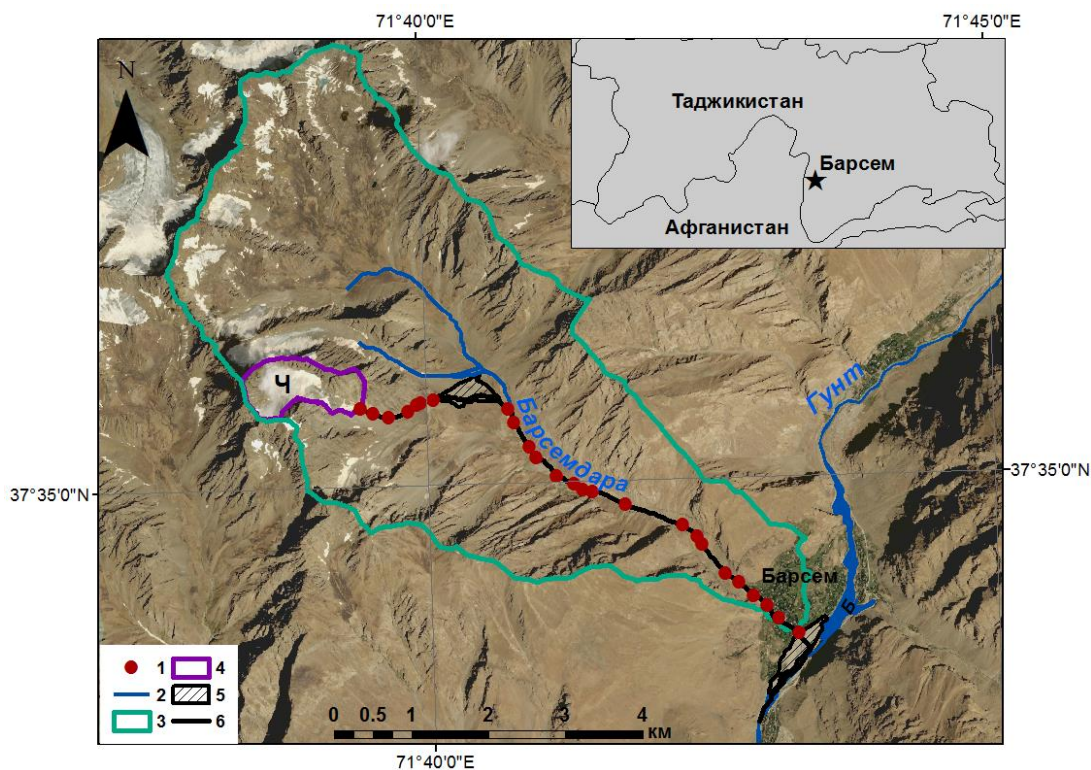


Рис. 3. Схема расположения участков в долине ручья Барсемдара: 1- границы расчетных участков, 2- реки, 3 – границы водосбора, 4-водосбор селевого очага, 5- конус выноса и участок промежуточной аккумуляции, 6-зона движения селя 2015 г., Ч - ледник Чирминтарман, Б – озеро Барсемкуль.

Fig. 3. Location scheme of sights in Barsemdara River valley. Designations: 1 – boundaries of estimation sites, 2 – rivers, 3 – Barsemdara River watershed, 4 – watershed of debris flow origination site, 5 – debris flow fan of 2015 event and a section of intermediate accumulation, 6 – debris flow movement zone in 2015, Ч – Chirmintarman Glacier, Б – Barsemkul Lake Debris



Рис. 4. Схема участка прохождения селевого потока (кадры видеоролика) на участке поворота русла руч. Барсемдара. Стрелкой показана контрольная точка на повороте русла. Источник: <https://www.newsru.com/world/19jul2015/seli.html>

Fig. 4. Scheme of debris flow passage section (film frame) at the section of the Barsemdara River channel turn. Arrow shows the control point on the channel turn. Source: <https://www.newsru.com/world/19jul2015/seli.html>



Рис. 5. Схема участка прохождения селевого потока (кадры видеоролика) на участке впадения руч. Барсемдара в р. Гунт. Стрелкой показана контрольная точка перед выходом на конус выноса. Источник: <https://www.newsru.com/world/19jul2015/seli.html>

Fig. 5. Scheme of debris flow passage section (film frame) at the confluence of the Barsemdara River in the Gunt River. Arrow shows the control point before the debris flow fan. Source: <https://www.newsru.com/world/19jul2015/seli.html>

Привязка осуществлялась в программном пакете ArcGIS, расстояние между двумя контрольными точками составило 216 м. В программном пакете Shortcut фиксировалось время прохождения фронта селевой волны на контрольных точках, т.е. на повороте и перед выходом на конус выноса селевого потока. Полученное в результате измерений время равнялось 13 с.

Результаты

В летний период рыхлые отложения более насыщены талыми водами снежников и ледников за счет высокой проницаемости грунтов, что резко уменьшает их устойчивость. Характеристики селевого потока в сильнейшей мере зависят от влажности ПСМ. Возможны три характерных случая: при абсолютно сухом ПСМ ($\zeta_1 = 0$), увлажненном до предела текучести ($\zeta_2 = 0.133$) и заполненном водой ($\zeta_3 = 0.200$). Вариант а отвечает постепенному затуханию, б- стабильности и с - лавинообразному развитию процесса, которое может ограничить только резкое уменьшение уклона или отсутствие ПСМ [4]. В связи с этим были проведены сценарные расчеты с различной влажностью ПСМ по трем вариантам, описанным выше. Как можно видеть из рисунка ниже (рис.6), приращение твердого материала в очаге во многом определяются именно влажностью селеформирующих грунтов. Данный рисунок раскрывает суть транспортно-сдвигового процесса, заложенного в модели. Максимальное приращение твердого материала составляет от 274 м³/с на 1 участке 4088-3992 м н.у.м. до 1821 м³/с на участке 3767-3715 м н.у.м. для варианта с), минимальное же – от 123 до 182 м³/с, соответственно, для варианта а). Модель в целом отражает закономерность, соответствующую развитию селевого процесса, однако имеются отклонения при сухом ПСМ ($\zeta_1 = 0$), т.к. при недостатке воды в какой-то момент расход твердого вещества должен перестать нарастать по длине участка.

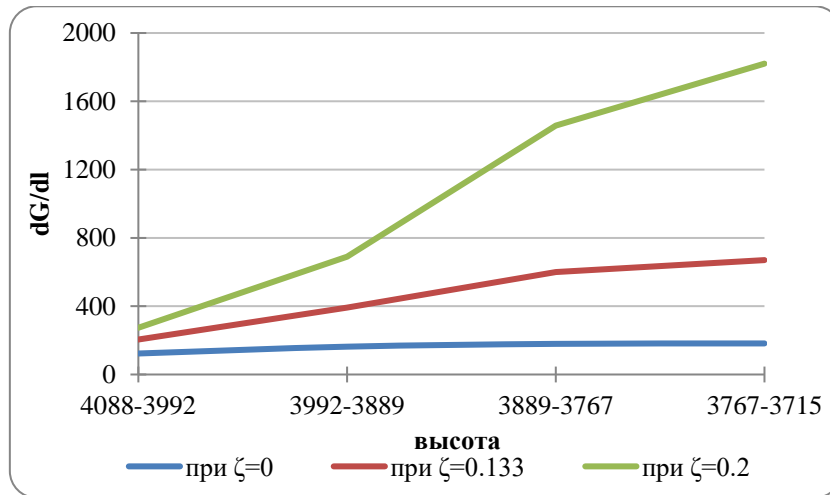


Рис. 6. Изменение интенсивности захвата селеформирующих грунтов по длине очага (т.е. приращение твердого расхода на единицу длины очага (dG/dl)). Вариант а (при $\zeta = 0$) обозначается синим цветом, б (при $\zeta = 0.133$) – красный цвет и вариант с (при $\zeta = 0.2$) – зеленый

Fig. 6. Change in the intensity of soil entrainment along the origination site (i.e., the increment in solid flow per unit length of the origination site (dG/dl)). Case a (for $\zeta = 0$) is marked in blue, b (for $\zeta = 0.133$) is red, and case c (for $\zeta = 0.2$) is green

Необходимо отметить, что вид функции роста расхода селя по очагу по своему виду повторяет приращение твердого материала. Значение расхода изменяется в пределах от 148 и до 455 м³/с для варианта а, 255 – 1630 м³/с для варианта б и 353 – 4551 м³/с для варианта с.

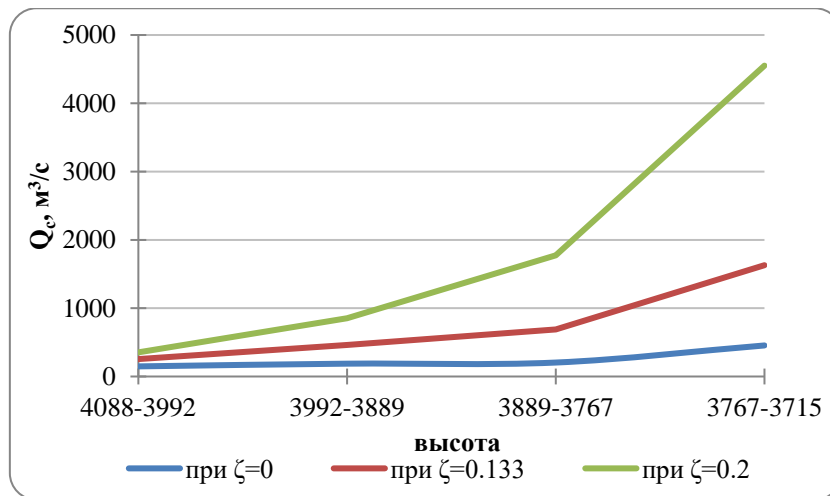


Рис. 7. Рост расхода селя по длине очага. Вариант а (при $\zeta = 0$) обозначается синим цветом, б (при $\zeta = 0.133$) – красный цвет и вариант с (при $\zeta = 0.2$) – зелены

Fig. 7. Increase of debris flow discharge along the origination site. Case a (for $\zeta = 0$) is marked in blue, b (for $\zeta = 0.133$) is red, and case c (for $\zeta = 0.2$) is green

Плотность селевой массы по очагу изменялась в среднем в пределах от 2239 кг/м³ при начальном ПСМ, заполненным водой, и до 2407 кг/м³ для абсолютно сухого ПСМ. Полученные значения соответствуют диапазону плотности грязекаменного потока [Виноградов, 1980]. Движение селевого потока в долине неизменно сопровождается его трансформацией. На рисунке ниже представлены расчеты трансформации расхода селевого потока по формуле, упомянутой выше.

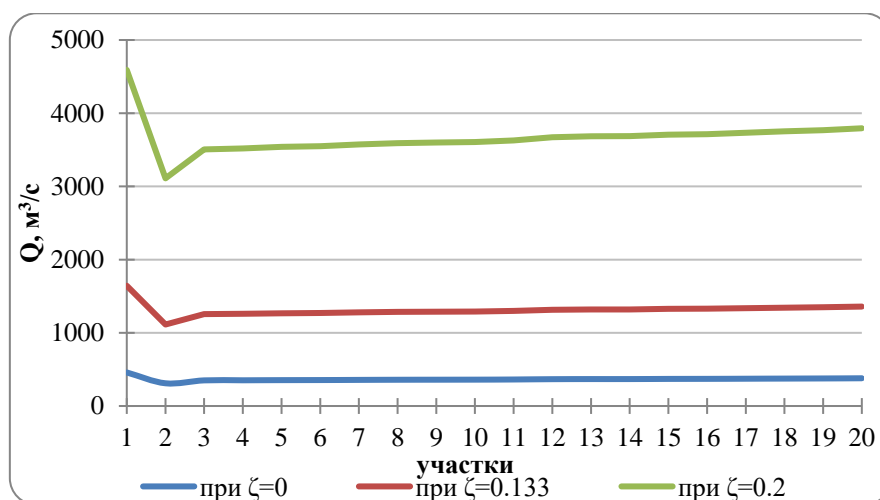


Рис. 8. Трансформация расхода селя по долине ручья Барсемдара, полученных при моделировании по 3 сценариям влажности ПСМ. Вариант а (при $\zeta = 0$) обозначается синим цветом, б (при $\zeta = 0.133$) – красный цвет и вариант с (при $\zeta = 0.2$) – зеленый

Fig. 8. Transformation of the debris flow discharge along the valley of the Barsemdara River. Data were obtained from modeling according to three scenarios of moisture content of the friable material. Case a (for $\zeta = 0$) is marked in blue, b (for $\zeta = 0.133$) is red, and case c (for $\zeta = 0.2$) is green

Как можно видеть, на 2 участке в долине происходит резкое снижение расхода. Это связано в первую очередь, со средней шириной, которая на этом участке в среднем составляет 200 м. На снимке с БПЛА, полученном в ходе маршрутного обследования долины в 2019 году на данном участке наблюдается промежуточная аккумуляция селевых отложений (рис. 9).

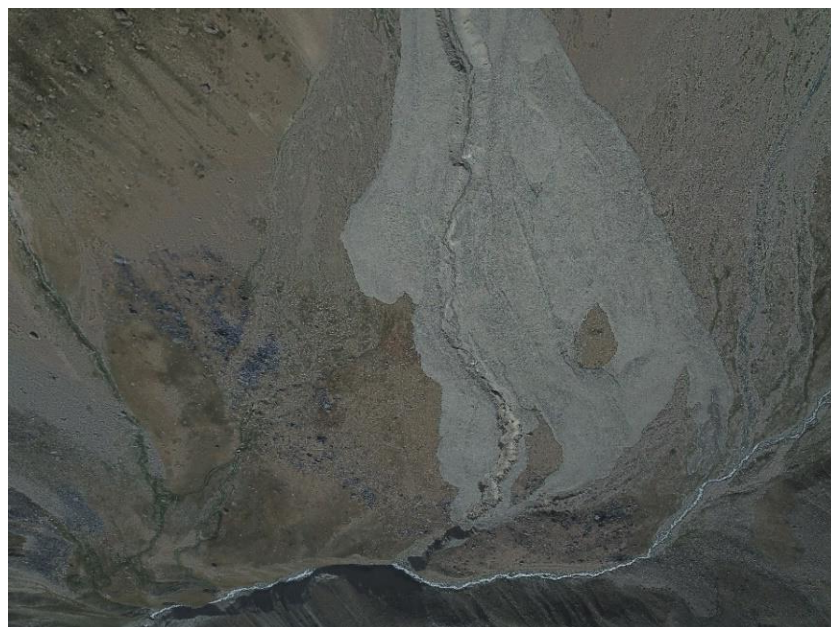


Рис. 9. Зона промежуточной аккумуляции перед выходом потока в главное русло. 10 августа 2019 г. Фото с квадрокоптера: С.С. Черноморец

Fig. 9. Zone of 2015 debris flow intermediate accumulation before the flow enters the main channel, 10 August 2019. Photo from a quadcopter: S.S. Chernomorets

Оценка скорости потока

Помимо высокой насыщенности рыхлообломочным материалом, селевому потоку также присуще волновое движение [Казаков, 2001; Натишвили, Тевзадзе, 2011]. В данной работе с помощью видеосъемки были получены значения скорости движения фронта одной из многих селевых волн, принесенной материал которой значительно участвовал в формировании конуса выноса. Скорость рассчитывалась как пройденное волной расстояние, деленное на время, и составила 16.6 м/с. Также была оценена площадь поперечного сечения в программном пакете ArcGIS с использованием ранее применяемой ЦМР и функции Contour для построения изолиний. Рассчитанный расход селевой волны составил 1536 м³/с. Однако в связи с тем, что площадь поперечного сечения была получена по ЦМР 2007 года, и скорость определялась только для одной из 40 волн, полученные с помощью видеосъемки значения носят оценочный характер.

Выводы

В данной работе была впервые проведена оценка характеристик селевого потока, сошедшего по долине ручья Барсемдара. Для этого использовалась транспортно-сдвиговая модель селеобразования, разработанная Ю.Б. Виноградовым. В данной работе расчет уравнений модели велся с помощью средств языка программирования Python. Ранее модель использовалась для расчетов и сравнения данных наблюдений Чемолганских экспериментов [Vinogradova, Vinogradov, 2017]. На этапе подготовки исходной информации селевой врез и долина были разбиты на участки с одинаковыми морфометрическими показателями на основе данных ЦМР ALOS 2007 года. Всего было выделено 24 участка. Сначала велся расчет прироста твердого материала, а также селевого расхода и плотности по длине очага для 3 вариантов увлажнения ПСМ: при абсолютном сухом, увлажненным до предела текучести и заполненным водой. Полученные данные еще раз свидетельствуют о том, что влажность ПСМ во многом определяет характер процесса. Максимальные значения расхода селевого вала на выходе из очага составили до 455 м³/с для варианта а, 1630 м³/с для b и 4551 м³/с для варианта с. Максимальное значение приращения селевого материала наблюдалось для варианта ПСМ, заполненного водой, и составило 1821 м³/с. Плотность селевого потока в среднем составила 2292 кг/м³ для варианта расчета с и 2382 кг/м³ для а, что соответствует плотности грязекаменного селевого потока.

Также была рассчитана трансформация волны селевого потока при движении по долине. Расход селевого потока в замыкающем створе составил 379 м³/с для варианта а, 1358 м³/с для b и 3794 м³/с для варианта с. Кроме того, была получена скорость одной из селевых волн с помощью видеосъемки. Для этого были выбраны кадры прохождения волны селея на территории кишлака до поворота и перед выходом на конус выноса, которые в дальнейшем привязывались к спутниковому снимку. Зная расстояние и время, была получена скорость селевой волны, которая составила 16.6 м/с. Далее была измерена площадь поперечного сечения и получен расход селея, который составил 1536 м³/с. Следует учитывать, что это были кадры одной из 40 селевых волн, и полученные данные носят оценочный характер.

Важным этапом будущих работ с транспортно-сдвиговой моделью станет уточнение характеристик селеформирующих грунтов. В настоящее время результаты представляют собой первичную оценку характеристик данного селея. Несмотря на это, полученные данные могут иметь практическое значение для расчета параметров селевых потоков высокой плотности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-35-90006 и 18-05-00520, а также темы МГУ имени Ломоносова I.7 AAAA-A16-116032810093-2 «Картографирование, моделирование и оценка риска опасных природных процессов» (ГЗ) МГУ имени М.В. Ломоносова.

Авторы выражают благодарность И.В. Крыленко (МГУ имени М.В. Ломоносова), А. Акдодову и Ф.О. Мародасейнову (Агентство Ага Хана по Хабитат) за участие в сборе

полевых материалов; Ч.Д. Икболшоеву, председателю кишлака Барсем Горно-Бадахшанской автономной области Таджикистана, за логистическую поддержку; Г. Филлоеву, очевидцу селя 2015 г., за предоставленные сведения.

Список литературы

- Виноградов Ю.Б. (1980а) Транспортный и транспортно-сдвиговый селевые процессы. // Селевые потоки, Сб. 4. КазНИГМИ, с. 3–18.
- Виноградов Ю.Б. (1980б) Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеоздат, 144 с.
- Виноградов Ю.Б. (1985) К методике расчета характеристик селевых потоков. // Труды Государственного гидрологического института, вып. 304, Л., с.83–89.
- Виноградов Ю. Б., Виноградова Т.А. (2010) Математическое моделирование в гидрологии: учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования. М.: Издательский центр «Академия», 304 с.
- Докукин М.Д., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Запороженко Э.В., Бобов Р.А., Пирмамадов У.Р. (2019) Барсемская селевая катастрофа на Памире в 2015 году и ее аналоги на Центральном Кавказе. // Геориск, т. XIII, № 1, с. 26–36.
- Казаков Н.А. (2001) Волновая динамика селей // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. № 2, с. 158–164.
- Маслов, Н. Н. (1977). Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними). М.: Стройиздат, 320 с.
- Михайлов В.О. (2011) Классификация численных математических моделей селевых и склоновых процессов // Инженерная геология, №3, с. 26–33.
- Михайлов В.О., Черноморец С.С. (2011) Математическое моделирование селей, обвалов и оползней. LAP Lambert, 131 p.
- Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И. (2011) Волны в селях. М.: ООО Издательство Научтехлитиздат, 160 с.
- Никулин А.С. (2009) Опыт определения углов внутреннего трения селевых грунтов. // ОАО «Севкавгипропроводхоз». Сборник научных трудов. Выпуск 18. Пятигорск, 2009, с.30–33.
- Соколова Д.П., Куровская В.А., Осташов А.А., Казаков Н.А. (2019) Оценка динамических характеристик селевого потока по видеоматериалам // Гидросфера. Опасные процессы и явления. Т. 1. Вып. 1. С. 31–51, DOI: 10.34753/HS.2019.1.1.003
- СП 425.1325800.2018 «Инженерная защита территорий от эрозионных процессов. Правила проектирования» М.: Минстрой РФ, 2018. 60 с. <https://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/469/SP-425.pdf>.
- Тукеев О.В. (2002) Селевые явления Памира: катастрофы, закономерности, прогноз. М., 176 с.
- Черноморец С., Савернюк Е., Бобов Р., Асмаатов Н., Мавлоназаров О., Мирмамадов Д., Пирмамадов У., Шафиев Г. (2015) Селевые потоки в долине реки Барсемдара в июле 2015 г. и подпрудное озеро Барсемкуль на реке Гунт (Горно-Бадахшанская автономная область, Таджикистан). // Вторые Виноградовские чтения. Искусство гидрологии, Сборник докладов Международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова, Санкт-Петербург, с. 261–264.
- Arattano M., Marchi L. (2000). Video-derived velocity distribution along a debris flow surge. // *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(9), p. 781–784. doi:10.1016/s1464-1909(00)00101-5
- Berti M., Genevois R., LaHusen R., Simoni A., Tecca P.R. (2000). Debris flow monitoring in the aquabona watershed on the Dolomites (Italian Alps). // *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(9), p. 707–715. doi:10.1016/s1464-1909(00)00090-3
- Bezák N., Sodník J., Mikoš M. (2019) Impact of a random sequence of debris flows on torrential fan formation. // *Geosciences*, 9, 64.
- Dattilo G., Spezzano G. (2003) Simulation of a cellular landslide model with CAMELOT on high performance computers // *Parallel Computing*, Vol. 29, No. 10, p. 1403–1418.
- Guzzetti F., Crosta G., Detti R., Agliardi F. (2002) STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls // *Computers & Geosciences*, Vol. 28, No. 9, p. 1079–1093.
- Keiler M., Zimmermann M., Bigler S., Fuchs S. (2018). Assessing a large-scale debris flow in Barsem, Tajikistan: exceptional size, duration and process chain. EGU General Assembly Conference Abstracts, Vol. 20, p. 5405.
- Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A., Chernomorets S.S., Evans S.G., Kidyayeva V.M., Krylenko I.N., Norin S.V., Shakhmina M.S., Seynova I.B. (2012) Monitoring of Bashkara glacier

- lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst. // *Natural Hazards*, 61, p. 1293–1316.
- Takahashi T., Tsujimoto H. (1984) Numerical simulation of flooding and deposition of a debris flow // *Disastrous Preventing Research Institute, Kyoto University*, No. 27(B-2), p. 467–485.
- Vinogradova T.A., Vinogradov A.Y. (2017) The Experimental Debris Flows in the Chemolgan River Basin. // *Natural Hazards*, 88, p. 189–198.



Селеформирующая опасность завальных озер и водохранилищ Памира и других горных регионов

А.М. Лехатинов

*ФГБУ Национальный парк «Тункинский», Кырен, Республика Бурятия, Россия,
lexam29@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается проблема прогнозной оценки селевой опасности в случае прорыва Сарезского озера.

Ключевые слова: озеро, завал, каньон, оползень, сель

Ссылка для цитирования: Лехатинов А.М. Селеформирующая опасность завальных озер и водохранилищ Памира и других горных регионов. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 265–271.

Debris flow hazard in case of the outbursts of dammed lakes and reservoirs in Pamir and other mountain regions

A.M. Lekhatinov

*FSBI National Park “Tunkinsky”, Kyren, Republic of Buryatia, Russia,
lexam29@mail.ru*

Abstract. The problem of predictive estimation of mudflow hazard in case of Sarez lake breakout is considered.

Key words: lake, blockage, canyon, landslide, debris flow

Cite this article: Lekhatinov A.M. Debris flow hazard in case of the outbursts of dammed lakes and reservoirs in Pamir and other mountain regions. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 265–271.

В XX веке по мере развития научно-технического прогресса, человек начал стремительно продвигаться высоко в горы, усиливая транспортную, добывающую, энергетическую и познавательную деятельность. Добыча полезных ископаемых, развитие производственной и социальной инфраструктуры с недостаточным учетом сейсмической, лавинной, селевой, оползневой и других геологических опасностей, нередко сопровождается неприятными последствиями разрушений и гибели живых существ, включая человека. Из экзогенных геологических процессов наибольшей разрушительной силой обладают сели, сформированные прорывами горных водоемов – завальных, запрудных озер и водохранилищ. К завальным относятся озера с плотинами, сложенными оползневыми, обвальными, осыпными отложениями и материалами ледопада. Два первых типа плотин отличаются более надежной устойчивостью и меньшей опасностью. Запрудные озера, образование которых связано с временным перекрытием русел водотоков моренами, заломами, селевыми конусами выноса и техногенной деятельностью, чаще разрушаются - опаснее завальных запруд. Лавинно-снежные плотины, отличаются весьма слабой устойчивостью, чем другие запрудные скопления.

Из техногенных плотин надежными считаются железобетонные и сооружения комбинированной конструкции. Слабой устойчивостью характеризуются насыпные и

деревянные запруды. Прорыв любой плотины, как правило, сопровождается формированием селей, мощность и масштабность которых теснее связаны с объемом прорвавшейся воды с твердым материалом. Техногенные сели в большом количестве содержат продукты разрушения жилых, хозяйственных объектов, дорог, мостов и остатки бытового мусора. Однако, известно, что плотины строятся, прежде всего, для сбора воды на нужды производства и водоснабжения. Впервые в СССР плотина, с использованием направленных взрывов, была построена для борьбы с разрушительными селевыми потоками на р. Малая Алматинка (Медео, 1960-1966 гг.). Она надежно защищает г. Алма-Ата и другие поселения, расположенные ниже Медео.

В горах, особенно в молодых альпийской и тихоокеанской складчатостей, распространено большое количество завальных, запрудных озер и водохранилищ. Из них наиболее часто очагами селеформирования становятся непрочные ледниковые и насыпные запруды. За истекшие десятилетия трагические селевые потоки, вызванные прорывными водами, прошли в Таджикистане и горных регионах России. В Таджикистане при разрушении двадцатиметровой земляной плотины Саргазона был разрушен кишлак, погибли люди и животные. На реке Ясман в 1949 году во время Хаитского землетрясения произошел прорыв плотин из конусов выноса ее притоков, обвалов и оползней, сформировался грязекаменный поток с крупными глыбами шириной до 2-х километров. Селевой поток усилил трагическую катастрофу - погибло много людей города Хаит и кишлаков, разрушенных землетрясениями. Аналогичные с Хаитом следы схода селей, связанных с прорывными водами, сохранились ниже завальной плотины озера Яшилькуль (Памир), угроза повторного прорыва которого не обнаружена в 1968 году (Лехатинов). Грязевый сель, возникший при прорыве оползневой плотины в сае Ялдомич в 1969 г. уничтожил сохранившуюся от оползневой потока нижнюю половину одноименного кишлака. Летом того же года жуткую картину страдания людей пришлось пережить во время изучения причинно-следственных связей проявления трагических событий в районе кишлака.

От запрудно-ледникового и грязекаменного потока погибли люди в Кармадонском ущелье в 2002 году (Кавказ, Россия). Техногенный селевой поток 2019 года в Саянах сильно разрушил поселок золотодобытчиков. Прорвалась дамба водохранилища, были человеческие жертвы. В 2018 году без жертв обошелся оползень, который из Буреинского водохранилища поднял вал воды на противоположный склон. При накате и откате вода размывала рыхлые отложения склона вместе с лесной растительностью, сформировала склоновые сели с большим содержанием древесных остатков. Взрывами был построен канал и ликвидирована опасность прорыва оползневой плотины. Грандиозная селевая катастрофа, вызванная «выплеснутой» оползнем водой, произошла в долинах рек Вайонт и Пьяве в 1963 году (Альпы, Италия). Плотина гидроэлектростанции была построена в ущелистой V-образной долине р. Вайонт с эрозионно-тектоническими склонами, пораженными оползневыми трещинами отрыва, обвалами и осыпями. Строительство плотины началось в 1957 году и завершилось в 1959 году. Оползневая опасность была обнаружена до заполнения водохранилища, но «хозяева стройки» не обратили на неё внимания до первого случая обрушения пород небольшого объема. Попытались срочно понизить уровень воды водохранилища, но избежать трагедии не смогли. Затопление части склона и обильные осенние дожди 1960 года, сильно увлажнили трещиноватые, неустойчивые породы, которые с большой скоростью сползли в водохранилище (рис. 1).

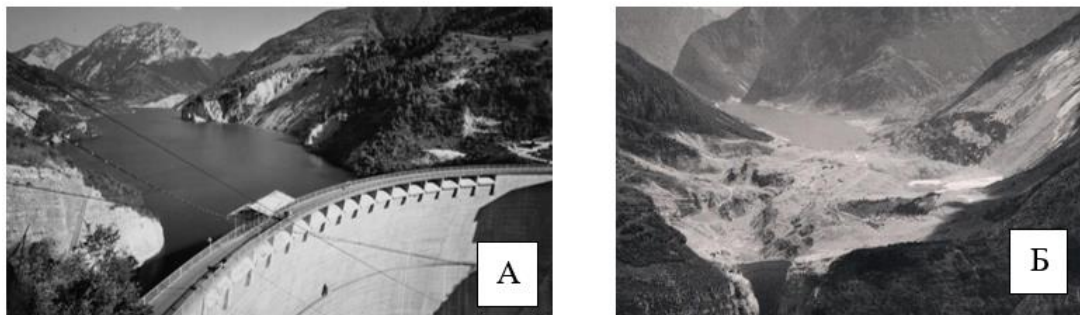


Рис. 1. Вайонт, Италия: А – водохранилище и левый оползнеопасный склон до катастрофы, Б – после катастрофы

Fig. 1. Vayont, Italy: А – reservoir and left landslide slope before the disaster, Б – after the disaster

Как утверждали очевидцы, вода в объеме более 50 млн. м³ выплеснулась на противоположный застроенный склон, смыла грунты и объекты жизнедеятельности, и столбом высотой 250 м. поднялась и обрушилась в долину ниже плотины. Сформировался цунамиподобный водно-селевой вал, который разрушил г. Лонгароне и ещё 5 деревень (рис. 2).



Рис. 2. Вайонт – Пьяве: А – г. Лонгароне до селевой катастрофы; Б – после катастрофы

Fig. 2. Vayont-Piave: А – Longarone before the mudslide; Б – after the disaster

По разным данным погибло 2500–3000 человек. Техногенный селевой поток рр. Вайонт и Пьяве, в отличие от природных, был насыщен (уплотнен) природными, промышленно-гражданскими и биологическими компонентами.

Схожие с Вайонтом геодинамические и геоморфологические условия возникновения паводкоселевой катастрофы, связанной с поднятием и переливом воды через Усойский завал, имеются в котловине Сарезского озера (Памир). Известно, что огромный по объему 2,2 млрд. м³ Усойский завал-оползень перекрыл долину р. Мургаб во время 9-ти балльного землетрясения в 1911 году. С правого борта долины р. Мургаб в сае Усой-Дара сползли гигантские по объему блоки пород. Образовалась завальная плотина из крупных скальных массивов и блоков местами с рыхлым чехлом. Её высота 650-700 м, ширина более 5 км, длина по долине 3,5–4,0 км. По названию погребенного завалом кишлака плотина именуется Усойской. У плотины образовалось озеро, затопившее кишлак Сарез. Это самое крупное в мире высокогорное, пресноводное озеро. Глубина его перед плотинной достигает 505 м, в 1968 г., сезонное колебание уровня происходит в пределах первой десятки метров. Длина озера составляет 70 км, максимальная ширина 3,4 км, объем воды 16–17 км³. С 1913 года (с перерывами) по 1956 г. исследователи завала приходили к выводам: одни находили признаки опасности прорыва, а другие – отсутствие такой угрозы (Д.Д. Букинич, Г.А. Шпилько, И.А. Преображенский, И.Л. Корженевский, О.К. Ланге и др.). В 1948 году В.В. Акулов

пришел к выводу, что катастрофа прорыва завала может произойти через 22 года, примерно в 1960–61 гг.

По заданию Правительства СССР и Таджикской ССР Всесоюзный научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО) и Управление геологии Таджикской ССР в 1967–70 гг. совместно провели комплексные геологические, геофизические и инженерно-геологические исследования Усойского завала и побережья Сарезского озера, а также оценку активизации селей и гравитационных процессов Центрального Таджикистана в 1969 г. (А.М. Лехатинов – ответственный исполнитель, начальник партии ВСЕГИНГЕО, В.Д. Фоменко – начальник партии ТаджКГЭ; Ш.Ш. Деникаев, В.С. Гончаров, И.А. Моссаковская и др., научный руководитель работ А.И. Шеко). Были изучены генезис и прочность завала с выявлением закономерностей развития процессов разрушения его тела, включая фильтрацию воды через него и рост каньона. Изучены возможные сходы в озеро селей, способных сформировать цунамиподобные валы, которые могли бы нарушить прочность завальной плотины. Были обследованы все притоки озера, включая рр. Катта-Марджонай и Мургаб. Особое внимание уделялось скорости роста каньона, который, по мнению В. Акулова «должен прорвать завальную плотину». Установлено также, что завал представляет не обвальное, а оползневое тело из массивов, блоков, глыб нерастворимых и растворимых скальных пород, местами перекрытых щебнисто-суглинистыми образованиями. И по устойчивости к прорыву он состоит из двух главных частей: южной и северной. Южная представлена главной оползневой грядой и «буграми» выдавливания зоны интенсивного сжатия. Она водонепроницаема и отличается повышенной устойчивостью к прорыву. Северная часть сложена мелкими блоками и глыбами обратного смещения в сторону оползневой депрессии, в которой сформировался внутризавальный сток воды озера и каньон с грифонами (родниками). Согласно данным В.С. Гончарова [Гончаров, 1979], В.Т. Дубинчука, Ю.Н. Уханова, А.М. Лехатинова, в 1968 году в каньоне действовало 34 грифона с общим расходом воды 90 м³/сек. Средняя скорость воды через завал достигала 1,4 м/сек., а в каньоне она колебалась в пределах 0,5 – 2,26 м/сек. Расход воды грифонов изменялся от 0,4 м³/сек. до 7,4 м³/сек. Инфильтрация воды озера происходила по входам в верхнем бьефе в виде концентрированных участков общей протяженностью 800 м. Северная часть завала более понижена (35-40 м. над озером) и менее устойчива, чем южная. Здесь широко распространены гравитационные процессы в оползневом цирке и каньоне, овражная эрозия на конусе выноса и селевом поле и карстово-суффозионные, селевые формы рельефа.

Эрозионный рост каньона, скорость которого достигал 50 м/год, приостановился 35–40 лет тому назад до 1967 г. Скорость роста каньона повышалась ежедневными июль-августовскими таловодными селями сая Усой-Дара. Грязекаменная масса падала с 20–30 м борта каньона, разрушала его и разжижалась до состояния водокаменного потока. Позже направление селевых потоков изменилось в сторону озера, в каньоне прекратилась попятная эрозия. Направление селевых потоков сменилось с западного на восточный. Сели ежедневно в большом объеме выносят грязекаменную массу в озеро, усиливая кольматаж путей фильтрации. Кольматаж может обусловить опасный подъем воды озера. Усойский оползень разрушил ригели кара и трога сая Усой-Дара, поэтому талые воды ледника с моренными отложениями беспрепятственно и с грохотом низвергаются по обрывистой, высотой в несколько сот метровой стенке оползневого цирка, скапливаясь на вершине конуса выноса. При движении вниз эта масса трансформируется в плотный сель, который к вечеру летнего дня стекает в озеро. В русле с уклоном 6–10° лавоподобный сель движется в ламинарном режиме. Камни весом 15–20 кг положенные на его поверхность, «плывут» на протяжении 150-200 м, не погружаясь в него. Ежедневно в озеро поступает сотни тысяч кубометров твердого материала, который оседает в верхнем бьефе. Взвешенные наносы втягиваются фильтрационными водами в завал, затрудняя сток воды из озера. При образовании затора в восточном овраге – русле, селевые потоки будут вновь стекать в среднюю часть каньона. Сели

западного направления повысят активность формирования селевых потоков в русле Мургаба на участке до кишлака Барчадив (рис. 3).

Проблема не допустить возможной селевой катастрофы архиактуальна, она требует безотлагательного решения силами интеллектуального и делового сообщества, в том числе Селевой Ассоциации. С 1913 года исследователи по этой проблеме почти единодушно поддерживают гипотезу, что «Сарезское озеро не в состоянии ни прорвать завал, ни опрокинуть его», селевая опасность не рассматривалась до 1967 года. Как альтернатива гипотезе, существуют две версии о неустойчивости Усойского завала. Согласно первой версии «катастрофа может произойти при продвижении каньона до озера». Она не может подтвердиться, так как каньон «уперся» в прочную оползневую грядку и перестал расти. Ширина грядки от каньона до озера весьма внушительная. И она не может быть разрушена абразией, эрозией и растворением. Не исключается вероятность разрушения пониженной перемычки в случае перелива воды через неё под воздействием внешних факторов.

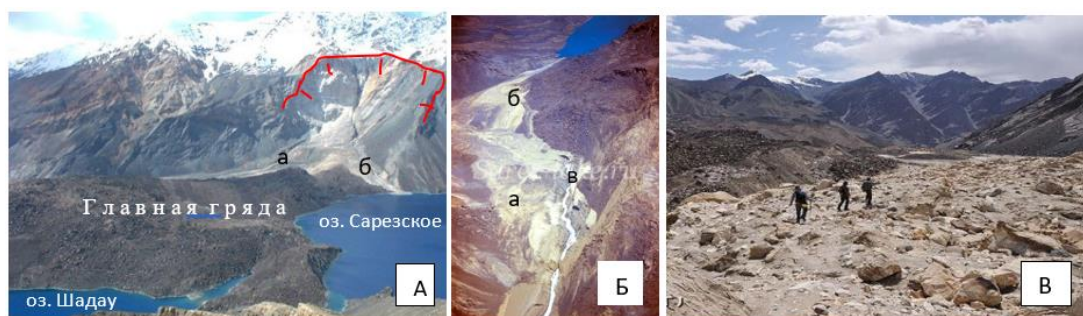


Рис. 3. А – Усойский завал с цирком оползней и селеактивным саям Усой-Дара, Б – селевые отложения сая Усой-Дара: а – западного направления потока и б – восточного направления потока, в – каньон; В - грязекаменные отложения селей каньона – Мургаба ниже Усойского завала в сторону Барчадива

Fig. 3. А – Usay dam with the circus landslides and the frequent mudflow river Usay-Dara, Б – debris deposits river Usay-Dara: а – West flow direction and б – East flow direction, в – canyon; В – mudstone deposits mudflow canyon – Murgab the below Usay dam in the direction to Barchadiv.

Вторая версия опасности прорыва – это проседание завала при таянии льдов и фирновых снегов, сохранившихся в нем при сползании пород зимой. Она беспочвенна и фантастична, потому что при быстром смещении, особенно на большие расстояния, каменный материал нагревается от трения и ударов до точки кипения. Лед и снег в такой массе пород переходит в жидкое и газообразное состояние. И, не может, он хранится в завале десятки и сотни лет в условиях положительной температуры тела завала. В зимних условиях образования завала речная вода и лед оказались между главным блоком и последующими оползневыми блоками, были выжаты в приповерхностные породы. При стаивании льдов сформировались просадочные формы вдоль простирания контакта. При современном режиме Сарезского озера Усойский завал является весьма устойчивым природным сооружением. **Селевая катастрофа возможна только в том случае, если сползут породы правого склона Сарезского озера.**

Впервые в истории изучения Усойского завала, оползневые трещины на правом склоне озера были обнаружены мною, А.М. Лехатиновым, при восхождении к вершине сая Биром-Банд в августе 1967 г. Рекогносцировочные работы проводились сразу же после обнаружения деформации поверхности склона совместно с геологами В.П. Свешниковым и В.С. Курдяковым. Трещины заинтересовали специалиста по оползням и селям А.И. Шеко, который на следующий 1968 г. в составе Правительственной комиссии на вертолете облетел склон, уточнил зоны разрывных нарушений, определил объем будущих оползней. Кулисообразные зоны трещин с зиянием до 5–10 м, протяженностью 3500–4000 м., простираются на восток от сая Биром-

Банд. Обнаруженные три зоны разрывных нарушений, расположенные друг над другом с интервалом 500–600 м, указывают на развитие трех оползневых блоков. Причина образования зон разрывных нарушений остается загадкой природы. Возможно, они образовались одновременно с Усойским завалом при сильном землетрясении и не повторили Усойский оползень, который образовался в условиях увлажнения пород р. Усой-Дара. Правый оползневой склон расположен между двумя саями и исключительно сухой. Поэтому трещины сохраняют свежий вид, признаки активизации их не прослеживаются. Однако, существование трех гигантских по размеру оползневых блоков на правом склоне, вызывает серьезное опасение. Комиссия согласилась с нашими выводами и рекомендовала проведение комплексных исследований на Усойском завале и смежных с ним склонах.

Работы были продолжены после 1968 г. Начатые геофизические, буровые и инженерно-геологические работы были приостановлены в связи с беспорядками в стране. Предварительные результаты исследований носят дискуссионный характер, мнения оползневой опасности до сих пор остаются спорными. Выявление генезиса трещин и закономерности их развития позволит минимизировать опасение, селевую угрозу, которая может возникнуть при сползании в озеро трех суперкрупных блоков пород (рис. 4).

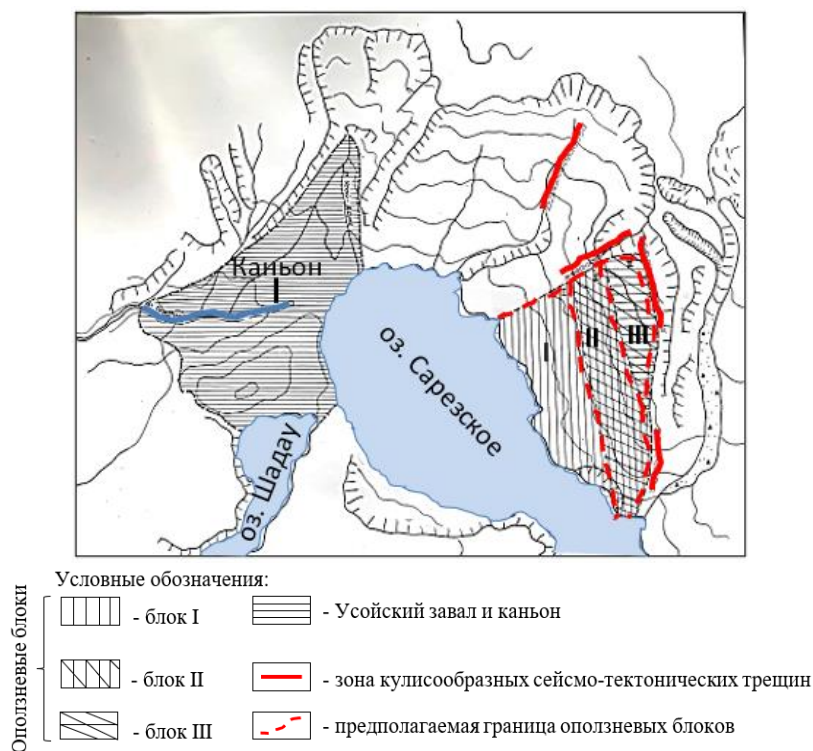


Рис. 4. Карта-схема оползневой опасности прорыва Сарезского озера. Масштаб 1:50 000. Составил: А.М. Лехатинов, 1967 г.

Fig. 4. Map-scheme of the landslide hazard breakout of the Sarez lake. Scale 1:50 000. Compiled by: A.M. Lekhatinov, 1967

По данным Л.П. Папырина (1986), могут сползти массивы пород объемом 1 млрд. 250 млн. кубометров. Соответственно объем поднятого оползнем воды озера может быть, как минимум, около миллиарда кубометров. Когда сползут породы и произойдет селевая и паводковая катастрофа – это вопрос времени. Причинами быстрого смещения пород могут стать: переувлажнение оползневого склона талыми водами и подъем воды озера на 30–40 м, 9–11-балльные землетрясения в ближайшие годы или через 100–1000 лет, катастрофа неизбежна. И не следует повторять ошибки итальянцев, допущенные на водохранилище долины р. Вайонт.

Из-за слабой изученности Правобережного оползня бытуют утверждения, исключаяющие опасность его проявления. Мониторинг состояния Усойского завала, проводимый за последние годы, не решит эту проблему, так как главная причина прорыва формируется за его пределами. Известно, что Комитет чрезвычайной ситуации (КЧС) Таджикистана убеждает жителей: «Завал надежное природное сооружение и оползни не могут угрожать его устойчивости, если понизить уровень воды озера на 100-150 м.». Спасет ли понижение уровня, если после него в озере сохранится 350–400 метровая толща воды объемом в миллиарды кубометров, когда обрушится в неё 1250 млн кубометров пород? В долине Вайонта оползень и вода водохранилища были в несколько сот раз меньше, чем ожидаемые объемы на Сарезе, а селевая катастрофа была самой тяжелой в прошлом веке. Представляется, что столб воды озера будет многократно выше завала, также как уклон Бартанга больше, чем уклон Вайонта. Трудно представляется масштаб возможной трагической селевой катастрофы в бассейне Амударьи. Ответ на вопрос, быть катастрофе или не быть, можно получить путем:

- Глубокого анализа результатов исследований, проведенных на Усойском завале, Правобережном оползне и озере в 1967-1986 гг.;
- Изучения глубинного строения правобережного оползневого склона и выявления поверхности скольжения пород;
- Проведения микросейсмического районирования завала и смежных склонов;
- Ведения мониторинга развития деформации склона и сейсмической активности оползневого района;
- Изучения роли селевых потоков сая Усой-Дара в развитии кольматажа, каньона и неустойчивости завала;
- Прогнозирования селевой катастрофы в долинах рек Бартанг, Пяндж и Амударья в случае прорыва Усойского завала, организации противоселевых мероприятий;
- Привлечения мирового научного и делового сообщества к проблеме изучения и разработки мероприятий для понижения уровня воды Сарезского озера до безопасной отметки или разработки других способов минимизации опасностей прорыва Усойского завала.

Недооценка опасности правобережных гравитационных процессов Сарезского озера может стать причиной повторения, по проявлению селевой трагедии, произошедшей в долине р. Вайонт. И повторится она, как планетарная катастрофа. Откладывание решения проблемы – это приближение паводкоселевой опасности. Вопреки скептикам и дилетантам, которые утверждают, что «Сарезское озеро не представляет угрозу жителям Таджикистана, Афганистана, Узбекистана и Туркмении», и отрицают Правобережный оползень, следует объединить международные усилия для уменьшения риска прорыва завала. Паводкоселевая беда может случиться в любое время. Причинами сползания пород могут стать: увлажнение склона в результате аномального таяния ледников, снежников, подъема уровня озера на 30–35 м и землетрясения силой 8-9 и более баллов. Катастрофа по времени может совпасть с аномальным проявлением факторов – явлений, ускоряющих оползневой процесс.

Усойский завал – надежное природное сооружение, которое выдержит любой напор воды при естественном подъеме уровня воды озера. Загадку природы о паводково-селевой опасности необходимо разгадать «всем миром»: нет Правобережного оползня – нет опасности прорыва завала и селевой катастрофы. Население может жить спокойно.

Список литературы

- Гончаров В. С., Скомаровский А. Н. Изучение фильтрации через Усойский завал. – Атомиздат, М.: 1979. С. 57.
- Папырин Л.П. Результаты геофизических исследований оползней в районе Сарезского озера. ТаджикНИИНТИ, Душанбе, 1990. С. 1-5.



Debris flow hazard of glacial lake in Chitral, Pakistan

N.U. Shah, M. Anjum, S. Uddin, Z. Uddin

*Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in Pakistan, Islamabad, Pakistan,
nasiruddin.shah@akdn.org*

Abstract. Glacial lake outburst floods (GLOF) evolve into debris flows by erosion and sediment entrainment while propagating down a valley, which highly increases peak discharge and volume and causes destructive damage downstream. In Chitral, the most northern district of Pakistan, we have combined field and remote sensing research to study glacial lakes and debris flow initiation zones in periglacial areas. The study of lake dynamics and description of Lake Outburst on downstream settlement is presented. Dir Gol Lake in the north of Arkari valley has been subject to detailed monitoring since 2015. In 2015 the total area of the lake was 127,535m² which has expanded up to 146,539m² area in 2019. Although lake is stable due to the firm support of moraine boulders but due to the adjacent retreating glacier and physical condition of the surrounding area the downstream settlements are endangered by potential debris flow. Based on the analysis of physical and social-economic parameters of the glacier lakes and surrounding area respectively we determined risk index and vulnerability for the downstream settlement. Study shows that most of the glaciers in Hindu Kush region are receding, so the probability of lake development is also increasing in the region. In the future we hope to develop detailed recommendations for risk management, mitigation and adaptation measures of glacier and debris flow hazards in Chitral area.

Key words: debris flow, lake, GLOF, anticipated debris flow, hazard, outburst

Cite this article: Shah N.U., Anjum M., Uddin S., Uddin Z. Debris flow hazard of glacial lake in Chitral, Pakistan. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 272–281.

Селевая опасность ледникового озера в Читрале, Пакистан

Н.У. Шах, М. Анджум, С. Уддин, З. Уддин

*Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Пакистане, Исламабад, Пакистан,
nasiruddin.shah@akdn.org*

Аннотация. Паводки, формирующиеся в результате прорыва ледниковых озер, ниже по долине трансформируются в селевые потоки в результате эрозии и вовлечения твердой составляющей, что значительно увеличивает их пиковые расходы и объем и наносит разрушительный ущерб в низовьях реки. В Читрале, самом северном округе Пакистана, мы объединили полевые и дистанционные исследования для изучения ледниковых озер и зон зарождения селевых потоков в перигляциальных районах. В статье представлено изучение динамики озер и описание последствий прорыва озера для населенного пункта ниже по течению. Озеро Дир Гол, расположенное на севере долины Аркари, стало объектом детального мониторинга с 2015 г. В 2015 г. общая площадь озера составила 127 535 м², а в 2019 г. она увеличилась до 146 539 м². Несмотря на то, что озеро стабильно благодаря тому, что подпружено крупнообломочными моренными отложениями, наличие выше отступающего ледника и физическое состояние окружающей территории объясняют высокий уровень потенциальной селевой опасности для населенных пунктов, расположенных ниже по течению. На основании анализа физических и социально-экономических параметров ледниковых озер и прилегающей территории мы определили индекс риска и уязвимости населенных пунктов ниже по течению. Исследования показывают, что большая часть ледников

в горах Гиндукуша отступает, поэтому вероятность формирования озер в этом районе также возрастает. В будущем мы надеемся разработать подробные рекомендации по управлению рисками, смягчению последствий и мерам адаптации к опасностям, связанным с ледниками и селевыми потоками в округе Читрал.

Ключевые слова: селевой поток, озеро, прорыв ледникового озера, прогнозируемый селевой поток, опасность, прорыв

Ссылка для цитирования: Шах Н.У., Анджум М., Уддин С., Уддин З. Селевая опасность ледникового озера в Читрале, Пакистан. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 272–281.

Introduction

Glaciers in high mountain regions benefit human civilization by serving as sources of drinking water, irrigation, and energy generation, but they also pose occasional hazards such as glacial lake outburst floods (GLOFs) and ice avalanches, causing human casualties and economic losses in downstream areas. Debris flows associated with glacier are common mountain hazard, and are driven by climate and weather conditions as well as by glacier dynamics and geological features. In recent decades Hindu Kush-Himalaya (HKH) glaciers have been shrinking and thinning [Kaser *et al.*, 2006; Zemp *et al.*, 2009; Fujita *et al.*, 2011; Kargel *et al.*, 2011; Scherler *et al.*, 2011] resulting glacier to retreat. After the termini retreat the vacant area in between the moraine and retreating glacier snout is taken over by proglacial lakes. Such glacier phenomenon and lake formation is currently observed in the majority of glaciated mountain regions of the world including the Himalayas and Karakoram. These glacial lakes often dammed by ice-cored moraines are main sources of devastating outburst floods. These outburst events often transform into more destructive debris flows when the flow path is steep, flow velocity is high and erodible material is available [Clague *et al.*, 1985; Clague *et al.*, 1992; Huggel *et al.* 2004; Kaab *et al.* 2005; Chiarle *et al.* 2007], threatening downstream settlements and infrastructure. In comparison with other glacier hazards, GLOFs are widespread and impact several kilometers downstream from the source. Such sudden outburst may lead to widespread damage and result in fatalities. Pakistan has witnessed several GLOF events in the past. A series of studies carried out between 2002 and 2005 in Pakistan identified a total of 5,218 glaciers with an area of 15,041 sq.km, and 2,420 glacial lakes out of which 52 were considered potentially dangerous [Roohi *et al.*, 2005]. Gilgit-Baltistan region is said to have witnessed more than 35 GLOF events in the past 200 years [Watkins, 2007]. In recent past too, we have witnessed GLOF events. Two GLOF events, one in Brep village in Upper Chitral in 2005 and other in the village of Sonoghur in 2007 displaced 100 families and damaged valuable cultivable land and infrastructures [Haq, 2007].

Surrounded by some of the tallest and highly glaciated mountains, the Chitral District of northern Pakistan lies in the eastern Hindu Kush Range (Fig. 1). The district has an area of 15,000 km² and spans within an elevation range from 1000 m to 7700 m above sea level. A common geomorphic feature of the Chitral region is valley facing slopes associated with high-relief Mountains, which merge into broad, relatively flat floodplains. The region is prone to occasional heavy precipitation, snow avalanches and glacial-lake outbursts that cause flooding of the fans, damaging life, property and crops. At least a dozen human casualties are associated with snow avalanches, floods and debris flows in the eastern Hindu Kush every year [Haq, 2007]. Roohi *et al.* [2005] reported 187 glacial lakes in the Chitral basin covering an area of 9 km² [cf. Ives *et al.*, 2010].

The paper presents the debris flow hazard case study from a Dir Gole lake in the Arkari valley. The lake located at latitude 36°10'54.38"N °and longitude 71°47'57.46"E is at an elevation of 4613 m with north-south orientation. It is a moraine dammed lake. The nearest settlement is Safaid Arkari and is situated at a distance of 13 km downstream at 2575 m asl

altitude. The geology of the area is composed of Meta sediments which are intruded by granodiorites such as the Tirich Mir Pluton [Calkins *et al.*, 1981]. The climate there is temperate type with warm summer and very cold winter. Mean summer temperature ranges from 22°C to 24 °C while winter temperature ranges from -4°C to -6°C.

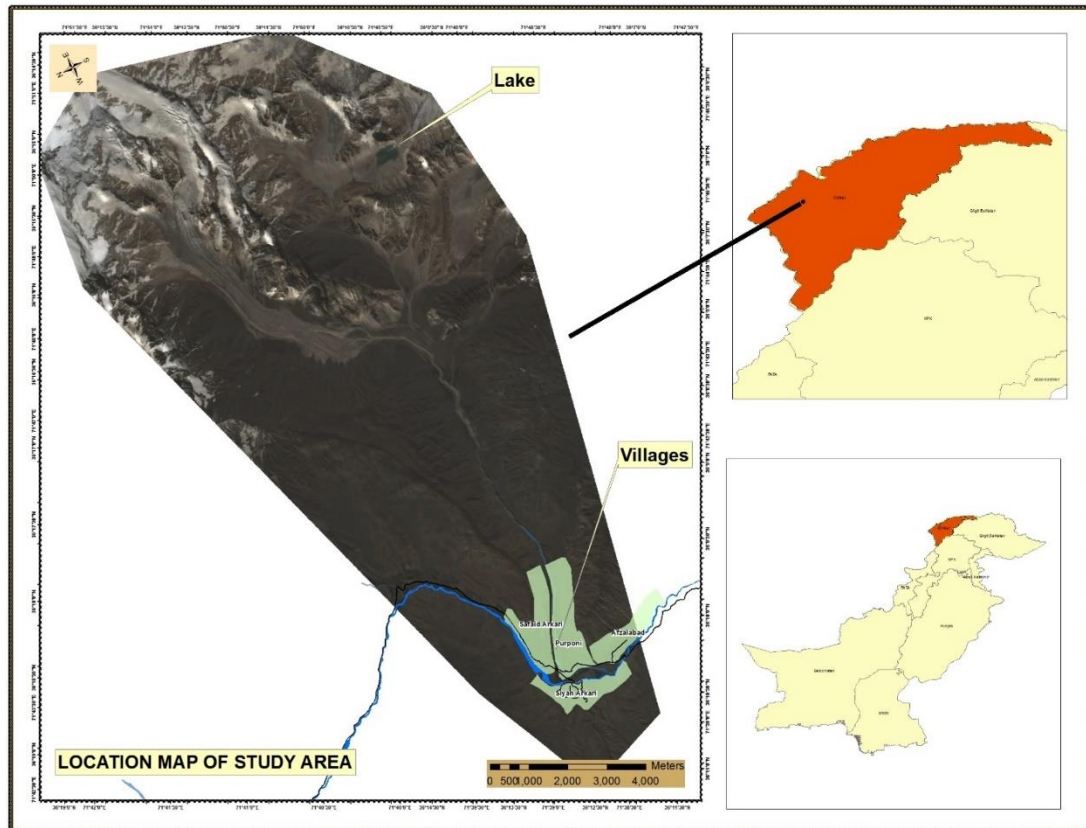


Fig. 8. Location map of the study area

Specific aims of our study are as follows: i) to prepare a comprehensive assessment of GLOF hazard, risk and vulnerability ii) to determine the fluctuation in glacial lake area, volume and iii) to describe the impact of lake burst on the downstream settlement.

Brief Review of the Problem

Geo hazards in the Karakoram have been subject of a few studies in the past [*e.g.*, Derbyshire and Owen, 1990; Derbyshire *et al.*, 2001], but the adjacent eastern Hindu Kush remained unexplored due to inaccessibility [Khan *et al.*, 2012].

In spite of presence of several glacial lakes in Chitral, assessment of glacial lakes from the point of debris flow risk has not yet been sufficiently researched. The lakes have not been systematically surveyed. It is extremely important to improve our knowledge of glacial-lake formation features, estimate lake volumes and areas, and assess the hazard of outburst floods and debris flows. Up to now, in the region conclusions are drawn mainly on small amounts of direct field data. The outburst trigger mechanism is poorly understood as well as the relations between the lake volume and the debris flow discharge.

Data

Multi-temporal Sentinel 2A images with 10m resolution of the study area were downloaded freely from Sentinels Scientific Data Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>), for 2015 & 2019. Settlement area, road network, drainage network were manually digitized. The digital elevation model (DEM) with 30m spatial resolution was downloaded from Earth Explorer

website for generating slope and contour maps. Land cover data of 2015 and 2019 were sourced from Sentinels Scientific Data Hub website and were of 10m spatial resolution. These images have cloud cover less than 20%.

Vector data like road network, settlement area, and drainage network and debris flow path were digitized manually in ArcGIS 10.7. Debris flow path was further verified on field by the Geologists of Aga Khan Agency for Habitat, Pakistan. These data were overlaid on the satellite imageries as base map.

Temperature data were taken from Weather Monitoring Post (WMP) installed by Aga Khan Agency for Habitat at Rabat Mukhi Arkari valley. Physical parameters of the lake and surrounding area, pictures, household data, demographic data and infrastructure data were collected during field survey conducted from 08 to 14 of August of the 2019.

Methods

Lake area change

This study is based on primary data collected from field and secondary data obtained through remote sensing. Mainly, linear stretching and histogram equalization were used to improve image contrast. The enhanced images were taken to ArcGIS 10.7 software for visual interpretation and image classification. The lake area was mapped using supervised classification which was later converted to vector for further calculation. Fig. 2 provides workflow used for this study. Both manual digitization and supervised classification technique were adopted to generate input data. The downloaded images which were in raw format were first imported in ArcGIS and four bands such as B2, B3, B4 and B8 of 10m spatial resolution were layer stacked followed by image enhancement done in ILWIS 3.4 software to enhanced improve visualization.

Lake volume estimation

Although there is no better alternative to field based bathymetric survey in case of lake volume estimation, an empirical equation established by Huggel et al, 2002 is used in this study. This approach has been used by many researchers mainly to overcome lack of field data which is hard to come. The empirical equation expressed volume, V (in m^3) of a glacial lake as a function of the area A (in m^2) as in Eq. 1:

$$V = 0.104A^{1.42}, \quad (1)$$

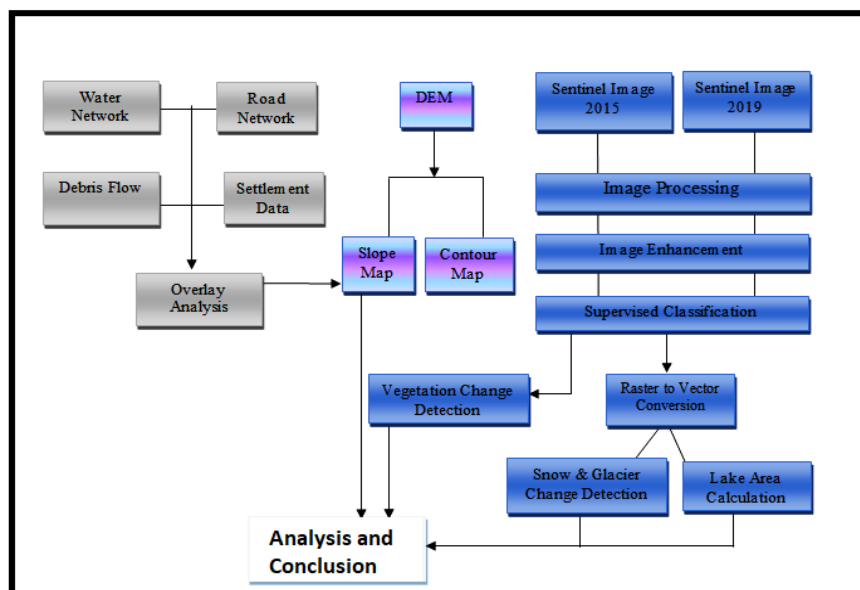


Fig. 9. Work flow diagram

Cause of the GLOF

A team of geologists were fielded for field assessment to understand potential causes that resulted in the GLOF. The team made visual observation of associated glacier features like hanging glaciers, glacial retreat and assessed possibility of ice avalanche, ice calving, rock fall or rock slope failure.

Data analysis

We carried out detailed surface area mapping around the lake, downstream hazard vulnerability risk assessment and bathymetry of the lake using Remote Sensing and empirical formula respectively to determine the lake’s development processes and assess the prospect of the GLOF from the lake. The surface area and volume of the lake in 2015 and 2019 are given in the Table 1.

Table 5. Calculated lake area and volume, Volume calculation is based on Eq. 1

#	Lake	Area 2019 (m ²)	Area 2015 (m ²)	Difference in Area (m ²)	Volume 2019 (m ³)	Volume 2015 (m ³)	Difference in Volume (m ³)	Status
1	Dir Gole Lake	146,539	127,535	190,004	2,252,614.8	1,849,383.8	403,231	Both Increased

This lake is dammed by a glacial moraine, which is strong enough to sustain the pressure for a longer period of time. But other factors that are reducing the reliability of the dam are the secondary hazards which are in direct contact with the lake, and in case of their reactivation, they can put severe impacts on the dam. There are five potential sites of the snow avalanche activity where debris along with snow may fall directly into the lake producing a strong wave. This strong wave of water will increase the pressure on the dam and ultimately will increase the probability for its outburst. The presence of small lake towards the downstream side of the understudy lake also indicates the presence of hidden channels passing through the dam which may weaken the shear strength of the dam. Almost 5 villages settled along either sides of the Dir Gole are critically studied for the expected flood from Lake. With few exceptions, major areas of all the villages will be affected from this flood.

Glacier recession and changes in lake area and volume

Remote sensing-based assessment of the surrounding glacier in the study area indicates that the glaciers have retreated by 410 m from 2015 to 2019. As a result of glacier retreat and substantial ice melting the glacial lake has grown in area from 127,535 m² to 146,539 m² and volume from 1,849,383.8 m³ to 2,252,614.8 m³ (Table 1). It is clear that the lake has drastically expanded from 2015 to 2019. The expansion of lake area in the southern and south western part is more due to the recession of glacier and breakage and falling of crevasses into the lake respectively. Towards the north the lake has shrunk due to the firm support of moraine materials and backward movement of lake area toward the southern part.

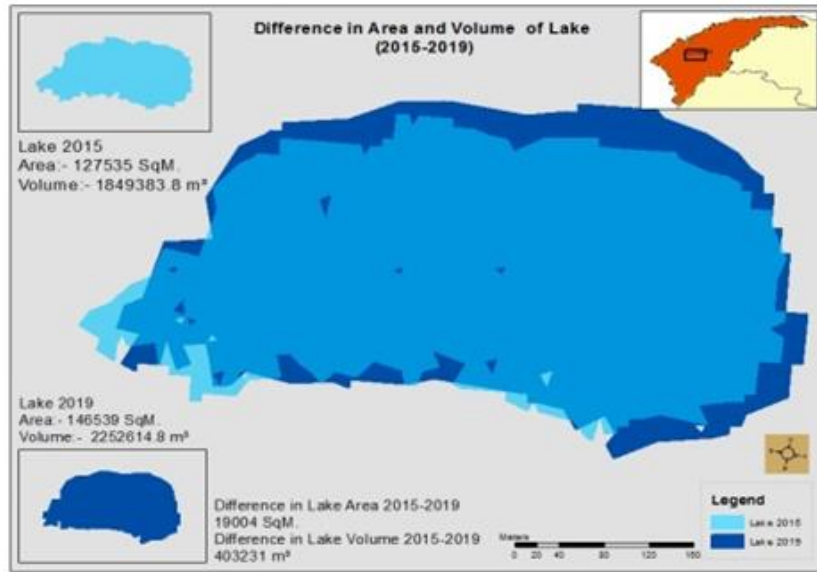


Fig. 3. Difference in lake area and volume (2015 and 2019)

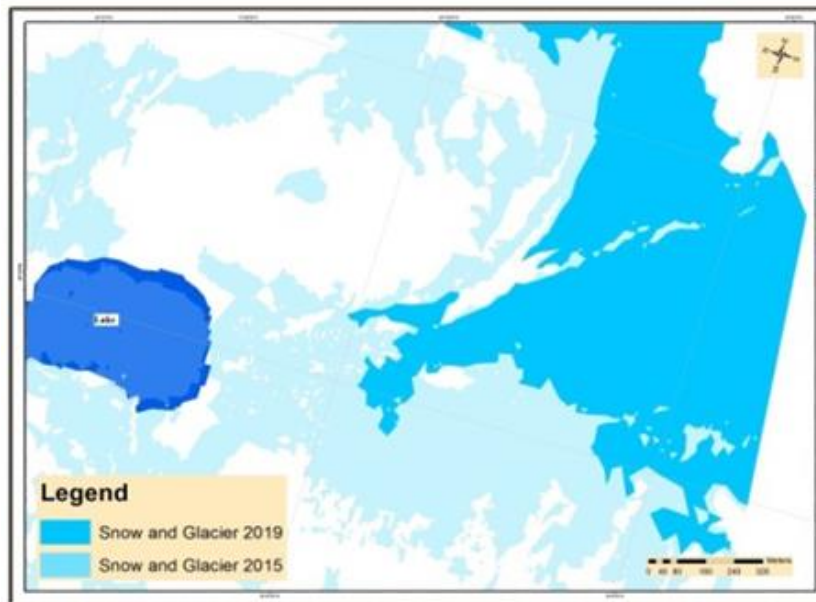


Fig. 4. Snow and glacier distribution (2015-2019)



Fig. 5. Picture of receding glacier snout

Elements Exposed to a Potential GLOF

Using slope map, debris flow path for potential debris flow is generated and used to map out elements exposed to the event. This was cross checked using contour map with 10 m contour interval. It was further verified by demarcating anticipated debris flow path during field visit.

The initial 6 km stretch of the downstream areas for about Dir Gol Lake is almost uninhabited. However, many people from downstream communities commute and install temporary huts in the pasture land from June to August for grazing their sheep and goats. The temporary movement of community towards the pastureland makes them more vulnerable to potential GLOF as the site is very near to debris flow tract. In addition, high temperature in July and August accelerate the melting of glacier, which further add more water to the lake and increase the probability of Lake Outburst.

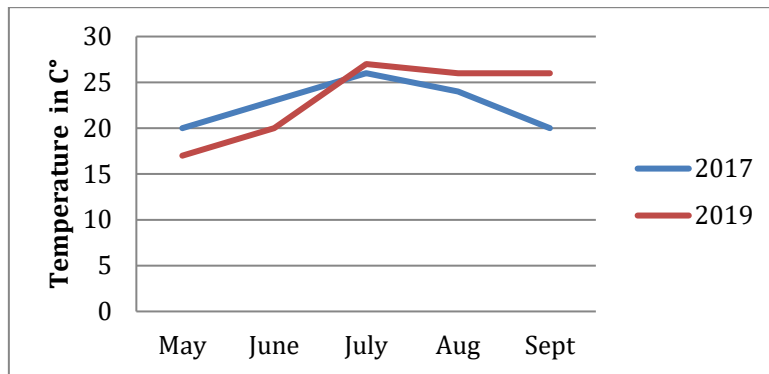


Fig. 6. Mean monthly temperature, Rabat Mukhi WMP

A potential GLOF can have downstream impacts at three different levels: households, vegetation area, and infrastructures.

Table 6. Impact of GLOF

Houses	131 households with 858 populations
Infrastructure	four schools, office building, two Jamat Khanas, trails, roads, embankment structures, bridges, irrigation channels, water mills, shops, welfare center, Aga Khan Health Center, heliport, dispensary, food store and transmission lines.
Vegetation	Forest, grazing land and crop land.

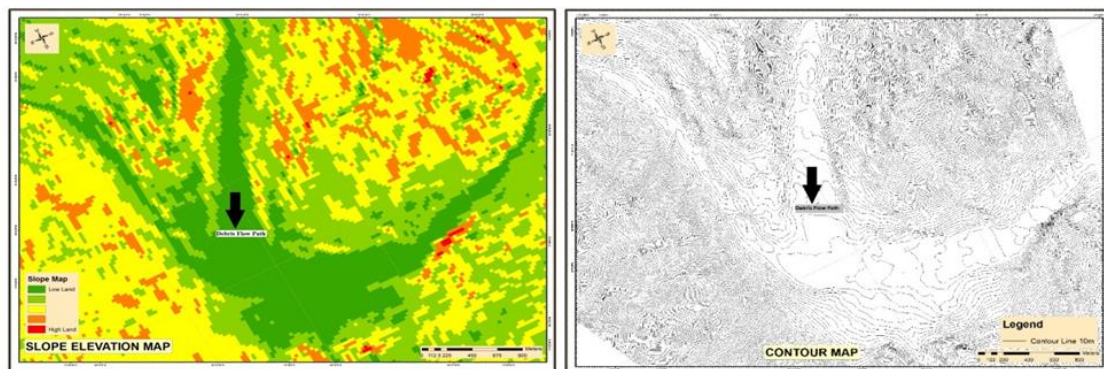


Fig. 7. Slope elevation map and contour map of study area

It was observed that the debris flow may block Arkari River and create artificial lake which will create secondary hazards in the form of bank erosion for some of the houses and infrastructures at Safaid Arkari village along the river bank. If this debris dam remains for some

days, the stored water will damage the settlements lying in the lower reaches of the valley up to Ruji more severely than the anticipated GLOF.

Assessment of vegetation and stream width

The changes in vegetation cover can be identified clearly. The green part shows vegetation, including forest covered area, crop land and shrub land while the other shows barren land and buildup area. As both the images were of same month, so by visual interpretation it is obvious that vegetation has decreased and the debris path has increased width wise from 2015 to 2019 in the perennial stream. Therefore, it can be interpreted that in case of out bursting it will erode and affect more area than the perennial stream covered. This was substantiated through field observation where sediment deposition has raised the water level and transformed the gorge into shallow stream due to which bank erosion has occurred at both sides, and widened the stream width and decreased vegetation cover along the sides.

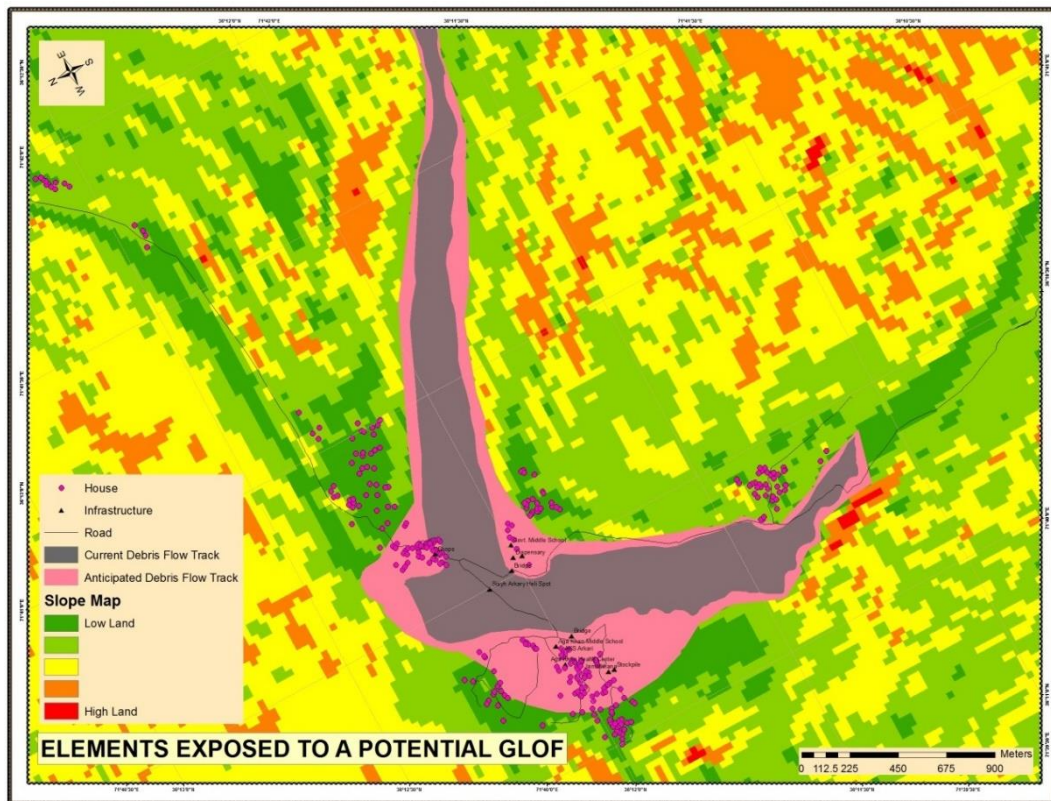


Fig. 8. Elements exposed to potential GLOF

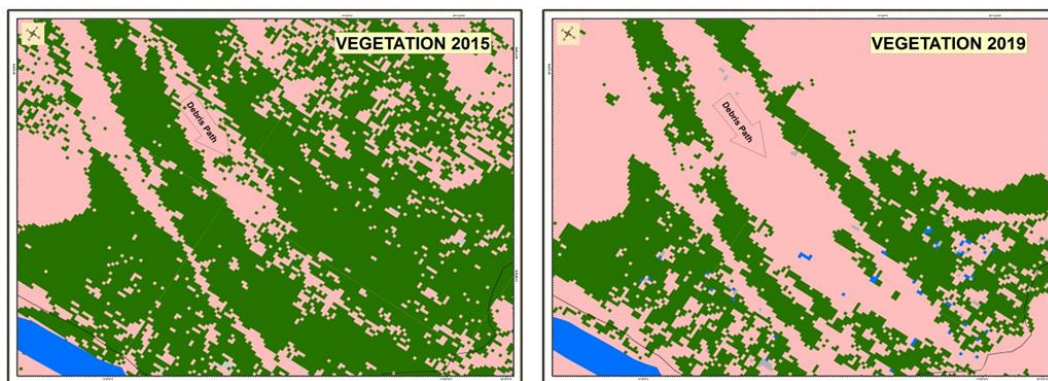


Fig. 9. Decrease in vegetation and increase in debris flow path in the study area between 2015 and 2019

Conclusion

In this study assessment of GLOF hazard and impact of Lake Outburst on the downstream settlement is presented. Although outburst debris flows have been rare in the region, but recession of glacier, expansion of lake and prominent seepage water in the terminal moraine dam means that surge waves can overtop the dam triggering an outburst. Study indicates that the lake can become unstable as surge waves as a result of ice and rock avalanches striking their surface could cause overtopping of end moraine. The study clearly shows that people living downstream of the glacial lakes are at risk from GLOFs. Their lives and property, including infrastructure and crop land are vulnerable. To reduce the impact of GLOFs, we can also increase the preparedness of the community which is settled on the areas laying low along the valley through which water from out bursting lake will flow. Proper planning of land use should be placed in which should focus on using the areas or zones of higher vulnerability for the purposes other than human settlements, i.e., for agriculture or for farming. Enhancement of the coping and adaptive capacity of local governments and communities, reducing of water volume in the lake and establishment of appropriate early warning systems are recommended.

Acknowledgments

Authors highly acknowledge the efforts of Aga Khan Agency for Habitat Pakistan, for providing the platform to conduct this research. Also, the efforts of Deo Raj Gurung, Programme Coordinator, Aga Khan Agency for Habitat, Head Office for giving the preliminary technical input in initiating the research are highly acknowledged.

References

- Clague, J.J., & Evans, S.G. (1992). A self-arresting moraine dam failure, St. Elias Mountains, British Columbia. Current Research, Part A, *Geological Survey of Canada*, Paper 92-1A: 85-188.
- Clague, J.J., Evans, S.G. & Blown, I.G. (1985). A debris flow triggered by the breaching of a moraine-dammed lake, Kattlasine Creek, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences* 22:1492-1502.
- Calkins, A., Jamiluddin., Bhuyank., & Hussaina. (1981). Geology and mineral resources of the Chitral-Partsan area, Hindu Kush Range, Northern Pakistan. *United States Geological Survey Professional Paper*, 716-G.
- Chiarle, M., Iannotti, S., Mortara, G. & Deline, P. (2007). Recent debris flow occurrences associated with glaciers in the Alps. *Global and Planetary Change*. 56:123-136.
- Derbyshire, E., Owen, L.A. (1990). Quaternary alluvial fans in the Karakoram mountains. In: Rachocki, A.H., Church, M. (Eds.), *Alluvial Fans: A field Approach*. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 27–53.
- Derbyshire, E., Fort, M., Owen, L.A. (2001). Geomorphological hazards along the Karakoram Highway; Khunjerab Pass to the Gilgit River, Northwest Pakistan. *Erdkunde, Arcive Fur Wissenschaftliche Geographie*, Boss Verlag Kleve, pp. 49–71.
- Fujita, K., & Nuimura, T. (2011). Spatially heterogeneous wastage of Himalayan glaciers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 14011–14014. doi:10.1073/pnas.1106242108.
- Haq, I. (2007). Community response to climatic hazards in northern Pakistan. *Mountain Research and Development* 27 (4). <http://dx.doi.org/10.1659/mrd.0947>.
- Ives, J.D., Shrestha, R.B., Mool, P.K., (2010). Formation of glacial lakes in the Hindu Kush-Himalayas and GLOF risk assessment. *ICIMOD*, Kathmandu, 1–56.
- Huggel, C., Käab, A., Haerberli, W., Teyssere, P., & Paul, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39: 316–330.
- Huggel, C., Haerberli, W., Käab, A., Bieri, D., & Richardson, S. (2004). Assessment procedures for glacial hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6):1068-1083.
- Käab, A., Huggel, C., Fischer, L., Guex, S., Paul, F., Roer, I., Salzmann, N., Schlaefli, S., Schmutz, K., Schneider, D., Strozz, T. & Weidmann, Y. (2005). Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high Mountains: an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5:527-554.

- Khan, M.A., Haneef, M., Khan, A.S. & Tahirkheli, T. (2012). Debris-flow hazards on tributary-junction fans, Chitral, Hindu Kush Ranges, northern Pakistan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, 720–733.
- Kargel, J. S., Cogley, J. G., Leonard, G. J., Haritashya, U., & Byers, A. (2011). Himalayan glaciers: The big picture is a montage. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 14709–14710. doi:10.1073/pnas.1111663108.
- Kaser, G., Cogley, J. G., Dyurgerov, M. B., Meier, M. F., & Ohmura, A. (2006). Mass balance of glaciers and ice caps: Consensus estimates for 1961–2004. *Geophysical Research Letters*, 33(19), 1–5. doi:10.1029/2006GL027511.
- Roohi, R., Ashraf, R., Naz, R., Hussain, S.A., Chaudhry, M.H., 2005. Inventory of glaciers and glacial lakes outburst floods (GLOFs) affected by global warming in the mountains of Himalayan region, Indus Basin, Pakistan Himalaya. ICIMOD Report, Kathmandu, Nepal.
- Scherler, D., Bookhagen, B., & Strecker, M. R. (2011). Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover. *Nature Geoscience*, 4(1), 1–1. 10.1038/ngeo1059.
- Watkins, K. (Ed.). (2007) *Human Development Report 2007: Climate Change and Human Development—Rising to the Challenge*. Palgrave Macmillan.
- Zemp, M., Hoelzle, M., & Haeberli, W. (2009). Six decades of glacier mass-balance observations: A review of the worldwide monitoring network. *Annals of Glaciology*, 50, 101–111. doi:10.3189/1727564097877.



Debris flow mitigation in Chitral Region, Pakistan

Z. Uddin, T. Zaman, M. Anjum, S. Uddin, N. Uddin

*Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in Pakistan, Islamabad, Pakistan,
zia.uddin@akdn.org, tahir.zaman@akdn.org, muhammad.anjum@akdn.org,
salahuddin@akdn.org, nasiruddin.shah@akdn.org*

Abstract. Most of the villages in the Hindukush region are settled on alluvial fan and riverbed. The catchment of the alluvial fan is composed of high peak mountains that are covered with glaciers and snow. The glaciers and snow are the main sources of water for drinking and agriculture purposes. Debris flows is a major hazard in the Hindukush region where they repeatedly result in disaster. In 2015 debris flow and flash flood caused 30 casualties in the Chitral region besides infrastructure damage. Debris flow events occur due to the rapid melting of glacier/snow and intense rainstorm, instability of steep slopes, and unconsolidated material overlying bedrocks. Through Hazard Vulnerability and Risk Assessment, (HVRA) maps of different villages are developed. Each hazard is further classified based on intensity and frequency. Based on risk and feasibility mitigation is recommended. Two types of mitigation are practiced passive and active mitigation. Passive mitigation is carried out by sharing of hazards and Risk maps with Government and other stakeholders for land use management. Based on hazard maps awareness seminars in villages are conducted and people are educated about prevailing geohazards. Safe routes are also identified and through mock drill communities are prepared to do the evacuation. Active mitigation is focused on the reduction of hazard levels by the construction of protection walls, channelization, and check dams. After completion of mitigation projects, the risk has been reduced according to HVRA maps. Post-disaster analysis of mitigation structures is necessary to evaluate the effectiveness and sustainability of the designs to improve future projects.

Key words: *debris flow, mitigation, alluvial fan, protection wall, hazard*

Cite this article: Uddin Z., Zaman T., Anjum M., Uddin S., Uddin N. Debris flow mitigation in Chitral Region, Pakistan. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhiya K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 282–289.

Мероприятия по смягчению последствий селевых потоков в округе Читрал (Пакистан)

З. Уддин, Т. Заман, М. Анджум, С. Уддин, Н. Уддин

*Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Пакистане, Исламабад, Пакистан,
zia.uddin@akdn.org, tahir.zaman@akdn.org, muhammad.anjum@akdn.org,
salahuddin@akdn.org, nasiruddin.shah@akdn.org*

Аннотация. Большинство сел в Гиндукуше расположены на аллювиальных конусах и в днищах речных долин. Водосборные бассейны, заканчивающиеся аллювиальными конусами, окружены высокими горными хребтами, покрытыми ледниками и снежниками. Ледники и снежники являются основными источниками воды для питьевых и сельскохозяйственных целей. Большую опасность для горного региона Гиндукуша представляют селевые потоки, где они неоднократно приводили к катастрофическим последствиям. В 2015 г. селевые потоки и ливневые паводки, помимо ущерба, нанесенного инфраструктуре, привели к 30 жертвам среди населения в округе Читрал. Селевые потоки происходят из-за быстрого таяния ледников/снега и интенсивных ливней, нестабильности крутых склонов и наличия больших объемов рыхлого материала, накопившегося поверх коренных пород. По

результатам оценки уязвимости и риска (HVRA) составляются карты различных населенных пунктов. На основе этой оценки рекомендуются мероприятия по снижению риска. Практикуются два типа мероприятий по смягчению последствий: пассивные и активные. Пассивное смягчение осуществляется путем обмена картами опасностей и рисков с правительством и другими заинтересованными сторонами для разработки мероприятий по управлению землепользованием. На основе карт опасности проводятся семинары по повышению информированности населения о преобладающих георисках. Также определяются безопасные маршруты, и с помощью тренировочных учений население готовится к эвакуации. Активные меры по смягчению последствий сосредоточены на снижении уровня опасности путем строительства защитных стенок, создания дополнительных русел и противоселевых дамб. После завершения проектов по снижению риска, согласно созданным картам, риск снижается. Для оценки эффективности разработанных мер и с целью улучшения будущих проектов необходима проводить анализ эффективности этих мер после прохождения стихийных бедствий.

Ключевые слова: селевой поток, мероприятия по смягчению последствий, аллювиальный конус, защитные стенки, опасность

Ссылка для цитирования: Уддин З., Заман Т., Анджум М., Уддин С., Уддин Н. Мероприятия по смягчению последствий селевых потоков в округе Читрал (Пакистан). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 282–289.

Introduction

In the north of Pakistan there lies a deep river traversed valley Chitral located in the eastern Hindukush Ranges at the south-western part of the Pamir Syntaxis [Haneef, 2010]. The district Chitral overlays an area of 15,000 km² in mountainous terrain with an elevation range from 1000 m to 7700 m above sea level (a.s.l.) [Saeed et al., 2010]. The river of Chitral crisscrosses the district as a primarily U-shaped valley molded in response to Late Quaternary ice-age glaciations [Saeed et al., 2010]. The location of the understudied village is in Chitral named Awi Shoghore and georeferenced as 36.00833N, 71.75833E. The village under multiple hazards but debris flow is the most prominent. In July 2015 debris flow completely damaged 2 households and partially damaged 4 households besides cultivated lands, and forests. In the course of Quaternary, valley-fill sediments of great width have been deposited by glacial, fluvial, eolian, and mass-movement processes and the fluvial incision eroded these sediments and formed terraces. Their development was controlled by tectonic and climatic influences, and therefore they record information about the Quaternary landscape evolution and glaciations [Kamp, 2004]. Climate change effects on the glacier bearing mountains and increased climate variability are already affecting water accessibility, and extreme weather is causing flash floods, landslides, and debris flow [Arabinda Mishra, 2019].

The most familiar geomorphic trait of the Chitral region is steep slopes associated with high-relief mountains, which fuse into extensive relatively even floodplains. The dense network of the tributary system covers these slopes. They drop sediments on go into valley floors developing a range of tributary-junction landforms including debris cones, debris fans, and alluvial fans [Tahirkheli, 2013]. In a region, where plane land for settlement and cultivation is rare, fane terraces are used, and in some cases, these are the only available site for habitation. Developments in irrigation technology and road building has enabled the increasing population to a spread of settlements and cropland on these alluvial fans. Such areas are prone to glacial-lake outbursts that cause flooding of the fans, damaging life, property, and crops [Tahirkheli, 2013]. The Hazards that occurs on the fan surfaces are mainly hydrogeomorphic and are categorized as floods and debris flow based on sediment/water ratio during their carriage and the floods have water content with sediments of 40%.

In comparison, debris flows have 70–90% sediment concentration by weight, forming a heterogeneous admixture and typically forms marginal levees and terminal lobes when deposited [Tahirkheli, 2013].

This paper will focus on the dynamics of debris-flow hazards for alluvial fans with unstable toe baseline deposition, with sediment concentration above 40%, which includes debris flow and debris flood [Tahirkheli, 2013]. The rise in debris flow hazard increases in human-environment interaction and the number of people and asset values exposed to hazards. Vulnerability measurement and assessment are recognized as key components for reducing losses from disasters and facilitating a culture of disaster resilience [Rasler, 2018]. To minimize the vulnerability of the area, hazard vulnerability and risk assessment carried out and based on assessment physical mitigation had been done which reduced the risk from high intensity to low, of the area [Rasler, 2018].

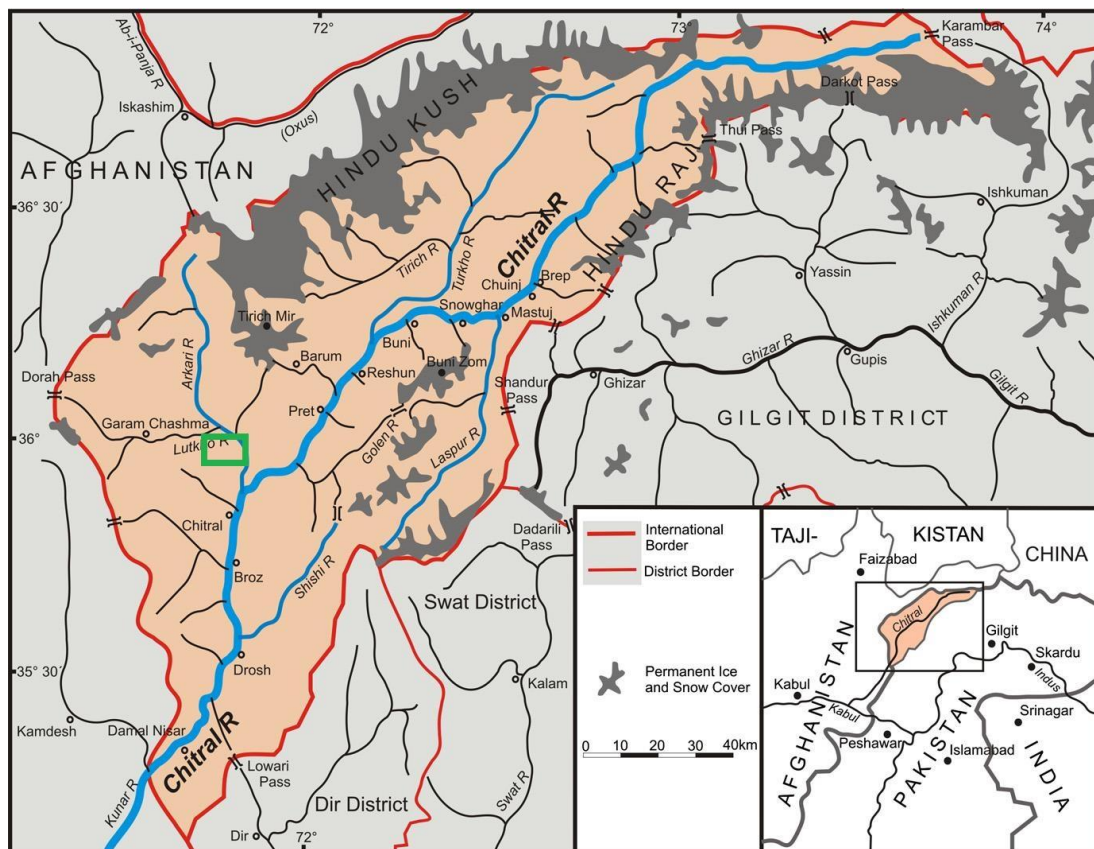


Fig. 10. Location Map of District Chitral, studied area is identified as a green square [Haneef, 2010]

Brief Review of the Problem

The design and implementation of active mitigation measures are vital to reduce the impact of debris-flow activity and to protect inhabitants living downstream. The main problem in active mitigation is the geomorphology of the site and the design. The protection wall has been considered as the most suitable active mitigation structure for alluvial fan geomorphology. The research focuses on the impact of active mitigation on the inhabitants living in debris flow risk areas.

Methods

Since hazards occur at the juncture of socio-ecological systems, reducing hazard loss requires the all-inclusive assessment of risk that considers combined distinctions of the physical, built, and social environments of a place. Hence, risk assessment, and ultimately vulnerability reduction, are processes that require multidisciplinary knowledge of various

coupled physical and social processes to calculate the increasing level of risk posed by hazards [Aksha *et al.*, 2019].

Risk assessment itself is a methodology to determine the nature and extent of risk by analyzing potential hazards and evaluating existing conditions of vulnerability that together could potentially harm exposed people, property, services, livelihoods and the environment on which they depend.

Risk assessments (and associated risk mapping) include a review of the technical characteristics of hazards such as their location, intensity, frequency and probability; the analysis of exposure and vulnerability including the physical social, health, economic and environmental dimensions; and the evaluation of the effectiveness of prevailing and alternative coping capacities in respect to likely risk scenarios. This series of activities is sometimes known as a risk analysis process.

The methodology of research is based upon hazard risk vulnerability assessment of debris flow and the followed physical mitigative structures. The applicable mitigative design can minimize the effect of debris-flow intensity. the indication of its potential for destruction and is expressed as a function of the intensity and the return period. Its values will be used to weight the exposure in the risk calculation and should be relative values. The significance allows us to explicitly give more importance to frequent and/or high-intensity hazards in the risk calculation.

The location, design, and potential to resist the debris flow of the mitigative structure contribute to low the intensity of the debris flow [Aksha *et al.*, 2019].

Data

To Mitigate the debris flow risk AKAH Pakistan initiated a project to reduce the risk. The initiated project encompasses active mitigation. In active mitigation, the protection wall model has been used to lessen the intensity of debris flow. The household data and infrastructure data acquired from the HVRA database. The catchment of the debris flow in Awi is barren regolith encompasses an area of 35.92 km². The slope angle of the gorge is 5 to 7-degree steep to facilitate the debris velocity. To prevent the high risk of debris flow protective wall of 103 feet in length and 10 feet high from natural surface level has been built on the convex portion of the gorge.



Fig. 11. Cross-sectional view of protection wall along the gorge at the convex portion of the meandering stream

Fig. 12. Side view of the protection wall

Analysis

The analysis based on the risk index of the village before and after the active mitigation The process of risk index described here leads to the calculation of two risk indices.

- Risk index (activity zone) better depicts the risk of infrastructure and economic activities, therefore the activity zone exposure is the physical exposure of the village to natural hazard

$$Risk\ Index(Actvity\ Zone) = Exposure\ e(Area) * Vulnerability$$

- Risk index (living zone) better depicts the risk of loss of life and injuries, therefore the living zone exposure is the percentage of a village population at-risk

$$Risk\ Index(Living\ Zone) = Exposure\ (Population) * Vulnerability$$

For prioritization purposes, it might be required to summarize the risk index (activity zone) and the risk index (living zone) into a single risk index (village). Given that the living zone better depicts the location of people while the activity zone better depicts the location of activities and infrastructure, and given the relative importance of life lost compared to economic loss and infrastructure damage, it is accepted that the risk index (living zone) will be given a heavier weight. In addition, the population parameter of living zones is taken into account as by simple averaging of living zones risk index the final village risk can be misleading. Thus, the final calculation formula for village risk index is expressed as follow:

$$RiskIndex(Village) = 0.8 * (\sum_{i=0}^N (RiskIndex(LivingZone_i) * CalibrationIndex_i) / N) + 0.2 * RiskIndex(ActvityZone)$$

$$Calibration\ Index_i = Population(Living\ Zone_i) / (\sum_{i=0}^N (Population(LivingZone_i) / N))$$

where

- *CalibrationIndex* is a derived index to calibrate initial living zone risk index based on population factor;
- *N* is total number of living zones of an activity zone.

0.8 & 0.2 indicates 80% & 20% weight given to risk of living & activity zone respectively [HVRA, 4 October 2014].

Following the formula of risk index is calculated through Arc GIS has and the results are as follows [HVRA, 4 October 2014].

Various Indices Pre Mitigation

Table 7. The exposure, susceptibility, coping capacity, adaptive capacity, vulnerability, and risk in the pre mitigation scenario

Hazard	Exposure	Susceptibility	Coping Capacity	Adaptive Capacity	Vulnerability	Risk
Avalanches	0.0042	0.45	0.66	0.7	0.36	0.0015
Bank Erosion	0.0031		0.77		0.33	0.001
Debris Flow	0.2456		0.66		0.36	0.0889
Earthquake	0.149		0.68		0.36	0.0538
Flood	0.0168		0.66		0.36	0.0061
Rockfall	0.1259		0.74		0.34	0.0426
Multi-Hazard	0.5446	0.45	0.64	0.7	0.37	0.2005

Various Indices Post Mitigation

Table 8. Post mitigation indices

Hazard	Exposure	Susceptibility	Coping Capacity	Adaptive Capacity	Vulnerability	Risk
Avalanches	0.0043	0.32	0.7	0.74	0.3	0.0013
Bank Erosion	0.0033		0.83		0.25	0.0008
Debris Flow	0.1976		0.7		0.3	0.0579
Earthquake	1		0.73		0.29	0.2869
Flood	0.0157		0.7		0.3	0.0046
Rockfall	0.1278		0.79		0.27	0.0342
Multi-Hazard	1.3487	0.32	0.69	0.74	0.3	0.4029

The various indices illustrate the difference between the pre and post risk index of the village. The exposure difference is 0.17304 has been reduced due to active mitigation. the susceptibility has been also reduced from 0.45 to 0.32. the coping capacity and adaptive capacity has been increased from 0.66 and 0.7 to 0.7 to 0.74, respectively. Thus, the vulnerability of the habitat also condensed from 0.36 to 0.3. Hence the scenario changed the risk index of the village from 0.0889 to 0.0579 with a difference of 0.31 in response to debris flow mitigation.

Table 9. Impact of mitigation on the village Awi Shoghore

	Household			Population			Infrastructure		
	High	Medium	Low	High	Medium	Low	High	Medium	Low
Before	11	18	37	70	111	251	Helispot, Hotel, Mosque, Water tank	Bank, School, Jamat Khana	Wildlife office, AKHC, AKHC Staff house
After	0	30	37	0	202	251	NA	Bank, School, Jamat Khana, Water Tank, Mosque	AKHC, AKHC Staff house, Wildlife Office

The Table 3 illustrates the effect of active mitigation measures ensured the positive changes in the villages. After the mitigation, the 11 households in high risk moved to medium and low vulnerable areas. The infrastructure in high risk displaced to medium and medium to low consequently.

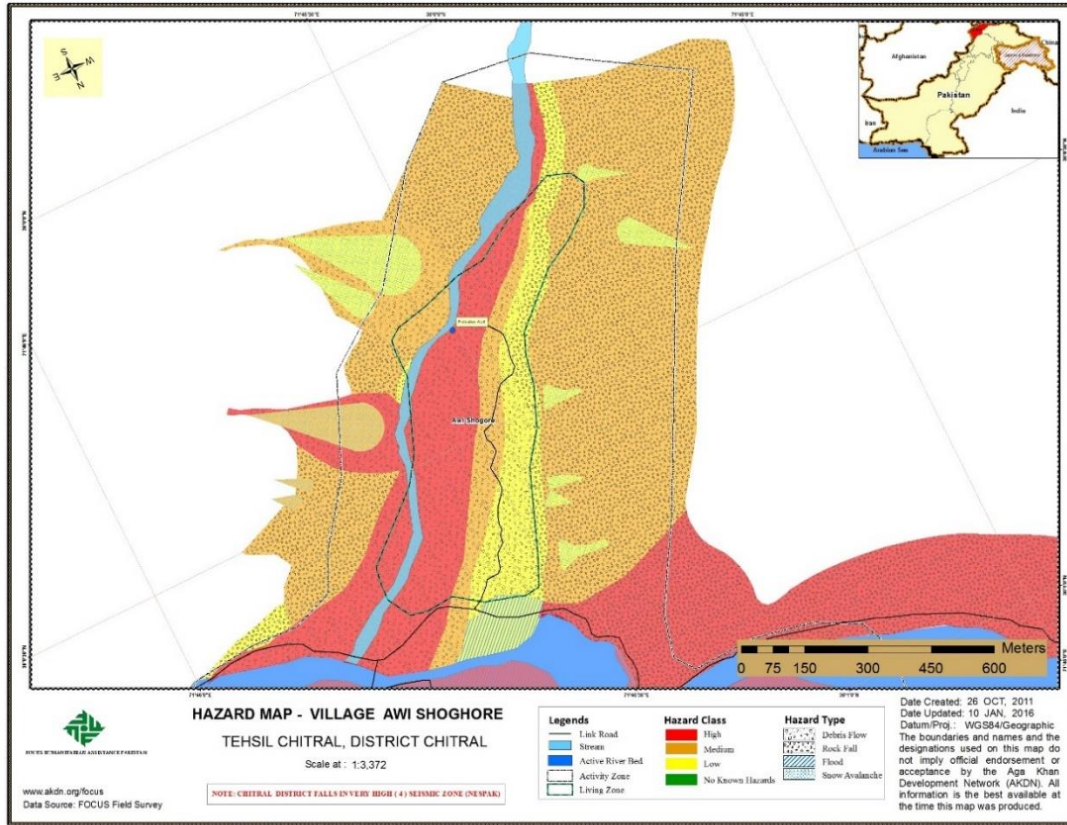


Fig. 13. Hazard map of the village developed before mitigation

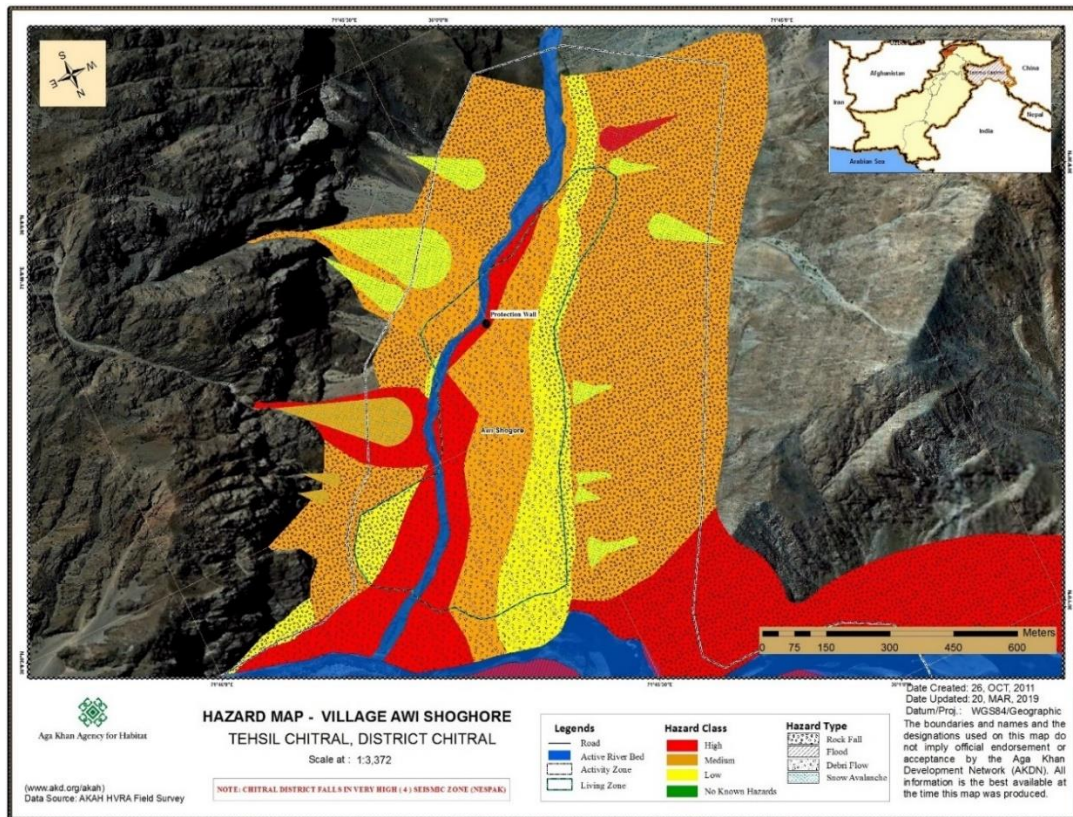


Fig. 14. Hazard map of the village after completion of the mitigation project. The map illustrates that due to mitigation the high hazard class has been shifted towards the gorge

Conclusion

Natural hazards are the most prominent factor that affects the habitat in the northern areas of Pakistan. Although all hazards leave their mark on the community, but the debris flow is the most disastrous. Debris flow will affect the community if not mitigated properly. Due to climate change, the monsoon causes flash floods even in the Upper parts of the Chitral region. In the village, Awi Shoghore a small step has been taken to prevent the overflow of debris at critical points. Post-disaster analysis of mitigation structure is helpful to evaluate the effectiveness and sustainability of design. As both the precautionary and preventable measures were taken then the risk index of the village has been reduced.

References

- Aksha, S.K., Juran, L., Resler, L.M., Zhang, Y. (2019). An analysis of social vulnerability to natural hazards in Nepal using a modified social vulnerability index. *International Journal of Disaster Risk Science*, 10, p. 103–116.
- Arabinda Mishra, A. N. (5 January 2019). Adaptation to Climate Change in the Hindu Kush Himalaya: Stronger Action Urgently Needed. *The Hindu Kush Himalaya Assessment*, 57.
- HVRA, F. (October 4, 2014). AKDN Disaster Risk Management Initiative.
- Kamp, U.A., Haserodt, K., Shroder Jr, J.F. (2004). Quaternary landscape evolution in the eastern Hindu Kush, Pakistan. *Geomorphology*, 57 (1-2), p. 1-27.
- Saeed, A., Asif Khan, M., Haneef, M. (2010). Morphometry of alluvial fans and its relation to debris flow hazards in Chitral valley, N. Pakistan. *Journal of Himalayan Earth Sciences* 43, 73-73.
- Tahirkheli, M.A. (2013). Debris-flow hazards on tributary junction fans, Chitral, Hindu Kush Range. *Journal of Asian Earth Sciences*.



Комплексная оценка и планирование управления водосборными бассейнами в Раштской долине Республики Таджикистан

У.Р. Пирмамадов

*Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, Душанбе,
Таджикистан, ubaidullo.pirmamadov@akdn.org*

Аннотация. В статье излагаются подходы и конкретные мероприятия, предлагаемые филиалом Агентством Ага Хана по Хабитат (АКАН) совместно с сетью Фонда Ага Хана и Программой поддержки развития горных обществ (MSDSP) в комплексной оценке и планировании управления водосборными бассейнами. Поставленная задача состоит из выполнения ряда компонентов и комплекса задач, направленных на выбор методики новых технологий для оценки образования и условий проявления геологических процессов, гидрологических ресурсов, деградации почв и биоресурсов эрозионными процессами и антропогенными факторами с использованием новых технологий ГИС. Основная цель данного проекта является – оценка природно-геологических угроз в пределах субводосборных бассейнов (малые водосборные бассейны), гидрологических условий, физико-механического состояния грунтов и почвенного слоя, геоботанических условий местности, площади распространения растительности в зависимости от высотной зональности, состояния земель и пастбищ с целью планирования и управления.

Ключевые слова: комплексная оценка, планирование и управление, водосборные бассейны, субводосборные бассейны (малые водосборные бассейны), гидрологические условия, состояние почвенного слоя, деградация земель, геоботанические условия, биорастительность, почвенный слой, устойчивое управление, эрозионные процессы

Ссылка для цитирования: Пирмамадов У.Р. Комплексная оценка и планирование управления водосборными бассейнами в Раштской долине Республики Таджикистан. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 290–302.

Integrated assessment and planning of watershed management in the Rasht valley of the Republic of Tajikistan

U.R. Pirmamadov

*Aga Khan Agency for Habitat in Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan,
ubaidullo.pirmamadov@akdn.org*

Abstract. The article outlines the approach and specific activities proposed by the Aga Khan Foundation network, the Mountain Societies Development Support Program (MSDSP), and the Aga Khan Habitat Agency (AKAH). The goal contains a number of components and a set of tasks aimed at choosing the latest methods of new technologies for assessing the formation and conditions for the manifestation of geological processes, hydrological resources, degradation of soils and biological resources by erosion processes and anthropogenic factors using new GIS technologies. The main goal of this project is to assess natural-geological threats within the territory of sub-catchment basins (small catchment basins), hydrological conditions, physical and mechanical condition of soils and soil layer, geobotanical conditions of the area, vegetation distribution area depending on altitudinal zonation, assessment of land and pasture conditions for planning and management purposes.

Key words: *integrated assessment, planning and management, watersheds, basins, sub catchment basins (small catchment basins), hydrological conditions, soil condition, land degradation, geobotanical conditions, bio-vegetation, soil cover, sustainable management, erosion processes*

Cite this article: Pirmamadov U.R. Integrated assessment and planning of watershed management in the Rasht valley of the Republic of Tajikistan. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 290–302.

Проблемы устойчивости горной среды связаны с изменением климата являются в настоящее время актуальными для мирового общества. Ситуация устойчивого развития горных систем в настоящее время имеет тенденции к ухудшению. Оно выражено в ускорении процессов эрозии почв, сокращении площади лесов, загрязнения ледников и вод, развития катастрофических селевых потоков, оползней, обвалов и других геологических процессов.

Анализ активизации вышеназванных процессов показывает, что техногенные факторы играют большую роль в расширении масштабов разрушения горной среды.

Нынешняя демографическая ситуация выступает как фактор возрастающего давления на горные экосистемы. Это дополнительное давление на зеленые насаждения, пастбища, почвы, водные ресурсы, животный мир и т.д.

Организации сети Ага Хана совместно с партнерами реализуют проекты по устойчивому развитию горных регионов Таджикистана.

Проект «Комплексная оценка, планирование и управления водосборными бассейнами в Раштской долине Республики Таджикистан», содержит подходы и конкретные мероприятия для проведения мероприятий по ослаблению угроз горной экосистемы, предлагаемые Фондом Ага Хана, Программой поддержки развития горных обществ и филиалом Агентством Ага Хана по Хабитат.

Предлагаемые мероприятия основываются на достижениях проекта по комплексному улучшению здоровья и местообитания (ИНИ) в Раштской долине, который финансируется Швейцарским агентством по развитию и сотрудничеству (SDC) и Фондом Ага Хана.

Основная цель проекта является – оценка природно-геологических угроз в пределах субводосборных бассейнов – гидрологические условия, физико-механическое состояние грунтов, геоботанические условия местности, площадь распространения растительности в зависимости от высотной зональности, оценка состояния земель и пастбищ с целью планирования и управления.

Поставленная задача содержит ряд компонентов, направленных на выбор методики новых технологий для оценки образования геологических процессов, гидрологических ресурсов, деградации почв и биоресурсов эрозионными процессами и антропогенными факторами.

В работе над составлением проекта принимали участие: Бобов Р. (глава департамента OR&T АКАН), Шафиев Г. (начальник геологического отдела OR&T АКАН), Курбонмамадов Д. (начальник отдела ГИС OR&T АКАН) и две полевые команды в составе: 1-ая команда: Шахбозбеков Х. (старший специалист ГИС), Лаълбеков Ё. (геолог), Азимшоев М. (геолог), Каримов А. (гидрогеолог), Ханджаров А. (геоботаник), Неъматов Х. (пастбищевед), Олифтаев Г. (почвовед), Шоназарбеков С. (лесовед), Саидов М. (агроэкономист), Сафолов М. (социолог); 2-ая команда: Зарипов Р. (старший геолог), Нуров Т. (специалист ГИС), Имомназаров Ф. (геолог), Тагойбеков А. (гидрогеолог), Абдуллоева М. (социолог), Юсупов С. (геоботаник), Бобоев Д. (лесовед), Джумаев О. (пастбищевед), Файзиев Н. (почвовед), Хасаков Ю. (агроэкономист).

В Раштской долине региона были выбраны 14 субводосборных бассейнов с прилегающими их территориями.

В ходе реализации проекта были проведены следующие работы:

- изучены и анализированы геологические материалы Государственного фонда геологической информации о недрах при Главном управлении

геологии, материалы Института почвоведения и геоботаники при Академии наук Республики Таджикистан, а также материалы отделов Комитета по чрезвычайным ситуациям в районах Раштской долины по развитию геологических процессов за последние 15-20 лет. Названные материалы были использованы для составления Карты процессов.

- определялась методика изучения процессов с использованием новых технологий ГИС по поиску и картированию современных геологических процессов.
- проведены полевые маршруты, вертолетные облёты, дешифрирование спутниковых снимков для выявления и детального описания процессов в пределах субводосборных бассейнов.
- составлены карты:
 - современных геологических процессов субводосборных бассейнов (рис. 1),
 - гидрологических условий района работ с прилегающими элементами (рис. 2),
 - расположения пастбищ, землепользования и их состояние (рис. 3),
 - строение почвенного слоя в зависимости от высотной зональности,
 - геоботаническая с указанием распространения растительности и их ресурсов (рис. 4),
 - сезонное использование пастбищ;
- проведена корреляция частоты деградации растительного-почвенного слоя в зависимости от воздействия природно-геологических и антропогенных факторов на ключевых участках с учетом специфики и доступности распространения биоресурсов.

Геологическая часть отчета для субводосборных бассейнов содержит:

Физико-географический очерк – орография, гидросеть, климат, растительный и животный мир.

Демографические данные – общая характеристика водосборных бассейнов, социальные проблемы, рекомендации и выводы.

Геологическое строение – стратиграфия, тектоника, магматизм и геоморфология водосборных бассейнов.

Современные геологические и природные процессы в водосборном бассейне – обзорное описание имеющихся природных угроз – лавины, селевые потоки, подмыв и обрушение берегов, оползни, камнепады, затопление (наводнение), суффозии и т. д.

Для каждого субводосборного бассейна составлялись отчеты, заполнялись рабочие листы по угрозам, таблицы и карты-схемы.

Ниже приведён пример карты угроз одного из водосборных бассейнов на территории Раштской долины (рис. 1).

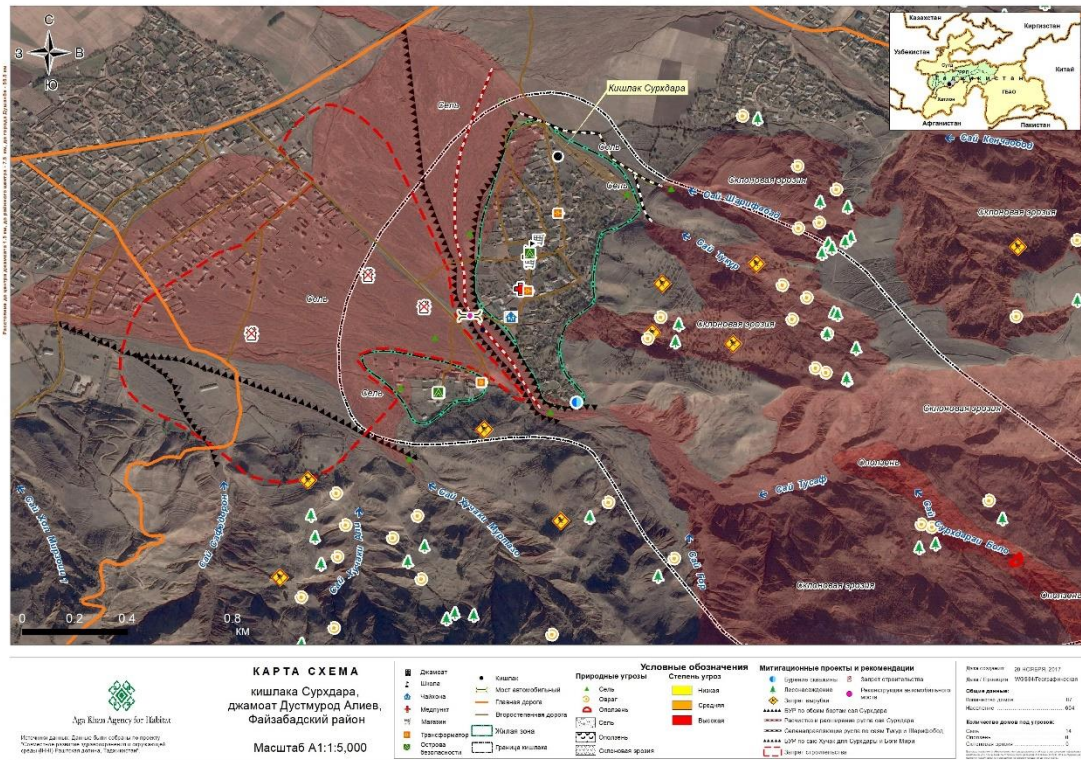


Рис. 1. Карта-схема угроз водосборного бассейна Сурхдара, Файзабадского района

Fig. 1. Sketch map of hazards for the Surkhudara catchment (Fayzabad District)

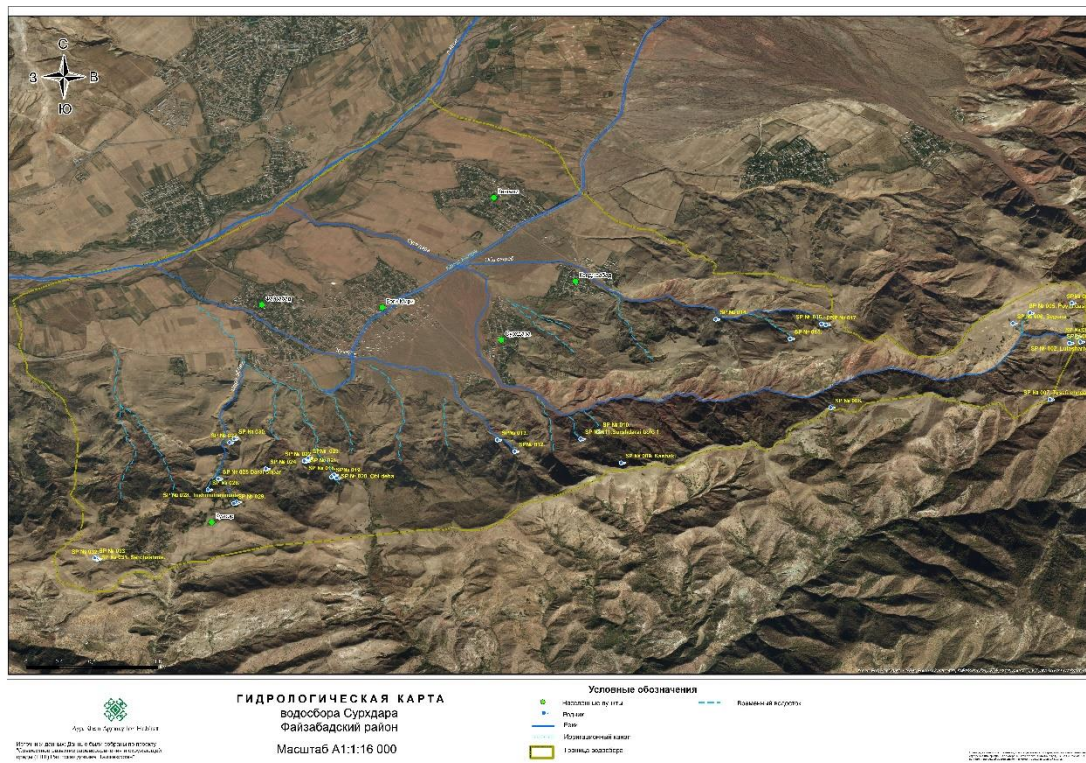


Рис. 2. Гидрологическая карта водосбора Сурхдара, Файзабадского района

Fig. 2. Hydrological map of the Surkhudara catchment, Fayzabad District

Гидрология – гидрография бассейна, климатическая и гидрологическая характеристика водосборных бассейнов, ледники, реки, ручьи и временные водотоки, озёра, родники (лабораторные данные пробы воды из родника), способы обеспечения населения питьевой и поливной водой, выводы и рекомендации.

Для каждого водосборного бассейна составлялись отчеты, приводились таблицы, данные химического анализа воды из родников и составлена карта-схема гидрологии водосборного бассейна.

В статье приведен пример гидрологической карты одного из водосборных бассейнов на территории Раштской долины (рис. 2).

Оценка почвенного покрова – характеристика почвенного покрова, эрозийная устойчивость почвы к природным факторам, плодородие почвы, пути их повышения и охраны, структура почвы и факторы борьбы с эрозией, таблица анализа почв, выводы и рекомендации.

В результате исследований почвенного покрова выявлено, что водосборные бассейны (Шураки Нушор, Сурхдара и Коксу) состоят из трёх типов почв.

1. Высокогорные светло-коричневые выщелоченные почвы (1700–2800 м).
2. Высокогорные лугово-степные почвы (2800–3500 м).
3. Высокогорные степные почвы (3500–4500 м).

Основная роль в образовании почв принадлежит растениям, которые используя солнечную энергию, синтезируют органическое вещество путем усвоения углекислоты воздуха, воды, соединений азота и зольных элементов почвы.

Особенно велика роль в почвообразовании корневая система растений, с которой связано накопление почвенного перегноя, образования структуры почвы, развития интенсивной микробиологической деятельности. От растительного покрова зависит нагревание поверхности почвы и потери тепла.

По итогам оценки почвенного покрова водосборного бассейна составлялись отчеты, таблицы и карта-схемы сезонного использования пастбища в водосборном бассейне (рис. 3).

Большие потери хозяйств в результате эрозии определяют основные задачи работ по защите почв, целью которых является улучшение водного режима, предупреждение, прекращение или ослабление эрозийных процессов, повышение производительности горных территорий, вовлечение в хозяйственный оборот земель, уже вышедших из сельскохозяйственного оборота. Работы должны проводиться для восстановления и повышения производительности горных территорий.

Производственный опыт и научные исследования показывают, что улучшение водного режима, борьба с эрозией почв и повышение производительности горных территорий в условиях Средней Азии могут быть достигнуты путем применения следующих мероприятий.

1. организационно-хозяйственные,
2. агротехнические,
3. лесомелиоративные,
4. гидротехнические.

Геоботаническая оценка бассейна – состояние растительности, природно-хозяйственные условия, краткая характеристика основных кормовых, вредных, ядовитых лекарственных растений, типология растительности и кормовых угодий, культурно-техническое состояние пастбищ, заключение и рекомендации.

В настоящее время, в процесс природопользования во многих случаях наступление на природу идёт гораздо быстрее и более масштабнее, чем проведение защитно-восстановительных мероприятий. Поэтому необходимо заранее принимать действенные меры, направленные на предупреждение возникающих климато-географических сдвигов, приводящих к уничтожению фауны и флоры.

Основная причина уменьшения количества растений связана с широким использованием площадей в качестве пастбищ. Надо отметить, что в водосборных бассейнах «неудобные» земли занимают значительную площадь. К ним относятся:

каменистые вершины хребтов, ледники, снежники, осыпи, скалисто-каменистые склоны, не имеющие практического значения.

В результате интенсивного использования, продуктивность пастбищ постепенно снижается. Главной причиной ухудшения кормовых угодий является длительный бессистемный выпас.

В низко-среднегорной области с резким крутосклонным рельефом, хозяйственная деятельность человека вызвала уничтожение древесно-кустарниковой и травянистой растительности, что в свою очередь привело к ускоренному развитию эрозии, оползневых процессов и росту оврагов.

Рациональное использование пастбищ требует недопущения вольного выпаса скота сразу по всей территории, правильного соотношения количества скота и корм ёмкости пастбищ, временный запрет выпаса в отдельных урочищах, либо участках с целью восстановления растительного покрова, применение загонной системы пастбищ.

Для всех пахотных угодий характерно отсутствие защитных полос по краям площадей, расположенных близко к обрывам. Поэтому, в целях защиты их от эрозии, нельзя допускать распашку и посев сельхоз культур, на расстоянии менее чем 10м от обрыва.

Для водосборного бассейна составлялись отчеты, таблицы и карта-схемы сезонного использования пастбища. Пример геоботанической карты водосборного бассейна приведен на рис. 4.

Управление пастбищами – оценка состояния, биоразнообразия растений, продуктивность и ёмкость, использование и методы улучшения. Проведение анализов состояния и управления пастбищными ресурсами. При анализе выявляются:

- Управление и состояние пастбищ – состояние животноводства в исследуемой области; анализ посевов и производства кормов; анализ продуктивности пастбищ; стойловое содержание скота; состояние породистости животных; ветеринарные услуги; гендерные отношения в управлении животноводством; пастбищные инфраструктуры; обработка и продажа животноводческой продукции; использование пастбищ в иных целях (кроме выпаса скота); основные проблемы в управлении пастбищами; состояние пастбищных земельных ресурсов.
- Продуктивность и ёмкость пастбищ – потребность и обеспеченность кормов в исследуемой области; структура поголовья скота; ёмкость пастбищ и фактическая обеспеченность кормами пастбищных угодий в исследуемой области; мероприятия для уравнивания потребности кормов с поголовьем скота.
- Пути и методы улучшения использования пастбищ – основные методы улучшения использования пастбищ.

Составляется отчет, который включает карту сезонного использования пастбищ (рис. 5) и таблицу с выводами и рекомендациями (таблица 1).

Агроэкономическая оценка – анализ текущего состояния сельского хозяйства; выявление факторов и причин низкой производительности отрасли; создание и использование различных методов математического моделирования для определения уровня жизни и разработки прогнозов; разработка методов и процедур для получения требуемых данных, выработка советов и рекомендаций по предотвращению факторов снижающие производительность сельскохозяйственного сектора, применение новых технологий влияющие на стоимость продуктов питания; анализ уровня жизни жителей сельской местности водного бассейна – как основной причины, в связи с которым сами жители не имеют возможность без помощи международных организаций самостоятельно реализовать проекты предотвращающие природные угрозы; подготовка отчета о результатах оценки с целью определения дальнейшей стратегии развития.

Подготовлены раздаточные материалы в виде письменных рекомендаций и брошюр по борьбе с существующими угрозами, болезней и вредителей растений и правильной технологии выращивания растений, также пути повышения

производительность отрасли. Работа агроэкономиста сосредоточена на использовании и сохранении природных ресурсов страны.

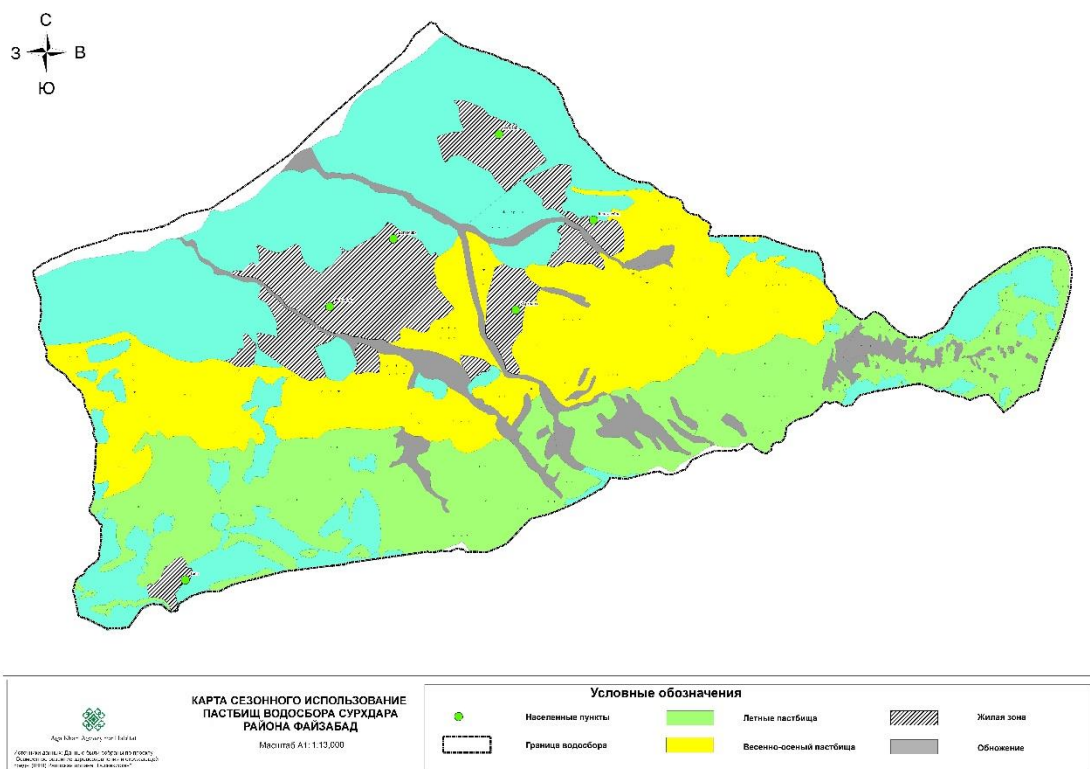


Рис. 5. Карта сезонного использования пастбищ водосбора Сурхдара, Файзабадский район

Fig. 5. Map of seasonal use of pastures of the Surkhudara catchment, Fayzabad District

Таблица 1. Выводы и рекомендации

Table 1. Conclusions and recommendations

Выводы	Рекомендации
Острая нехватка пастбищных угодий	Организовать работу по сертификации пастбищ бассейна и передачи их в обществ пастбище пользователей
	Доступ к новым пастбищам
	Для снижения риска конфликта по использованию пастбищных угодий местные органы государственной власти при раздаче земельных угодий должны учитывать интересы населения сёл бассейна.
Значительное увеличение поголовья скота	Улучшение породы скота за счёт сокращения поголовья местных пород.
Деградация и низкая кормовая продуктивность пастбищ	Прекращение вспахивание земель в верховье бассейна.
	Засыпка траншей вокруг фермерских участков и посадки деревьев для укрепления почвы.
	Организация пастбище оборот (сезонный и там, где возможно, годовой).
Частичное отсутствие структур по управление пастбищами	Создание обществ пастбище пользователей (в тех селах где отсутствует).
	Составить план по управлению пастбищами и животноводством.

Выводы	Рекомендации
Плохое состояние или полное отсутствие пастбищной инфраструктуры	Организации пастбищных инфраструктур в соответствии с нуждами животноводов.
Несоответствии ёмкости пастбищ к поголовью скота	Регулирование поголовья скота в соответствии с нормами и емкостью пастбищных угодий.
Низкая экологическая осведомленность населения	Организовать курсы и тренинги по обучению местных специалистов и скотоводов способами устойчивого управления пастбищами.
Недостаток корма для скота	Увеличение посевов и урожайности кормовых культур
	Обеспечение скота комбикормами.
Полное отсутствие племенных работ (домашний скот местной породы)	Покупка породистого скота или использование точки искусственного осеменения для улучшения пород.

Оценка современного состояния лесов в водосборных бассейнах

С 2018 года филиал АКАН по проекту «Совместное развитие здравоохранения и окружающей среды в Раштской долине Республики Таджикистан» (ИНИ) с целью улучшения жизни населения проводить обследование современного состояния лесов, лесных ресурсов, производства лесоматериалов, развития лесной политики (нелегальная вырубка лесов), а также лесонасаждения для защиты почв от эрозии и других экзогенно-геологических процессов.

Сохранение лесов является необходимым условием поддержания качества среды обитания общества. Наиболее остро эта проблема стоит в густонаселённых районах страны, в том числе в Раштской долине.

Задачи по разработке систем природопользования, оптимально сочетающие меры по поддержанию биоразнообразия с рациональной эксплуатацией лесов, требуют проведения комплексных исследований территорий с выявлением роли абиогенных, биогенных и антропогенных факторов в формировании лесного покрова.

Целый ряд вопросов, связанных с пространственной сопряженностью сообществ, определением динамики землепользования может быть решён только на ландшафтном уровне, в связи с чем перспективен бассейновый подход. Неравномерность и неполнота изученности лесов определяет актуальность исследования их истории, структуры и динамики с привлечением традиционных и новых методов геоботаники и смежных наук.

Цель и задачи исследования – выявление особенностей структуры лесного и растительного покрова.

В ходе работы выявлены природно-хозяйственные условия, собраны данные по характеристике основных древесно-кустарниковых растений, типологии лесной растительности, лесоразведению и лесовосстановлению, охране и защита леса, побочном использовании леса, охране фауны, разработаны рекомендации и мероприятия, созданы карта-схемы лесов в водосборных бассейнах.

Инженерная оценка водосборных бассейнов – рекомендуемые мероприятия по защите и профилактики от чрезвычайных ситуаций, выявление и описание структурно-митигационных проектов по защите водосборных бассейнов, составление смет, схем и чертежей с использованием новых ГИС технологии ArchiCAD, AvtoCAD и т.д.

Предложены 408 митигационных проектов (по 3 проекта для 136 населённых пунктов) и реализованы 10 митигационных проектов по обследованным водосборным бассейнам на территории Раштской долины.

Социологическая оценка – выявляются основные социальные проблемы и уязвимости общин, проводятся встречи, семинарии и тренинги с населением. Анализируется демографическая ситуация района исследования и даются рекомендации для повышения уровня социального благосостояния общин.



Рис. 6. Космоснимок водосборного бассейна Лояк, Файзабадский район

Fig. 6. Satellite image of the Loyak catchment, Fayzabad District

Заклучение

В рамках проекта «Комплексная оценка и планирование управления водозаборными бассейнами в Раштской долине Республики Таджикистан» для устойчивого развития горных регионов специалистами АКАН в сотрудничестве с государственными учреждениями и партнёрами по развитию проведена оценка опасных природных и техногенных процессов в водосборных бассейнах, изучены гидрологические условия, состояния почвенного слоя, степени и площади деградации земель, геоботанические условия развития биорастительности, состояния земель, лесов и пастбищ с целью управления и повышение эффективности планирования и управления. В ходе реализации проекта в 2017-2019 годы были выполнены нижеследующие мероприятия:

- проведена оценка 14 водосборных бассейнов, **136** населённых пунктов, **12482** хозяйств с населением **133336**;
- составлены картографические материалы в количестве **1001** штук и **136** планов по управлению ЧС и СБ (VDMP);
- проведены тренинги в **136** населённых пунктах;
- предложены **408** митигационных проектов (по 3 проекта для 136 населённых пунктов) и реализованы до декабря 2019 года **10** митигационных проектов.

Ниже приведена таблица распределения мероприятий по водосборным бассейнам, разработанным в ходе реализации проекта (таблица 2).

Таблица 2. Мероприятия, выполненные по водосборным бассейнам

Table 2. Measures carried out on catchments

Водосборные бассейны	Презентации		Буклеты		Эвак. сумка	Карты						Геоботанические работы	Тренинги
	сёл	бассейнов	лавин	правила защиты		угроз	бассейнов	почв	гидрогеологии	пастбищ	лесов		
Каранак	49	5	160	160	160	49	5	5	5	5	5	5	8
Зугара	34	5	95	95	95	42	5	5	5	5	5	5	6
Сурхдара	50	6	500	500	500	42	12	42	42	42	-	42	7
Хилмони	70	6	385	385	385	63	5	-	5	-	-	5	10
Шураки Нушор	56	6	550	550	550	80	14	14	14	14	-	14	8
Мучихарф	42	6	670	670	670	147	6	6	27	6	6	6	21
Лояк	18	6	880	880	880	63	6	6	15	6	6	6	9
Коксу	76	6	1690	1690	1690	112	10	17	17	17	0	17	24
Шураки капали	60	6	675	675	675	84	11	0	0	0	0	0	15
Джавони	105	7	353	353	353	80	0	0	0	0	0	0	16
Шашвалон	8	6	190	190	190	16	6	6	6	6	6	6	8
Сурхоб	17	6	465	465	465	15	6	6	6	6	6	6	10
Пахно	16	6	730	730	730	16	6	6	6	6	6	6	12
Оби кандак	15	6	552	552	552	24	6	6	6	6	6	6	15

В эпоху научно-технической революции сохранение естественного баланса в едином звене человек – природа, охрана и рациональное использование растительного мира считаются самыми актуальными проблемами.

Известный писатель Чингиз Айтматов по защите флоры и фауны на планете отметил: «Сегодня мы достигли таких вершин цивилизации, когда человек должен быть не только «потребителем» природы, но и её покровителем, её сотворцом. Сегодня уже не только мы зависим от природы, а и она от нас. Нашей волей и нашим разумом – этим, величайшим даром Времени и Пространства, той же Природы и Истории – мы должны противостоять нарушению экологического равновесия. В борьбе за сохранение и возобновление природных богатств, за устойчивость экологических систем не должны быть преграды и государственные границы. Ибо возникновение дисбаланса в одном месте больно, а порой катастрофически «детонирует» в другой части земного шара».

Список литературы

- Агроклиматические ресурсы Таджикской ССР. Часть 2. Агроклиматические условия роста и развития сельскохозяйственных культур и пастбищной растительности и отгонное животноводство. Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. 255 с.
- Ахмадов Х.М. Картографирование почв и эрозии в Республике Таджикистан по космическим снимкам. Душанбе, 2013.
- Геологическая карта современных геологических процессов Центральной части Таджикской ССР. Масштаб 1:50000.
- Гришина Л.С., Орлов Д.С. Система показателей гумусового состояния почв. // В кн.: Проблемы почвоведения. М.: Наука, 1978, с. 44-47.
- Комплексная оценка и планирование управления водоразделами в Раштской долины Республики Таджикистан. Материалы отчета. Международная организация «Агентство Ага Хана по Хабитат». Проекты. 2017–2019.
- Кутеминский В.Я., Леонтьева Р.С. Почвы Таджикистана. Вып. 1. Душанбе: Ирфон, 1966. 223 с.
- Мадаминов А.А. Продуктивность горных пастбищ и сенокосов Республики Таджикистан. М. ВИНТИ, 1992. 191 с.
- Пастбища и сенокосы СССР. М.: Колос, 1974. 512 с.
- Пастбища и сенокосы Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1977, 302 с.
- Чукавина А. Основные черты структуры растительного покрова хребта Сурхоб (Центральный Таджикистан) // Изв. АН РТ. Отд. биол. наук, 1985. № 2 (99). С.19-24.
- Якутилов М.Р., Бурикин А.М., Садриддинов А.А. и Лукин В.Н. Почвы Таджикистана. // Эрозия почв и борьба с ней. Выпуск 6. Душанбе: Таджгосиздат, 1963.



Оценка потенциального прорыва озера Варшезкуль Нижнее (Памир, Таджикистан) по результатам батиметрической съемки и моделирования

Ю.Х. Раимбеков¹, У.Р. Пирмамадов¹, Ф.О. Мародасейнов¹, И.И. Зикиллобеков¹,
А.Г. Гуломайдаров¹, С.С. Черноморец², Е.А. Савернюк², И.В. Крыленко²,
И.Н. Крыленко², В.М. Кидяева², В.А. Куровская², К.С. Висхаджиева², Р.А. Бобов³

¹Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, Душанбе,
Таджикистан, yusuf.raimbekov@akdn.org

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия, sc@geogr.msu.ru

³Организация Ага Хана по Развитию, Душанбе, Таджикистан

Аннотация. Локальные опасные природные процессы (в основном, камнепады, сходы селей и снежных лавин) часто происходят в горах Таджикистана, в горных селениях существуют современные меры по предупреждению и защите от этих явлений. Однако, отдаленные геологические угрозы высокой магнитуды и низкой повторяемости практически не изучены и представляют большую угрозу для местных сообществ. Сотрудниками Филиала Агентства Ага Хана по Хабитат в Таджикистане совместно с экспертами из Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Россия) были проведены полевые исследования, включавшие батиметрическую съемку озер, маршрутное обследование долин, по которым могут сойти прорывные сели и паводки, аэросъемку ключевых участков с применением беспилотного летательного аппарата. По результатам исследований проводилось сценарное математическое моделирование возможного прорыва озера Варшезкуль нижнее. Входными данными для моделирования являлись данные о рельефе территории и возможные сценарии прорыва горных озер, результатами моделирования – плановое распределение глубин затопления, скоростей течения и потенциальной опасности в горных долинах ниже прорывоопасного озера. В результате работы выявлены наиболее уязвимые территории в пределах населенных пунктов, расположенных в устьевой части долины р. Варшездара.

Ключевые слова: опасные геологические процессы, батиметрическая съемка, моделирование прорыва озера, FLO-2D, Варшезкуль, Агентство Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан

Ссылка для цитирования: Раимбеков Ю.Х., Пирмамадов У.Р., Мародасейнов Ф.О., Зикиллобеков И.И., Гуломайдаров А.Г., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Кидяева В.М., Куровская В.А., Висхаджиева К.С., Бобов Р.А. Оценка потенциального прорыва озера Варшезкуль Нижнее (Памир, Таджикистан) по результатам батиметрической съемки и моделирования. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 303–312.

Assessment of a potential outburst for Lower Varshedzkul Lake (Pamir, Tajikistan) using bathymetric survey and modeling

Y.K. Raimbekov¹, U.R. Pirmamadov¹, F.O. Marodaseinov¹, I.I. Zikillobekov¹,
A.G. Gulomaydarov¹, S.S. Chernomorets², E.A. Savernyuk², I.V. Krylenko²,
I.N. Krylenko², V.M. Kidyayeva², V.A. Kurovskaia², K.S. Viskhadzhieva², R.A. Bobov³

¹Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, Dushanbe,
Tajikistan, yusuf.raimbekov@akdn.org

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, sc@geogr.msu.ru*

³*Aga Khan Development Network, Dushanbe, Tajikistan*

Abstract. Local processes of geological hazards (rock falls, debris flows and avalanches of moderate magnitude) often occur in the mountains of Tajikistan, and the population has learned how to cope with them. Different situation is happening with distant geological threats of high magnitude and low frequency. Employees of the Aga Khan Agency for Habitat, Branch in Tajikistan, together with experts from Moscow State University, Russia, conducted field research, including bathymetric surveying of lakes, route survey of valleys, which can cause breakthrough mudflows and floods, aerial survey of key sites using unmanned aerial vehicle. Modeling of a possible outburst of Lower Varshedzkul Lake is being conducted based on the results of the research. The geomorphological structure of the valley was evaluated. The input data for the simulation were the data on the relief of the territory and possible scenarios for the outburst of mountain lakes, the simulation results were the planned distribution of depths of flooding, flow rates and potential hazard for the mountain valleys below the outburst-hazardous lakes, the time of flooding. The tasks of the work included preparing the relief for modeling, developing scenarios of outbursts or descent of debris flows and floods, estimating the parameters of the outburst hydrographs, modeling the movement of outburst floods and debris flows in the studied valleys and assessing the characteristics of flooding.

Key words: *hazardous geological processes, bathymetric survey, simulation of the lake outburst, FLO-2D, Varshedzkul, Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan*

Cite this article: Raimbekov Y.K., Pirmamadov U.R., Marodaseinov F.O., Zikillobekov I.I., Gulomaydarov A.G., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Kidyayeva V.M., Kurovskaia V.A., Viskhadzhieva K.S., Bobov R.A. Assessment of a potential outburst for Lower Varshedzkul Lake (Pamir, Tajikistan) using bathymetric survey and modeling. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 303–312.

Введение

Горно-Бадахшанская автономная область (ГБАО) расположена в зоне высокого риска опасных природных процессов – землетрясений, оползней, селей и снежных лавин [Атлас..., 1968]. Актуальность исследования заключается в возрастающей хозяйственной нагрузке на территории горных кишлаков, которые традиционно располагаются на конусах выноса и в устьях малых водосборов [Виноградов, 1976, 1977; Тукаев, 2002; Винниченко и др., 2003; Кидяева и др., 2018]. В водосборных бассейнах региона достаточно рыхлообломочного материала для возникновения селей, которые могут привести к катастрофическим последствиям – разрушению водохозяйственных и промышленных объектов, повреждении линий коммуникаций, смыве пашни и других сельскохозяйственных угодий и, в конечном итоге, значительным экономическим ущербам [Тукаев, 2002; Mergili et al., 2011]. В рамках предыдущих работ, проведенных Филиалом Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, были выявлены и нанесены на карты локальные опасные геологические процессы, воздействующие на населенные пункты [Раимбеков, 2012; Раимбеков, Мародасейнов, 2019].

На следующем этапе акцент исследования переместился на верховья бассейнов рек, где расположены потенциально опасные селевые очаги. Основным объектом исследования стали высокогорные озёра, прорывы которых могут вызвать паводки, трансформирующиеся в селевые потоки.

В статье рассмотрены результаты исследований, проведенных совместно Агентством Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан и Географическим факультетом МГУ им. Ломоносова в бассейне р. Варшездара, одном из селеопасных

бассейнов ГБАО. В ходе полевых работ была проведена батиметрическая съемка высокогорного оз. Варшезкуль и исследована долина р. Варшездара. На основе полученных данных оценена потенциальная опасность прорыва озера, проведено сценарное математическое моделирование прохождения возможных прорывных паводков и селей, построены карты затопления населенных пунктов. Собранные данные были переданы в государственные структуры и местным органам управления с целью привлечь их внимания к возможным прорывам высокогорных озер и подготовленности населения к опасным природным процессам.

Цели, задачи и объекты исследования

Основная цель работы – оценка потенциальной опасности прохождения селевого потока в бассейне р. Варшездара в результате прорыва высокогорных озер, основанная на детальных полевых данных. В рамках данной работы были поставлены следующие задачи – маршрутное обследование бассейна р. Варшездара и выявление геоморфологических особенностей долины, проведение батиметрической съемки прорывоопасного оз. Варшезкуль нижнее, создание батиметрической карты озера, геоморфологическое описание вододерживающей плотины и оценка ее устойчивости, математическое моделирование возможных сценариев прорыва озера. Наиболее важной задачей было создание карт затопления в пределах населенных пунктов, расположенных в устьевой части долины.

Объектами исследования являлись высокогорные озера Варшезкуль верхнее и нижнее (рис. 1), участки долины р. Варшездара, особенно пойменная часть реки и конус выноса. Верховья р. Варшездара располагаются на склонах Шугнанского хребта (максимальная высота 5708 м н.у.м.), река впадает в р. Гунт в районе с. Варшез. Общая протяженность реки составляет 18 км [*Ресурсы...*, 1971], фактическая длина водотока от выхода воды из-под моренно-ледовой запруды оз. Варшезкуль нижнее – 12.7 км. Площадь бассейна – 71.7 км², долина имеет ассиметричную форму, она вытянута с юго-запада на северо-восток, длина долины около 17 км, максимальная ширина в средней части около 7 км (рис. 1). Нижняя часть долины используется для выпаса скота и сельскохозяйственных работ, в устье расположены кишлаки Варшез и Абуали Сино.

Методика исследования

В ходе полевых исследований был пройден пеший маршрут по руслу и правому борту р. Варшездара, с помощью портативного GPS-приемника были определены координаты всех потенциально возможных очагов зарождения опасных природных процессов, было проведено геоморфологическое описание долины, описание вододерживающей перемычки, отмечены каналы стока из озера, термокарстовые просадки, место высачивания озерных вод.

Батиметрическая съемка озера проводилась с моторной надувной лодки с помощью эхолота Lowrance Hook 5 и Lowrance Elite 5. Съёмка глубин озера была выполнена 25 июля 2018 г. эхолотами И.С. Зикиллобековым и И.В. Крыленко. Промеры были привязаны к уровню озера, зафиксированному на созданном и размеченном футштоке с логотипом агентства АКАН (Агентство Ага Хана по Хабитат). Аэросъемка проводилась с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Phantom 4 С.С. Черноморцем на трех участках долины – оз. Варшезкуль нижнее, участок активного каменного глетчера из левого бокового распада в центральной части долины и конус выноса с расположенным на нем с. Варшез.

Контур береговой линии был отрисован по данным съёмки с БПЛА от 25.07.2018 и GPS-обходов по контуру озера, сделанных И.В. Крыленко и Ф.О. Мародасейновым. В полевых работах участвовали В.М. Кидяева, Е.А. Савернюк, У.Р. Пирмамадов, Ю.Х. Раимбеков, А. Гуломайдаров, И. Елназаров, Ф. Гулобов.

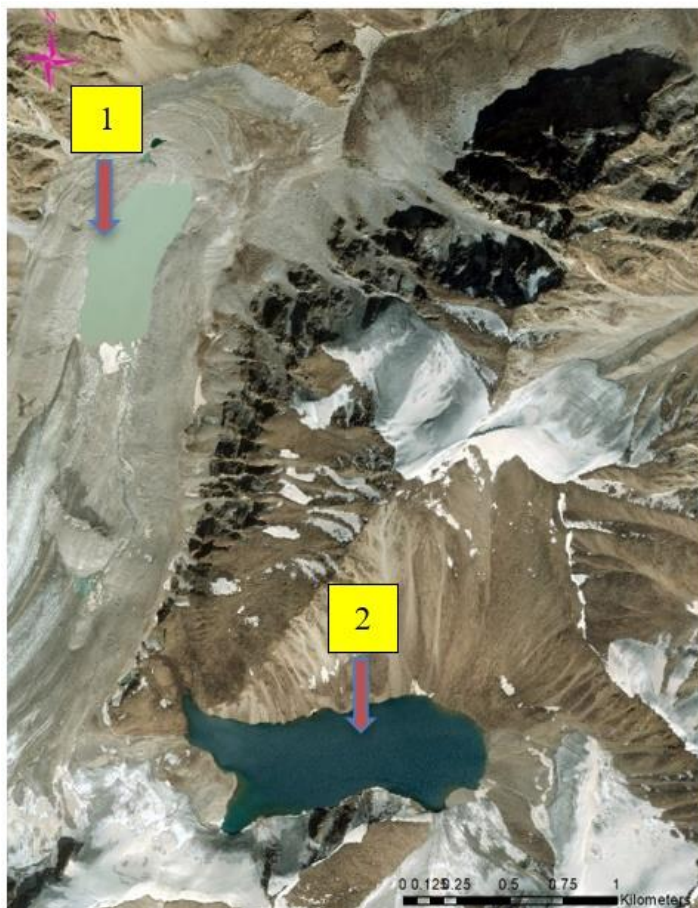


Рис. 1. Расположение озер в верховьях бассейна Варшездара. 1 – Варшездкуль Нижнее, 2 – Варшездкуль Верхнее. Подложка - космический снимок Google

Fig. 1. Location of the lakes in the Varshedzara catchment. 1 – Varshedzkul Lower, 2 – Varshedzkul Upper. Background: the Google satellite image



Рис. 2. Долина реки Варшездара. Фото Ю.Х. Раимбекова

Fig. 2. Varshedzara River valley. Photo: Y.K. Raimbekov.

По результатам съемки построены ортофотопланы высокого разрешения и цифровые модели местности с разрешением от 0.23 м до 1 м, которые использовались

для построения продольных и поперечных профилей долины и для двумерного математического моделирования. Создана батиметрическая карта озера Варшезкуль Нижнее (рис. 3) и рассчитаны его морфометрические характеристики. Построение ортофотоплана и батиметрической карты было выполнено Е.А. Савернюк.

Был измерен расход воды в р. Варшездара на выходе из оз. Варшезкуль.

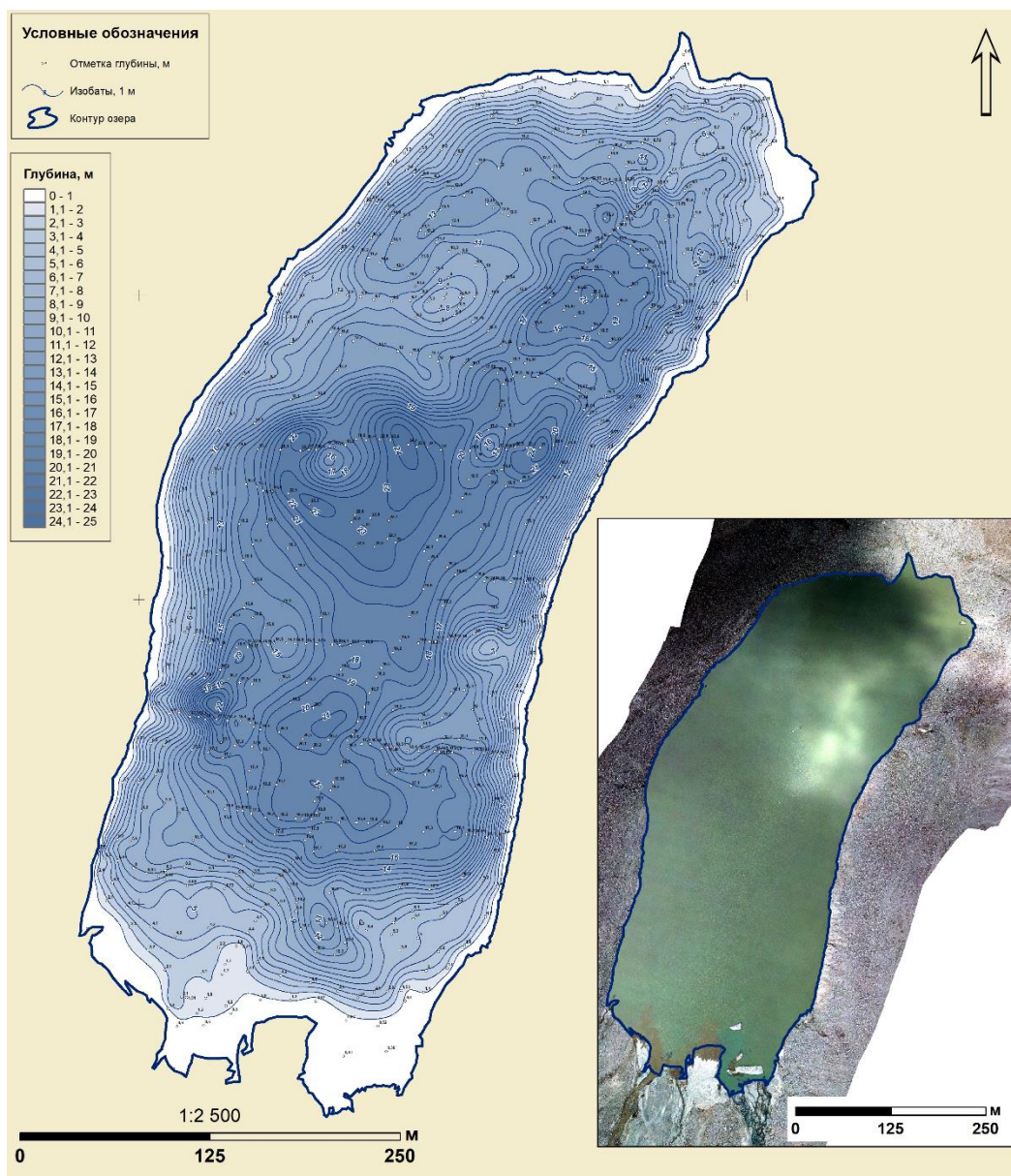


Рис. 3. Батиметрическая карта и ортофотоплан озера Варшезкуль Нижнее по состоянию на 25 июля 2018 г. Составитель карты: Е.А. Савернюк [Черноморец и др., 2018]

Fig. 3. Bathymetric map and orthophoto map of Lake Varshedzkul Lower as of July 25, 2018. Cartographer: E.A. Savernyuk [Черноморец и др., 2018]

Двумерное математическое моделирование движения водных и селевых потоков было проведено В.М. Кидяевой при участии В.А. Куровской с использованием программного комплекса FLO-2D PRO (автор J. O'Brien, <https://flo-2d.com/>) по двум наиболее вероятным сценариям прорыва озера. Сценарии были описаны гидрографами, в которых учитывался возможный объем прорывных паводков, время излияния воды, объем вовлеченного селевого материала, наиболее вероятные параметры селевых

потоков, полученные в предыдущих исследованиях [Petrakov et al., 2012], объемная концентрация наносов (33–35%).

В качестве базовых данных о рельефе территории использовалась цифровая модель рельефа PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) с разрешением 12.5 м. Для русла проводилась проверка корректности рельефа путем построения изолиний с использованием программы ArcGIS 10.2 и анализа продольного профиля. Вдоль русла отметки высот были проинтерполированы с более детальным шагом, а контур русла уточнялся по данным космических снимков и на основе топографических карт масштаба 1:50000.

После корректировки все данные о рельефе для моделирования были проинтерполированы в расчетную сетку модели с шагом 12.5×12.5 м. Данные беспилотной съемки интерполировались в расчетную сетку модели с шагом 5×5 м. Коэффициент шероховатости задавался равным 0.04–0.05, согласно типичным для данных русел значений [Барышников, 2003].

Результаты исследования

Параметры озёр

Озеро Варшезкуль Нижнее имеет вытянутую слабоизогнутую форму с выпуклостью к западу. Параметры озера по состоянию на 25 июля 2018 г.: длина 750 м, ширина в средней части 227 м, максимальная глубина 24.5 м, средняя глубина 11.4 м, площадь акватории в летний период 173 тыс. м², периметр 2290 м. Объем воды составил 1.94 млн м³ [Черноморец и др., 2018].

Озеро лежит в чаше, образованной мертвыми льдами языка ледника Варшез (согласно карте – на абсолютной отметке 4532.5 м, по данным GPS – 4535 м). Современный активный язык ледника находится на южном берегу озера в 100–150 м от уреза воды. С запада и востока берега озера образуют высокие, по 15–25 м гряды мертвых льдов, покрытые рыхлообломочным плащом и круто обрывающиеся к озеру. Северный берег и водоудерживающую плотину озера Варшезкуль Нижнее образует последний по времени образования конечно-моренный вал. Превышение его гребня над озером составляет от 5 до 25 м, низовой откос возвышается над поверхностью нижнего конечноморенного вала на 20–30 м. Предположительно, большая часть вала все еще остается цельным ледовым телом, покрытым чехлом грубообломочной поверхностной морены.

Сток из озера подземный, следов перелива или существования поверхностного водотока не обнаружено. Вода просачивается непосредственно от уреза в пределах полукруглой просадки размером 80×80 м в пологом склоне перемычки. Вода выходит на дневную поверхность у основания вала-запруды в виде родников в полосе шириной около 100 м. В склоне низового откоса запруды над родниками образовалась ниша. Расстояние от уреза воды в озере до полосы выхода воды из-под водоудерживающей плотины около 170 м. Родники находятся ниже уровня воды в озере на 12–15 м. Вода мутная, как и в озере, что указывает на преобладание свободного стока по подземным полостям. Отсутствие следов высокого стояния воды указывает на достаточно высокую в настоящее время пропускную способность подземных каналов стока [Черноморец и др., 2018].

Озеро Варшезкуль Верхнее лежит на высоте 4788.6 м в 15 км от устья. Площадь акватории озера составляет 357 тыс. м², длина – 1000 м, ширина – 300 м. Северный берег крутой скальный, западный и восточный – моренные, на южном к воде выходит два склоновых ледника с разделяющим их скальным гребнем. Прозрачный цвет воды в озере даже в середине периода активного таяния льда указывает на небольшой поверхностный сток в водоем, замедленный водообмен и, вероятно, значительные глубины. Объем воды в озере оценить сложно. Если предположить, что средняя глубина озера составляет около 10 м, то объем составит 3.57 млн м³.

Моделирование прорывных паводков и селей

При моделировании были рассмотрены два наиболее вероятных сценария возникновения прорывных потоков. Первый сценарий предполагает порыв одновременно двух озер Варшезкуль. Верхнее озеро подпружено скальными породами и может прорваться только в результате падения обвала. Предполагаем, что в случае падения обвала опорожнится половина объема верхнего озера и полностью нижнее озеро, таким образом, объем прорывного паводка составит 3.725 млн м³. При объемной концентрации наносов 0.35, объем селевого потока может достичь 5.730 млн м³. Максимальный расход прорывного паводка при таком объеме оценивается в 650 м³/с, что соответствует расходу селевого потока 1000 м³/с. Предполагается, что продолжительность селевого процесса составит 5 ч, гидрограф симметричный (рис. 4а).

Второй сценарий предполагает прорыв только нижнего озера Варшезкуль. Наиболее вероятный сценарий прорыва нижнего озера – развитие внутриледникового канала стока и медленное опорожнение озера. Согласно расчетам по модели Ю.Б. Виноградова [Виноградов, 1976], гидрограф такого прорыва имеет длительный пологий подъем (процесс разработки внутриледникового канала стока) и резкий спад (опорожнение остаточного объема озера). Для предварительной оценки был построен асимметричный гидрограф треугольной формы с максимальным расходом 100 м/с (рис. 4б). Продолжительность опорожнения озера оценена в 12 ч (по географическим аналогам), пик прорывного паводка приходится на 10 ч. Объем водной составляющей селевого потока равен объему озера – 1.94 млн м³, максимальный расход селевого потока – 153.8 м³/с, соответственно, объем селея – 2.98 млн м³.

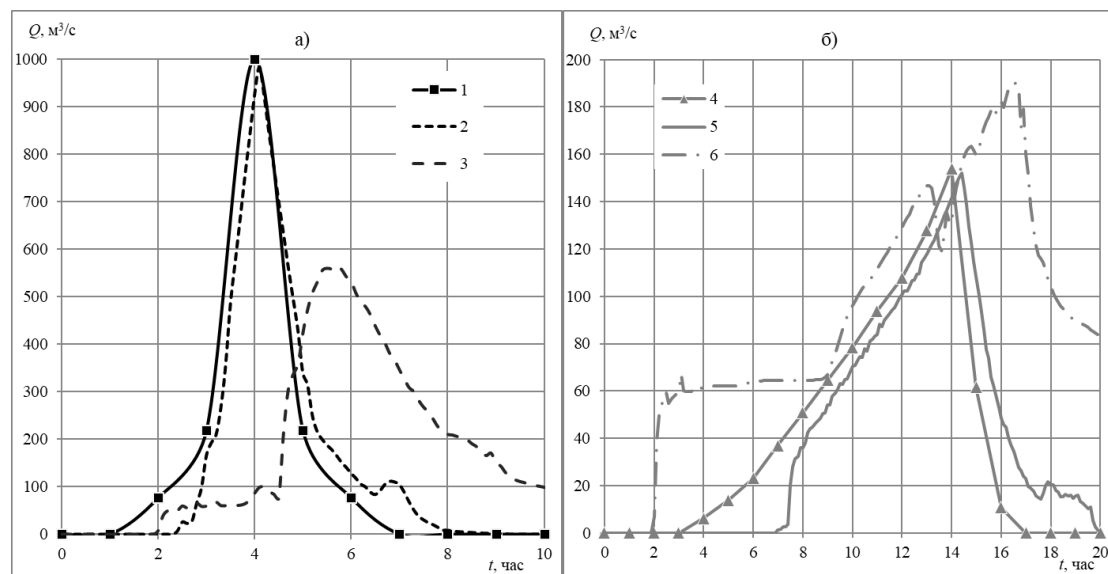


Рис. 4. Полученные по результатам моделирования на основе программного комплекса FLO-2D гидрографы селевого потока (а – сценарий 1, б – сценарий 2): 1, 4 – входной гидрограф селевого потока; 2, 5 – – рассчитанный гидрограф селевого потока на вершине конуса выноса; 3, 6 – рассчитанный гидрограф селевого потока в 6.6 км ниже впадения р. Варшездара в р. Гунт, с учетом р. Гунт

Fig. 4. Model hydrographs of the debris flow simulated on the base of FLO-2D (a – Scenario 1, б – Scenario 2): 1, 4 - input hydrograph of the debris flow, 2, 5 – calculated hydrograph of the debris flow in the upper part of the debris flow fan, 3, 6 - calculated hydrograph of the debris flow in 6.6 km below the confluence of the Varshedzdar River with the Gunt River (taking into account the Gunt River)

По результатам моделирования прорывных потоков было получено, что время добегания до вершины конуса выноса составляет всего 0.1 ч (0.3 ч для второго сценария), а повышение расхода воды будет наблюдаться через 1.4 ч от начала прорыва (3.5-4 ч для

второго сценария). Такое время добегающего обусловлено катастрофически высоким расходом селевого потока. Максимальный расход селевого потока в вершине конуса выноса составит $982.8 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 4а) для первого сценария и $151 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 4б) для второго сценария. Форма гидрографа останется практически неизменной в обоих случаях.

Ниже селевой поток будет растекаться по конусу выноса, впадая в р. Гунт с нескольких мест. После впадения в р. Гунт на характеристики паводка влияет режим р. Гунт, но незначительно. Селевой поток преодолеет конус выноса за 1.4 ч в первом сценарии и 2.1 ч во втором. Максимальный расход селевого потока с учетом воды р. Гунт (среднегодовой расход воды $65 \text{ м}^3/\text{с}$) составляет $565 \text{ м}^3/\text{с}$ (первый сценарий) и $190 \text{ м}^3/\text{с}$ (второй сценарий) (рис. 4). Согласно расчетам, объемная концентрация потока в р. Гунт снизится до 0.19 (первый сценарий) и 0.12 (второй сценарий) [Черноморец и др., 2018].

Плановые характеристики глубины затопления при прохождении селевых потоков по конусу выноса р. Варшездар в районе селений Варшез и Абуали Сино представлены на рис. 5.

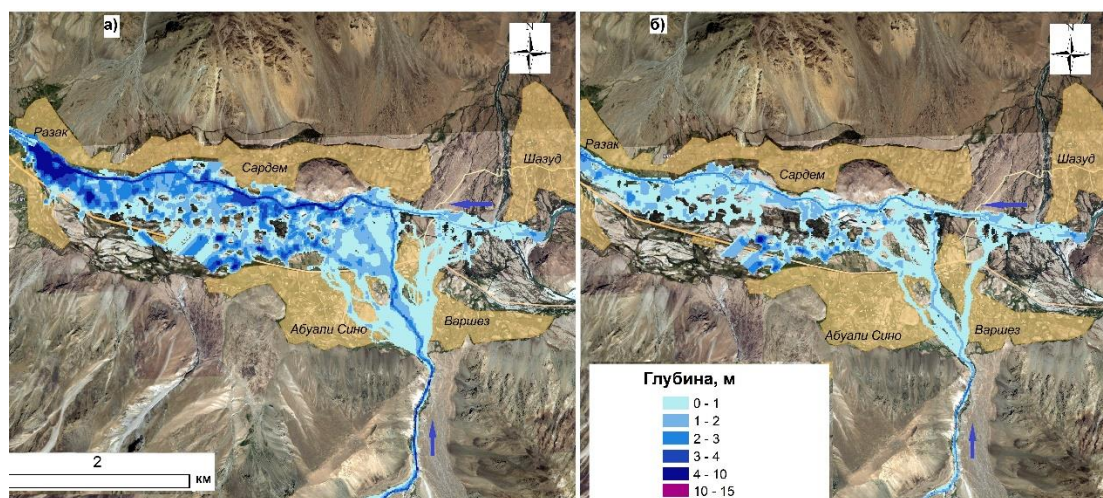


Рис. 5. Плановое распределение глубин затопления при прорывных потоках из озер Варшездар по результатам моделирования на основе программного комплекса FLO-2D (а – сценарий 1, б – сценарий 2)

Fig. 5. Flow depth of the Varshedzara River according to the results of the debris flow simulation based on the FLO-2D software (a – scenario 1, б – scenario 2)

Максимальные глубины потока в русле р. Варшездара в сужениях в первом сценарии достигают 10 м, скорости течения – 12 м/с ($2\text{--}3 \text{ м}$, до 7 м/с во втором сценарии, соответственно). На конусе выноса р. Варшездара глубина потока достигает $2\text{--}3 \text{ м}$ в русле. Поток растекается широко по руслу, затопляя дома на правом и левом берегу. В районе моста через реку Варшездара глубина потока составляет 3 м , дорога будет затоплена и, вероятно, разрушена. Скорости течения в русле реки на этом участке также достигают $7\text{--}12 \text{ м/с}$ (первый сценарий) и $1.5\text{--}4 \text{ м/с}$ (второй сценарий). Глубины затопления на р. Гунт не превышают в среднем $3\text{--}5 \text{ м}$ по фарватеру и достигают 10 м перед сужением у с. Разак (первый сценарий) и 4 м (второй сценарий). Скорости течения – $4\text{--}7 \text{ м/с}$ по фарватеру и $1.5\text{--}3 \text{ м/с}$ на расширениях. В зоне затопления по р. Гунт находятся дома в поселке Сардем на правом берегу реки и почти весь левый берег. Ниже с. Разак селевой поток затопляет поселки Мийоншахр, Окмамад, Чарсем, Тангиф, затоплены дома и дорога на левом берегу реки. На всех участках моделирования опасность селевого потока и наносоводного паводка средняя и максимальная.

Заключение

По материалам батиметрических съемок и съемок с беспилотных летательных аппаратов составлена батиметрическая карта оз. Варшезкуль нижнее в долине р. Варшездара, измерены его морфометрические характеристики. На озере создан футшток для последующего мониторинга. Проанализировано геоморфологическое строение долины р. Варшездара ниже озера. Для долины р. Варшездара адаптирована двумерная модель движения водных и селевых потоков FLO-2D. Выполнены сценарные расчеты характеристик затопления, потенциальной опасности и времени добегания прорывных селей и паводков в случае прорыва обоих озер Варшезкуль верхнее и нижнее или только нижнего озера.

По долине р. Варшездара оба сценарных потока движутся с катастрофическими скоростями, время добегания первого потока до конуса выноса – всего 0.1 ч, второго – 0.3 ч. Максимальные глубины при катастрофическом потоке по первому сценарию достигают 10 м, скорости течения – 12 м/с. В наиболее широких частях речной долины глубина потока – до 3 м, скорости течения – до 3 м/с. При моделировании по обоим сценариям потоки затапливают конус выноса с глубинами до 3–4 м, скоростями течения до 3 м/с.

Затапливаются все населенные пункты на левом берегу р. Гунт (Варшез и Абуали Сино), а также частично дома в пос. Разак и Сардем. Ниже по р. Гунт селевой поток затапливает частично поселки Мийоншахр, Окмамад, Чарсем, Тангиф (дома и дорога на левом берегу реки).

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Филиала Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, а также в рамках государственного задания МГУ имени М.В.Ломоносова по теме I.7 АААА-А16-116032810093-2 «Картографирование, моделирование и оценка риска опасных природных процессов» и при частичной поддержке проекта РФФИ 18-05-00520.

Список литературы

- Атлас Таджикской ССР. Душанбе-Москва: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1968. 200 с.
- Барышников Н.Б. Гидравлические сопротивления речных русел. С.-Пб.: Изд-во РГГМУ, 2003. 147 с.
- Винниченко С.М., Бахтдавлатов Р. Д., Шафиев Г.В., 2003. Снижение степени риска при катастрофических последствиях геологических процессов на горных сейсмоактивных территориях. // Материалы международной конференции по организации мониторинга за оползнями в Центральной Азии, Ташкент, 2003, с. 58-60.
- Виноградов Ю.Б. Метод расчета гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера. // Селевые потоки, сб. 1. М.: Гидрометеиздат, 1976. С. 138–153.
- Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Ленинград: Гидрометеиздат, 1977.
- Кидяева В.М., Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.Н., Докукин М.Д., Висхаджиева К.С., Бобов Р.А., Пирмамадов У.Р., Мародасейнов Ф.О., Раимбеков Ю.Х., Курбонмамадов Д.А., 2018. Моделирование прорывов горных озер и селевых потоков в Горно-Бадахшанской автономной области, Таджикистан. // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии, Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова, Санкт-Петербург, 2018, с. 897–902.
- Раимбеков Ю.Х., 2012. Исследование геологических угроз Горного Бадахшана Республика Таджикистан. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования, № 1, с. 96-100.

- Раимбеков Ю.Х., Мародасейнов Ф.О., 2019. Опасные природные процессы и явления на малых водосборах в бассейне реки Гунт (Горно-Бадахшанская автономная область, республика Таджикистан). // Геориск, № 2, с. 52-62.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 14. Средняя Азия. Выпуск 3. Бассейн р. Амударья. –Л.: Гидрометеоздат, 1971. 472 с. <http://www.cawater-info.net/library/rus/hist/resources-amudarya/>
- Тукеев О.В. Селевые явления Памира: Катастрофы, закономерности, прогноз. Москва, 2002. 176 с.
- Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Кидяева В.М., Рудой А.Н., Висхаджиева К.С., Аршинова М.А., Куровская В.А. Батиметрическая съемка озер Куленкуль (Дузахдара), Варшезкуль, Патхур (Чапдара), Джизев, Хавраздара и моделирование возможных прорывов. М.: Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, 2018. 278 с.
- Mergili M., Schneider D., Worni R., Schneider J.F., 2011. Glacial lake outburst floods in the Pamir of Tajikistan: challenges in prediction and modelling. 5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, University of Padova, Italy, 2011, p. 75.
- Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A., Chernomorets S.S., Evans S.G., Kidyaeva V.M., Krylenko I.N., Norin S.V., Shakhmina M.S., Seynova I.B. Monitoring of Bashkara glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst. // Natural Hazards. 2012.Vol. 61. No. 3. P. 1293–1316. DOI:10.1007/s11069-011-9983-5. 38.



Дистанционное зондирование и мониторинг селеопасных территорий в условиях изменения климата (Камароб, Таджикистан)

М.С. Сафаров^{1,2}, А.Р. Фазылов²

¹Научно-исследовательский Центр экологии и окружающей среды Центральной Азии (Душанбе), Душанбе, Таджикистан, mustafo-2010@mail.ru

²Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан, alifazilov53@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена анализу областей применения методов и технологий дистанционного (неконтактного) зондирования и мониторинга поверхности земли при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), позволяющие получить актуальную информацию, в условиях изменения климата. Осуществлен анализ, эффективность использования различных типов БПЛА, а также областей и методов их применения, для мониторинга и сбора данных о селеопасных территориях горных и предгорных районов Таджикистана (на примере ущелья Камароб).

Ключевые слова: дистанционное зондирование, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), аэрофотосъемка, мониторинг, технологии, сели, картографирование

Ссылка для цитирования: Сафаров М.С., Фазылов А.Р. Дистанционное зондирование и мониторинг селеопасных территорий в условиях изменения климата (Камароб, Таджикистан). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 313–322.

Remote sensing and monitoring of debris flow areas in the conditions of climate change (Kamarob, Tajikistan)

M.S. Safarov^{1,2}, A.R. Fazilov²

¹Research Center for Ecology and Environment of Central Asia (Dushanbe), Dushanbe, Tajikistan, mustafo-2010@mail.ru

²Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan, alifazilov53@gmail.com

Abstract. The article is devoted to the analysis of the areas of application of methods and technologies for remote (non-contact) sensing and monitoring of the earth's surface using unmanned aerial vehicles (UAVs), which provide up-to-date information in the context of climate change. The analysis, the effectiveness of the use of various types of UAVs, as well as areas and methods of their application, for monitoring and collecting data on mudflow hazard zones of mountain and foothill regions of Tajikistan (for the Kamarob gorge).

Key words: remote sensing, unmanned aerial vehicles (UAVs), aerial photography, monitoring, technology, debris flow, mapping

Cite this article: Safarov M.S., Fazilov A.R. Remote sensing and monitoring of debris flow areas in the conditions of climate change (Kamarob, Tajikistan). In: Chernomoretz S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: "Promotion" LLC, 2020, p. 313–322.

Введение

Дистанционное зондирование – технология наблюдения объекта на поверхности земли наземными, авиационными и космическими средствами с использованием инструментальных методов, дистанционного неконтактного получения информации о состоянии и параметрах объектов и обеспечивающая дополнительной информацией существующие наземные системы мониторинга окружающей среды.

К основным областям, в которых летательные аппараты используются в качестве носителей средств ДЗ, в условиях РТ являются: Гидрология (управление и оценка водных ресурсов, мониторинг таяния снегов, прогноз о паводках); Сельское хозяйство (метеопрогноз, ареал и состояние растительного покрова, создание карт по типам грунтов, предупреждение градобитий и т.д.); Экология (исследования по охране окружающей среды); Гляциология (исследования ледников, снежного покрова, ледяного покров водоёмов и др); Геология, геоморфология и геодезия; Топография и картография (получение точных данных о высоте и привязке их к данной системе координат, производство карт и внесение изменений в них); Риски стихийных бедствий (контроль объема паводков, предупреждение о селях, лавинах, оползнях, песчаных и пылевых бурях и т.п.).

Одним из методов дистанционного зондирования является использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) – летательный аппарат без экипажа на борту, и квадрокоптеров, управляемые в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах для осуществления аэрофотосъемки, позволяющие создавать карты и трехмерные модели местности.

При этом БПЛА позволяют, даже при их полете под облаками, получать четкие изображения, фотографии и видео с высоким разрешением и осуществлять исследования от нескольких минут до нескольких часов. Не маловажным фактором является и то, что Используя БПЛА можно без риска для жизни людей проникать в труднодоступные зоны, в частности в горно-предгорных условиях Таджикистана.

Область исследования

Ущелье Камароб длиной 54 км, окружено двумя основными хребтами, расположенными в Раштском регионе (рис. 1). Река Камароб расположена между Каратегинским и Кабудкрымским хребтами. Это левый приток реки Сарбог (бассейн Вахша). Основным притоком является Сободай. Длина реки – 36 км. Площадь водосбора 347 км². Количество притоков длиной менее 10 км, расположенных в бассейне Камароб, 78, общая длина которых составляет 122 км [Федотова, 1967].

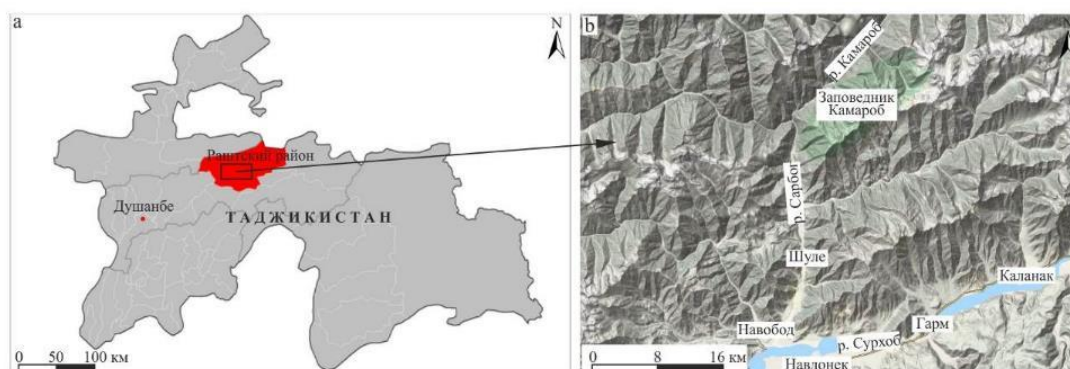


Рис. 1. Местоположение района исследований на политической и физико-географической картах

Fig. 1. Location of the study area on political and physical maps

Беспилотный летательный аппарат – инструмент для дистанционного зондирования

К существующим средствам мониторинга факторов, влияющих на природную среду и ведения наблюдения за её состоянием отнесены различного назначения станции в основном стационарного типа, требующие постоянного присутствия человека. Проблема специалистов обслуживающие эти станции заключается в проведения наблюдений в труднодоступных и опасных районах, отсутствие транспорта (длительные пешие переходы) и т.д.

К настоящему времени интенсивное развитие получили использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) летательные аппараты, снабженные искусственным интеллектом. Главным преимуществом данной технологии является отсутствие потребности специальных взлетно-посадочных площадок комплексов, обеспечивающих для обеспечения старта БПЛА, а также их отличает относительная дешевизна и отсутствие риска для человека.

Научно-технические достижения последних десятилетий в микросистемных технологиях (в частности, появление гироскопов и акселерометров в микроминиатюрных версиях), широкое внедрение систем глобального позиционирования (таких как GPS), появление других необходимых элементов для комплектации мини-БПЛА: эффективные видео камеры, бесщёточные электродвигатели, автопилоты, энергопотребляющие литий-полимерные батареи и др. явились основой для производства относительно небольших по массе и размеру, но способных выполнять довольно серьёзные задачи оборудования для дистанционного зондирования [Фетисов, 2014].

Непрерывная тенденция в миниатюризации электроники позволяет производить меньшие БПЛА оснащая их миниатюрными камерами и другими датчиками для поддержки сбора данных [Eisenbeiß, 2009].

Таким образом, инновации в области дистанционного зондирования и фотограмметрических изображений, и их применение являются ключевыми инструментами в оценке уязвимости территорий и оценке ущерба от стихийных бедствий [Yamazaki, 2001; Shinozuka, Rejaie, 2000].

Методы и технологии применения БПЛА

БПЛА используются для решения различных задач, которые ранее решались с использованием пилотируемых самолётов и вертолётов. Такой интерес во многом обусловлен простотой их эксплуатации, низкой стоимостью, эффективностью. Высокое качество и наличие эффективных программных средств для автоматической обработки материалов аэрофотосъёмки открывают возможности для широкого их использования как при воздушном мониторинге состояния окружающей среды (мониторинг ледников, ледниковых озёр, рек, озёр и водохранилищ), мониторинг опасных зон рисков, приводящих к стихийным бедствиям так и для проведения съёмки при чрезвычайных ситуациях.

В условиях горной страны (93% всей территории Таджикистана, отметки выше 600м), БПЛА значительно расширили возможности мониторинга с воздуха и сделали его более доступным и одним из инструментов мониторинга обеспечивающие высокую аппроксимацию в процессе фотосъёмки. При этом регулярные наблюдения с помощью БПЛА обеспечивают получение достоверной информации исследуемой территории. Исследования - полёты проводились с использованием БПЛА, на примере ущелья Камароб (Природный заповедник Камароб) в Раштском районе.

В процессе наблюдений аэрофотосъёмка и видеозапись местности были выполнены с использованием беспилотного летательного аппарата QC-2 Micro (рис. 2, 3А, Б) и квадрокоптеров. QC-2 Micro оснащённых фотоаппаратом Sony RX1.



Рис. 2. Участок бассейна р. Камароб, исследованный с помощью БПЛА. Обозначения: 1 — участок съемки с БПЛА, 2 — р. Сарбог, 3 — место взлета БПЛА, 4 — р. Камароб. В качестве подложки использован космоснимок с сервиса Google Earth

Fig. 2. Site of the Kamarob River catchment surveyed by the UAV. Designations: 1 — area of UAV survey, 2 — Sarbog River, 3 — UAV take-off point, 4 — Kamarob River. Background — Google Earth satellite image

Характеристика примененного БПЛА: размах крыльев БПЛА 180 см, длина 110 см; полётный вес составляет 3,5 кг, время полёта – около 90 минут. Квадрокоптеры DJI Phantom 4 и DJI Inspire 1 pro (рис. 3В, Г) использовались для видеосъёмки и фотографирования небольших территорий с разрешением от 5 см до 15 см и на основе полученных данных построены 2D и 3D карты местности.

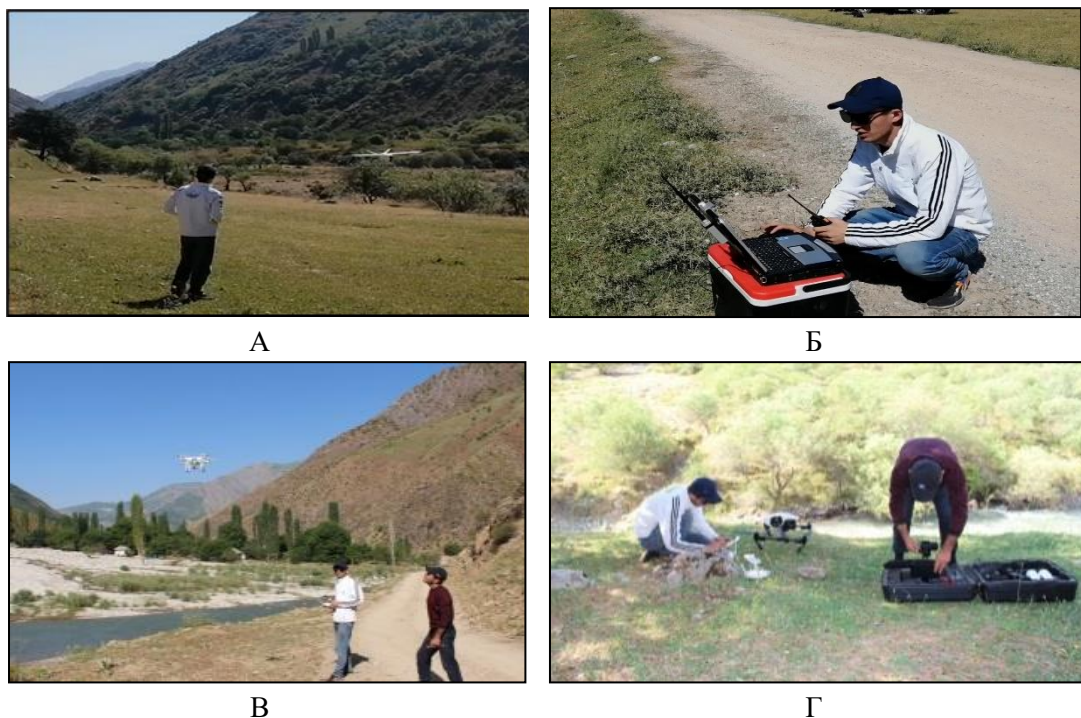


Рис. 3. Подготовка и организация полетов БПЛА самолетного типа QC-2 Micro (А, Б) и квадрокоптеров DJI Phantom 4 (В) и DJI Inspire 1 Pro (Г)

Fig. 3. Preparation and organization of flights of the UAVs QC-2 Micro (A, B), DJI Phantom 4 (B) and DJI Inspire 1 Pro (Г)

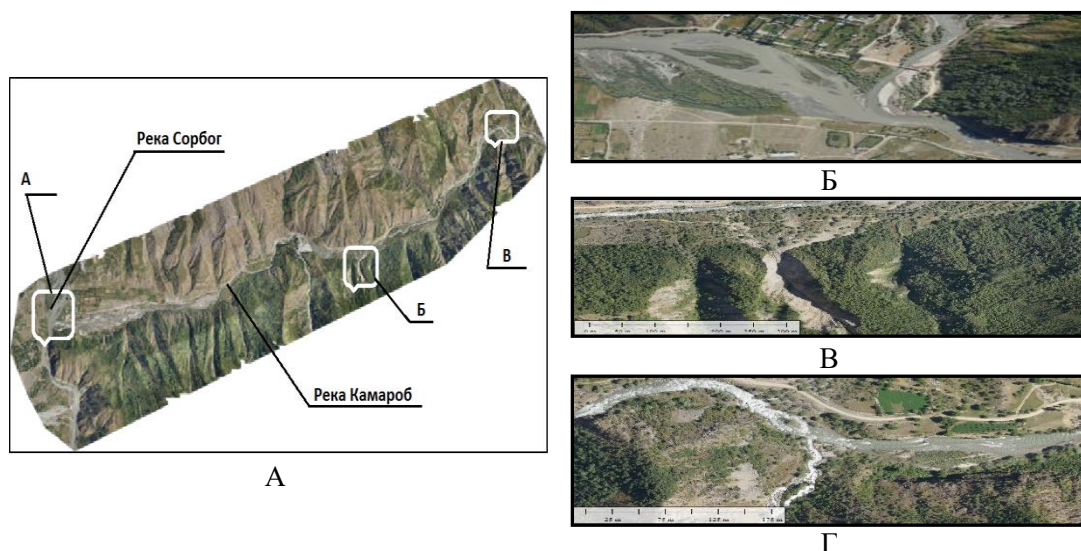


Рис. 4. Результат аэрофотосъемки участка бассейна р. Камароб с использованием БПЛА самолетного типа QC-2 Micro: А — общий вид участка съемки, Б — селевой конус выноса при впадении р. Камароб в р. Сарбог, В — устье левого селевого притока р. Камароб, Г — среднее течение р. Камароб. Площадь съемки — 19 км², пространственное разрешение — 15 см/пиксель. Съемка произведена М.С. Сафаровым

Fig. 4. Results of aerial photography of the Kamarob River basin site using QC-2 Micro UAV: А — general view of the survey area, Б — Kamarob River debris flow fan near the its inflow in Sarboq River, В — mouth of the left debris flow tributary of the Kamarob River, Г — middle part of the Kamarob River. Survey area — 19 km², spatial resolution — 15 cm/pixel. UAV survey was taken by M.S. Safarov

Количество перекрывающихся изображений, рассчитанных для каждого пикселя ортофотомозаики где красные и желтые области указывают на низкое перекрытие, для которого могут быть получены плохие результаты. Зелёные области обозначают и перекрывают более 5 изображений для каждого пикселя. Слишком низкое перекрытие (красный) может привести к некачественной трёхмерной реконструкции в этих областях. Таким образом, перекрытие является важным параметром для общего качества (рис. 5А). На рис. 5Б представлена 3D-карта местности, а на рис. 6А – Цифровая модель поверхности (DSM), 6Б – Цифровая модель местности (DTM). Также были проведены видео и аэрофотосъёмки в различных территориях с помощью DJI Phantom 4 и DJI Inspire 1 и подготовлены Цифровые модели местности, где ранее имели место схода селевых явлений (рис. 7 и 8).

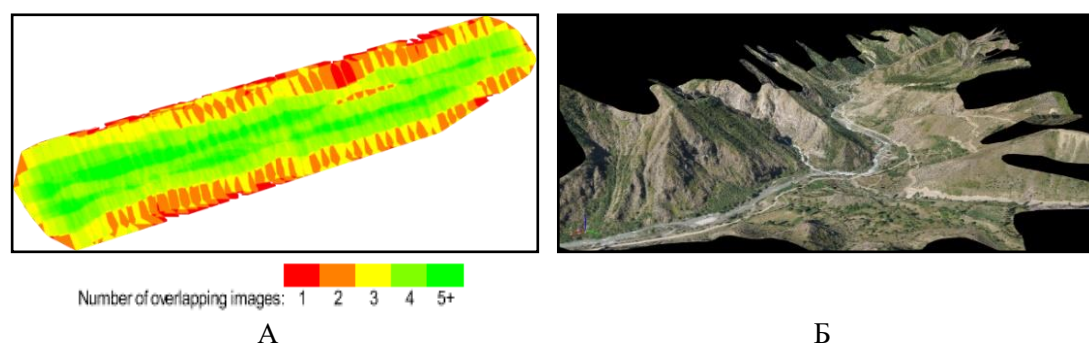
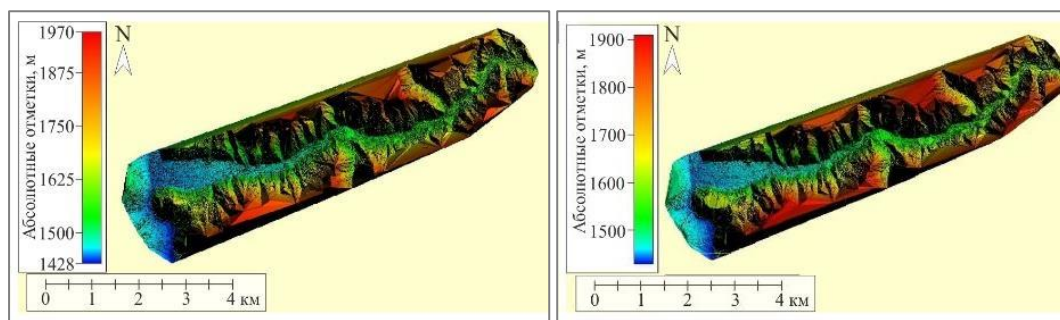


Рис. 5. Схема перекрытия снимков (А), 3D-модель исследуемого участка бассейна р. Камароб (Б)

Fig. 5. Scheme of image overlapping (A), 3D-model of the Kamarob River basin investigated site the (Б)



А

Б

Рис. 6. А) Цифровая модель местности (А) и цифровая модель рельефа (Б) исследуемого участка бассейна р. Камароб

Fig. 6. Digital surface (А) and elevation (Б) models of the investigated site of the Kamarob River basin

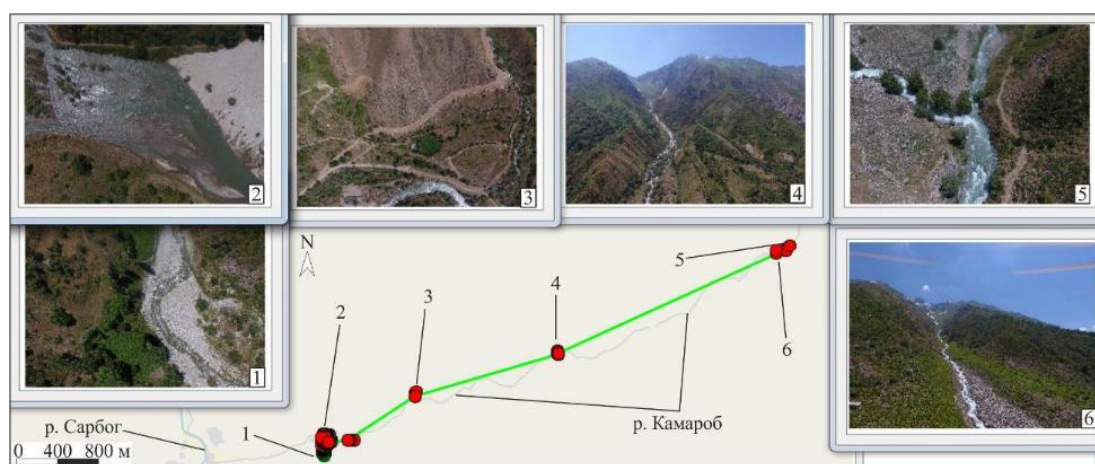


Рис. 7. Места схода селей из боковых притоков р. Камароб и участков аккумуляции селевых отложений в главной долине, аэрофотосъемка которых проводилась с квадрокоптеров DJI Phantom 4 и DJI Inspire 1 Pro. Съемка произведена М.С. Сафаровым

Fig. 7. Sites of debris flow occurrences from Kamarob River tributaries and accumulation of debris flow deposits in the main river valley surveyed by the quadcopters DJI Phantom 4 and DJI Inspire 1 Pro. UAV survey was taken by M.S. Safarov

Для комплексного изучения бассейна реки Камароб были использованы данные спутниковых снимков, такие как SRTM и Глобальная цифровая модель высоты (GDEM) ASTER версии 3 (ASTGTM) для разграничения водораздела бассейна реки Камароб (рис. 9). При использовании Глобальной цифровой модели высоты (GDEM) ASTER версии 3 (ASTGTM) при разграничении водораздела бассейна реки не удалось определить все речные бассейны, которые впадают в реку Камароб, в то время как при использовании SRTM удалось определить.

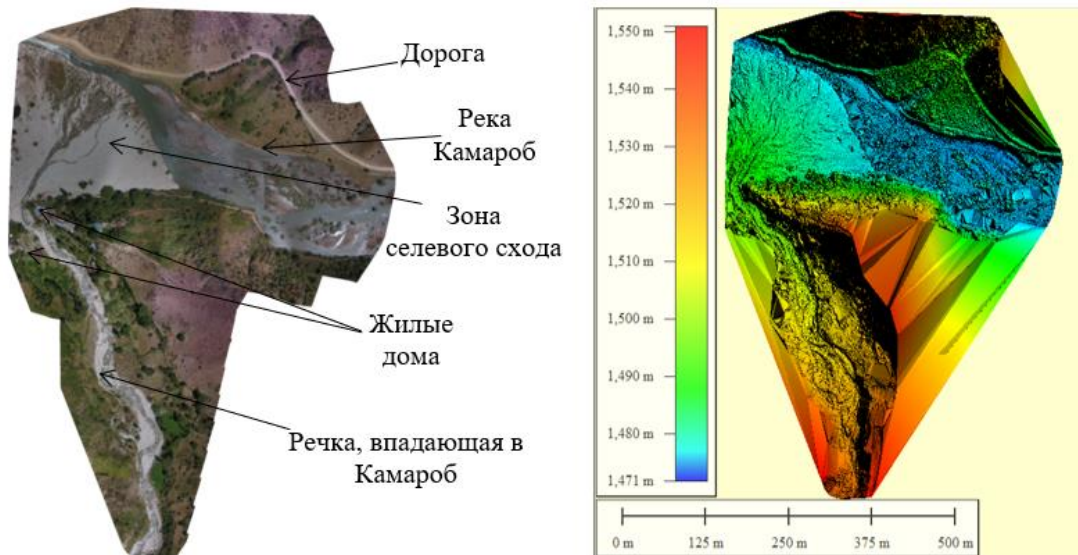


Рис. 8. Ортофотомозаика и ЦММ, полученные по результатам съемки с помощью квадрокоптера DJI Phantom 4. Площадь съемки -- 0,207 км², пространственное разрешение -- 5 см/пиксель. Съемка произведена М.С. Сафаровым

Fig. 8. Orthophotomosaic and digital surface model obtained from the results of the quadcopter DJI Phantom 4 survey. Survey area -- 0,207 km², spatial resolution -- 5 cm/pixel. UAV survey was taken by M.S. Safarov

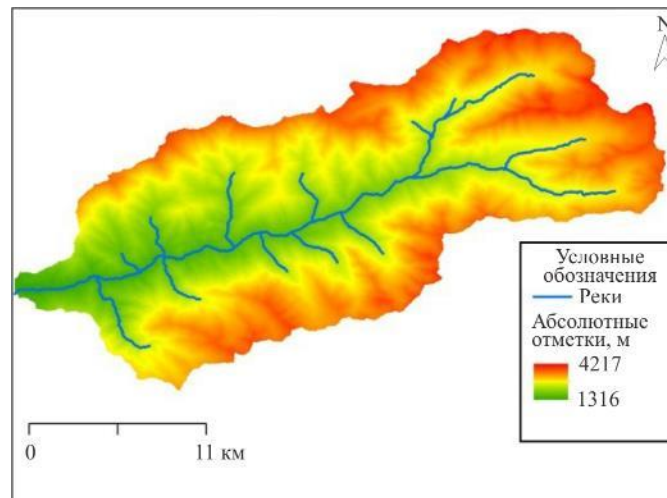


Рис. 9. Фрагмент глобальной ЦМР ASTER GDEM. Version 3 для бассейна р. Камароб

Fig. 9. Fragment of the global digital elevation model ASTER GDEM. Version 3 of the Kamarob River basin

Для получения информации о растительности использовались данные Landsat и данные, полученные с использованием квадрокоптера Dji Phantom 4 (рис. 10). Полеты и карта состояния растительного покрова выполнялись с использованием приложения Drone Deploy. Мониторинг растительности с помощью дронов позволяет измерять здоровье растений, выявлять урожайность.

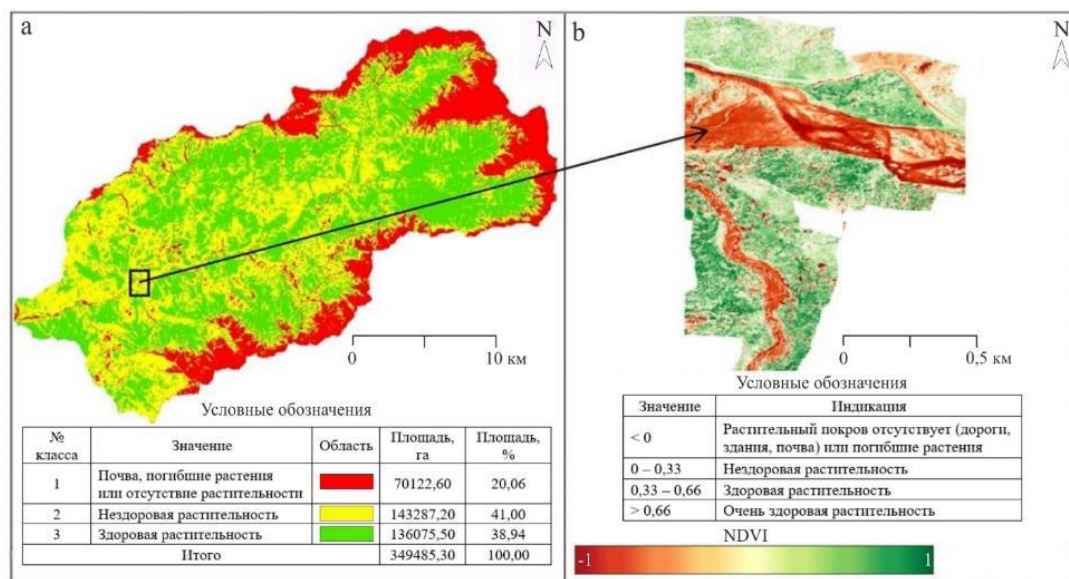


Рис. 10. Карта NDVI бассейна р. Камароб, полученная по данным съемки со спутника Landsat-8 от 18.07.2019 (а), и карта состояния растительного покрова, построенная по данным съемки с квадрокоптера DJI Phantom 4 от 18.07.2019 (б)

Fig. 10. NDVI map of the Kamarob River basin based on the Landsat-8 satellite survey, 18 July 2019 (a) and vegetation status map based on DJI Phantom 4 quadcopter survey data, 18 July 2019 (b)

Технология БПЛА позволяет нам оценивать состояние растений и изменчивость точечных культур. Использование алгоритмов здоровья растений, таких как NDVI для данного района, может помочь выделить изменчивость и упростить изучение растительности и ее деградации. Данная переменная играет важную роль также и при изучение селевых процессов. Поскольку растительность обездвигивает большое количество воды и увеличивает сопротивление сдвигу и сцепление массы с почвой.

Существует несколько типов камер, которые могут помочь вам оценить здоровье растений, в нашем случае мы использовали DJI Phantom 4 с наиболее распространённым типом камер, используемых для картирования, то есть RGB-камер.

Камеры RGB – или стандартные – фиксируют красный, зеленый и синий свет. Изображения RGB более доступны и могут быть получены с помощью обычной камеры, что делает их доступным вариантом, не требующим инвестиций в дополнительные сенсорные технологии. Кроме того, камеры RGB снимают изображения, подобные тем, которые видны человеческому глазу, что означает, что они более знакомы и их легче интерпретировать – даже без использования алгоритмов здоровья растений. Камеры RGB также являются многоцелевыми, что означает, что они могут делать снимки для создания детальных ортофотоплановых карт и способны снимать видео высокого качества [Yamazaki, 2001].

После сравнения старых космических данных и новых полученных, с помощью БПЛА были найдены несколько селеопасных зон, где ранее проходили селевые явления. Как видно на рис. 11, где отображены спутниковые снимки 2007 года и аэрофотоснимок 2019 года имело место прохождение селевого потока, которое также подтвердили местные жители. Как видно на снимках (рис. 12) площадь или длина зона прохождения селя увеличилась, русло реки на рисунке слева более широкое, а на рисунке справа – более узкое.

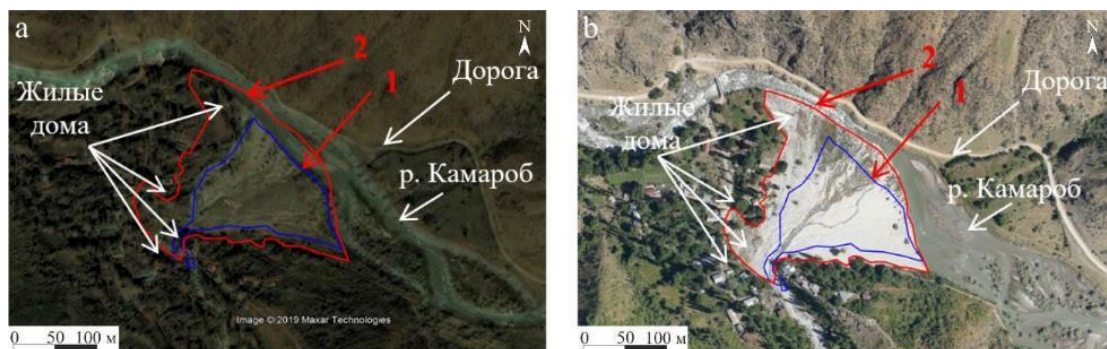


Рис. 11. Селевой конус выноса бокового притока р. Камароб на космоснимке 2007 г. с сервиса Google Earth (a) и аэрофотоснимке 2019 г. с БПЛА (b). *Обозначения:* 1 -- контуры селевых отложений в 2007 г., 2 -- контуры селевых отложений в 2019 г.

Fig. 11. Debris flow fan of the Kamarob River tributary on the 2007 Google Earth satellite image (a) and on the 2019 UAV aerial photo (b). *Designations:* 1 -- contours of debris flow deposits in 2007, 2 -- contours of debris flow deposits in 2019

Применение БПЛА в условиях горных территорий при отсутствии собственных спутников для оперативного мониторинга из космоса позволило получить актуальные данные ДЗЗ (данные аэрофотосъемки) для нижней части бассейна р. Камароб на площади 19 км² с пространственным разрешением 15 см/пиксель, а на территории пос. Пингон, где были зафиксированы отложения после прохождения селевого потока, на площади 0,207 км² с разрешением 5 см/пиксель. Впервые для ущелья Камароб были получены аэрофотоснимки с использованием БПЛА, а также набор актуальных данных (ЦМР, ортофотомозаики, карты растительности и т.д.) для последующей оценки селевой опасности территории; создана база данных; предложена технология постоянного мониторинга; определены наиболее целесообразные типы БПЛА для использования в горных условиях; разработаны, с учетом существующих технологий, рекомендации по применению БПЛА для горно-предгорных зон Таджикистана.

Как отмечено выше, для условий горных территорий наиболее целесообразным вариантом является применение БПЛА самолетного типа QC-2 Micro и квадрокоптеров с камерами высокого разрешения, характеризующихся большим временем работы и возможностью осуществления полетов на больших высотах. Оперативный мониторинг с воздуха способствует своевременному получению информации, необходимой для анализа, сравнения с предыдущими данными, выявления и комплексной оценки риска возникновения опасных природных явлений, что в конечном итоге позволяет составить оперативные ситуационные карты, а также карты изменения местности для моделирования быстрых или длительно развивающихся опасных гидрологических процессов. В случае возникновения чрезвычайных ситуаций, БПЛА могут быть использованы непосредственно в зоне бедствия для обнаружения его источников, анализа опасной зоны, а также оценки ущерба и мониторинга восстановительных работ с воздуха без риска для здоровья человека.

На основе полученных результатов и проведения научно-исследовательских работ с применением БПЛА различного типа в качестве будущих задач запланированы: ежегодный мониторинг района исследований и прилегающих к нему селеопасных горных территорий, расширение перечня объектов мониторинга и пополнение базы данных новыми геопространственными данными, получение оперативных снимков с разрешением от 5 до 50 см/пиксель, составление карты селевой опасности бассейна р. Камароб, дальнейшее накопление результатов мониторинга и анализа бедствий для разработки рекомендаций по управлению рисками стихийных бедствий, связанных с селями.

Выводы

Таким образом, одной из основных проблем, с которой сталкиваются исследователи при изучении горных территорий в Таджикистане, является недостаток открытых данных высокого разрешения о современном состоянии окружающей среды (климата, водных ресурсов, активности протекания экзогенных процессов), которые позволили бы проводить оценку ее состояния и давать своевременный прогноз развития опасных природных процессов, в частности, селевых. Большие возможности для решения данной проблемы открываются в связи с наблюдающимся в последние годы активным развитием технологий БПЛА.

Показанные в данной работе методы и технологии съемки с БПЛА, а также способы ее обработки позволяют получать актуальные данные о состоянии селеопасных районов (снимки труднодоступных участков, высокоточные цифровые модели рельефа). Эти данные являются основой для дальнейшего изучения и анализа селевой опасности с целью предотвращения и минимизации рисков в горных и предгорных районах Таджикистана.

Список литературы

- Камароб [Electronic resource]. URL:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BC%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B1>
- Федотова В.М. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 14. Бассейны рек Средней Азии. Вып. 3. Бассейн р. Аму-Дарьи.: Гидрометеоздат, 1967. — С. 57.
- Фетисов В. С. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние: Уфа 2014. 20 с.
- Eisenbeiß, H. 2009. UAV Photogrammetry. PhD Thesis, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zurich.
- Shinozuka, M. and Rejaie, A. 2000. Correlational analysis of remotely sensed pre- and post-disaster images. SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials.
- Yamazaki, F. 2001. Applications of remote sensing and GIS for damage assessment. Structural Safety and Reliability (Proceedings of Icosar '01). Corotis, R., Schueller G. and Shinozuka, M. (eds.). Taylor & Francis Group
- Identifying Crop Variability with Drones [Electronic resource]
<https://blog.dronedeploy.com/identifying-crop-variability-whats-the-difference-between-ndvi-false-ndvi-and-vari-plant-health-98c380381a33>

Оценка риска и уязвимости территории города Хорог от селевых явлений

Г.В. Шафиев

*Филиал Агентства Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистан, Душанбе,
Таджикистан, ganjali.shafiev@akdn.org*

Аннотация. В статье кратко рассматривается опыт организации АКАН в Таджикистане по оценке уязвимости и риска города Хорог от селевых угроз за период 2015-2016 гг.

Территория города Хорог и прилегающие к нему населенные пункты выбраны из тех соображений, что в будущем такие оценки будут проводиться в пределах малых городов и крупных населённых пунктов Таджикистана, которые сталкиваются с множеством рисков, в том числе и от дальних угроз, влияющих на общее экономическое и социальное развитие, включая вопросы продовольственной безопасности, слабое управление водными ресурсами, повышенной степени угроз от стихийных бедствий, ограниченный доступ к рынкам, изоляция от районных центров и остальной территории Таджикистана. При подготовке доклада автором использованы фондовые материалы Главного управления геологии при Правительстве республики Таджикистан и отчета «Оценка рисков природных опасностей и уязвимости города Хорог». Основной целью проведенных исследований является обращение внимания государственных структур и населения, проживающих в городе Хорог на существующие проблемы, с точки зрения снижения риска и уязвимости от водно-эрозионных процессов и других опасных природных явлений. В рамках работы «Оценка рисков природных опасностей и уязвимости г. Хорог» была проведена оценка обрамляющих склонов и прилегающих к ним водосборных бассейнов. За период работ по оценке г. Хорог были выявлены 42 селевых очага по правому и левому бортам долины реки Гунт.

Ключевые слова: *русловые сели, склоновые сели, техногенные сели, селеносные сели, объем селевого материала, путь транзита*

Ссылка для цитирования: Шафиев Г.В. Оценка риска и уязвимости территории города Хорог от селевых явлений. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 323–334.

Debris flow risk and vulnerability assessment for the territory of the Khorog town

G.V. Shafiev

*Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic Tajikistan, Dushanbe,
Tajikistan, ganjali.shafiev@akdn.org*

Abstract. The article briefly reviews the experience of AKAH in Tajikistan, assessing the vulnerability and risk of Khorog town from mudflow threats for the period of 2015-2016. The territory of Khorog town as well as adjacent to the town settlements are selected for the consideration that in future similar assessments will be carried out within small towns as well as large settlements of Tajikistan, which face many risks, including long-range threats that affect the overall Economic and social development, including food security, poor water source management, increased threats from natural disasters, limited access to the markets, isolation of regional centers from the other parts of the Tajikistan. Drafting the report the author used library sources of the Main Department of Geology at the Government of Republic of Tajikistan, and the report “Khorog town natural hazards Risk

Assessment and vulnerability”. The main purpose of the research is to draw the attention of Governmental Authorities and the residents of Khorog town to existing problems, from point of view of reducing the risk and vulnerability to water erosion processes other dangerous natural phenomena. In the framework of Khorog town natural hazards and vulnerability Assessment, the framing slopes and drainage basins attached to them has been done. While doing Khorog Town Assessment 42 mudflow channels at the right and left sides of Gunt river valley were identified.

Key words: *channel debris flows, slope debris flows, technogenic debris flows, debris flow channel, volume of debris flow material, transit path*

Cite this article: Shafiev G.V. Debris flow risk and vulnerability assessment for the territory of the Khorog town. In: Chernomorets S.S., Viskhadzheva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 323–334.

Введение

Территория ГБАО занимает почти половину территории Таджикистана и относится к самой высокогорной её части. В связи с этим на этой территории довольно широко развиты экзогенные геологические процессы (оползни, обвалы, сели, наводнения), которые в той или иной степени проявляясь, наносят огромный ущерб народному хозяйству и зачастую представляют большую угрозу селениям, которые расположены в зонах их распространения. Оценка риска экзогенных геологических явлений и уязвимости селений, особенно важна в горных районах, так как большинство населенных пунктов расположены по бортам долин горных рек, у подножий горных склонов и конуса выносов, в пределах которых в основном и происходят эти природные явления [Шафиев, 2013].

При всём многообразии и активности проявления современных геологических процессов на Памире, одним из самых распространённых являются селевые потоки. Только на территории города Хорог зафиксированы 42 очага селевых проявлений, которые по характеру угрозы могут считаться опасными и непредсказуемыми процессами [Винниченко и др., 2016]. Для проведения оценки рисков природных опасностей и уязвимости город Хорог был выбран в связи с географическим расположением, высокими темпами развития, освоения новых территорий и подверженности рискам стихийных бедствий.

Материалы и методы

В 2015 году со стороны Филиала агентство Ага Хан по Хабитат была произведена оценка природных опасностей и уязвимости г. Хорог и прилегающих территорий с применением современных ГИС технологий по ране отработанной методике на территориях городов – Душанбе, Худжанд (Таджикистан) и Нарын (Киргизия).

При проведении исследований были использованы имеющиеся фондовые и литературные данные по ранее проведенным работам на данной территории. Основной базовый материал для оценки риска селевых процессов на территории г. Хорог был собран при проведении полевых работ на данной территории. На территории г. Хорог и прилегающих к нему территорий были выявлены и обследованы 42 очага проявления селей на 19-ти участках, которые потенциально могут создавать угрозу для жилых зон, объектов инфраструктуры, освоенных площадей и т.д. При этом был выполнен цикл полевых маршрутов для выявления и детального описания процессов.

В пределах г. Хорог и прилегающих к нему территорий в связи с массовым площадным распространением покровных делювиально-осыпных и мореных отложений, формируются преимущественно грязевые и грязекаменные селевые потоки [Методическое..., 1971]. Зарождение селевых потоков происходит, в зависимости от

геологического строения склонов и эрозионных врезов в водосборах: в средних частях эрозионных саев обрамляющих склонов, в средней, верхней и даже нижней части склонов, в нишах отрыва древних сейсмогенных оползней. Повторяемость селей находится в прямой зависимости от величины бассейна, строения и крутизны склонов, объёмов и состояния очагов твёрдого стока. Кроме того, в увеличении объема селевого потока участвуют боковые второстепенные эрозионные ложбины, промоины и врезы.

По характеру эрозионных долин, врезов и очагов зарождения селевых потоков на исследуемой территории выделены:

Типичные эрозионные селеносные саи с постоянными и временными водотоками. К данной группе относятся селевые саи протяжённостью от 2,5 до 4,0 км с боковыми эрозионными ложбинами и средней площадью водосборного бассейна. Площади водосборных бассейнов, в основном составляют первые квадратные километры, в верховьях склоны скалистые, крутые, средняя и нижняя часть сглаженная, с выходами обнаженных коренных пород по бортам эрозионных саев. Это преимущественно грязе- и водокаменные потоки эрозионного зарождения ливневого или снежного питания. Типичный сезон проявления для особо мощных потоков июль-август, реже проходят весенние селевые потоки, связанные с дождями и таянием снега. Объёмы селевых выносов разнообразны от слабо насыщенных потоков в 5-7 тыс. м³ до мощных в 50–70 тыс. м³. Основными источниками твёрдой составляющей в этих бассейнах являются моренные, осыпные, обвально-оползневые и русловые отложения. Данный тип селей наблюдается по эрозионным саям Тем, Хуфак Рушанского хребта, Гузакдара и Ниводак Ишкашимского хребта.

Согласно оценке, в зону потенциального поражения попадают 59 хозяйств.



Рис. 1. Селеносные эрозионно-водные саи Ниводак и Хуфакдара

Fig. 1. Nivodak and Khufakdara debris flow gullies

Склоновые сели снежно-дождевого зарождения – основной по распространению тип селей в пределах территории г. Хорог. Происходят обычно на осыпных склонах, лавинно-осыпных конусах и моренно-осыпных шлейфах в весеннее время, в периоды интенсивного таяния снежного покрова, при сходе и таянии лавин, выпадении дождей. Очаги проявления селей наблюдаются над жилыми зонами Хлебозавод, Андарситез, Аэропорт, Паринен, Шошхорог, Бизмич, Гулобод, Барджем, Сельхозтехника. Активизация проявления селей наблюдается в апрель - май месяцы в период интенсивного таяния снежников и останцев сохранивших лавин расположенных в средней и верхней части склонов южной и северной экспозиции. Сели проходят ежегодно, до полного смещения и выноса подвижных осыпей. Масштаб проявления не велик, до 1000 м³ с небольшими зонами поражения. Обычно в зоне поражения оказываются автодороги, линии электропередач и приусадебные участки, которые близко расположены к основанию склонов. Чаше эти сели проявляются в высокогорье (в верхней части склонов) за пределами жилых зон.

Согласно оценке, в зону потенциального поражения попадают 72 хозяйства.



Рис. 2. Склоновые сели снежно-дождевого зарождения. Участки Абдуллоева и Паринен

Fig. 2. Origination sites of debris flows caused by snow melting and heavy rains. Abdulloev and Parinen sites

Склоновые сели техногенного генезиса. Это один из самых распространённых типов селей в пределах освоенных склонов. Связаны со сбросом вод, разрушением водоподводящих каналов и фильтрации воды из оросительной сети. Образуются из-за нарушения правил строительства и эксплуатации водных систем. По характеру проявления – это типичные склоновые грязекаменные сели малых объемов с локальными зонами поражения. Локализации данных типов селей наблюдаются вдоль оросителей Тимур, Додхудоева, деривационного канала Старый ГЭС и канала Ниводак. Частота проявления селей ежегодная. Несут прямую угрозу не только освоенным землям и приусадебным участкам, но и отдельным хозяйствам. Сели этого типа легко регулировать, если проводить гидроизоляцию и закрепление гидросети. Самый лёгкий, эффективный и распространенный способ – это лесопосадки по внешней стороне каналов и рынков.

Согласно оценке, в зону потенциального поражения попадают 16 хозяйств.



Рис. 3. Склоново-техногенные сели. Участки Паринен и Новая

Fig. 3. Initiation zone of man-made debris flow on slopes. Parinen and Novaya sites

При полевых обследованиях селевых участков особое внимание уделялось типу данного явления, области зарождения, транзита и аккумуляции отложений, предполагаемому объёму выносимого материала, параметрам склона, периоду повторяемости, возможной площади поражения, расположению селений и объектов народного хозяйства в зоне риска и т.д. В таблице 1 приведена общая информация об обследованных участках, в пределах которых наблюдаются селевые процессы.

При детальном обследовании участков развития селевых процессов были получены данные об их основных характеристиках – высотные отметки зоны зарождения, тип селевого потока, протяженность зоны транзита, скорости прохождения, расход, объём выносимого материала, коэффициент селеопасности [Флейшман, 1978; Круподеров, Постоев, 1984], частота проявления, возможная площадь поражения, какие объекты могут попасть в зону риска для каждого участка и точки проявления процесса.

Определены основные зоны развития селевых процессов, основные условия и факторы, влияющие на их проявление.

Кроме перечисленных выше характеристик, были обследованы также и селезащитные сооружения, созданные ранее на этих участках, их состояние и эффективность. Были разработаны превентивные мероприятия по инженерной защите территории и подготовлены рекомендации по их осуществлению.

Все эти данные проанализированы и обобщены в таблице.

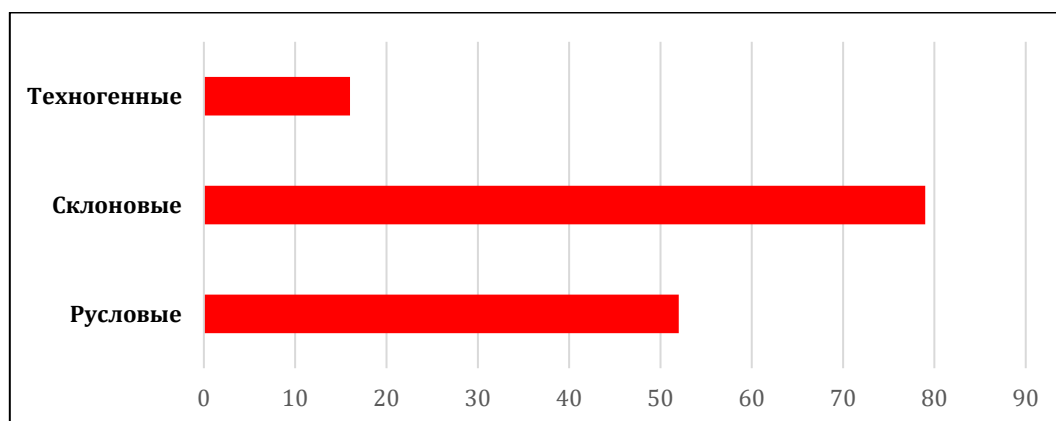


Рис. 4. Количество хозяйств в зоне потенциальной угрозы

Fig. 4. Number of farms in the area of potential hazard

Таблица. Основные характеристики селей на территории г. Хорог

Table. Main characteristics of debris flows on the territory of the Khorog town

№	Район (количество селей на участке) Тип селевого потока	Сель и тип селевой долины Абс. высота Площадь селесбора	Путь транзита Расход Объем выноса Площадь поражения	Частота проявления	Элементы, находящиеся в зоне риска от селей
1	Темдара (2) Грязекаменный	DF_01_S1- S2 русловой 2700-3000 м S = 4 км ²	L = 2000 м Q = 5-10 м ³ /с V = 6000 м ³ S = 0,3-1,5 га	от ежегодных до 1 раз / 5 лет	8 хозяйств, ороситель 180 м, ЛЭП 350 м, грунтовая дорога 150 м,
2	Аэропорт (3) Грязекаменные	DF_02_S1, S2, S3 склоновые 2800-3000 м S = 0.30 км ²	L = 950 м Q = 5-10 м ³ /с V = 3800-15000 м ³ S = 1 км ²	от ежегодных до 1 раз / 10 лет	31 хозяйство, отрезок оросителя 275 м, приусадебный участок 0.6 га, ЛЭП 0.13 км
3	Паринен (2) Грязекаменный	DF_03_S1, S2 склоновые 2700-2850 м S = 0.21 км ²	L = 700 м Q = 5-10 м ³ /с V = 2000 м ³ S = 13400 м ²	от ежегодных до 1 раз / 10 лет	3 хозяйства, ЛЭП 0.95 км, столовая, кафе, магазин стройматериалов, отрезок канала 80 м,
4	Саиден (2) Грязекаменный	DF_04_S1, S2 склоновые 2300-2400 м S = 0.23 км ²	L = 400 м Q = 3-5 м ³ /с V = 200 м ³ S = 5000 м ²	от ежегодных до 1 раз / 10 лет	3 хозяйства, отрезок канала 280 м, ЛЭП 0.07 км,
5	Гулобод (2) Грязекаменный	DF_05_S1, S2 склоновые 2350-2400 м S = 7,4 км ²	L = 3450 м Q = 5-10 м ³ /с V = 5200 м ³ S = 11000 м ²	от ежегодных до 1 раз / 10 лет	2 хозяйства, отрезок канала 0.03 км, ЛЭП 0.04 км, дорога 0.1 км,
6	Хуфак (4) Грязевые и грязекаменные	DF_06_S1, S2, S 3, S4 склоновые 3500-3300 м S = 8.2 км ²	L - более 3 км Q = 5-10 м ³ /с V = 21000 м ³ S = 15000 м ²	от ежегодных до 1 раз / 5 лет	33 хозяйства, здание ХГУ (1 корпус), отрезок канала 0.04 км, пастбища 3 га
7	Барджев (3) Грязекаменные	DF_07_S1, S2, S 3 склоновые 2600-2700 м S= 1.3 км ² .	L = 800-1000 м Q = 5-10 м ³ /с V = 21000 м ³ S = 50000 м ²	от ежегодных до 1 раз / 5 лет	отрезок грунтовой автодороги, 2.8 га., 6 хозяйств, канал 300 м, ЛЭП 0.2 км
8	Пастчид (1) Грязевые и грязекаменные	DF_8_S1, склоновые 2300 м S= 0.3 км ²	L = 300 м Q = 4-5 м ³ /с V = 6250 м ³ S = 9000 м ²	от ежегодных до 1 раз / 8 лет	отрезок автомобильной дороги 500 м, канал Темур 500 м,
9	Имомабад (1)	DF_9_S1, склоновые 2400-2600 м S = 1.21 км ²	L = 80-700 м Q = 4-5 м ³ /с V = 1000 м ³ S = 2400 м ²	от ежегодных до 1 раз / 8 лет	1 хозяйство, отрезок автомобильной дороги 0.03 км, ЛЭП 0.04 км,
10	Дашти-Боло (1) Грязекаменные	DF_10_S1, склоновые 2600-2700 м S = 0.41 км ²	L = 200 м Q = 4-5 м ³ /с V = 7500 м ³ S = 3000 м ²	от ежегодных до 1 раз / 8 лет	4 хозяйства, здания школы, отрезок грунтовой дороги 140 м, ЛЭП 260 м, ороситель 60 м,

№	Район (количество селей на участке) Тип селевого потока	Сель и тип селевой долины Абс. высота Площадь селесбора	Путь транзита Расход Объем выноса Площадь поражения	Частота проявления	Элементы, находящиеся в зоне риска от селей
11	Чухт - Хорог (старая ГЭС) (1) Грязекаменные	DF_11_S1, склоновые 2100-2200 м S = 0.04 км ²	L = 180 м Q = 4-5 м ³ /с V = 1000 м ³ S = 1400 м ²	от ежегодных до 1 раз / 8 лет	Ороситель Бидурд-Дашт 60 м, Автодорога Ош-Хорог 50 м
12	Ботсад (3) Грязевые	DF_12_S1, S2, S3 склоновые 2700-3000 м S = 1.9 км ²	L = 200 м Q = 3-5 м ³ /с V = 300 м ³ S = 8600 м ²	до 1 раз / 8 лет	В зоне возможного риска - тропа 0.035 км, отрезок оросительного канала 0.12 км
13	Андарситез (1) Грязекаменный	DF_13_S1, склоновые 3200 м и более S = 6.60 км ²	L = 1,5-2км Q = 8 м ³ /с V = 6000 м ³ S = 103000 м ²	1 раз / 20 лет	В зоне возможного риска - ороситель 60 м, запасная автодорога Хорог-Хабост 130 м
14	Гулобод (2) Грязевые	DF_14_S1, S2 склоновые 2400-2500 м S = 0.06 км ²	L = 500-600м Q = 3-4 м ³ /с V = 1500 м ³ S = 38500 м ²	до 1 раз / 3 года	В зоне возможного риска 4 хозяйства, отрезок оросительного канала 0.08 км,
15	Тирчид (2) Грязевые	DF_15_S1, S2 склоновые 3000-3100 м S=0.3 км ²	L = 1600 м Q = 3-5 м ³ /с V = 3500 м ³ S = 61500 м ²	1 раз / 5 лет	В зоне возможного риска - отрезок оросительного канала 290 м, новая спортплощадка
16	Носири Хусрав (1) Грязевые	DF_16_S1, склоновые 2700-2800 м S = 0.72 км ²	L = 1,5-2.4 км Q=5 м ³ /с V = 2000 м ³ S = 48700 м ²	от ежегодных до 1 раз / 5 лет	Отрезок оросительного канала около 250-300 м, сады 1.6 га
17	Хлебзавод (5) Грязевые и грязекаменные	DF_17_S1, склоновые 2500-2600 м S = 4.2 км ²	L = 0.3 км Q = 3-4 м ³ /с V = 3120 м ³ S = 37000м ³	до 1 раз / 5 лет	7 хозяйств, отрезок оросительного канала около 205 м, сады 7.4 га, грунтовая автодорога 60 м
18	Бизмич (6) Грязевые	DF_18_S1, S2, S3, S4, S5, S6 склоновые 2400-2600 м S = 1.93 км ²	L = 0.5 км Q = 2-5 м ³ /с V = 1000 м ³ S= 33270 м ²	до 1 раз / 10 лет	12 хозяйств, отрезок оросительного канала около 245 м, сады 0.8 га
19	Ниводак (1) Водокаменный	DF_19_S1, русловой 2900-3000 м S = 1.93 км ²	L = 2.0 км Q = 5-7м ³ /с V=50000м ³ S=67000м ²	от 1 раз / 5 лет до 1 раз / 15 лет	18 хозяйств, школа, автодорога Хорог-Ишкашим 160 м, отрезок оросительного канала около 70 м

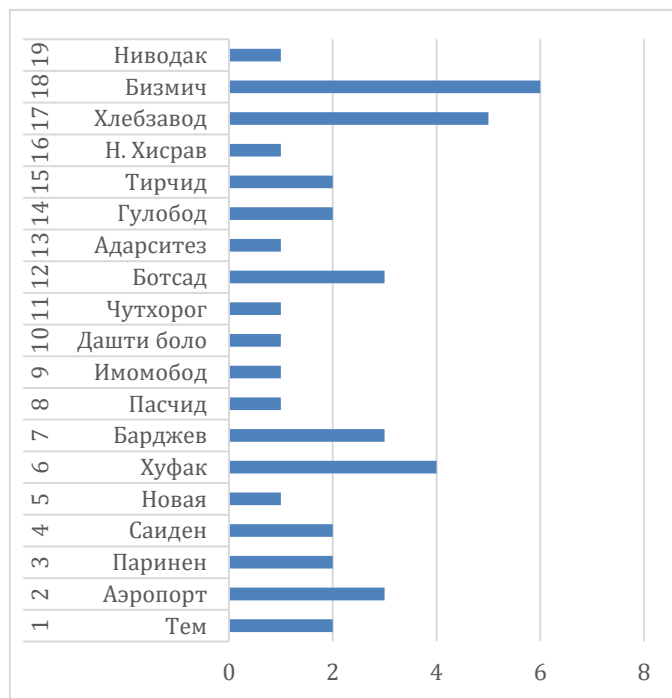


Рис. 8. Количество селевых очагов по участкам города Хорог

Fig. 8. Number of debris flow initiation zones in the parts of the town of Khorog

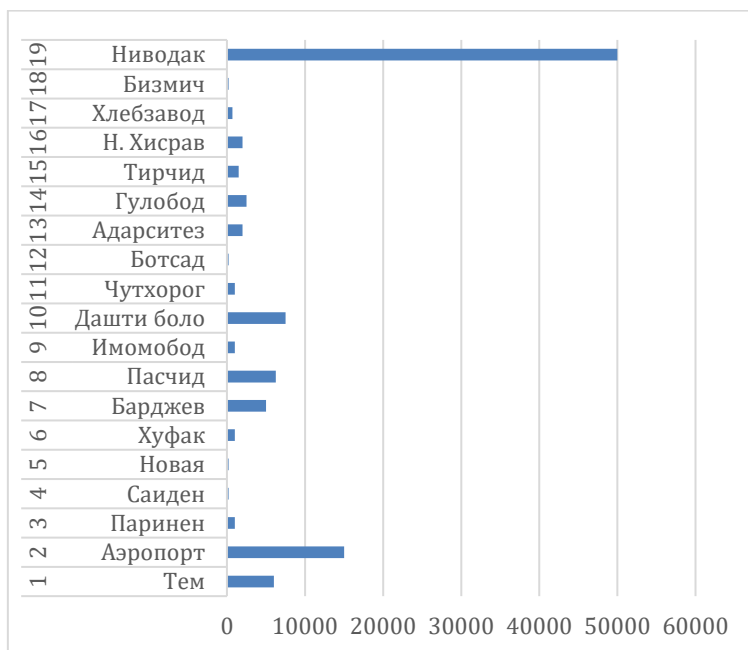


Рис. 9. Суммарный максимальный объем единовременных выносов селей по участкам города Хорог

Fig. 9. Total maximum volume of debris flows for residential parts of the town of Khorog

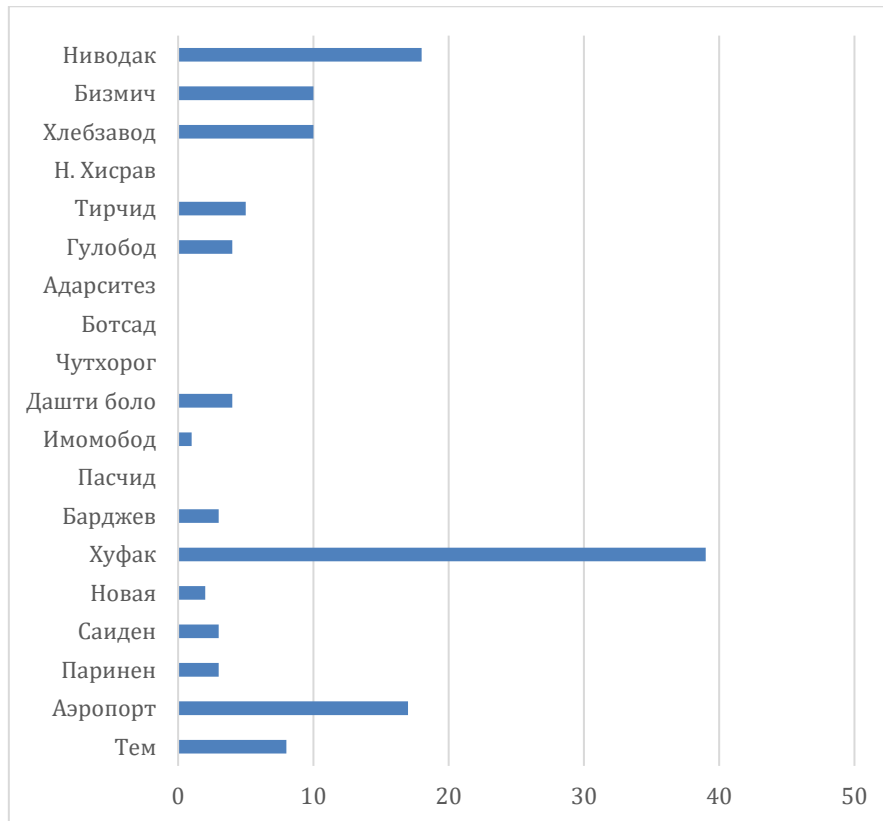


Рис. 10. Количество хозяйств по жилым участкам города Хорог в зоне потенциальной селевой угрозы

Fig. 10. Number of farms by residential plots in the town of Khorog in the zone of potential debris flow hazard

Составленная карта в электронном варианте, помещенная в базу геологических данных показывает состояние участков, в пределах которых распространены селевые процессы на момент их обследования. Преимуществом электронных карт в том, что её можно использовать при повторных аналогичных работах для определения динамики развития селей и эффективности рекомендуемых защитных мероприятий на данной территории.

Составленные таблицы в дальнейшем были использованы для составления «Карты схемы развития селей на территории г. Хорог» в формате ГИС-технологий.

Проведена оцифровка всех селевых процессов на территории г. Хорог и прилегающих территорий в ГИС-программах, собранная информация переведена в электронный формат и введена в геологические базы данных по процессам, населенным пунктам и территориям. Предварительно была подготовлена оцифрованная карта исследуемой территории, и вся полученная информация использована для создания специальной электронной «Карты-схемы развития селей на территории г. Хорог».

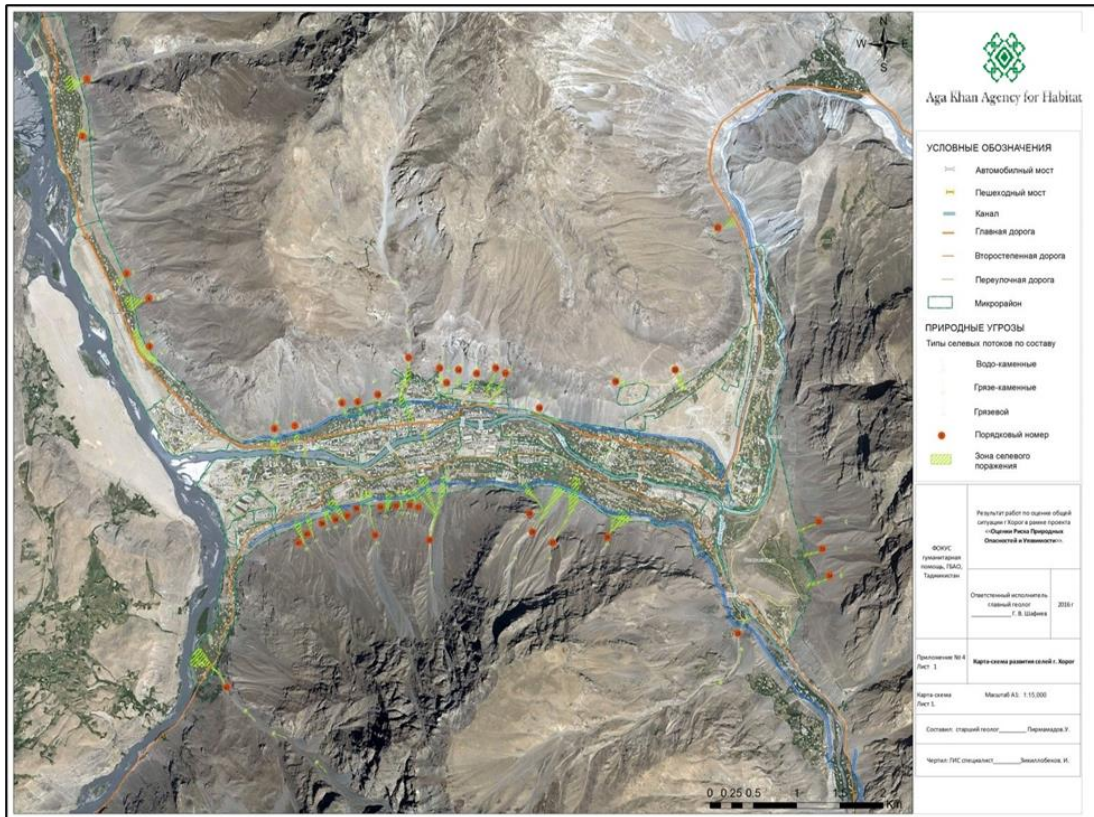


Рис. 11. Карта-схема развития селей на территории города Хорог и прилегающих склонов

Рис. 11. Sketch map of debris flow formation in the town of Khorog and adjacent slopes

Выводы и рекомендации

На территории города Хорог установлено развитие 2 типов по генезису селевых явлений, типичных для горных и высокогорных территорий, которые напрямую взаимосвязаны с оползнями, лавинами и водно-эрозионными процессами [Шафиев, 2013].

Селевые явления для территории города Хорог рассматривались как геологический процесс, который усиливает, иногда определяет другие процессы гравитационной и эрозионной групп.

Практически все типы селей проявляются в городе Хорог и прилегающих территориях. На многих участках они представляют угрозу для жилых кварталов, отдельных домов, народно-хозяйственных и социальных объектов, каналам, автодорогам, линиям электропередач и гидротехническим сооружениям.

Описание очагов селевых явления проводилось в привязке к конкретным участкам и площадям. После описания каждого процесса получался набор участков, где этот процесс развит самостоятельно или проявляется в парагенезисе с другими процессами (оползень и склоновая эрозия). После завершения описания процессов по территории города Хорог было выделено 19 участков, которые представлены в табличной форме, где указаны процессы и количество точек проявления по каждому процессу в пределах участков.

Ситуация изменилась в последние 20–25 лет, когда на первый план вышел вопрос взаимоотношения процессов и человека, масштабы поражения угрозы и риска, а также поиск направлений и мероприятий по реальной защите и снижению риска от угроз.

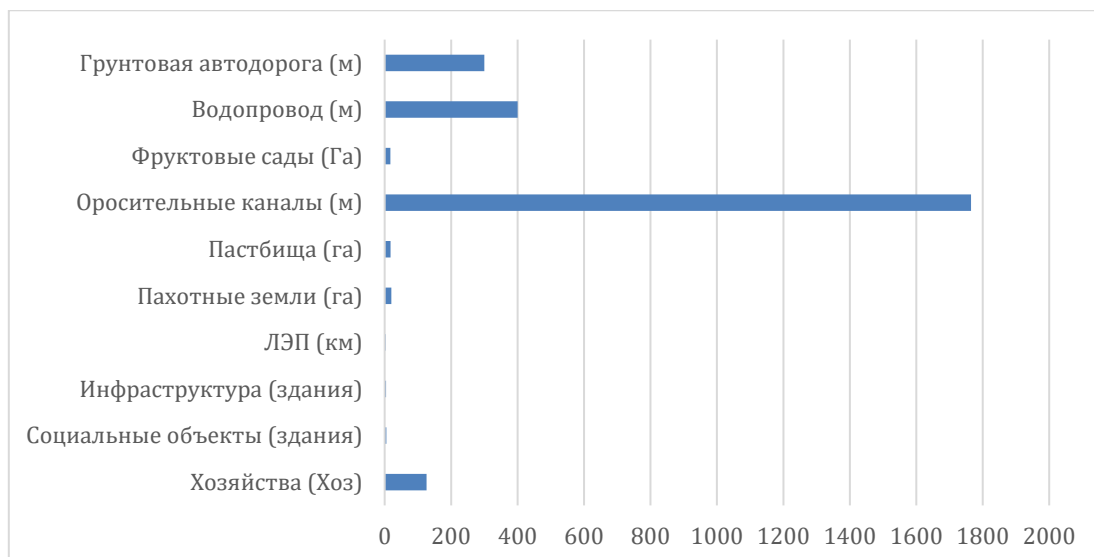


Рис. 12. Диаграмма распределения объектов г. Хорог, находящихся в зоне угрозы от селевых явлений

Fig. 12. Diagram of the distribution of objects in the town of Khorog, located in the zone of debris flow hazard

Всего на территории города Хорог выявлены 42 очага проявления селей на 19 участках, которые потенциально могут создавать угрозу для жилых зон, объектов инфраструктуры, освоенных площадей и т.д. Состояние территории города на предмет селеопасности критическое. Фактически все имеющиеся селезащитные сооружения технически изношены и подлежат реконструкции. Селеопасными участками являются: Аэропорт, Паринен, Хуфак, Барджев, Гулобод, Автостанция, Бизмич, Хлебозавод и Ниводак.

Для защиты от селевой угрозы рекомендуется выполнение следующих мероприятий.

Активные селезащитные мероприятия

1. Террасирование склона на 2 уровня (участки Хлебозавод, Гулдасташо, Гулобод, Боген)
2. Строительство селесборов по сухим саям (Тем, Хуфакдара, Ниводакдара и Андарситез)
3. Строительство селезащитных и селенаправляющих дамб (Хуфак, Аэропорт, Барджев, Автостанция)
4. Расчистка селевых русел (Тем, Хуфакдара, Адарситез, Ниводакдара)

Пассивные селезащитные мероприятия

1. Организация мониторинга за опасными зонами
2. Временная эвакуация жителей из зоны риска в период выпадения обильных дождей, резкого повышения температуры
3. Выделение охранных зон и полный запрет жилого строительства. Установка знака оповещения «Внимание: сели»
4. Запрет строительства объектов инфраструктуры и коммуникаций в зоне риска
5. Лесонасаждения в зоне аккумуляции селей и на пути транзита

Благодарности

Автор выражает благодарность группе исполнителей организации АКАН, в том числе: Зарипову Р.Г., Мародасейнову Ф.О., Пирмамадову У.Р. и консультанту проекта к.г.-м.н. Винниченко С.М. за оказанную помощь при подготовке и написании статьи.

Список литературы

- Винниченко С.М. и др. Оценка рисков природных опасностей и уязвимости города Хорог. Отчет. 2016.
- Методическое руководство по комплексному изучению селей. Под ред. А.И. Шеко и М.В. Чуринова. М.: Недра, 1971.
- Флейшман С.М. Сели. Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. 312 с.
- Круподеров В.С., Постоев Г.П. Глава 16. Расчет основных параметров оползней и селей. // В кн.: Оползни и сели. В двух томах. М.: Центр международных проектов ГКНТ, 1984. Том 1, с. 286-301.
- Шафиев Г.В. Особенности проявлений селевых процессов и опыт международной организации «Фокус Гуманитарная помощь» в разработке современных методов защиты от них в условиях Горного Бадахшана (Таджикистан) // Геориск. 2013. № 1. С. 53-59.



Роль растительного покрова в укреплении ландшафтов водосборного бассейна Шашвалон Нурабадского района Республики Таджикистан

С.Ю. Юсупов

Филиал Агентство Ага Хана по Хабитат в Республике Таджикистане, Душанбе, Таджикистан, sino.yusupov@akdn.org

Аннотация. В статье рассматривается роль растительного покрова в сохранение горной экосистемы водосборного бассейна Шашвалон. Анализируется экологическая ситуация в горных экосистемах региона. Коротко описывается доминирующие виды травянистых растений, выполняющих природоохранную роль в горных экосистемах региона, а также причины деградации.

Ключевые слова: водосборный бассейн, Шашвалон, растительность, полусаванны, крупнотравье, чернолесье, экспозиция

Ссылка для цитирования: Юсупов С.Ю. Роль растительного покрова в укреплении ландшафтов водосборного бассейна Шашвалон Нурабадского района Республики Таджикистан. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 335–341.

Role of vegetation cover for the landscape stabilization in Shashvalon catchment, Nurabad District, Republic of Tajikistan

S.Y. Yusupov

Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan, sino.yusupov@akdn.org

Abstract. The following article is considering the role of vegetation in preserving the mountain ecosystem of the Shashvalon watershed. The ecological situation in the mountain ecosystems of the region is being analyzed. Also, it briefly describes the dominant species of herbaceous plants that play a conservation role in the mountain ecosystems of the region, as well as the causes of degradation.

Key words: watershed, Shashvalon, vegetation, semisavanna, tall grass, deciduous forest, exposition

Cite this article: Yusupov S.Y. Role of vegetation cover for the landscape stabilization in Shashvalon catchment, Nurabad District, Republic of Tajikistan. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 335–341.

Введение

Активная хозяйственная деятельность, ставшая во второй половине XX века одним из ведущих факторов среде образования, нарушила сложившиеся природные связи и стала причиной негативных процессов и явлений природной среде и социально-экономической сфере. В связи с этим стала актуальной охрана окружающей среды – создание систем мер, обеспечивающих рациональное использование природных ресурсов и предупреждающих прямое и косвенное вредное влияние результатов деятельности общества на природу и здоровье человека. Вместо с тем, без использования

природных ресурсов невозможен прогресс человеческого общества, поэтому необходимо найти разумное соотношение между использованием природы и её охраной, что определяется природными и экономическими условиями республики, социальными и культурными традициями её населения, многовековым опытом использования лесных и водных богатств, её богатой флоры и фауны [Лебедев и др., 2012].

Естественные пастбища и сенокосы являются источником производства дешёвых кормов высокого качества и имеют огромное значение в развитии животноводства Республики Таджикистан. В общем балансе кормов для животных естественные кормовые ресурсы занимают первое место. В практике животноводства, особенно овцеводства и мясного скотоводства широко используют естественные пастбища. Однако за последние годы бессистемный выпас домашних животных и вырубка древесное – кустарниковая растительность значительно ухудшил состояние пастбищ и растительный покров. Особенно высокая нагрузка приходится на высокогорных пастбищах, в том числе и на территории водосборного бассейна Шашвалон Нурабадского района. Это приводит к разрушению травянистый покров и ускорение эрозионных процессов, как селевых потоков и оползней.

Цель исследования – изучить экологическое состояние растительного покрова и определение современного состояния экосистем водосбора Шашвалон.

Материалы и методы исследования

Нами был проведён комплекс исследований на территории водосбор Шашвалон, экспедиционным и маршрутным методом. Летом 2019 г. были проведены геоботанические исследования с применением наземных методов изучения ландшафтов. Всего было выполнено 83 геоботанических описаний за период вегетации растительных сообществ.

Описание растительного покрова проводили в соответствии со стандартными геоботаническими методами, которые включали: общее проективное покрытие, обилие по шкале Друде, фаза развития, проективное покрытие видов, пробы растительных образцов для определения урожайности [Лавренко и др. 1964, 1972]. При оценке фитоценотического разнообразия сообществ использовали принцип выделения видов фитоценозов на основании выделения сообществ, видового состава, доминирования видов [Сочава, 1972].

В целях определения ключевых пастбищных полигонов водосбора (в дальнейшем ВБ) Шашвалон были использованы геоботанические карты М:100 000 70-х годов прошлого столетия. В результате геоботанической обследования было создана геоботаническая карта ВБ Шашвалон масштаба 1:18 000 (рис. 1, 2).

Территория бассейна Шашвалон Нурабадского района по характеру растительности относится к Гиссаро-Дарвазскому типу поясности и охватывает часть южного склона Каратегинского хребта.

Бассейн расположен на высоте 1400 до 3200 м над уровнем моря. Производственное направление в основном садоводство, животноводство и пчеловодство.

Рельеф – горный, минимальная высота 1350 м, максимальная высота 3200–3400 м над уровнем моря. Рельеф обследованной территории характеризуется значительным колебанием относительных и абсолютных высот с сравнительно небольшой крутизной склонов и выходами коренных пород. В пастбищном отношении немаловажную роль играет среднегорная территория сглаженных водоразделов (1600–2800 м.). Нижняя полоса этой области заселена и освоена под посевы различных сельскохозяйственных культур, в основном сенокосы.

Климат. Каратегинский хребет относятся в Переднеазиатской климатический области, характеризующейся недостаточностью увлажнения при максимуме осадков в холодное время. Зимы суровые, лето тёплое. Весной максимум температура воздуха не превышает 17–23°C. Летом температура воздуха составляет 24–28°C. Заморозки обычно начинаются с октября. Постоянный снеговой покров устанавливается с конца ноября –

начала декабря и лежит до конца марта. Зима многоснежная и суровая, глубина снегового покрова достигает 1–1,5 м. Минимальная температура воздуха зимой доходит до -7 – -11°C . В июне осадки 32–40 мм, в июле 12 мм, в августе 2 мм. В декабре и январе выпадает 150–160 мм осадков. Осенний дождливый период бывает коротким. Сумма годовые осадков превышает 777 мм. Минимум среднегодовой температура $3,1^{\circ}\text{C}$, а максимум $15,1^{\circ}\text{C}$.

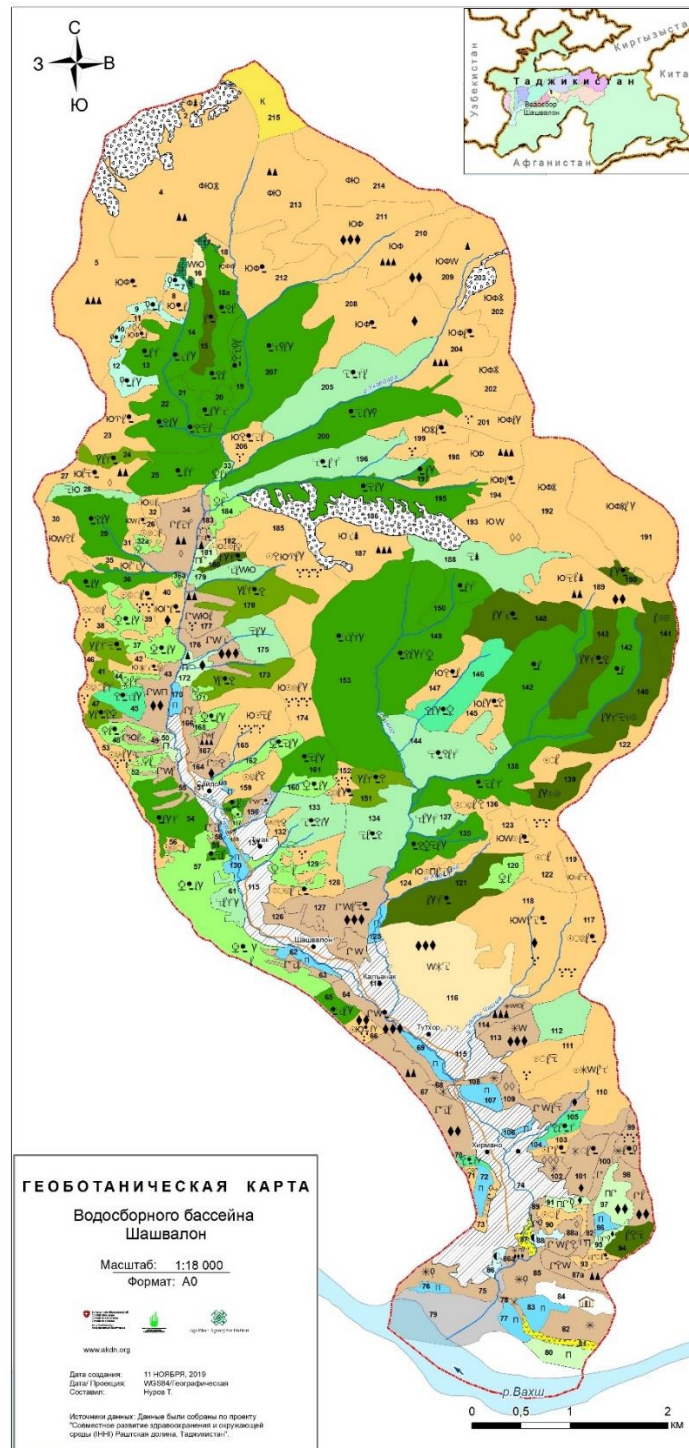


Рис. 1. Геоботаническая карта водосбора Шашвалон Нурабадского района

Fig. 1. Geobotanical map of the Shashvalon watershed, Nurabad District



Рис. 2. Экспликация к геоботанической карте

Fig. 2. Explication to the geobotanical map

Почва. Почвенный покров образуют горные коричневые и высокогорные лугово-степные почвы. Пояс горных коричневых почв по рельефу приурочен к среднегорьям на высоте от 1400 до 2700–3000 м над уровнем моря. Нижняя часть пояса занята горными коричневыми карбонатами, а верхняя часть коричневыми типичными почвами.

Пояс горно-коричневых почв по рельефу приурочен к среднегорьям на высоте от 1200–1500 до 2700–3000 м над уровнем моря. Нижняя часть пояса – массивы холмистых предгорий с мощным чехлом лёсса и лёссовидных суглинков- занята горными коричневыми карбонатами, а верхняя часть – сильно расчленённые и скалистые склоны хребтов- коричневыми типичными почвами.

Почвообразующими породами коричневых карбонатных почв служат лёссовидные суглинки, подстилаемые известняками, красноцветными песчанками, сланцами, конгломератами. Гумуса содержится до 4,5%.

Горные коричневые типичные почвы развиваются под древесно-кустарниковыми формациями туркестанского клёна, экзохорды, грецкого ореха, арчовниками на делювии и элювии гранита, сланцев, реже на лёссовидных суглинках, известняках, красноцветных песчаниках и глинах. Содержание гумуса от 5 до 12% [Кутеминский, Леонтьева, 1966].

С высоты от 2700–2800 до 3300 м распространены высокогорные лугово-степные почвы, которые развиваются на делювии крупнозернистых интрузивных пород, глинистых сланцев, кристаллических известняков. Содержание гумуса от 5 до 10%.

Важная экологическая проблема землепользования в водосборном бассейне Шашвалон является деградация пастбищ. На территории ВБ Шашвалон 90% занимают пастбища. Их состояние можно считать критическим: около 60% в той или иной степени деградированы.

С давних пор территория ВБ Шашвалон использовалась в качестве пастбищ для многочисленного поголовья скота.

Анализ данных предыдущих лет показывает, что пастбищная растительность многие десятилетия находилась под постоянным антропогенным процессом: наблюдался ненормированный выпаса скота. Ёмкость пастбища была превышена почти в 3 раза, в результате чего произошёл процесс пастбищной дигрессии. Безмерная заготовка лекарственных и пищевых трав, высокая нагрузка скота вызвали значительные изменения в продуктивности, флористическом составе и структуре растительных сообществ и привели к трансформации самих сообществ.

Анализируя состояние окружающей среды водосбора, нужно принимать во внимание общее экономическое развитие данной территории и условия жизни ее граждан. Малоимущее население кишлаков в этом регионе сильно зависит от природных ресурсов и наиболее сильно подвержено воздействию дисбалансов, возникающих в окружающей среде, в частности процессам опустынивания, загрязнения водных источников и последствиям природных бедствий, включая оползни и селевые потоки. В то же самое время они часто являются невольными факторами деградации окружающей среды. Из-за отсутствия альтернатив население загрязняет водные источники бытовым мусором и сточными водами, производит рубки скудных лесных ресурсов на топливо и содержит стада домашнего скота в количестве, превышающем несущую способность земель.

На протяжении последних 20 лет сельские и горные районы испытывают возрастающее давление населения. В переходный период, из-за упадок промышленного производства и нехватка экономических возможностей многие люди покинули города и вернулись в сельские районы на скудные пахотные земли. Эти миграционные тенденции, вместе с высоким уровнем рождаемости в горных регионах, низким уровнем занятости и немногочисленными экономическими возможностями, за исключением сельского хозяйства, в сочетании с низким уровнем инфраструктуры оказывают огромное давление на природные ресурсы через интенсивное использование пахотных земель, воды и лесов. Чрезмерный выпас скота, богарное земледелие, использование горных земель существенно содействовали эрозии почв, а также деградации земель [Мадаминов и др., 2012].

Деградация земель оказывает вредное воздействие на условия жизни, так как сельское хозяйство является главным источником дохода бедного населения. Большинство населения ВБ Шашвалон зависят от земли для своего существования и пропитание. Решение проблемы обеспечения продовольствием очень зависит от рационального использования земель и функционирования сельскохозяйственного сектора. Однако малоимущим очень трудно выжить, опираясь только на сельское хозяйство, и деградация земель не является единственной причиной.

Нехватка топлива (угля, природного газа) заставляет населению рубить деревья для топлива. Основным топливом для приготовления пищи в данной местности является древесина. Рубки лесов приводят к перемещению критической состоянием биомассы,

что снижает производительность земель, также приводит к уменьшению плодородия почвы.

Вырубка деревьев и кустарников также представляет серьезную угрозу для биоразнообразия. Вместе с чрезмерным стравливанием пастбищ, браконьерством и вторжением людей в дикую природу это является серьезным наступлением на природные богатства страны.

Как показали исследования, на протяжении довольно длительных и высоких пастбищных нагрузок вблизи населенных пунктах (Хирмано, Шайхабдулхай, Тутхор, Каланак, Шашвалон, Тугак) произошло трансформация растительности происходило постадийно: коренные югановые сообщества из *Prangos pabularia* сменились на полынные сообщества из *Artemisia tenuisecta*. В дальнейшем, при возрастании нагрузки сформировались полынно-эфемеровые сообщество с преобладанием однолетников из *Bromus oxyodon*, *Poa bulbosa*, зверобой *Hypericum perforatum*, *Avena fatua*, *Rhaponticum repens*, *Cichorium intybus*, *Origanum vulgare*, *Plantago lanceolata*, *Vulpia myuros*, *Scaligeria hirtula*, *Verbascum songarica*, *Eremurus korshinskyi*, и другие. Большая часть присельных пастбищ представлено сорной растительностью, что явилось следствием интенсивного пастбищного использования (таблица).

Таблица. Состояние растительности полынных сообществ на деградированных сельских пастбищах ВБ Шашвалон

Table. Vegetation status of Artemisia communities on degraded rural pastures of Shashvalon catchment

Название видов	Обилие по Друде	Фаза развития	Высота растений, см
<i>Artemisia tenuisecta</i>	cop3-2	цв/плд*	35-44
<i>Bromus oxyodon</i>	cop2	клш	24-32
<i>Anisantha tectorum</i>	cop1	клш	15-27
<i>Poa bulbosa</i>	sp	клш	12-24
<i>Avena fatua</i>	sp	клш	25-34
<i>Hypericum perforatum</i>	sp	цв/плд	32-43
<i>Cichorium intybus</i>	sol	цв	35-47
<i>Origanum tyttanthum</i>	sol	цв/плд	33-41
<i>Eremurus korshinskyi</i>	sp	плд	36-47
<i>Cousinia stephanophora</i>	sp	цв	45-48
<i>Euphorbia zeravschanica</i>	sol	цв	28-33
<i>Hypericum scabrum</i>	sol	цв/плд	27-39
<i>Galium tricorne</i>	sol	цв/плд	24-33
<i>Thermopsis lanceolata</i>	sol	цв/плд	43-51
<i>Adonis turkestanicus</i>	sol	цв/плд	27-38
<i>Ziziphora pamiroalaica</i>	sol	цв	16-21
<i>Polygonum coriarium</i>	sol	цв/плд	42-49

*Примечание: sol – единично, sp – рассеянно, cop1 – довольно обильно, cop2 – обильно, cop 3 – очень обильно; цв – цветение, плд – плодоношение, клш – колошение.

Геоботанические материалы прошлых лет позволили проследить некоторую динамику смены растительности, произошедшую за последние почти 50 лет. Так, крупнозлаковая юганово-феруловая формация полусаванн сменилась на эфемерово-полыновую, причём увеличение части разнотравья, как правило, произошло за счёт разрастания сорных видов.

Итак, стихийные бедствия, очевидно, являются наиболее яркими проявлениями последствий потери биоразнообразия и деградации окружающей среды. Крутые горные склоны и нестойкий почвенный покров способствуют десятки оползней в год. Эти хрупкие и нестойкие условия делают землю еще более чувствительной к ущербу, причиненному человеческой деятельностью. Обезлесение, культивация и чрезмерное

стварливание склонов, открытая добыча полезных ископаемых и дорожное строительство усугубляют нестабильность горных территорий. Антропогенное влияние проявляется наиболее остро на южном склоне Каратегинского хребта, где выпас скота, сельское хозяйство и промышленность нанесли урон уязвимым пастбищам.

Эрозия почв и оползни – наиболее важные проблемы. Эрозия является широко распространенным природным явлением, возникающим вследствие условий рельефа и климата, но при этом усиливающимся в результате неправильной практики управления землей, такой как возделывание земли на крутых склонах; чрезмерные рубки леса и перевыпас скота. По оценкам 82,3% всей земли и 97,9% сельскохозяйственных угодий, в том числе пастбища, подвергаются различному уровню эрозии. Эрозия и чрезмерный выпас являются двумя факторами, которые ускоряют опустынивание. Другие факторы включают обезлесение, развитие транспортной и другой инфраструктуры и горные выработки. Высокие температуры и низкое количество осадков в отдельные годы, которые способствуют опустыниванию, могут быть следствием изменения климата.

В заключение надо отметить, что огромную роль в жизни человека играет растительный покров, который является не только надёжным источником пищи и здоровья, но и играет неоценимую роль в охране почвы, водных ресурсов и регулировании климата. 75% доступной пресной воды, потребляемой в быту, сельском хозяйстве и промышленности, обеспечивают водосборные бассейны растительность. Растительность представляет собой ключевой элемент управления водосборным бассейном. Растения – это природные фильтры, очищающие воду. Растения заслуживают всесторонней заботы и всеобщего внимания. В эпоху научно-технической революции сохранение естественного баланса в едином и нерасторжимом звене человек-природа, охрана и рациональное использование растительного мира считаются актуальными проблемами. В настоящее время, к сожалению, в процессе лесопользования во многих случаях наступление на природу идёт гораздо быстрее и масштабнее, чем комплекс защитно-восстановительных мероприятий. Дарами природы необходимо пользоваться так, чтобы не наносить ей ущерб в сохранении и последующем росте лесных массивов или животного мира. Тысячи лет растения служат человеку надёжным источником исцеления, пищи и корма для животных. Чтобы они ежегодно служили нашим потребностям, необходимо подумать о сохранности и приумножении их естественных запасов.

Список литературы

- Кутеминский В.Я., Леонтьева Р.С. Почвы Таджикистана: Условия почвообразования и география почв. Душанбе: Ирфон, 1966. 223 с.
- Лебедев В.И., Прудников С.Г., Кальная О.И., Доможакова Е.А., Самбуу А.Д., Забелин В.И., Арчимаева Т.П., Андрейчик М.Ф., Балакина Г.Ф., Аюнова О.Д., Саая А.Д., Горбунов Д.П., Монгуш Ч.О., Геоэкологическое состояние природной среды в районе Кызыл-Таштыгского колчеданно-полиметаллического месторождения (Тува). – Кызыл: ТуВИКОПР СО РАН, 2012. 178 с.
- Мадаминов А.А., Саидов М., Юсупов С.Ю. Влияние климата и антропогенных факторов на продуктивности пастбищ Таджикистана. // Экологические проблемы и рациональное использование природных ресурсов. Мат-лы респ. научн. конф. Душанбе: ТНУ, 2012. С.195-199.
- Полевая геоботаника / под общ. ред. Е.М. Лавренко, А.А. Корчагина: в 5 т. М; Л.: Наука, 1964. Т.3. 442 с.; Полевая геоботаника: В 5 т. М; Л.: Наука, 1972. Т. 4. 336 с.
- Сочава В.Б. Классификация растительности как иерархия динамических систем // Геоботанические картографирование. Л.: Наука (Ленинградское отделение), 1972. С. 3-18.



Оценка селевых потоков бассейна реки Шураки Капали (левый приток реки Сурхоб, Таджикистан) и разработка мер по снижению риска

Р.Г. Зарипов, Ф.С. Имомназаров, А.С. Тагойбеков

*Филиал Агентства Ага Хан по Хабитат в Республике Таджикистан, Душанбе,
Таджикистан, rajabali.zaripov@akdn.org, firdavs.imomnazar@akdn.org,
abdurashid.taghoybekov@akdn.org*

Аннотация. В статье рассматривается пример интегрированной оценки природных угроз в малых водосборных бассейнах. Водосборный бассейн реки Шураки Капали территориально приурочен к центральной части северного склона хребта Петра Первого, который является основной орографической единицей, составляющей левый борт Сурхобской долины в её западной части. В пределах исследуемого водосборного бассейна одними из основных причин возникновения селевых потоков, которые представляют угрозу населенным пунктам и инфраструктуре, являются подвижки (пульсации) ледников № 504, 505 и Люлихарви, перекрытие малых боковых долин снежными лавинами и активизация оползней с последующим развитием синергетических эффектов. В результате выполненных полевых исследований летом 2018 года были составлены специальные карты и карта природных угроз водосборного бассейна реки Шураки Капали. Комплексная оценка природных угроз позволила разработать рекомендации и выполнить ряд мероприятий по снижению риска от селевых потоков и оползней. Проведенная оценка селевой опасности водосборного бассейна позволит учесть непредвиденные природно-геологические угрозы на стадии подготовки и обоснования инженерно-защитных проектов.

Ключевые слова: водосборные бассейны, ледники, селевые потоки, оползни, комплексная оценка, специальные карты, рекомендации, мероприятия по уменьшению угрозы и риска, подготовка населения

Ссылка для цитирования: Зарипов Р.Г., Имомназаров Ф.С. Тагойбеков А.С. Оценка селевых потоков бассейна реки Шураки Капали (левый приток реки Сурхоб, Таджикистан) и разработка мер по снижению риска. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 342–350.

Assessment of debris flows in the Shuraki Kapali River basin (left tributary of the Surkhob River, Tajikistan) and development of risk reduction measures

R.G. Zaripov, F.S. Imomnazarov, A.S. Taghoybekov

*Branch of the Aga Khan Agency for Habitat in the Republic of Tajikistan, Dushanbe,
Tajikistan, rajabali.zaripov@akdn.org, firdavs.imomnazar@akdn.org,
abdurashid.taghoybekov@akdn.org*

Abstract. The article is addressed to the example of integrated assessment of natural hazards in small river catchments. Shuraki Kapali River catchment is geographically confined to the central part of the northern slope of Peter the First (Petra Pervogo) Range, which is the basic orographic feature of the left side of Surkhob valley in its western part. The major reasons for debris flows threatening the settlements and infrastructure in the territory of assessed catchment are the surges of the glaciers No. 504, No. 505 and Lyulikharvi, overlaps of small side valleys with snow avalanches and activization of

landslides with subsequent development of synergetic effects. As a result of field survey conducted in summer 2018, the special maps and maps of natural hazards of Shuraki Kapali River catchment were developed. Integrated assessment of natural hazards allowed to develop recommendations and implement a number of measures to reduce the risk of debris flows and landslides. The assessment of debris flow hazard in the catchment will make it possible to consider existing and possible natural threats at the stage of preparing and justifying engineering protection projects.

Key words: *catchments, glaciers, debris flows, landslides, integrated assessment, special maps, recommendations, measures to reduce hazards and risks, preparing the community for natural disasters*

Cite this article: Zaripov R.G., Imomnazarov F.S., Taghoybekov A.S. Assessment of debris flows in the Shuraki Kapali River basin (left tributary of the Surkhob River, Tajikistan) and development of risk reduction measures. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhiya K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 342–350.

Введение

Выполненные в рамках данного исследования мероприятия основываются на результатах работы по одному из ключевых компонентов «Интегрированного проекта по улучшению здоровья и среды обитания в Раштской долине Таджикистана», который финансируется совместно Швейцарским агентством по развитию и сотрудничеству (SDC), Организацией Ага Хана по развитию (AKDN) и Филиалом Агентства Ага Хан по Хабитат (АКАН) в Республике Таджикистан. Основной частью указанного проекта является «Комплексная оценка и планирование управления водосборными бассейнами в Раштской долине Таджикистана» [Абдуллоева и др., 2018].

Для реализации проекта была выбрана методика комплексного изучения территории водосборных бассейнов малых рек с использованием космоснимков последних лет, а также с применением ГИС-технологий для поиска и картирования активных очагов и исследования факторов и предпосылок природных гидрологических и экзогенных геологических процессов.

Проведено дешифрирование космоснимков последних лет с определением контуров участков активного развития опасных природных процессов. Выполнено аэровизуальное обследование территории для выявления очагов и зон развития экзогенных геологических процессов, которые затем были нанесены на карты. Проведены пешие маршрутные исследования с целью детального описания, измерения, привязки и фотографирования зон и участков проявления процессов. Детально изучены предпосылки и факторы селеформирования. Разработан ряд мероприятий по снижению природных рисков для территории водосборного бассейна и расположенных в его пределах населённых пунктов.

Территория исследования

Изученная территория относится к северному склону западной части хребта Петра Первого. Длина этого хребта составляет около 200 км, средняя высота – 4300 м на западе и 6000 м на востоке. Западная часть хребта Петра Первого протягивается на 114 км с востока на запад от плато Тупчек до слияния рек Обихингоу и Сурхоб (рис. 1). Современное оледенение здесь незначительное. Всего имеется 137 ледников общей площадью 46,8 км². Высочайшая вершина – пик Сагунаки высотой 4793 м. Он находится в 3,5 км южнее озера Кызылкуль, к востоку от правого борта долины реки Шураки Капали.



Рис. 1. Общий вид хребта Петра Первого (красная линия) и границы района исследований (голубой прямоугольник) на топографической карте

Fig. 1. General view of the Peter the First Range (red line) and the study area (blue rectangle) on the topographic map

На северных склонах хребта Петра Первого в последние десятилетия участились сходы селевых потоков разного типа и объёмов. Большинство из них связано с выпадением аномального количества атмосферных осадков в виде ливневых дождей и града, а также с таянием ледников. В бассейнах рек Сурхоб и Обихингоу, где горные хребты сложены осадочными и рыхлыми породами, для возникновения селевых потоков достаточно выпадения в течение первых суток 35-40 мм осадков (при годовом количестве 445-465 мм).

В западной части хребта Петра Первого, на его северных склонах, насчитывается пять однотипных малых селеносных бассейнов. В верховьях этих рек расположены каровые, висячие и долинные ледники площадью от 0.1 до 2.2 км² (таблица). Ряд ледников имеют пульсирующий характер [Каталог ледников..., 1971].

Одним из преобладающих видов опасных природных процессов в Раштской долины являются сели.

Бассейн реки Шураки Капали (Шурак Восточный). Река является левым притоком реки Сурхоб. Шураки Капали – это постоянно действующий водоток, берущий начало из 10 малых ледников (каровые и висячие ледники №№ 503-511 и ледник Люлихарви) на северном склоне хребта Петра Первого. Длина основного русла реки составляет 18,5 км, площадь водосборного бассейна 110 км², средний уклон русла 10-15°, в верховьях 20-25°. Абсолютная высота варьирует в пределах от 1500 м у слияния с рекой Сурхоб до 4307 м (пик Джагрык) в водораздельной части хребта Петра Первого.

Водосборный бассейн р. Шураки Капали в верховьях имеет циркообразную форму с висячими, каровыми и долинными ледниками (рис. 2). Долина реки в средней части характеризуется U-образной формой поперечного профиля с крутыми склонами и плоским дном. В нижней части поперечный профиль долины реки приобретает ассиметричную форму с террасами и древними селевыми конусами выноса.

Таблица. Основные сведения о ледниках, расположенных в водосборных бассейнах рек северного склона западной части хребта Петра Первого [Каталог ледников..., 1971]

№ по каталогу	Названия ледников	Названия рек	Морфологический тип	Общая экспозиция	Длина в км	Площадь в км ²
490-500	Айконуш. Сафедорак	Обишурак	Висячие, каровые, долинные	С, СВ, СЗ	0.5-3.3	4.4
503-511	Люлихарви	Шураки Капали (Шурак Восточный)	Висячие, каровые, долинные	С, СВ, СЗ	0.2-2.5	3.7
512-515	Дидаль	Дара	Висячие, каровые, долинные	С, СВ	0.7-4.8	2.1
521-525		Дарай Мазор	Висячие, каровые, присклоновые	С, СВ, СЗ	0.5-0.8	1.3
526-534		Шурак Западный	Висячие, каровые, присклоновые	С, СВ, СЗ	0.6-1.8	4.4



Рис. 2. Цирк в верховьях реки Шураки Капали, в днище которого видна отколовшаяся часть ледника № 505. Фото Б.А. Сатторова, 31.08.2016

Fig. 2. Glacial cirque in the upper reaches of the Shuraki Kapali River and part of the No. 505 glacier that broke away. Photo by B.A. Sattorov, 31 August 2016

В данном водосборном бассейне единственным левым притоком основной реки является река Дарай Назарак, которая берет начало из ледника Люлихарви. Длина русла реки Дарай Назарак составляет 14 км, средний уклон - 8-10°. Есть еще короткие боковые сая Каирма, Кызылкуль, Санговак и Дегдонак протяженностью до 5 км.

Селевые потоки по реке Шураки Капали (Шурак Восточный)

Согласно историческим данным, сходы селевых потоков, принесшие ущерб населению и социальным объектам, наблюдались в бассейне реки Шураки Капали в 1970, 1985, 1988, 2016 и 2017 годах [Зарипов, Рязузова, 1998; *Официальный...*, 2016]. В последние годы из-за резкого изменения климата (жаркое лето, общее потепление) и следующего за ним увеличения скоростей таяния ледников уровень воды в реке несколько раз значительно поднимался. Шураки Капали выходила из берегов, нанося серьезный ущерб населению, проживающему вдоль берега. Так, катастрофический селевой поток был зафиксирован летом 2016 года. В результате этого события был нанесён ущерб на сумму около 4 000 000 сомони [Каталог событий..., 2018].

Ледник № 504. Это безымянный долинный ледник, расположенный на северном склоне хребта Петра Первого в пределах водосборного бассейна реки Шураки Капали. Длина ледника № 504 около 1,4 км, площадь - 0,3 км², нижняя (передняя) его часть расположена на абсолютной отметке 3470 м, а самая верхняя - на высоте 4000 м. Весной 1988 года откололась фронтальная часть этого ледника объемом около четырех миллионов кубометров. Дальность выноса ледяной лавины составила 5,5 км. Путь транзита ледяной массы происходил по слабо наклонной поверхности склона крутизной до 15°, покрытого снегом. По пути транзита ледяная лавина срезала языковую часть ледника № 507. Долина реки Шураки Капали на протяжении 2,5 км была завалена десятиметровым слоем льда. Ширина завала достигала 150 м. Вся эта ледяная масса аккумулировалась ниже снеговой границы, что привело к ее интенсивному таянию. В результате расход воды в реке увеличился в полтора-два раза, что привело к разрушению автомобильного моста.

Повторная активизация ледника произошла в июле 2017 года (между 9 и 11 числом) [Докукин и др., 2019]. Дальность выноса снежно-ледовой массы составила 9,0 км (рис. 3). К счастью, схода селевого потока при этом не наблюдалось.



Рис. 3. Снежно-ледовая масса в долине реки Шураки Капали после схода ледника № 504, сентябрь 2017 г. Фото А.Ш. Тагойбекова

Fig. 3. Snow-ice mass in the Shuraki Kapali River valley after surge of the No. 504 glacier, September 2017. Photo by A.Sh. Taghoybekov

Ледник № 505. Более активным за прошедшие годы XXI века был карово-висячий ледник №505 (длина - около 1,0 км, площадь - 0,3 км²): в 2016 году наблюдалось 2 случая

его схода - между 13 и 25 июля (дальность выброса масс льда - 5,6 км) и 28 августа, примерно в середине дня (рис. 2, 4) [Докукин и др., 2019].

В результате данного события образовалась снежно-грязевая плотина, перегородившая сток реки Шураки Капали (рис. 5). Вследствие этого в верховьях реки сформировалось подпрудное озеро. Быстрый подъем уровня воды в нем привел к его прорыву, сопровождавшемуся сходом селевого потока по реке Шураки Капали. Расходы селя превышали 50 м³/с.



Рис. 4. Снежно-ледовая масса в долине р. Шураки Капали, август 2016 г. Фото А.Ш. Тагойбекова

Fig. 4. Snow-ice mass in the Shuraki Kapali River valley, August 2016. Photo by A.Sh. Taghoybekov



Рис. 5. Снежно-грязевая плотина на р. Шураки Капали, образовавшаяся вследствие схода ледника № 505. Фото Б.А. Сатторова, 31.08.2016

Fig. 5. Snow-debris dam in the Shuraki Kapali River formed due to the surge of the No. 505 glacier. Photo by B.A. Sattorov, 31 August 2016

В результате прохождения селевого потока по реке Шураки Капали был разрушен мост между селениями Фатхобод и Шуроба, а также повреждены 25 жилых домов, нанесен ущерб фермерским хозяйствам и коммуникационным системам селений Фатхобод и Капали джамоата Калъаи Лаби Об Таджикабадского района (рис. 6).



Рис. 6. Грязевая (а) и грязекаменная (б) масса в жилой зоне селений Капали и Фатхобод. Фото Б.А. Сатторова, 31.08.2016

Fig. 6. Debris flow deposits in Kapali and Fatkhobod villages. Photo by B.A. Sattorov, 31 August, 2016

Результаты исследования водосборного бассейна реки Шураки Капали

Летом 2018 года группа специалистов Филиала АКАН в Таджикистане в течение трех месяцев проводила комплексную оценку территории, относящейся к водосборному бассейну реки Шураки Капали (р. Шурак Восточный). В ходе этих работ было выявлено и закартировано более 24 очагов зарождения селевых потоков в том числе из них на территории кишлаков - 18 очагов зарождения (рис. 7). По вещественному составу данные селевые потоки подразделяются на водокаменные, грязекаменные и грязевые. Частота схода варьирует от ежегодной до одного раза в 10-20 лет [Абдуллоева и др., 2018].

Наиболее опасными являются селевые потоки гляциального типа, проходящие по главным руслам рек Шураки Капали и Дарай Назарак, а также грязекаменные сели по боковым притокам (саи Каирма, Кызылкуль, Санговак и Дегдонак).

Выполненные полевые исследования позволили составить специальные крупномасштабные карты. Кроме того, были разработаны рекомендации и выполнен ряд мероприятий по уменьшению риска селевых потоков.

Рекомендуемые мероприятия по снижению риска и профилактике ЧС

1. Аэровизуальные обследования территории, включая верховья водосборного бассейна с обязательной инвентаризацией существующих ледников.
2. Расчистка и спрямление русла реки Шураки Капали в зоне возможного затопления на территории кишлака Капали.
3. Расчистка и рекультивация земельных участков от селевых наносов 2016 года.
4. Восстановление и реконструкция головных сооружений каналов.

5. Строительство селезащитной дамбы протяжённостью 1000 м по бортам реки.
6. Организация сезонных наблюдений за зонами зарождения селевого потока.
7. Подготовка населения к природным угрозам и чрезвычайным ситуациям (ЧС).



Рис 7. Количество селевых очагов в кишлаках бассейна реки Шураки Капали

Fig. 7. Number of debris flow origination sites in the villages of the Shuraki Kapali River catchment

Выполненные мероприятия

После исследования территории, согласно выданным рекомендациям, были выполнены следующие мероприятия.

1. Переселены на безопасные места 10 хозяйств, получившие серьезный ущерб от воздействия селевого потока 2016 года.
2. Выделены земельные участки 25 хозяйствам, расположенным в зоне потенциальной угрозы от селевого потока по реке Шураки Капали.
3. По левом борту реки для защиты жилой зоны построена селезащитная дамба протяжённостью 300 м.
4. С целью своевременного оповещения и эвакуации населения проживающего в зоне риска, установлена дистанционная система раннего оповещения ИТ-70.
5. В центре кишлака установлен склад неприкосновенного запаса в случае стихийного бедствия и чрезвычайной ситуации.
6. Подготовлены 30 волонтеров-спасателей при джамоате Кальаи Лаби Об из числа местных жителей.
7. Проведены тренинги с населением кишлаков, расположенных в водосборном бассейне Шураки Капали, на тему: «Результаты комплексной оценки водосборного бассейна Шураки Капали и рекомендуемые мероприятия по снижению угроз и риска от природных процессов». Разработан план безопасного развития кишлака.

Заключение

Данный водосборный бассейн был выбран для исследования на основе критериев, соответствующих основному компоненту проекта «Комплексная оценка и планирование управления водосборными бассейнами в Раштской долине Таджикистана». В данном водосборном бассейне расположены 11 населённых пунктов и райцентр Таджикабад. Стихийные бедствия природного характера (селевые потоки, лавины, оползни, эрозия

почв) являются ежегодной проблемой для населения и местной инфраструктуры. Выполненные мероприятия по снижению риска от природных опасностей в данном водосборном бассейне являются первым шагом по информированию населения и государственных структур. Разработанный совместно с населением план безопасного развития территории является основным достижением проекта.

Всего же на северном склоне хребта Петра Первого насчитывается более 10 потенциально опасных малых водосборных бассейнов. В настоящее время изучены два из них (Обишурак и Шураки Капали), расположенные на территории Таджикабадского района. Рекомендуются проведение исследований аналогичного типа в остальных водосборных бассейнах.

Список литературы

- Абдуллоева М.Н., Зарипов Р.Г., Имомназаров Ф.С., Тагойбеков А.Ш., Шафиев Г.В. Отчёт о комплексной оценке водосборного бассейна Шураки Капали в Раштской долине Таджикистана. Душанбе, 2018. С. 5-10, 34-35.
- Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Признаки подготовки катастрофических сходов ледников (анализ разновременной космической информации) // Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии / Под ред. А.В. Николаева, В.Б. Заалишвили. Владикавказ: Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, 2019. С. 522–528.
- Зарипов Р.Г., Рягузова А.С. Каталог службы наблюдения и оповещения (СНОП). Душанбе: Изд-во Главного управления геологии Таджикистана, 1998.
- Каталог ледников СССР. Том 14. Средняя Азия. Выпуск 3. Аму-Дарья. Часть 6. Бассейн р. Сурхоб между устьями рек Обихингоу и Муксу / Под ред. Г.М. Варнаковой, О.В. Рототаева. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 91 с.
- Каталог событий и чрезвычайных ситуаций Таджикистана. Душанбе, 2018.
- Официальный сайт фонда «Диалог Цивилизаций». Таджикистан начал исследование «Петра 1» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dialog.tj/news/tadzhikistan-nachal-issledovanie-petra-1> (дата обращения: 10.05.2020).



Расчет неразмывающих скоростей в горных реках Азербайджана

Ф.Ш. Ахмедов, Ф.А. Иманов, Е.В. Джавадзаде

*ОАО «Азерсу», Научно-исследовательский и проектный институт «Суканал»,
Баку, Азербайджан, farda_imanov@mail.ru*

Аннотация. В данной статье представлены расчетные формулы для определения значений средней и придонной допускаемой неразмывающей скорости частиц в руслах горных рек. Полученные формулы основываются на законе сохранения импульса и применимы для однородных и разнородных потоков. Выполнено сравнение рассчитанных значений неразмывающих скоростей, полученных по предложенным формулам и широко применяемыми формулами Ц.Е. Мирцхулава.

Ключевые слова: *горные реки, русло, донные частицы, неразмывающая скорость, подрусловые воды, водозаборные сооружения*

Ссылка для цитирования: Ахмедов Ф.Ш., Иманов Ф.А., Джавадзаде Е.В. Расчет неразмывающих скоростей в горных реках Азербайджана. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 351–354.

Calculation of non-eroding velocities in mountain rivers of Azerbaijan

F.S. Akhmedov, F.A. Imanov, E.V. Javadzade

*“Azersu” OJSC, Research and Design Institute “Sukanal”, Baku, Azerbaijan,
farda_imanov@mail.ru*

Abstract. This article presents calculation formulas for determining the values of the average and bottom permissible non-eroding velocity of particles in mountain river beds. The formulas obtained are based on the law of conservation of momentum and are applicable for homogeneous and heterogeneous flows. Comparison of the calculated values of non-erosion velocities obtained by the proposed formulas and the widely used formulas of Ts.E. Mirtskhulava.

Key words: *mountain rivers, channel, bottom sediments, non-eroding velocity, under-channel waters, water intake facilities*

Cite this article: Akhmedov F.S., Imanov F.A., Javadzade E.V. Calculation of non-eroding velocities in mountain rivers of Azerbaijan. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhiyeva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 351–354.

Введение

Водные ресурсы Азербайджана ограничены и распределены по территории неравномерно. К тому же около 70% поверхностных водных ресурсов приходятся на долю трансграничных рек, которые поступают в Азербайджан сильно загрязненными [Иманов, 2016]. Поэтому в целях водоснабжения широко используются подрусловые воды, т.е. грунтовый поток, формирующийся под руслом горных рек и питающихся за

счёт ниже залегающего грунтового потока и фильтрации речных вод [Алакбаров и др., 2008]. Эти воды забираются в целях водоснабжения через инфильтрационные водозаборы, расположенные вдоль русла реки или же через подрусловые водозаборы, расположенные непосредственно под руслом реки. В Азербайджане, для водоснабжения населенных пунктов построены 12 таких гидротехнических сооружений, с различной производительностью [www.azersu.az].

Эти водозаборные сооружения регулярно подвергаются воздействию паводков. Во время прохождения паводков в результате изменения скоростного режима потока, размываются дно и берега речных русел, уменьшается толщина защитного и фильтрационного слоя над дренажными трубами, в водозаборные сооружения проникают воды повышенной мутности.

Для изучения этого вопроса начаты исследования на двух горных реках (Кусарчай и Кудиалчай), бассейны которых расположены на северо-восточном склоне Большого Кавказа. Производительность водозаборных сооружений на этих реках составляет 60 и 110 л/сек., соответственно.

Планируются работы по комплексному исследованию русловых процессов (устойчивость русел, русловые деформации, формы руслового рельефа и т.д.) на изучаемых участках рек. На основе проведённых исследований будут разработаны рекомендации для улучшения работы водозаборных дренажных сооружений и защиты их от опасного воздействия паводков.

В данной статье приводятся предварительные результаты по исследованию неразмывающей скорости донных отложений, которая для данного грунта характеризует устойчивость его на дне потока. Наиболее распространенными являются формулы Ц.Е. Мирцхулавы, В.Н. Гончарова, И.И. Леви, А.М. Латышенкова, Б.И. Студеничкина [Чалов, 2015].

Расчетные формулы

Известно, что большой диапазон уклонов горных рек и высокая кинетичность потока обуславливают большое разнообразие условий формирования русел. На исследуемых реках водозаборные сооружения построены на расширенных участках, т.е. в предгорной зоне. На этих участках русла рек характеризуются с неразвитыми аллювиальными формами. Здесь существенным фактором развития русла является соизмеримость их глубин с размерами галечно-валунных и валунно-глыбовых руслообразующих наносов [Чалов, 2015].

Согласно Ц.Е. Мирцхулаве [1988], на отдельную частицу грунта, находящуюся на дне потока, действуют сила скоростного напора, подъемная сила и сила тяжести (веса) частицы.

В данной работе частица грунта (обломок горной породы) принята в форме прямоугольной призмы.

По закону сохранения импульса, изменение количества движения обломка горной породы в русле реки равна сумме импульсов действующих сил:

$$mdv = \sum_{i=1}^n F_i dt. \quad (1)$$

С учетом сил, действующих на частицу грунта, выражение (1) можно записать в виде:

$$mdv = \left[mg \sin \alpha + \frac{1}{2} \rho v^2 \omega_1 - \mu (mg \cos \alpha - \rho_b Vg) \right] dt, \quad (2)$$

Здесь: $m = \rho_0 abc$ - масса частицы грунта; $F_1 = mg \cos \alpha = \rho_0 abc g \cos \alpha$ - слагаемая силы тяжести частицы грунта, направленная перпендикулярно ко дну русла; $F_{II} = mg \sin \alpha = \rho_0 abc \sin \alpha$ - слагаемая силы тяжести частицы грунта, направленная по течению реки; ρ_0 - плотность частицы грунта; ρ_b - плотность воды, свободной от наносов; ρ - плотность селевого потока; ω_1 - площадь частицы грунта по направлению

течения; $F_A = \rho_b v g = \rho_b a b c g$ - сила Архимеда; $F_S = \frac{1}{2} \rho v^2 \omega_1$ - сила давления селевого потока на площадь ω_1 ; μ - общий коэффициент сопротивления, оказываемой движению потока со стороны обломка породы; $\sin \alpha = i$ - уклон исследуемого участка русла; $\cos \alpha = i_1 = \sqrt{1 - i^2}$, определяется по условию $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$. Учитывая это в выражении (2) получим:

$$a b c \rho_0 d v = \left[a b c \rho_0 g i + \frac{1}{2} \rho v^2 a b - \mu (a b c \rho_0 g i_1 - a b c \rho_b g) \right] d t. \quad (3)$$

Поскольку обломок породы принят в форме призмы с размерами a, b, c , то его средний размер определяется по выражению:

$$l = \sqrt[3]{a b c}, \quad (4)$$

и масса по формуле:

$$m = \rho_0 l^3, \quad (5)$$

Учитывая формулы (4) и (5) в выражении (3), получаем:

$$\rho_0 l^3 d v = \left[\rho_0 l^3 g i + \frac{1}{2} \rho v^2 l^2 - \mu (\rho_0 l^3 g i_1 - l^3 \rho_b g) \right] d t. \quad (6)$$

Обе стороны уравнения (6) делим на $\rho_0 l^3$, и получим:

$$d v = \left[g i + \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_0} v^2 - \mu \left(g i_1 - \frac{\rho_b}{\rho_0} g \right) \right] d t. \quad (7)$$

Для равномерных потоков $d v / d t = 0$ и поэтому пишем:

$$g i + \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_0} v^2 - \mu \left(g i_1 - \frac{\rho_b}{\rho_0} g \right) = 0. \quad (8)$$

После некоторых преобразований для обеспечения устойчивости донных частиц, неразмывающая скорость определяется по следующей формуле:

$$v^2 = \frac{2 \rho_0 i g}{\rho} \left[\mu \left(i_1 - \frac{\rho_b}{\rho_0} \right) - i \right]. \quad (9)$$

Обозначая

$$\left[\mu \left(i_1 - \frac{\rho_b}{\rho_0} \right) - i \right] = A \quad (10)$$

и учитывая это в выражении (9), получим:

$$v = \sqrt{\frac{2 \rho_0 i g}{\rho} \cdot A}. \quad (11)$$

В данной работе параметр A определен по рекомендациям Ц.Е. Мирцхулавы [1988] и получено $A=0,52$. Учитывая значение A в выражении (11) значение неразмывающей скорости на уровне выступов шероховатости определяется:

$$U_{\Delta \text{дон}} = \sqrt{\frac{1,04 \rho_0 l_{cp} g}{\rho_b}}. \quad (12)$$

С учетом параметра A , в выражении (10) коэффициент сопротивления определяется:

$$\mu = \frac{A+i}{i_1 \frac{\rho_b}{\rho_0}} \quad (13)$$

При $i=0$, получается:

$$\mu = \frac{A}{1 - \frac{\rho_b}{\rho_0}} \quad (14)$$

Значения неразмывающих скоростей, вычисленные по предложенной формуле оказались меньше соответствующих значений, полученных по известным формулам Ц.А. Мирцхулавы [1988].

Определение неразмывающей скорости для разнородных потоков

Во время паводков плотность речного потока, транспортирующего взвешенные вещества, находится в пределах 1100-1500 кг/м³. По сравнению с чистыми потоками, в таких потоках с увеличением массы единицы объема уменьшается скорость размыва частиц. Для обеспечения устойчивости частицы на дне русла сумма действующих сил в направлении движения потока должна быть равна нулю [Ибад-заде, 1986]. Это означает, что силы, действующие на частицу чистой от примесей потока и потока во время паводка, принимаются равными:

$$\left. \begin{aligned} F_r &= F_c \\ \text{или} \quad \frac{1}{2} \rho_b U_{1\Delta}^2 \cdot \omega_1 &= \frac{1}{2} \rho_c U_{2\Delta}^2 \cdot \omega_1 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где, F_r и F_c - силы действия на частицу, соответственно чистого потока и потока во время паводка; $U_{1\Delta}$ и $U_{2\Delta}$ - неразмывающие скорости, соответственно чистого потока и потока во время паводка. Из уравнения (15) для определения неразмывающей скорости в разнородном потоке опять получается формула (11).

Выводы

На основе закона сохранения импульса получены формулы для определения неразмывающих скоростей в горных реках. Однако, полученные по этим формулам значения неразмывающих скоростей оказались заниженными по сравнению с значениями, полученными по формулам Ц.А. Мирцхулавы. Планируется дальнейшее усовершенствование полученных формул с целью их применения для разработки рекомендаций по улучшению работы водозаборных дренажных сооружений и защиты их от опасного воздействия паводков.

Список литературы

- Алакбаров А.Б., Алиев Ф.Ш., Исафилов Ю.Г. и др. Геология Азербайджана. Т. VIII. Гидрогеология. Баку, Нафта-Пресс, 2008. 380 с.
Ибад-заде Ю.А. Гидравлика горных рек. Москва, Стройиздат. 1986. 160 с.
Иманов Ф.А. Водные ресурсы и их использование в трансграничном бассейне р. Куры. Санкт-Петербург: Свое издательство, 2016. 164 с.
Мирцхулава Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 304 с.
Чалов Р.С. Русловые процессы (Русловедение). Москва, ИНФРА-М, 2015. 565 с.
[http:// www.azersu.az](http://www.azersu.az)



Водокаменные сели Горного Алтая в неоплейстоцене

Г.Я. Барышников

Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, bgj@geo.asu.ru

Аннотация. Особое место среди экстремальных событий занимают селевые природные катастрофы, связанные с климатическими изменениями. Они недостаточно изучены и часто бывают непредсказуемыми. Современные гидрологические явления на Алтае, в виде наводнений, но значительно меньшего масштаба, по сути, являются аналогами катастрофических сбросов вод из древних приледниковых озер, происходивших в позднем неоплейстоцене. Реконструкция таких процессов является не менее важной задачей, чем изучение современных паводков. Расшифровка механизма катастрофического сброса огромных масс воды, в виде водокаменных селевых потоков, поможет смоделировать и предупреждать современные катастрофы. Экстремальные события в Горном Алтае в прошлом наиболее широко проявлялись на крупных магистральных реках – Бии и Катунь и были связаны с прорывами приледниковых озер. Масштабность таких событий поражает своей грандиозностью и влиянием на прилегающие к горам территории. При изучении геоморфологического строения долины р. Бии и ее продолжения - акватории Телецкого озера, было установлено, что в верхнем неоплейстоцене котловина была заполнена льдом. Потепление климата вызвало деградацию ледника, которая началась, по данным оптико-люминесцентного датирования около 37 тысяч лет назад. Существование конечной морены у истока Бии и дальнейшее таяние льда привели к накоплению огромных масс воды, более чем в два раза превышающих современный объем. Дальнейший прорыв конечной морены и обеспечил образование водокаменного селевого потока. Аналогичное событие происходило и в долине Катунь, вызвавшее перемещение значительных объемов обломочного материала, образование террас врезания, формирование в центральной части Горного Алтая и при выходе Катунь из гор, так называемых «гигантских рябей течения», происхождение которых в настоящее время широко обсуждается в научной литературе.

Ключевые слова: водокаменные сели, приледниковые озера, неоплейстоцен, Горный Алтай, природные катастрофы

Ссылка для цитирования: Барышников Г.Я. Водокаменные сели Горного Алтая в неоплейстоцене. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 355–362.

Neopleistocene debris flows in Gorny Altai

G.Ya. Baryshnikov

Altai State University, Barnaul, Russia, bgj@geo.asu.ru

Abstract. A special place among extreme events is occupied by mudflow natural disasters associated with climate change. They are poorly understood and often unpredictable. Modern hydrological phenomena in Altai, in the form of floods, but on a much smaller scale, are, in fact, analogues of the catastrophic discharges of water from ancient glacial lakes that occurred in the late Neopleistocene. The reconstruction of such processes is no less important than the study of modern floods. Deciphering the mechanism of catastrophic discharge of huge masses of water, in the form of stone-water mudflows, will help to model and prevent modern catastrophes. Extreme events in the Altai Mountains in the past were most widely manifested on the major main rivers, Biya and Katun, and were associated with breakthroughs of glacial lakes. The magnitude of such events is striking in its

grandeur and impact on the territories adjacent to the mountains. When studying the geomorphological structure of the valley. Biy and its continuation - the waters of Lake Teletskoye, it was found that in the upper Neopleistocene the basin was filled with ice. Climate warming caused the degradation of the glacier, which began, according to optical-luminescent analysis, about 37 thousand years ago. The existence of a terminal moraine at the source of Biy and further melting of ice led to the accumulation of huge masses of water, more than twice the current volume. A further breakthrough of the terminal moraine also ensured the formation of a water-stone mudflow. A similar event took place in the Katun valley, which caused the displacement of significant amounts of clastic material, the formation of cutting terraces, the formation of the so-called "giant ripple signs" in the central part of Gorny Altai and when Katun exited the mountains, the origin of which is currently widely discussed in the scientific literature.

Key words: *debris flows, glacial lakes, Neopleistocene, Gorny Altai, natural disasters*

Cite this article: Baryshnikov G.Ya. Neopleistocene debris flows in Gorny Altai. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: "Promotion" LLC, 2020, p. 355–362.

Введение

После распада Советского союза Горный Алтай становится одним из высочайшим горным сооружением России, на территории которого выделяется почти весь комплекс географической высотной поясности – от полупустынь во внутригорных котловинах до ледниковых образований высокогорий. Необходимо отметить, что экзогенным процессам в горах Алтая, к сожалению, исследователи уделяли недостаточное внимание. Тем не менее эти процессы могут создавать угрозу для человека в местах его проживания. Среди таких процессов особо выделяются сейсмоползни, медленное перемещение почвогрунтов по склонам, образование обвалов, вывалов, осыпей и селей. Но особое место среди экстремальных событий занимают природные катастрофы, поскольку они мало изучены и, следовательно, часто являются непредсказуемыми. Современные гидрологические катастрофы, по сути, это аналоги катастрофических сбросов приледниковых вод из древних озер на Алтае в позднем неоплейстоцене. Поэтому изучение таких явлений становится не менее важной задачей, чем наблюдаемые события в настоящем.

Цели и задачи

Цель исследования заключалась в реконструкции катастрофических событий, происходивших на Алтае в неоплейстоцене. Для достижения поставленной цели, нами на протяжении многих лет организовывались экспедиции, задачами которых было изучение особенностей геоморфологического строения долин магистральных рек – Катунь и Бии и основного современного водоёма – Телецкого озера. Полученные результаты способствовали выработке представлений о преобразовании рельефа под действием катастрофических сбросов значительных масс воды по долинам этих рек в верхнем неоплейстоцене, в результате прорыва приледниковых озер, объемы которых были невероятно большими.

Материалы и методы исследования

Российский Алтай является одним из регионов мира, где доказательно было признано существование в прошлом катастрофических водных потоков - самых крупных из известных пресноводных наводнений, по рекам которых сбрасывалось свыше 1 млн м³/с [Baker, 2013]. Более трех десятилетий назад на Алтае впервые были обнаружены «гигантские ряби течения» в долине Бии [Барышников, 1979, 1992], а также

в долинах рек Башкауса, Чуи, Катуня и в западной части Курайской степи [Бутвиловский, 1982, 1985; Окишев, 1982; Рудой, 1984], свидетельствующие о грандиозности таких событий. Но ряд исследователей придерживаются и другой точки зрения о том, что эти особенности являются специфическими фациями ледниковых образований [Борисов, Минина, 1979; Окишев, 2011; Зыкин, Зыкина, 2018; Зыкин и др., 2018]. Однако большинство ученых интерпретируют их как свидетельство катастрофических наводнений в результате прорыва вод из больших приледниковых озер, образованных вследствие закупорки выходящими из речных долин-притоков ледниками.

Затем появились дополнительные свидетельства прорыва приледниковых озер с образованием водосливов через отроги горных хребтов и дальней транспортировки гигантских блоков горных пород, оторванных от склонов долин рек. Палеогидравлические оценки [Baker *et. al.*, 1993; Herget, 2005; Carling *et. al.*, 2010] позволяют устанавливать катастрофические наводнения на Алтае с глубиной потока до 400 м и скоростью движения в 20–25 м/с, с выбросом до 10–20 млн м³/с водного субстрата, с близкими по величине с хорошо известным наводнением на р. Мизула в западной части США [Baker, 2009].

Для изучения такого явления нами проводилось картирование надпойменных террас на Бии и Катуня. Производился отбор проб на спорово-пыльцевой и палеокарпологический виды анализов. Для установления возраста отложений в террасовых комплексах применялось радиоуглеродное датирование по ¹⁴C и датирование с помощью оптически стимулированной люминесценции. С помощью георадарного профилирования подробно изучались территории, на которых были обнаружены гигантские ряби течения [Барышников и др., 2017].

Многочисленные исследования катастрофических паводков на Алтае до сих пор были сосредоточены на изучении прорывов древних подпрудных озер в Чуйском и Курайском бассейнах в Юго-Восточном Алтае, через долины Чуи и Катуня. Гораздо меньше внимания уделялось изучению другой речной системы Оби – долине Бии. Как нами было установлено [Барышников, 1992], катастрофический паводок в долине этой реки имел другой механизм, в отличие от системы Чуйско-Катунского паводка, где катастрофический поток возник, как мы уже отмечали выше, от прорыва плотин, образованных ледниками, спускавшихся из боковых долин-притоков. В системе р. Бия-Телецкое озеро ледник занимал широтный отрезок ложа будущего водоема, а древнее подпрудное озеро образовалось перед конечной мореной после таяния ледника в верхнем неоплейстоцене.

В то время уровень Телецкого озера превышал современный на 210 м, поскольку единственная водная артерия – р. Бия, по которой происходил сток, была перегорожена конечной мореной. Масса воды увеличилась примерно вдвое, что подтверждается максимальными высотными отметками боковых морен. Для поднятия уровня воды не потребовалось слишком много времени. Подсчитано, что даже при современном притоке из рек, впадающих в озеро достаточно было семи лет, для того чтобы накопилось около 40 км³ воды. Переполнение ванны Телецкого озера тальными ледниковыми водами и наличие моренной запруды, внутренние части которой были ослаблены присутствием блоков и линз погребенного льда, создали условия для катастрофического сброса вод и рыхлого обломочного материала в виде своеобразного селевого водокаменного потока, скорость которого, подсчитанная по формуле Тьери, составила 7,0–7,5 м/сек. Такая скорость обеспечивала перенос обломков пород массой свыше 8 т и объемом более 3 м³.



Рис. Эрратический валун из размытой конечной морены у истока р. Бии

Fig. Erratic boulder from the eroded terminal moraine at the source of the Biya River

Примерно такие же показатели скоростей получил [Ефимцев, 1961] для горных рек, используя в своих расчетах известный закон Эри. Подобные условия переноса крупных валунов были описаны в Пеннинских горах [Carling, 1983] и в отрогах Скалистых гор Северной Америки [Eisbacher, 1978]. Значительная скорость перемещения обломочного материала обеспечивалась, по-видимому, большим перепадом высот между зеркалом подпруженного озера и дном ниже расположенной долины реки.

Результаты и их обсуждение

Анализируя полученные данные, мы считаем, что отступление ледника началось около 37 тысяч лет назад, что подтверждено ОСЛ датированием, и в дальнейшем привело к образованию Телецкого озера, по крайней мере, его северного широтного участка. Эта дата рассматривается нами как время начала формирования современного водоема. Она удивительно близко совпала с расчетами геологов [Бубличенко, 1939], которые считали, что возраст озера составляет 36 тысяч лет. Начальный постледниковый уровень озера был определен конечной мореной, которая представляла собой плотину, расположенную у истока р. Бии, с абсолютной отметкой рельефа в 570 м над уровнем моря. Этот уровень соответствовал также максимальной высоте террасы в пос. Яйлю (560-580 м над уровнем моря). Отложения начальной стадии Телецкого озера представляет слой Ch3 в разрезе руч. Чеченек на яйлюнской террасе, накопленный при глубине воды более 100 м. Вскоре после этого уровень озера снизился до отметок менее 470 м абсолютной высоты. Это было вызвано быстрым сбросом воды из бывшего водоема в результате прорыва конечной морены. Данное событие в долине р. Бии являлось катастрофическим [Барышников, 1992, 2012].

Формирование террас Бии происходило за короткий промежуток времени. Палеогляциологические и палеогеографические построения, новые радиоуглеродные даты свидетельствуют о том, что геохронология основных событий в истории развития долины верхней Бии укладывается в 20 тысяч лет. Это подтверждают наблюдения, проведенные нами в предгорьях Алтая [Барышников, 1984]. В интервале 20-16 тысяч лет, возможно раньше, конечная морена размывается, обломочный материал селевым водокаменным потоком выносятся в долину р. Бии, а по притокам Бии накапливаются озерно-подпрудные осадки, по которым была получена серия радиоуглеродных дат, укладываемых в этот временной интервал.

Так, в районе с. Новотроицкое по р. Пыжа (левый приток Бии) в основании 9-метровой террасы обнажаются тонкослоистые глины с мощностью отдельных слоев до 2-3 см. Эти глины сменяются мелким горизонтально-слоистым галечником с

прослоями глин мощностью 0,5-1,0 см. Выше по разрезу отмечается переслаивание галечников, мелкозернистых песков и глин. Перекрывается разрез метровым слоем темно-серых суглинков. Из тонкослоистых глин Е.А. Пономарева выделила семенную флору, указывающую на холодные условия осаждения вмещающих осадков. Споры и пыльцу из этого же разреза изучала Л.И. Ефимова. Выделенные ею комплексы отражают развитие осоково-разнотравных лугов с зарослями папоротников и указывают на достаточно влажный прохладный климат. Абсолютный возраст древесины, отобранный у уреза воды из тонкослоистых озерных глин, показал 16120 ± 80 лет (СОАН-1864).

Близкая по возрасту дата получена из голубовато-серых глин, фациально замещающих осадки пыжинской озерно-подпрудной террасы. Проба была отобрана из шурфа, пройденного в одном километре от вышеописанного обнажения по руч. Томожу. Вскрытые глины характеризуют последнюю стадию накопления озерных осадков, растительные остатки из которых имеют абсолютный возраст 15270 ± 60 лет (СОАН-2017).

Объем накопленной массы воды в древнем Пыжинском озере, по нашим расчетам составил $1,5 \text{ км}^3$. При этом глубина его была около 50 м, длина 17,5 км и ширина 1,5 км. Контуры бывшего водоема реконструированы по фрагментам террасы, которая по мере удаления от устья р. Пыжа вверх по течению с 60-метровой отметки снижается до 15 м и затем сходит на нет.

Типично озерно-подпрудные осадки наблюдались в 2,5 км от устья р. Саракочша (левый приток Бии). Здесь в основании и средней части 40-45-метровой террасы вскрываются горизонтально-слоистые, с прослойками супесей, мелкозернистые пески. В 1,1 км по ручью (правый приток Бии) ниже с. Кебезень, в разрезе четвертой надпойменной террасы, Е.А. Пономарева выделила семенную флору, которую следует отнести к позднему неоплейстоцену. К такому же выводу пришла и Л.И. Ефимова, изучая спорово-пыльцевые комплексы. Ксерофильный и мезофильный облик моллюсков подтвердил и Е.А. Новиков [*Барышников, 1992*]. Абсолютный возраст древесины, отобранный из основания обнажения, датируется по радиоуглероду 14980 ± 70 лет (СОАН-1863).

Озерно-подпрудные отложения были изучены по р. Лебедь (правый приток Бии), где под современной почвой залегают переслаивающиеся с грубозернистым песком галечниковые осадки. Из мелкой фракции косо- и горизонтально-слоистых глин В.А. Панычевым по древесине была получена радиоуглеродная дата 16750 ± 70 лет (СОАН-576) [*Барышников, 1973*].

Перепополнение селевыми водно-каменными отложениями долины Бии привело к изменению первоначального базиса эрозии этой реки, а стремление к первичному базису эрозии привело к формированию надпойменных террас врезания выше по течению. За последующие 1,0-1,5 тысячи лет после селевой катастрофы сформировалась пятая и четвертая надпойменные террасы. Примерно столько же времени потребовалось на образование третьей и второй надпойменных террас. На рубеже верхнего неоплейстоцена и голоцена, а возможно, и в голоцене формируется первая надпойменная терраса. Две тысячи лет назад начала развиваться пойма.

Сохранившиеся после террас врезания перемычки, отделяющие долины притоков от основной реки, в которых также происходило накопление водной массы, были разрушены, образовавшиеся подпорные озера были спущены. Следы от таких паводков отмечены в виде своеобразного грядового рельефа, аналогов гигантских рябей течения, на поверхности четвертой надпойменной террасе в долине Бии выше устья левого притока р. Пыжа в районе горы Волчий Зуб [*Барышников, 1979*].

Позднее на этот феномен обратили внимание российские и зарубежные исследователи [*Рудой, 1984; Бутвиловский, 1985; Carling, 2015; Herget, 2015 и др.*]. В дальнейшем эти же ученые приводили обоснования для подтверждения своей точки зрения, используя в основном геологические, геоморфологические, радиоуглеродные, палинологические и сопоставительные методы исследования. Инструментальных наблюдений из-за отсутствия в то время приборной базы не проводилось. В 2015 г. как в Курайской котловине, так и в Яломанском расширении долины Катунь и в районе с.

Платово в предгорьях Алтая нам удалось с помощью GPS-профилей выполнить георадарную съемку грядовых полей, результаты которой, полученные в 2016 г., подтвердили наши предположения о водном происхождении гряд в результате спуска приледникового озера [Барышников и др., 2017].

Правда, о водном происхождении гигантской ряби течения в 2007 г. писали в своей работе и [Поздняков, Тимофеев, 2007], в которой авторы полемизируют относительно гипотезы о катастрофическом характере формирования рельефа гряд в Курайской котловине во время спуска приледникового озера, полагая, что грядовый рельеф – это эрозионная деятельность сравнительно мелких водотоков, образовавшихся в результате таяния ледников.

В Курайской котловине нами были обследованы два участка, где грядовые поля располагаются в нижней части дна впадины вблизи от голоценового долинного комплекса Чуи. Гряды относятся к типу двухмерных, а их гребни вытянуты в субмеридиональном направлении. Ввиду значительных размеров грядового поля и ясных визуальных отличий в параметрах гряд было заложено два профиля в разных его частях – северном и южном. Профили проложены в направлении с запада-юго-запада на восток-северо-восток, в целом перпендикулярно гребням гряд, по направлению движения предполагаемого палеопотока. С юга на север дно впадины в пределах грядового поля значительно снижается: профиль 2 располагается в среднем на 25–30 м гипсометрически ниже профиля 1. Таким образом, направление потока, сформировавшего гряды, было перпендикулярным уклону дна впадины.

Проведенные исследования позволяют закрыть вопрос о происхождении гигантских валунных гряд в Чуйско-Курайской системе. Как морфометрические параметры, так и внутреннее строение гряд свидетельствует об их образовании в ходе водного транспорта отложений, слагавших дно Курайской впадины. Остаются вопросы о параметрах, происхождении и времени проявления этих водных потоков, но гипотезы о ледниковом (ребристая морена) или эрозионном (остаточные гряды при эрозионном расчленении) происхождении гигантских гряд серьезному обсуждению уже не подлежат.

Грядовые поля на дне Курайской котловины обнаруживают противоположные закономерности в изменении морфометрических параметров по длине профилей (по течению палеопотока): в первом случае высота, крутизна и асимметрия гряд в целом уменьшаются вниз по течению, во втором – растут. Эти различия свидетельствуют о разной природе потоков, формировавших гряды. Параметры гряд Курайской котловины указывают на то, что наиболее вероятным механизмом образования этих гряд было возникновение сильного течения при спуске водоема, заполнявшего впадину. Для Курайского грядового поля сделана оценка, согласно которой формирование гряд началось на той стадии спуска водоема, когда его поверхности в районе дна впадины находились на уровне порядка 1600 м абсолютной высоты, а глубина в пределах грядового поля изменялась от первых метров до 80–100 м. Георадарные данные свидетельствуют о возможной инверсии направления течения на последнем этапе формирования гряд и начале перестройки грядового поля в обратном направлении.

В отличие от Курайской котловины, георадарные профили на низких террасах в долине р. Катунь располагались в другой геоморфологической ситуации. Они вырабатывались не пластовыми, как в Курайской впадине, а русловыми потоками. Профиль 4 расположен на 40-метровой террасе на левом берегу между пос. Иня и М. Яломан. Длина профиля 670 м, он зафиксировал 18 гряд, средний шаг – 37 м.

Профиль 5 проложен на левобережной второй надпойменной террасе (20 м) у с. Платово, на выходе Катунь из гор. Длина грядовой части профиля – 400 м, число пересеченных гряд – 17, средний шаг – 82 м, что соизмеримо с параметрами Курайского грядового поля.

Грядовые поля в долине Катунь обнаруживают иные связи морфометрических параметров. В отличие от Курайских гряд, Малояломанское грядовое поле показывает рост вниз по течению как высоты гряд, так и их крутизны и показателя асимметрии. Те же закономерности, хотя и менее четко, демонстрирует Платовское грядовое поле.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования позволяют закрыть вопрос о происхождении гигантских валунных гряд в катунской системе. Как морфометрические параметры, так и внутреннее строение гряд свидетельствуют об их образовании в ходе водного транспорта отложений, слагавших речные террасы Катунь. Остаются вопросы о параметрах, происхождении и времени проявления этих водных потоков, но гипотезы о ледниковом (ребристая морена) и эрозионном происхождении гигантских гряд серьезному обсуждению уже не подлежат. Грядовые поля в долине Катунь обнаруживают противоположные закономерности в изменении морфометрических параметров по длине профилей (по течению палеопотока): в первом случае высота, крутизна и асимметрия гряд в целом уменьшаются вниз по течению, во втором – растут. В долине Катунь были мощные долинные потоки, проходившие транзитом из верховий речной системы. В долине Бии масштабность проявления подобных событий значительно уступала катунским.

Список литературы

- Барышников Г.Я. Стратиграфия террасовых отложений долины р. Бии / Географический сборник. – Томск: Изд-во ТГУ, 1973. С. 3-9.
- Барышников Г.Я. К вопросу о формировании крупновалунного аллювия р. Бии / Геология и полезные ископаемые Алтайского края: тез. докл. науч.-практ. конф. - Барнаул, 1979. С. 117-119.
- Барышников Г.Я. Эоловые образования предгорий Алтая и их связь с климатами прошлых эпох / Современные геоморфологические процессы на территории Алтайского края: тез. докл. науч.-практ. конф. – Бийск, 1984. С. 6-9.
- Барышников Г.Я. Развитие рельефа переходных зон горных стран в кайнозойе (на примере Горного Алтая). – Томск: Изд-во ТГУ, 1992. - 182 с.
- Барышников Г.Я. Рельеф переходных зон горных стран. – Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2012. - 499 с.
- Барышников Г.Я., Панин А.В., Барышников С.Г. Экстремальные природные явления в горных странах (на примере Горного Алтая). - Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2017. – 153 с.
- Бубличенко Н.Л. Происхождение Телецкого озера // Вестник Зап.-Сиб. геол. управления, 1939. № 3. С. 42–58.
- Бутвиловский В.В. О следах катастрофических сбросов ледниково-подпрудных озер Восточного Алтая // Эволюция речных систем Алтайского края и вопросы практики: тез. докл. нач.-практ. конф. - Барнаул, 1982. С. 12–16.
- Бутвиловский В.В. Катастрофические сбросы вод ледниково-подпрудных озер Юго-Восточного Алтая и их следы в рельефе // Геоморфология. 1985. № 1. С. 65–74.
- Ефимцев Н.А. Четвертичное оледенение Западной Тувы и восточной части Горного Алтая. - М., 1961. - 164 с.
- Зыкин В.С., Зыкина В.С. Дискуссионные проблемы палеогеографии плейстоцена ледниковых областей Западной Сибири // Успехи современного естествознания, 2018. № 7. С.121-128.
- Зыкин В.С., Зыкина В.С., Вольвах Н.Е. Условия формирования ининской толщ плейстоцена в Яломано-Катунской зоне Горного Алтая // Успехи современного естествознания, 2018. № 8. С.118-129.
- Окишев П.А. Динамика оледенения Алтая в позднем плейстоцене и голоцене. -Томск, 1982. - 208 с.
- Окишев П.А. Рельеф и оледенение Русского Алтая. - Томск, 2011. - 381 с.
- Поздняков А.В., Тимофеев Д.А. Происхождение грядового рельефа Курайской котловины Горного Алтая // Геоморфология. 2007. № 2. С. 78–89.
- Рудой А.Н. Гигантская рябь течения – доказательство катастрофических прорывов гляциальных озер Горного Алтая / Современные геоморфологические процессы на территории Алтайского края. - Бийск, 1984. С. 60–64.
- Baker V.R., Benito G., Rudoy A.N. Paleohidrology of Late Pleistocene superflooding, Altai, Mountains, Siberia. Science 259, 1993. P. 348–350.
- Baker V.R. The Channeled Scabland-A retrospective. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences, 37. 2009. P. 6.1–6.19.

- Baker V.R. Global late Quaternary fluvial paleohydrology with special emphasis on paleofloods and megafloods. *Treatise on Geomorphology*, Vol. 9. Fluvial Geomorphology. Academic Press, San Diego, 2013. P. 511–527.
- Eisbacher G.H. Observations on the streaming mechanism of large rockslides, northern Cordillera // *Pap. Geol. Surv. Can.*, 1978. № 78. IA. P. 49–52.
- Carling P.A. Threshold of coarse sediment transport in broad and narrow natural streams // *Earth surface processes and Landforms*, 1983. Vol. 8. P. 1–18.
- Carling P.A., Villanueva I., Herget J., Wright N., Borodavko P., Morvan H. Unsteady 1-D and 2-D hydraulic models with icedam break for Quaternary megaflood, Altai Mountains, southern Siberia. *Global and Planetary Change* 70, 2010. P. 24–34.
- Carling P.A. Catastrophic deposition of Gravel from outbreak Floods / Gradualism vs Catastrophism in landscape Evolution/ *International Association of Geomorphologists. Regional conference*, July 2-4, 2015. P.12-13.
- Herget J. Reconstruction of the Pleistocene ice-dammed lake outburst floods in Altai-Mountains, Siberia. *Geological Society of America, Special Publication* 386, 2005. P. 118-129.
- Herget J. Reconstruction of the Pleistocene outbreak Floods / Gradualism vs Catastrophism in landscape Evolution / *International Association of Geomorphologists. Regional conference*, July 2-4, 2015. P. 18–19.



Опыт проектирования селезащитных сооружений на объектах транспортной инфраструктуры в стесненных условиях

И.С. Богданов

ООО «ГЕОИЗОЛ Проект», Санкт-Петербург, Россия, ibogdanov@geoizol.ru

Аннотация. В статье рассмотрен опыт проектирования селезащитных сооружений на объектах транспортной инфраструктуры в стесненных условиях. Приведено описание, характеристики и преимущества применения гибких селеудерживающих барьеров, позволяющих разместить селезащитное сооружение строго в полосе отвода дороги. В качестве примера реализации данного инженерного решения в статье представлен проект защиты от селей для участка федеральной трассы Р-297 «Амур» Чита – Хабаровск, на 17 км которой в июле 2018 году сошел селевой поток шириной фронта 25 м.

Ключевые слова: *селезащита, селезащитные барьеры, гибкие селеудерживающие барьеры, селепропускные сооружения, селезащитные сооружения, защита от селей*

Ссылка для цитирования: Богданов И.С. Опыт проектирования селезащитных сооружений на объектах транспортной инфраструктуры в стесненных условиях. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 363–370.

Debris flow protection constructions design experience at the transport infrastructure facilities in dumped conditions

I.S. Bogdanov

GEOIZOL Project LLC, Saint Petersburg, Russia, ibogdanov@geoizol.ru

Abstract. The article reviews the experience of designing flexible debris flow barriers on the objects of transport infrastructure in constrained conditions. The article gives a description, characteristics, and application benefits of flexible debris flow barriers that allow placing barriers sharply within the right-of-way. As an example of the implementation of this engineering solution, the article presents the debris flow protection project for a 17 km section of P-129 Amur federal motorway, Chita – Khabarovsk. In June 2018, there was a mudslide 25 m wide there.

Key words: *debris flow protection constructions, debris flow barriers, flexible debris flow barriers, debris flow check canals, debris flow protection facilities, protection against debris flow*

Cite this article: Bogdanov I.S. Debris flow protection constructions design experience at the transport infrastructure facilities in dumped conditions. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 363–370.

Сели – это опасные геологические процессы, которые несут угрозу разрушения не только населенным пунктам и хозяйственным объектам, но и транспортной инфраструктуре. Возникновение селей на автодорогах приводит к большим материальным потерям и социальным бедствиям из-за прерывания транспортного сообщения между населёнными пунктами на длительные сроки.

В последние годы значительно меняется география распространения селевых потоков, образование данных явлений наблюдается даже в тех регионах, где ранее их никогда не было. На активизацию селевых процессов напрямую влияет деятельность человека (особенно некомпенсируемая вырубка лесов), естественные природные процессы, климатические изменения последних лет.

Быстрое распространение проявлений селевой активности требует оперативных защитных мероприятий, которые в первую очередь нужно проводить для важных хозяйственных объектов и стратегических путей сообщения.

Проблема землеотвода

Эффективнее всего от селей может защитить комплекс мер, в число которых входят мероприятия, направленные на исключение факторов селеобразования (укрепление русел водотоков и массивов грунта, противоэрозийная защита); изменение направления селевых потоков (строительство направляющих дамб, пропускных сооружений, перенос защищаемых объектов); уменьшение объемов селевого потока (устройство гибких улавливающих барьеров и жестких преград).

Одной из сложностей создания селезащиты объектов транспортной инфраструктуры в рамках принятия оперативных мер по предупреждению чрезвычайной ситуации является стесненность площадок для размещения инженерных сооружений. Так, у автомобильной дороги, как правило, предусмотрена очень небольшая полоса отвода: трассы подчас проходят по территориям национальных парков, частных земель (садов, виноградников), в горной местности, где свободной земли не так много.

В то же время реализация традиционных решений инженерной защиты территории – дамб, селепропускных сооружений – требует большего пространства, чем примыкает к дороге. Среднестатистическая величина полосы отвода находится в пределах 10–15 м от края обочины. А, например, для пропуска селевого потока высотой 5 м и шириной 20 м потребуются выполнить селепропускное сооружение с высотой пролета не менее 8 м, шириной не менее 20–25 м, что с учетом необходимости сохранения уклонов селевого русла потребует создания подходящего участка длиной около 100 м.

Очевидно, что для реализации подобных решений нужно провести длительную процедуру землеотвода под размещение объекта селезащиты. Но если это частная территория, то на решение вопросов имущественно-правового характера могут уйти месяцы, если не годы.

Еще одна проблема при устройстве крупных селезащитных объектов, например, дамб связана с тем, что, исходя из опыта работы Группы компаний «ГЕОИЗОЛ», сметные расценки на проведение работ по отсыпке грунта не покрывают фактические затраты, которые несет подрядчик. Как правило, инфраструктурные объекты, которым требуется селезащита, значительно удалены от населенных пунктов, поэтому доставку строительных материалов и грунта приходится осуществлять с большим плечом, что удорожает реализацию проекта. Кроме этого, в силу удаленности объекта определенные затраты потребуются и на устройство строительного городка. В итоге общая стоимость реализации проекта окажется значительно выше расценок, заложенных в смете. Подрядчику не выгодно проводить подобные работы.

Выбор в пользу современных решений

Для защиты автодорог от селей в сжатые сроки в условиях ограниченной полосы отвода на помощь приходят современные инженерные решения, которые позволяют минимизировать площадь размещения объекта селезащиты [Богданов И.С., 2018].

Одним из наиболее эффективных способов является установка гибких селеудерживающих барьеров, состоящих из кольчужной сети, усиленной стальными канатами, в комбинации с энергопоглощающими устройствами и поддерживающими

стойками с оттяжками. Крепление селеудерживающих барьеров производится, как правило, с использованием грунтовых анкеров. Такие конструкции останавливают селевые потоки и удерживают твердую часть селя, предотвращая воздействие селевого потока на защищаемый объект.

Одно из важных преимуществ гибких селеудерживающих барьеров состоит в том, что для их установки требуется небольшая территория. Так, для размещения конструкции селеудерживающего барьера высотой 10 м достаточно выполнить свайное основание с ростверком шириной 3-4 м. Конструкция может быть закреплена без использования дополнительных оттяжек, она удерживается за счет специальных стоек, которые крепятся к свайному ростверку, при необходимости дополнительно закреплению грунтовыми анкерами для снижения горизонтальных нагрузок на свайное основание. В тоже время конструкция, в силу своих размеров, одновременно является вандалозащищенной, так как для ее демонтажа нужна спецтехника.

Одной из ключевых особенностей гибких селезащитных барьеров является их способность выдерживать множественные воздействия стихии.

Противоселевые барьеры устанавливаются в русле предполагаемого схода селя, перекрывая его путь. Ключевое значение в обеспечении их работоспособности играет правильный расчет и качественная установка.

Конструкция гибкого селеудерживающего барьера состоит из следующих элементов (рис. 1):

- высокопрочной преграды (кольчужной сети или высокопрочной сети, усиленной канатами);
- опор/стоек и фундаментов, закрепляемых на склоне, в том числе оттяжками;
- энергопоглотителей.

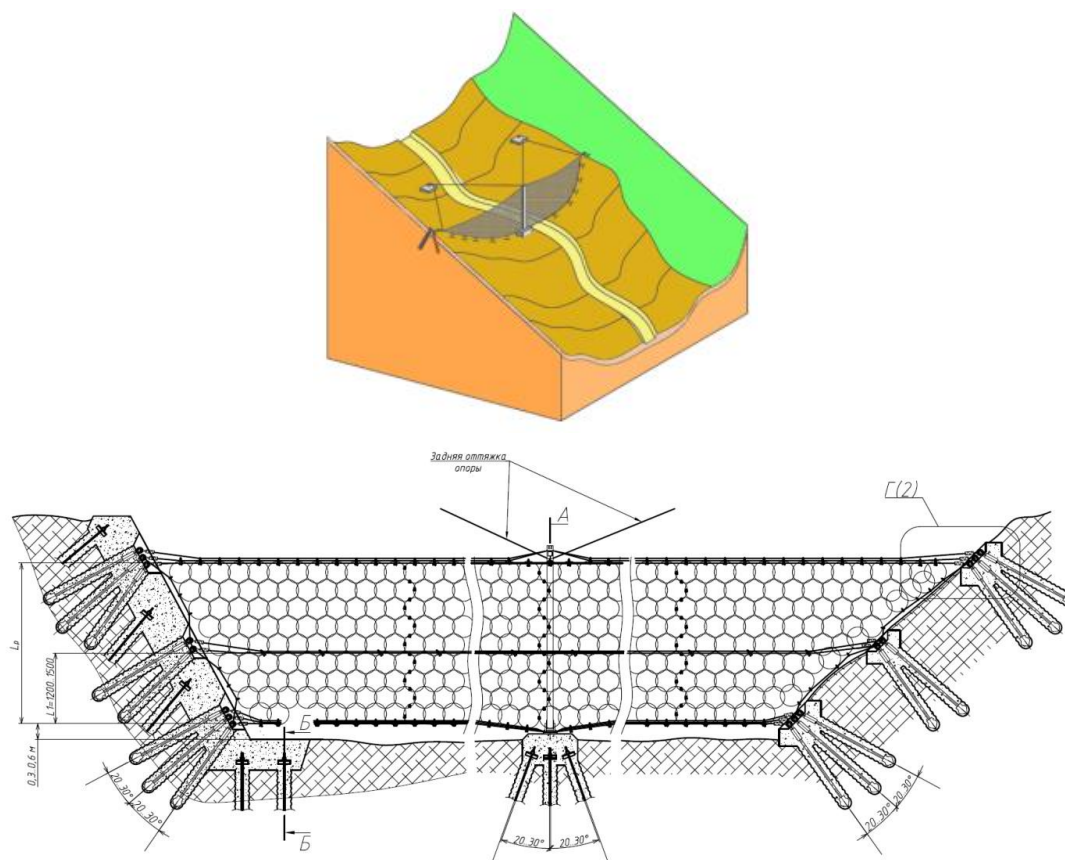


Рис. 1. Конструкция гибкого селеудерживающего барьера

Fig. 1. Scheme of the flexible debris flow protective barrier

Данная конструкция имеет ряд преимуществ:

- простота и скорость монтажа;
- экономичность;
- многоразовость использования (гибкие барьеры имеют амортизационные устройства для восприятия удара селей и со временем не теряют своих эксплуатационных свойств);
- экологичность (органично вписываются в существующий ландшафт, не перегружая и не изменяя его).

С одной стороны, стоимость конструкций гибких барьеров выше, чем устройство классических селеудерживающих сооружений, например, дамбы. Но, с другой стороны, учитывая эффективность гибких селезащитных барьеров, скорость их монтажа, а также минимальные затраты на эксплуатацию, данные конструкции в целом позволяют снизить расходы на устройство инженерной защиты транспортного объекта.

Конструкции гибких селезащитных барьеров изготавливаются на заказ на производстве строго в соответствии с проектом, на площадку доставляются в частично собранном виде. Одно из их преимуществ связано с быстрой и простой установкой. Для устройства гибких селезащитных барьеров требуются небольшие объемы товарного бетона и минимум специализированной техники – монтаж осуществляется небольшой бригадой квалифицированных рабочих с помощью автомобильного крана, а на особо труднодоступных площадках монтаж может быть произведен с использованием вертолета.

Несмотря на относительную новизну данных решений, технология гибких селезащитных барьеров уже показала свою эффективность и хорошо себя зарекомендовала на целом ряде российских объектов. Поэтому и в государственной экспертизе, и в специализированных дорожных экспертизах данные решения хорошо известны и не воспринимаются как ноу-хау.

В частности, гибкие селеудерживающие барьеры были применены Группой компаний «ГЕОИЗОЛ» при выполнении комплекса работ по инженерной защите объектов олимпийского Сочи в Красной Поляне в 2011-2014 гг. (лыжно-биатлонного стадиона «Лаура», бобслейной трассы, горнолыжного курорта «Альпика Сервис» и др.) (рис. 2) [СП 14.13330.2014].



Рис. 2. Примеры устройства гибких селеудерживающих барьеров, используемых для инженерной защиты горнолыжных объектов в Сочи

Fig. 2. Examples of flexible debris flow barriers used for engineering protection of ski facilities in Sochi

Поскольку все эти объекты находятся на территории национальных природных парков, при создании инженерной защиты территории [СП 116.13330.2012] важно было сохранить естественный рельеф, оказывая минимальные технологические воздействия на окружающую среду. На фото видно, что селеудерживающие барьеры хорошо вписаны в окружающий ландшафт (рис. 3).



Рис. 3. Каскад из эксплуатируемых гибких селеудерживающих барьеров хорошо вписывается в ландшафт местности

Fig. 3. A cascade of operated flexible debris flow barriers fits well into the landscape

По прошествии времени можно говорить о том, что конструкции из гибких селеудерживающих барьеров показали свою надежность и эффективность в рамках эксплуатации. За период с 2014 г. в Красной Поляне были зафиксированы неоднократные селевые сходы. Но ни один гибкий защитный барьер не был поврежден. После схода селя требовалась лишь очистка сетки от задерживаемой массы (грунта, камней, корчехода), а также замена энергопоглотителей (тормозов-замедлителей), которые деформировались при ударе селевого потока. Стоимость замены энергопоглотителей составляет всего 1–2% от общей цены селезащитного барьера.

Проектирование селезащитных сооружений на участке автодороги «Амур» р-297

В качестве примера создания проекта селезащиты автодороги [СП 34.13330.2012] в стесненных условиях приведем федеральную трассу Р-297 «Амур» Чита – Хабаровск, на 17 км которой в июле 2018 году после выпадения большого количества осадков сошел селевой поток шириной фронта 25 м (рис. 4).



Рис. 4. Сход селевого потока на 17 км федеральной трассы Р-297 «Амур»

Fig. 4. Debris flow at 17th km of the R-297 “Amur” federal highway

Компания «ГЕОИЗОЛ Проект» разработала проект инженерной защиты для данного участка дороги строго в границах полосы отвода трассы.

Проект предусматривает устройство селезадерживающих сооружений, которые остановят и удержат селевой поток, исключая риск его вываливания на автомобильную трассу. По проекту установка селезадерживающего барьера производится на основание в виде угловой подпорной стены, усиленной грунтовыми анкерами. Проектной документацией предусмотрено для обеспечения устойчивости и уменьшения горизонтальных усилий, передаваемых на оголовки свай, выполнение одного ряда грунтовых анкеров GEOIZOL-MP (собственная разработка Группы компаний «ГЕОИЗОЛ») длиной 19,5 м, с шагом 2 м [ВСН 506-88]. На этом основании выполняется устройство индивидуально разработанного для данного проекта селеудерживающего барьера высотой 10 м.

Конструкция барьера состоит из жестких стоек и высокопрочной кольчужной сети, усиленной поперечными стальными канатами, которые крепятся к основанию через специальные устройства, гасящие энергию удара селевого потока (рис. 5, 6, 7).

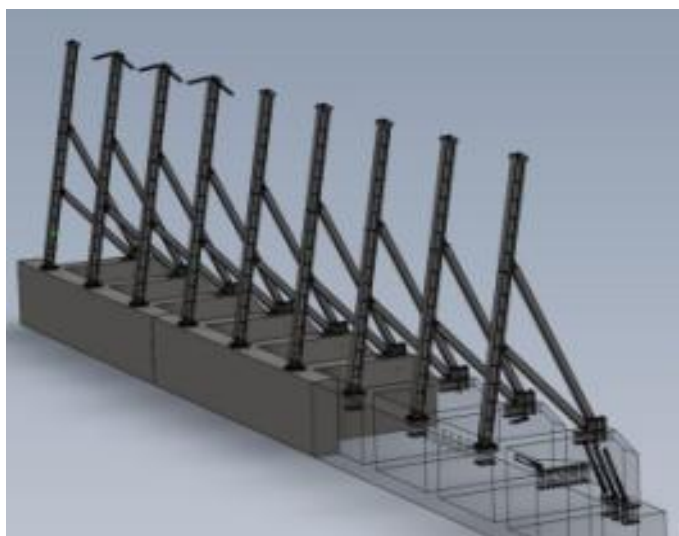


Рис. 5. 3D-модель селеудерживающего барьера

Figure: 5. 3D model of the debris flow protective barrier

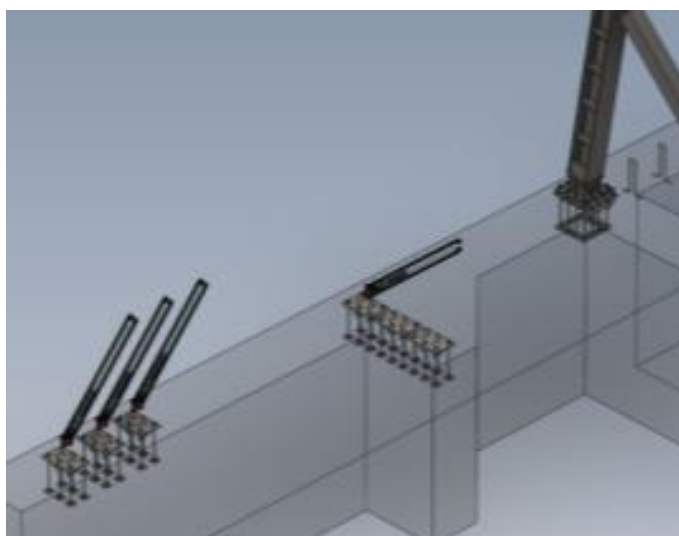


Рис. 6. Крепление стоек селеудерживающего барьера к основанию

Fig. 6. Fixing the debris flow protective barrier posts to the basement



Рис. 7. Общий вид расположения селеудерживающих барьеров на местности

Fig. 7. General view of the location of debris flow protective barriers on the ground

Среди плюсов такого технического решения: компактное размещение конструкции селеудерживающего барьера строго в полосе отвода дороги, выполнение работ без перекрытия трассы, наименьшие затраты на эксплуатацию и содержание объекта, отсутствие работ, потенциально активизирующих опасные природные процессы (оползни) и др.

При заполнении барьера селевым потоком вода под действием удерживаемой массы отжимается, и в барьере остается только твердый сток, что позволяет значительно уменьшить объемы работ по расчистке противоселевого барьера.

В качестве мероприятий по водоотведению разработано устройство искусственного русла вдоль подпорной стены для сброса воды в кювет автодороги. Русло запроектировано бетонным для возможности механической расчистки от селевых намывов и сезонных загрязнений.

Основные выводы

Компания «ГЕОИЗОЛ Проект» имеет большой опыт создания проектов инженерной защиты территорий и объектов, в том числе с использованием гибких селеудерживающих барьеров – экономически эффективная альтернатива традиционным железобетонным конструкциям.

Современные инженерные решения позволяют минимизировать площадь размещения объектов селезащиты, ограничиваясь строго зоной в полосе отвода дороги. В большинстве случаев достаточно свайного основания с ростверком шириной до 4 м.

Конструкции гибких селезащитных барьеров имеют преимущества, связанные с быстрой и простой установкой. Гибкие селеудерживающие барьеры рассчитаны на множественные воздействия стихии.

Список литературы

Богданов И.С. Инженерная защита территории. Комплексные проектные решения. // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений». 2018. С. 4-10.

- СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах СНиП II-7-81* (актуализированного СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах» (СП 14.13330.2011)) (с Изменением N 1).»
- СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003»
- ВСН 506-88 «Проектирование и устройство грунтовых анкеров». – М: 1989
- СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85* (с Изменениями N 1, 2)



Подземные прорывы озёр и другие проявления селей в каменных глетчерах

М.Д. Докукин¹, М.Ю. Беккиев¹, Р.Х. Калов¹, Е.А. Савернюк², С.С. Черноморец²

¹Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, inrush@bk.ru

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия, savernyuk@gmail.com

Аннотация. На основе анализа данных разновременных космических снимков проведено исследование динамики озёр, расположенных в тыловой зоне каменных глетчеров. Исследовались озёра в горных районах Афганистана, Таджикистана, Казахстана и России. Выявлены факты отсутствия озёр в течение нескольких лет, и затем появление их в год прорыва. Площади озёр составляли порядка 40-70 тыс. м². Следы прорыва фиксировались на фронтальных уступах каменных глетчеров на расстоянии от 500 до 1500 м от озёр, что свидетельствовало о наличии подземных каналов стока такой протяжённости. Озёра в каменных глетчерах прорывались неоднократно. Озеро в верховьях р. Каргалы в Казахстане прорывалось в 2015 и 2019 гг. Кроме прорывов озёр отмечены факты формирования селей на уступах каменных глетчеров с объёмами выноса до 1 млн м³ (каменные глетчеры в верховьях левых притоков р. Кынгарга в Юго-Западном Прибайкалье). Такие сели были вызваны выпадением аномального количества жидких осадков. Случаи схода нескольких селей с каменных глетчеров отмечены на Кавказе в Чегемском ущелье в 1983 г. в период массового схода дождевых селей. Дождевые сели в каменных глетчерах отличаются редкой повторяемостью, что осложняет их прогнозирование.

Ключевые слова: каменные глетчеры, прорывы озёр, подземные каналы, фронтальные уступы

Ссылка для цитирования: Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Подземные прорывы озёр и другие проявления селей в каменных глетчерах. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 371–387.

Underground outbursts of lakes and other debris flow manifestations in rock glaciers

M.D. Dokukin¹, M.Yu. Bekkiev¹, R.Kh. Kalov¹, E.A. Savernyuk², S.S. Chernomorets²

¹High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, inrush@bk.ru,

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, savernyuk@gmail.com

Abstract. We have investigated the dynamics of lakes located in the rear zone of rock glaciers using data analysis of different-time satellite images. We explored lakes in the mountainous regions of Afghanistan, Tajikistan, Kazakhstan and Russia and revealed the fact of the several years' absence of lakes, and then their appearance in the year of the outburst. The area of the lakes was about 40–70 thousand m². We recorded outburst traces on the frontal ledges of rock glaciers at a distance of 500 to 1500 m from the lakes indicating the presence of underground runoff channels of such a length. Lakes in rock glaciers have repeatedly broken through. Outbursts of the lake in the upper Kargaly River in Kazakhstan were in 2015 and 2019. In addition to lake outbursts we noted the facts of debris flow formation on the slope of rock glaciers with deposits volume of up to 1 million m³ (rock glaciers in the upper reaches of the Kyngarga River left tributaries in the South-Western Baikal region). Such debris flows were caused by an abnormal amount of liquid

precipitation. We revealed cases of several debris flows from rock glaciers that occurred in the Caucasus in the Chegem gorge in 1983 during the period of massive rain debris flows. Rain debris flows in rock glaciers are rarely repeated, which complicates their prediction.

Key words: *rock glaciers, glacial lakes outburst flood, underground channels, front slopes of rock glaciers*

Cite this article: Dokukin M.D., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S. Underground outbursts of lakes and other debris flow manifestations in rock glaciers. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhiya K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 371–387.

Введение

Каменные глетчеры – характерный элемент высокогорной криолитозоны, выраженный в виде языкообразных массивов, по форме напоминающих ледники, состоящих из обломков горных пород и льда, медленно сползающих по склонам за счёт деформации льда. Строение и динамика каменных глетчеров рассмотрена в работе [Haeblerli, 1985]. Обзор распространения каменных глетчеров в Сибири и Азии приведён в работах [Галанин, 2009; Горбунов, 2006]. Каменным глетчерам Кавказа посвящены работы [Бруханда, 1976; Володичева, Лабутина, 1996; Докукин, 1993; Кожевников и др., 1980; Краснослободцев, 1971; Тавасиев, 2011].

Каменные глетчеры как селевые очаги рассмотрены в работах [Докукин, 1987; Сейнова, Мезенина, 1987; Тавасиев, 2011a; Giardino, 1983; Lugon, Stoffel, 2010]. В этих работах в качестве селевых очагов показаны фронтальные уступы каменных глетчеров, на которых в результате ливней образуются эрозионные формы – рытвины и воронки. Селевому процессу могут способствовать прорывы внутренних полостей в каменных глетчерах, заполненные водой и грязекаменной смесью.

В работе [Докукин, 1993] каменные глетчеры представлены как конечные формы нескольких морфологических рядов: ледник – каменный глетчер, моренный пьедестал – каменный глетчер, обвально-осыпной конус – каменный глетчер. В этих морфологических рядах выделяются переходные образования. Каждой выделенной форме присущи свои темпы и механизмы развития, в том числе механизмы селеформирования.

Прорывы озёр по подземным каналам стока отмечены в работах [Erokhin et al., 2018; Petrakov et al., 2020].

Цель настоящей статьи – исследование случаев прорывов озёр, расположенных на поверхности каменных глетчеров или в их тыловой депрессии, а также селепроявлений на фронтальных уступах каменных глетчеров.

Материалы и методы

Исследования проведены на основе дешифрирования космических снимков с различных Интернет-ресурсов: Google Earth, Bing Maps, Yandex, ESRI. С сайта <https://landsatlook.usgs.gov/viewer.html> получены космоснимки Landsat 7 ETM+ (разрешением 30 м). На сайте <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> просматривали большое количество космических снимков Sentinel 2A (разрешением 10 м) за период 2015–2019 гг., а также Landsat 8 OLI разрешением 30 м за период 2013–2019 гг. Фрагменты космоснимков загружались в формате TIFF в системе координат WGS84 проекции UTM, и таким образом формировалась база растровых данных для работы в GIS-программе. На участок верховьев долины р. Сарын-Су на Кавказе использовались аэрофотоснимки 1957, 1973, 1978 и 1983 гг. из архива ФГБУ «ВГИ», космоснимки IRS 1D (разрешением 6 м), SPOT 5 (разрешением 2,5 м), IRS-P5 (Cartosat-1) (разрешением 2,5 м), предоставленные ИТИЦ «СКАНЭКС». В программе ArcGIS 10.3 космоснимки и

аэрофотоснимки привязывались по опорным точкам и создавались векторные слои границ озёр.

Результаты исследований

В последние годы было несколько сообщений в Интернете и публикаций о селевых потоках, связанных с прорывами озёр, которые выявлены по данным дистанционного зондирования и электронных СМИ: прорыв озера и разрушения в кишлаке Пашгор (Афганистан) в 2018 г., прорыв озера и выход селевого потока в г. Алматы в 2015 г., прорыв озера и разрушение кишлака Дашт (Таджикистан) в 2002 г. и др.

Прорыв озера в верховьях р. Даррагари (Панджшерское ущелье, Афганистан) в 2018 г.

На рис. 1 показано состояние озера, каменного глетчера и конуса выноса р. Даррагари (Афганистан), а также кишлака Пашгор до и после прорыва озера в 2018 г.

12 июля 2018 г. рано утром кишлак Пашгор в Панджшерском ущелье в Афганистане подвергся разрушительному воздействию селевого потока, в результате которого погибло 10 человек и разрушено 400 домов. 15 июля об этом сообщил Д. Петли в своём блоге (<https://blogs.agu.org/landslideblog/2018/07/15/panjshir-1/>) и привёл фрагменты космоснимков с Planet Lab от 11 и 12 июля 2018 г. и выводы о прорыве озера.

Авторы проанализировали космоснимки Sentinel 2А за 6 и 16 июля 2018 г. и более ранние космоснимки за период 2013-2018 гг., а также космоснимки с Google Earth за период 1984-2006 г. В результате было выявлено, что перед прорывом озеро имело площадь 62,6 тыс. м² (см. рис. 1а). Появилось озеро в начале лета и 6 июня уже имело площадь 30 тыс. м². К 16 июня его площадь достигла 41 тыс. м² (см. рис. 1б) и 6 июля площадь была максимальной. Всё это время озеро было в условиях заснеженной поверхности окружающей его территории. Анализ космоснимков предыдущих лет (2013–2017 гг.) показал, что и в весеннее и в летнее время озёр на этом месте не наблюдалось.

Исследование геоморфологических условий формирования прорывного паводка позволило сделать следующие выводы:

- 1) в котловину (рис. 1д, №2), которая в 2018 г. заполнилась водой, все годы поступала вода от таяния ледника (рис. 1д, №5) площадью около 0,15 км²;
- 2) ниже котловины озера и слева от неё расположен массив каменного глетчера шириной более 600 м, состоящий из двух потоков, второй из которых начинается ниже ледника (рис. 1д, №6) площадью 0,08 км²;
- 3) к северу от котловины озера 2018 г. (рис. 1д, №2), находится пустая котловина площадью 60-65 тыс. м², в которой существовало озеро в течение более 30 лет, а затем в 2006 г. озеро исчезло;
- 4) ниже озёрных котловин расположены две генерации (молодая и старая) каменного глетчера (рис. 1д, №3 и №4), в которых сток с озёр осуществлялся по подземным каналам (показаны синими и жёлтыми штриховыми линиями);
- 5) на теле крупноглыбовой поверхности старой генерации (рис. 1ж, №5) каменного глетчера после прорыва озера в 2018 г. отчётливо видны тёмные следы от водного потока шириной до 60–75 м (рис. 1ж, №2) протяжённостью около 400 м без отложения обломочной массы, причём ниже этого потока следов изменений в русле основного водного потока не зафиксировано;
- 6) на уступе каменного глетчера старой генерации следы эрозионной воронки шириной 50 м (рис. 1ж, №3) наблюдаются на участке правее следов водного потока, что позволило сделать предположение о том, что основной поток прорывного паводка проходил по подземному каналу в массиве старой генерации каменного глетчера, т.е. прорыв озера проходил по

- нескольким подземным каналам на разных уровнях двух генераций каменного глетчера; длина подземного канала достигала более 1500 м;
- 7) исчезновение озера в котловине №1 (рис. 1д) в 2006 г. происходило без прорывного паводка, так как при этом не было следов селевого потока на участке устья р. Даррагари в кишлаке Пашгор;
 - 8) ниже уступа старой генерации каменного глетчера размывы в русле были шириной более 50 м, и далее происходило отложение селевой массы на конусе площадью около 40 тыс. м².

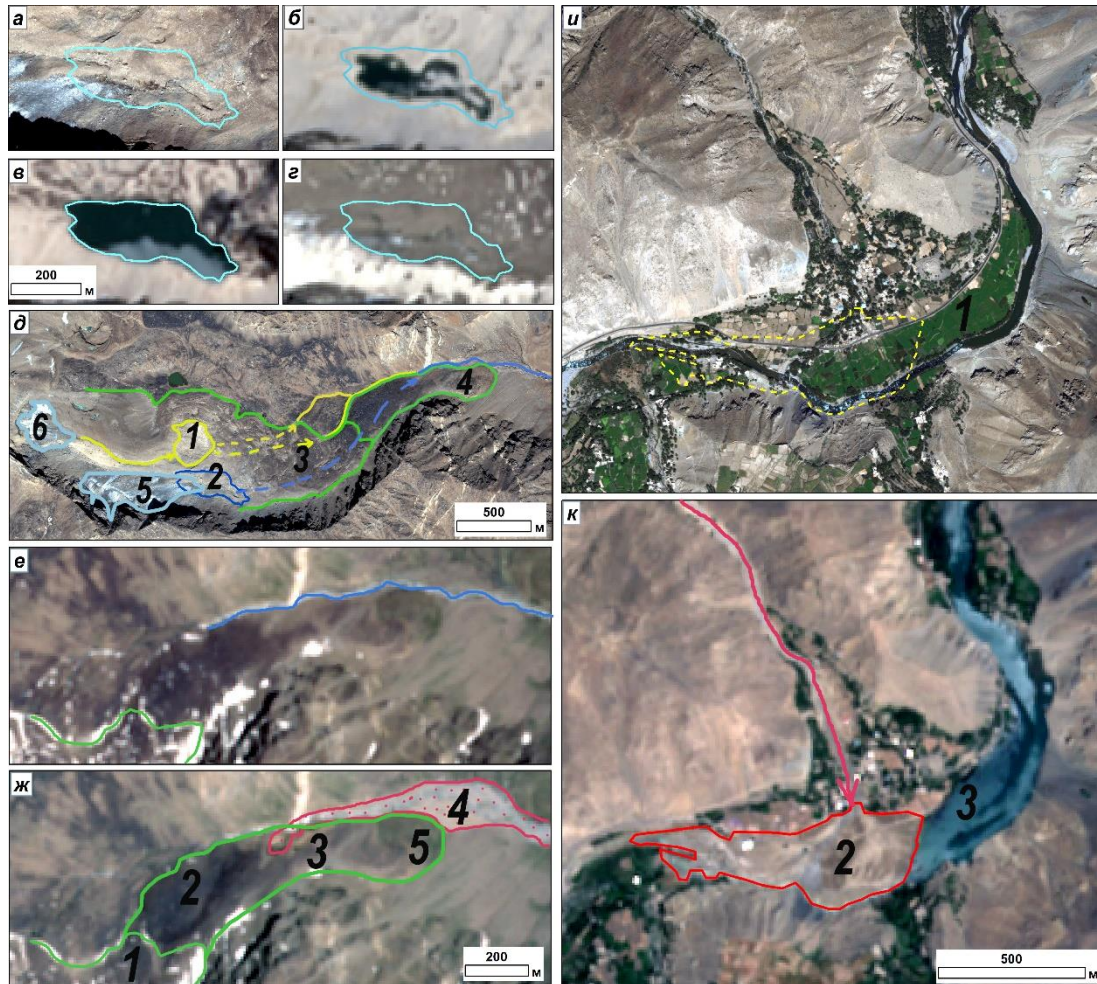


Рис. 1. Прорыв озера в верховьях р. Даррагари (бассейн р. Панджшер, Афганистан) 12 июля 2018 г.: а - котловина будущего озера 19.09.2013 (WorldView2), б - озеро 11.06.2018 (Sentinel 2A), в - озеро 06.07.2018 (Sentinel 2A), г - котловина без озера 16.07.2018; д - схема условия прорыва озера 19.09.2013 (WorldView2): 1 - котловина озера, исчезнувшего в 2006 г., 2 - котловина озера, прорвавшегося в 2018 г., 3 - тело молодой генерации каменного глетчера (зелёные границы), 4 - язык старой генерации каменного глетчера, 5 - ледник, питавший озеро 2, 6 - ледник, питавший озеро 1. Синяя штриховая линия - подземный канал стока из озера 2, жёлтая штриховая линия - подземные каналы стока из озера 1, жёлтая сплошная линия - русло потока с ледника, питавшего озеро 1; е - участок двух генераций каменного глетчера до прорыва озера 2; ж - участок двух генераций каменного глетчера до прорыва озера 2: 1 - молодая генерация каменного глетчера, 2 - следы водного потока на поверхности старой генерации каменного глетчера, 3 - участок выхода прорывного паводка из подземного канала в старой генерации каменного глетчера, 4 - отложения прорывного паводка и селя, 5 - фронтальная зона старой генерации каменного глетчера; и - кишлак Пашгор до прорывного паводка и селя (19.09.2013, WorldView2): 1 - конусная терраса с участками с/х культур, жёлтый контур - отложения прорывного паводка и селя 2018 г.; к - кишлак Пашгор после прорывного паводка и селя (16.07.2018 г. Sentinel 2A): 2 - отложения прорывного паводка и селя, 3 - подпрудное озеро.

Fig. 1. Lake outburst in the upper reaches of the Darragari River (Panjsher River basin, Afghanistan) on 12 July 2018: *a* - basin of the future lake (WorldView-2 satellite image, 19 September 2013); *б* - lake (Sentinel-2A satellite image, 11 June 2018); *в* - lake (Sentinel-2A satellite image, 6 July 2018); *г* - basin without lake (Sentinel-2A satellite image, 16 July 2018); *д* - lake outburst conditions scheme (WorldView-2 satellite image, 19 September 2013): 1 - lake basin, which disappeared in 2006; 2 - basin of the lake which outburst occurred in 2018; 3 - body of the young generation of rock glacier (green borders); 4 - tongue of the old generation of rock glacier; 5 - glacier that fed the lake 2; 6 - glacier that fed the lake 1, blue bar line - underground runoff channels from lake 2, yellow bar line - underground runoff channels from lake 1, yellow solid line - flow channel from the glacier that fed the lake 1; *e* - section of two rock glacier generations before the lake 2 outburst; *ж* - section of two rock glacier generations before the lake 2 outburst): 1 - young generation of rock glacier; 2 - traces of water flow on the surface of the old generation of rock glacier; 3 - outlet section of outburst flood from an underground channel in the old generation of rock glacier; 4 - deposits of outburst flood and debris flow; 5 - frontal zone of the old generation of rock glacier; *и* - Pashgor village before the outburst flood and debris flow (WorldView-2 satellite image, 19 September 2013): 1 - fan terrace with areas of agricultural crops, yellow contour - deposits of outburst flood and debris flow in 2018; *к* - Pashgor village after outburst flood and debris flow (Sentinel-2A satellite image, 16 July 2018): 2 - deposits of outburst flood and debris flow; 3 - dammed lake

На расстоянии более 13 км от озера происходило отложение селевой массы в пределах кишлака Пашгор на площади 0,17 км² (рис. 1к, №2). При этом образовалось подпрудное озеро (рис. 1к, №3), которое затопило невысокую террасу с сельскохозяйственными угодьями (рис. 1и, №1).

Прорывы озера в верховьях р. Шаркин (бассейн р. Санглед, Афганистан)

На рис. 2 показана динамика озера в верховьях р. Шаркин до и после прорывов и участка конуса выноса в долине р. Санглед.

По данным анализа космоснимков Landsat 8 и Sentinel 2A было выявлено два случая наполнения котловины и прорыва образовавшегося озера в 2014 и 2018 гг. На космоснимках Landsat 8 зафиксировано существование озера площадью около 35-40 тыс. м² в середине июня 2014 г. На рис. 2а, б показано, что 29 июля озеро имело площадь около 45 тыс. м², а 14 августа его уже не было. На конусе выноса изменения произошли в период 7–14 августа 2014 г. (рис. 2ж, и). В другие годы и весной, и летом наличие озера не зафиксировано, или обнаружено озеро площадью до 10 тыс. м² (2013, 2015, 2016 и 2017). В следующий раз наполнение котловины водой произошло в 2018 году уже в конце мая – начале июня. И озеро просуществовало до 8 июля с максимальной площадью 47,2 тыс. м² (рис. 2в). Затем 13 июля его площадь уменьшилась до 22,2 тыс. м² (рис. 2г). При этом на конусе выноса в этот же период зафиксированы значительные изменения (рис. 2л). В августе уровень воды в озере ещё сильнее упал и площадь его составила около 10 тыс. м².

Такая же площадь озера наблюдалась в 2019 г., и котловина озера не заполнялась до максимального уровня. Как и в случае озера в верховьях р. Даррагари (см. рис. 1) в тыловой зоне каменного глетчера в верховьях р. Шаркин находятся два ледника, но площадь их значительно больше – 0,3 и 0,8 км² (рис. 2е, №2). Длина подземного канала стока воды из озера в массиве каменного глетчера (рис. 2е, №3) составляет 1,5 км. Следы проявления селей отмечены ниже фронтального уступа каменного глетчера молодой генерации вдоль боковой границы каменного глетчера старой генерации (рис. 2е, №4, №5).

Таким образом, озеро в 2014 г. прорывалось полностью с формированием прорывного паводка, а в июле 2018 г прорывалось лишь частично, но при этом следы прохождения паводка присутствовали. Это может свидетельствовать об изменениях подземных каналов стока.

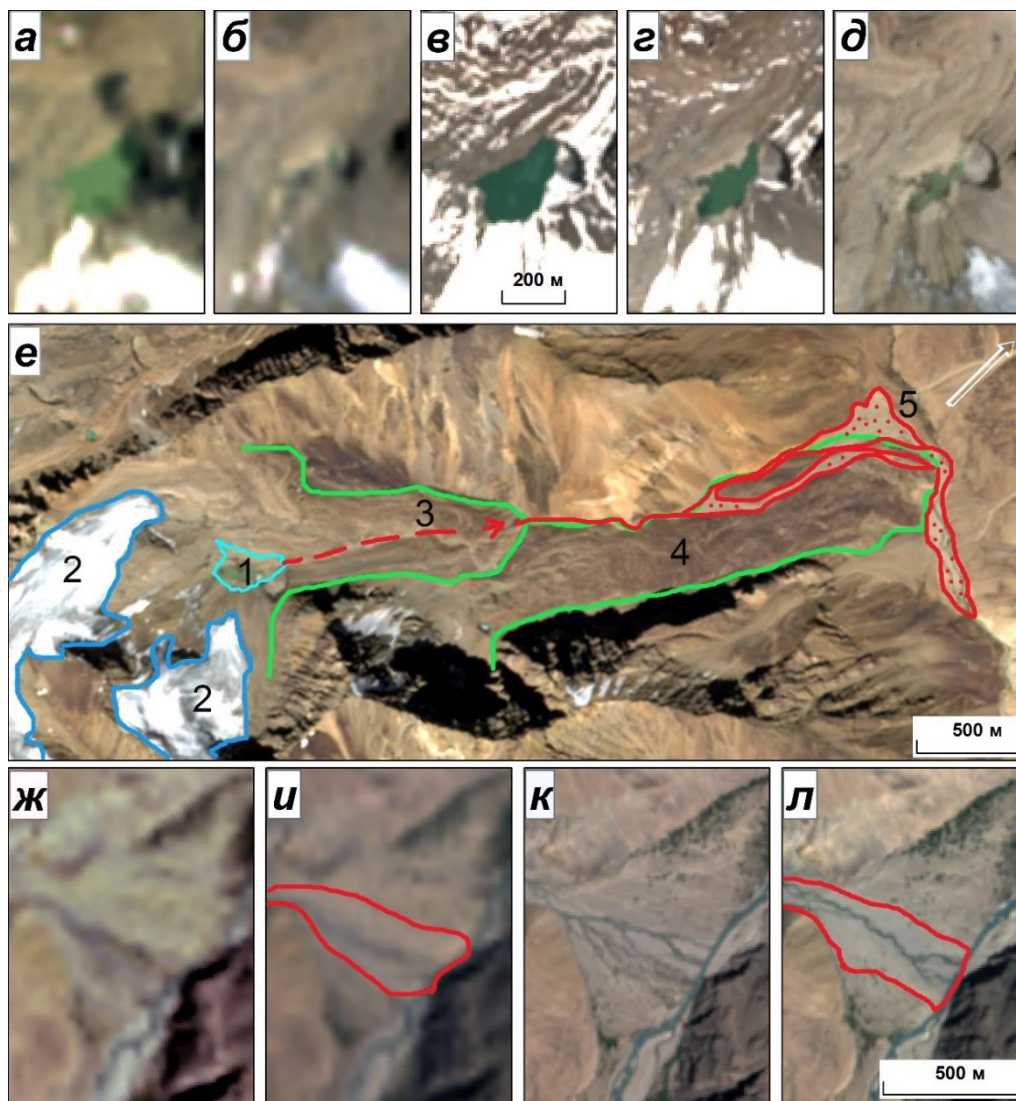


Рис. 2. Прорывы озера в верховьях р. Шаркин (бассейн р. Санглеч, Афганистан) в 2014 и 2018 гг.: *а* – озеро 29.07.2014 до прорыва (Landsat 8), *б* – озеро 14.08.2014 после прорыва (Landsat 8), *в* – озеро 28.06.2018 до прорыва (Sentinel 2A), *г* – озеро 13.07.2018 после прорыва (Sentinel 2A), *д* – озеро 22.08.2018, *е* – схема условий прорыва озера на космоснимке 06.09.2019 (Sentinel 2A): 1 – контур озера до прорыва 2018 г., 2 – ледники, 3 – молодая генерация каменного глетчера – зелёные линии, красная линия – путь подземного прорыва озера; 4 – старая генерация каменного глетчера – зелёные линии, красная линия – путь прорывного паводка; 5 – отложения прорывного паводка и селевого потока; конус выноса р. Шаркин: *ж* – 07.08.2014 (Landsat 8), *и* – 14.08.2014 (Landsat 8), красный контур – отложения прорывного паводка и селевого потока; *к* – 28.06.2018 (Sentinel 2A), *л* – 13.07.2018 (Sentinel 2A), красный контур – отложения прорывного паводка и селевого потока

Fig. 2. Lake outbursts in the upper reaches of the Sharkin River (Sanglech River basin, Afghanistan) in 2014 and 2018: *a* - lake before the 2014 outburst (Landsat-8 satellite image, 29 July 2014); *б* - lake after the 2014 outburst (Landsat-8 satellite image, 14 August 2014); *в* - lake before the 2018 outburst (Sentinel-2A satellite image, 28 June 2018); *г* - lake after the 2018 outburst (Sentinel-2A satellite image, 13 July 2018); *д* - lake on the Sentinel-2A satellite image, 22 August 2018; *е* - lake outburst conditions scheme (Sentinel-2A satellite image, 6 September 2019): 1 - lake contour before the 2018 outburst, 2 - glaciers, 3 - young generation of rock glacier (green lines), red bar line - the way of underground lake outburst, 4 - old generation of rock glacier (green lines), red solid line - way of outburst flood, 5 - deposits of outburst flood and debris flow. Sharkin River fan: *ж* - on the Landsat-8 satellite image, 7 August 2014; *и* - on the Landsat-8 satellite image, 14 August 2014 (red contour - deposits of outburst flood and debris flow); *к* - on the Sentinel-2A satellite image, 28 June 2018; *л* - on the Sentinel-2A satellite image, 13 July 2018 (red contour - deposits of outburst flood and debris flow)

Прорывы озера в верховьях р. Каргалы (Казахстан)

В работе [Медеу и др., 2016] отмечено, что в бассейне р. Каргалы (Каргалинка) в период с 1921 по 1999 г. зафиксированы наносоводные селевые паводки и грязекаменные селевые потоки дождевого генезиса. 23 июля 2015 г. на г. Алматы обрушился сель в результате прорыва небольшого озера, которое тогда называли Безымянным, так как не ожидали от него угрозы (https://forbes.kz/process/probing/kak_sel_proshel_v_almatyi_skvoz_plotinu_na_reke_kargalinka).

На рис. 3 показана динамика озера в верховьях р. Каргалы и схема формирования прорывных паводков. Было выявлено, что в годы, предшествующие прорыву озера (2013-2014) и последующие (2016-2018), озеро отсутствовало. В мае-июне 2015 года происходило заполнение котловины водой – озеро зафиксировано на заснеженной поверхности каменного глетчера (рис. 3а, б). В середине мая площадь озера была 12 тыс. м² (рис. 3а). 11 июля (за 12 дней до прорыва) площадь озера достигла 77,2 тыс. м² (рис. 3в). К 18 июля (за 5 дней до прорыва) площадь озера уменьшилась и составляла около 55 тыс. м².

В результате прорыва озера 23 июля 2015 г. и схода селевого потока в г. Алматы пострадало 456 домов, из них 9 разрушены, подтоплены 44 улицы, 32 единицы автотранспорта (<https://www.nur.kz/831907-iz-za-skhoda-selya-v-almaty-podtopleno-450-d.html>). В работе [Катица и др., 2018] приведена площадь озера 10 тыс. м², но озеро отнесено к категории селеопасных, и это оправдалось. В 2019 г. прорыв озера повторился. Площадь озера 15 июля составляла 37,5 тыс. м² (рис. 3д), а к 9 августа уменьшилась до 28 тыс. м² (рис. 3е). Это произошло в результате работ по искусственному опорожнению озера (<http://almaty.emer.gov.kz/index.php?id=4271>). В итоге селевой поток 14 августа был значительно меньших масштабов и имел характер наносоводного паводка.

По результатам исследований определено, что прорывы озёр в верховьях р. Каргалы происходят по подземным каналам каменного глетчера протяжённостью более 1 км (рис. 3ж, №3). Ледник, питающий озеро, имеет площадь около 0,95 км².

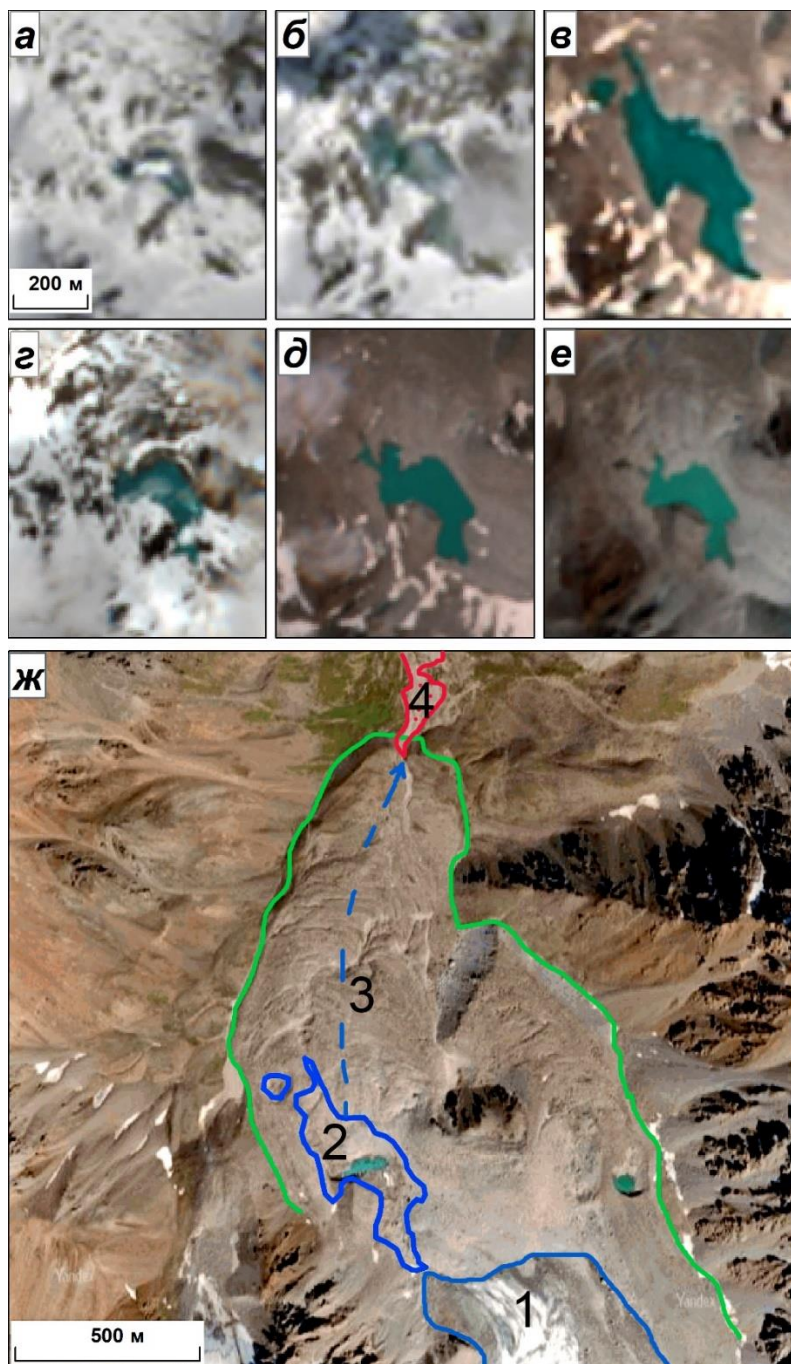


Рис. 3. Прорывы озера в верховьях р. Каргалы (Кзахстан) в 2015 и 2019 гг. Участок озёр на каменном глетчере на космоснимках Sentinel 2A: а – 15.05.2015, б- 16.06.2015, в – 11.07.2015, г – 05.06.2019, д – 15.07.2019, е – 09.08.2019. Схема участка подземных прорывов озера: ж (12.08.2012 Google Earth) – 1) ледник, 2) контур озера в 2015 г., 3) каменный глетчер (светло-зелёная линия) и подземный канал стока с озера (синяя штриховая линия), 4) участок выходного портала подземного канала стока и селевые отложения (красный контур)

Fig. 3. Lake outburst in the upper reaches of the Kargaly River (Kaskelen River basin, Kazakhstan) in 2015 and 2019. Site with lakes on rock glacier on multi-temporal Sentinel-2A satellite images: а - 15 May 2015, б - 16 June 2015, в - 11 July 2015, г - 5 June 2019, д - 15 July 2019, е - 9 August 2019. Scheme of the site with lake underground outbursts on the satellite image from the Google Earth service, 12 August 2012 (ж): 1 - glacier, 2 - lake contour in 2015, 3 - rock glacier (green line) and underground runoff channel from the lake (blue bar line), 4 - site of the underground runoff channel and debris flow deposits (red contour)

Прорыв озера в верховьях р. Даштдара 7 августа 2002 г. (Таджикистан)

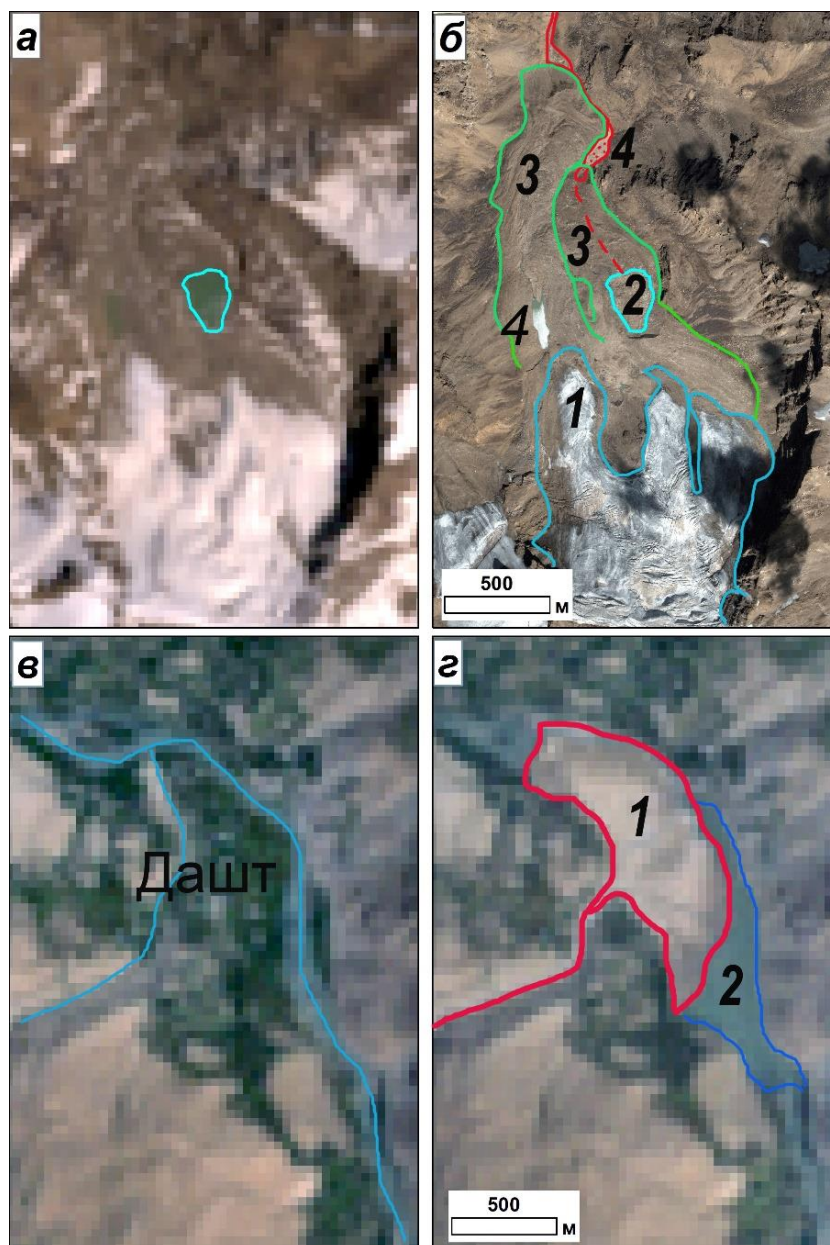


Рис. 4. Прорыв озера Дашт на Памире в 2002 г. (Таджикистан): *а* – контур озера на космоснимке Landsat 7 от 05.08.2002 г., *б* – схема участка прорыва озера (космоснимок 31.08.2008 г. Google Earth): 1 – ледник, 2 – котловина прорвавшегося озера, 3 – каменный глетчеры, красная штриховая линия – подземный канал стока, красная сплошная линия – путь прорывного паводка и селевого потока с участками промежуточной аккумуляции; *в* – кишлак Дашт на космоснимке Landsat 7 от 05.08.2002 г., *з* – конус выноса селя (1) на участке кишлака Дашт и подпрудное озеро на р. Шахдара (2) на космоснимке Landsat 7 от 21.08.2002 г.

Fig. 4. Lake outburst in the upper reaches of the Dashtdara River (Shakhdara River basin, Tajikistan) on 7 August 2002: *a* - contour of the lake before the outburst (Landsat-7 satellite image, 5 August 2002); *б* - scheme of the lake outburst site (satellite image from the Google Earth service, 31 August 2008): 1 - glacier, 2 - basin of the emptied lake, 3 - rock glacier below lake, 4 - existing lake, red bar line - underground runoff channel, red solid line - way of the outburst flood and debris flow with areas of intermediate accumulation; *в* - Dasht village (Landsat-7 satellite image, 5 August 2002); *з* - debris flow fan (1) in Dasht village and dammed lake at Shakhudara River (2) (Landsat-7 satellite image, 21 August 2002)

На рис. 4 показано состояние озера и каменного глетчера в верховьях р. Даштдара и кишлака Дашт на конусе выноса до и после прорыва. В результате прорыва озера и прохождении селевого потока практически полностью уничтожен кишлак Дашт и частично пострадал кишлак Лангар. Погибли 24 человека, разрушено 75 домов. Кроме того, уничтожены 2 моста, медпункт, магазин, средняя школа, библиотека, клуб, 2 животноводческие фермы, 510 голов скота, 4 км автомобильной дороги, 30 км линий электропередач, 8 трансформаторов, 7 км линий связи, 10 км оросительных сооружений, 61 га посева зерновых культур, 17 единиц техники (<https://ria.ru/20020807/204214.html>).

О селевой катастрофе в кишлаке Дашт в 2002 г. сообщалось в публикациях [Пирмамадов, 2013; Komatsu, Watanabe, 2013; Mergili, Schneider, 2011]. Данные о динамике озера за период 1968-2008 приведены в работе [Komatsu, Watanabe, 2013]. По этим данным площадь озера в 1968 г. составляла 7,0 тыс. м², в 1973 г. – 15,0 тыс. м², в 1983-84 гг. – 20,0 тыс. м², в 2002 г. – 32,0 тыс. м².

Отмечено, что восточное озеро было расположено на массиве морены с ледяным ядром и являлось термокарстовым. Появление вновь в 2000 г. и увеличение восточного озера в 2002 г. до 37 тыс. м² по мнению авторов статьи [Mergili, Schneider, 2011] было связано с блокировкой подземного канала стока в морене с ледяным ядром, а прорыв – с разблокировкой подземного канала. В работе [Пирмамадов, 2013] причиной прорыва озера названо падение блока льда в озеро.

На приведённых в статье фрагментах снимков видно, что по крайней мере с 1992 г. по настоящее время западное озеро, которое прорвалось в 2002 г. (рис. 4б, №2) существует площадью 12,0 тыс. м² (рис. 4б, №4), с которого на протяжении 250 м существует поверхностный сток. Западное озеро в отличие от прорвавшегося (восточного) озера не меняется в размерах уже более 15 лет.

Так как на уступе каменного глетчера ниже западного озера существуют следы эрозионных воронок, можно предположить, что были прорывные паводки и по подземному каналу стока с западного озера.

По результатам дешифрирования космоснимков получены следующие данные:

- 1) часть ледника, питавшая озеро, имела площадь 0,6 км²,
- 2) до прорыва озеро имело площадь 44 тыс. м² (определена по космоснимку Landsat 7 от 05.08.2002 г. (рис. 4а) и сопоставлению с границами котловины, которые видны на космоснимке 31.08.2008 г. Google Earth (рис. 4б, №2),
- 3) длина подземного канала стока, по которому произошёл прорыв озера, составляет 680 м,
- 4) ниже выходного портала подземного канала происходила подрезка фронтального уступа левого каменного глетчера,
- 5) на конусе выноса р. Даштдара площадь селевых отложений составила более 0,36 км² (рис. 4з, №1),
- 6) на р. Шахдара в результате схода селя образовалось подпрудное озеро площадью 0,11 км² (рис. 4з, №2).

Прорывы озера в верховьях р. Сарын-Су (бассейн р. Чегем, Кабардино-Балкария, Россия)

По данным сравнения аэрофотоснимков и космоснимков выявлено два случая значительного увеличения площади озера в тыловой депрессии каменного глетчера в верховьях р. Сарын-Су (рис. 5). Максимальный размер озера зафиксирован на космоснимке SPOT 5 31.07.2007 г. (рис. 5д) – 36,7 тыс. м² и на аэрофотоснимке 09.08.1978. Так как значительных изменений в русле реки ниже каменного глетчера на снимках в последующие годы не выявлено, можно предположить, что масштабы прорыва были невелики. Протяжённость подземного канала стока в каменном глетчере составляет 880 м. В настоящее время сток с ледника происходит в другом направлении (часть ледника, обращённая к озеру, растаяла) и озеро питается за счёт таяния снега и

атмосферных осадков. В связи с этим вероятность заполнения котловины водой уменьшилась.

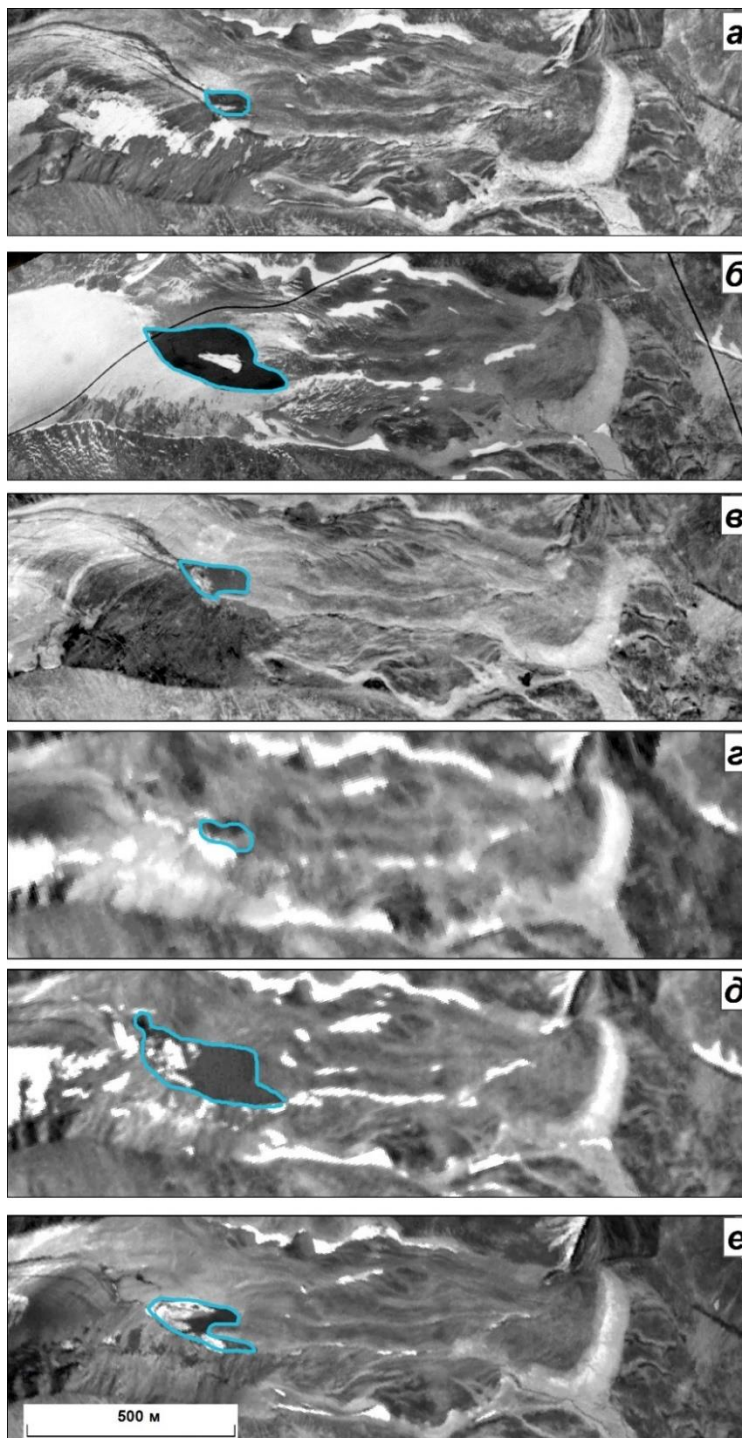


Рис. 5. Динамика озера в верховьях р. Сарын-Су на Кавказе (бассейн р. Чегем, Россия): *a* – аэрофотоснимок 08.09.1973 г., *б* – аэрофотоснимок 09.08.1978 г., *в* – аэрофотоснимок 1983 г., *г* – космоснимок IRS ID от 11.08.2006, *д* – космоснимок SPOT от 5 31.07.2007 г., *е* – космоснимок IRS P5 от 29.08.2009 г.

Fig. 5. Dynamics of the lake in the upper reaches of the Saryn-Su River (Chegem River basin, Russia): *a* - aerial image, 8 September 1973; *б* - aerial image, 9 August 1978; *в* - aerial image, 1983; *г* - IRS-ID satellite image, 11 August 2006; *д* - SPOT-5 satellite image, 31 July 2007; *е* - IRS-P5 satellite image, 29 August 2009. Designations: blue outline - lake

Прорыв озера Маашей в долине р. Мажой (бассейн р. Чуя, Алтай, Россия) в 2012 г.

В работах [Докукин, 2014; Докукин, 2015] приведены данные о прорыве озера Маашей вследствие блокировки подземного канала стока воды из озера в теле каменного глетчера. На рис. 6 показана схема участка прорыва. Подземный канал имел длину 440 м (рис. 6а, №3).

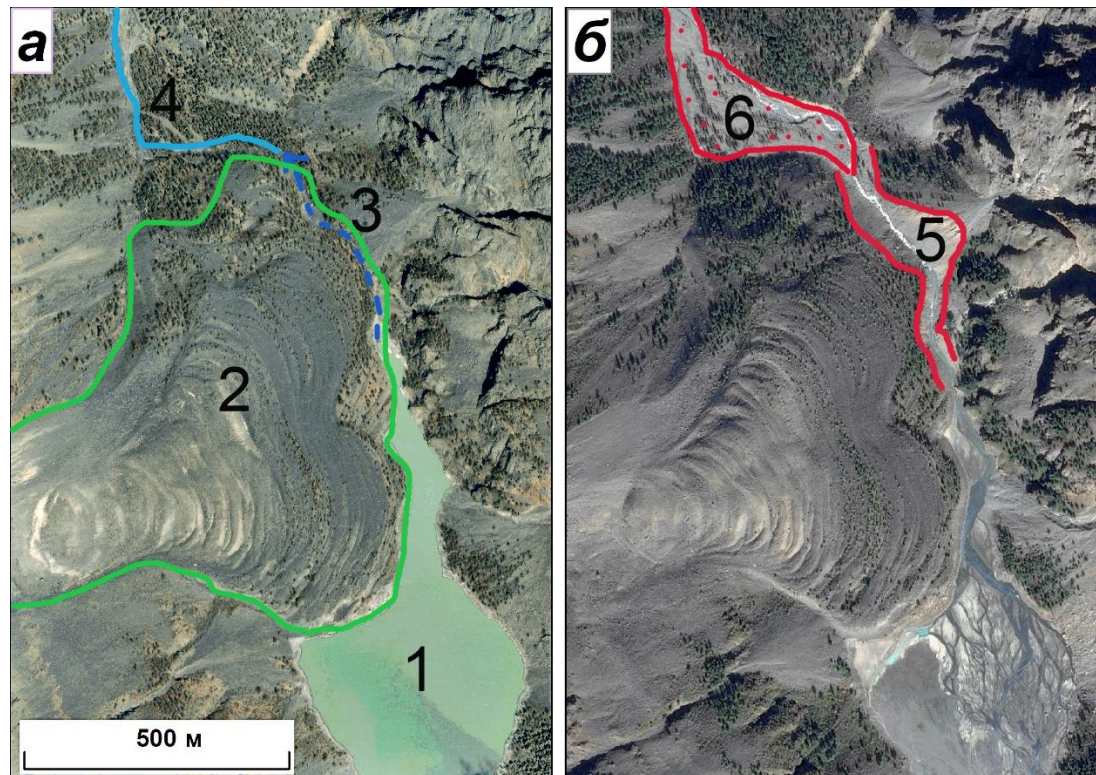


Рис. 6. Озеро Маашей на Алтае до и после прорыва на космоснимках Google Earth: *а* – 30.05.2002, *б* – 02.09.2013. 1 – озеро Маашей, 2 – каменный глетчер (контур зелёной линии), 3 – подземный канал стока, 4 – поверхностный сток с озера, 5 – эрозионный врез от прорыва озера, 6 – селевые отложения.

Fig. 6. Maashey Lake (Chuya River basin, Russia) before and after the outburst on multi-temporal satellite images from the Google Earth service: *a* - 30 May 2002; *б* - 2 September 2013. 1 - Maashey Lake, 2 - rock glacier (green line), 3 - underground runoff channels, 4 - surface runoff from the lake, 5 - erosion incision from the lake outburst, 6 - debris flow deposits

В отличие от других прорывов озёр, происходивших по подземным каналам стока, озеро Маашей прорвалось в результате размыва тела каменного глетчера на его поверхности водным потоком, сформировавшимся после аномальных ливней. Деформация подземного канала стока, существовавшего более 100 лет, произошла вследствие подвижки каменного глетчера (рис. 6а, №2).

По результатам исследований прорывов озёр на участках каменных глетчеров составлена таблица параметров (таблица).

В качестве основных выводов исследования случаев прорыва озёр на каменных глетчерах можно отметить, что:

- 1) большую часть времени озёрные котловины оставались пустыми, и их заполнение происходило в начале тёплого сезона в год прорыва, что позволяет выявить опасность прорыва озера заблаговременно;
- 2) озёра с плотинами каменных глетчеров, как озеро Маашей, могут существовать десятки и сотни лет;
- 3) котловина озера может опорожняться не сразу на полную глубину,

- 4) опорожнение озёрной котловины может происходить без прорывного паводка,
- 5) котловины озёр могут заполняться и прорываться несколько раз с промежутком в несколько лет,
- 6) в будущем озёра могут появляться на участках каменных глетчеров, где они раньше не были зафиксированы, что обуславливает необходимость мониторинга каменных глетчеров и оценки параметров рельефа котловин, как вместилищ озёр.

Таблица. Параметры озёр и подземных каналов стока

Table Lake and underground channels parameters

№	Горный район, страна	Название реки, (бассейн реки)	Координаты озера	Год прорыва	Абс. высота, м	Площадь озера до прорыва, тыс. м ²	Длина подземного канала, м	Угол наклона подземного канала, градус	Расстояние до устья притока (конуса выноса), м
1	Алтай, Россия	Мажой, Чуя	N50°09'11,06" E87°34'04,56"	2012	1984	286,4	440	4,4	10700
2	Иле Алатау, Казахстан	Каргалы	N43°00'25,08" E76°50'51,34"	2015, 2019	3510	77,2 (37,2)	1170	7,5	18000
3	Памир, Таджикистан	Даштдара, Шахдара	N37°13'13,75" E71°44'01,65"	2002	4390	44,6	680	9,6	10700
4	Гиндукуш, Афганистан	Шаркин, Санглед	N36°22'50,54" E71°07'40,47"	2014, 2018	4640	47,2	1520	7,2	12400
5	Гиндукуш, Афганистан	Даррагари, Панджшер	N35°28'12,48" E69°37'40,46"	2018	4450	62,6	1550 (1000)	14,3	13600
6	Кавказ, Россия	Сарын-Су, Чегем	N43°16'05,59" E42°58'33,49"	1978, 2007	3540	36,7	880	10,3	7700

Селепроявления на фронтальных уступах каменных глетчеров

В целом каменные глетчеры являются устойчивыми образованиями, существующими в таком виде тысячи лет.

В работе [Lugon, Stoffel, 2010] каменный глетчер в долине р. Ритиграбен (бассейн р. Маттерталь, Швейцария) охарактеризован как селевой очаг и приводятся данные о скорости движения фронтальной части каменного глетчера 0,7–0,8 м в год (скорость увеличилась в последние годы в 3 раза), об объёмах выноса с каменного глетчера, аккумулировавшихся на конусе выноса р. Ритиграбен 15–30 тыс. м³.

Сравнение современных космоснимков показало, что на некоторых уступах каменных глетчеров наблюдается формирование оплывин и селевых рытвин. На рис. 7 показаны изменения на уступе каменного глетчера в верховьях левого притока р. Башиль-Аузу-Су (бассейн р. Чегем, Кабардино-Балкария) после селя в 2016 г.

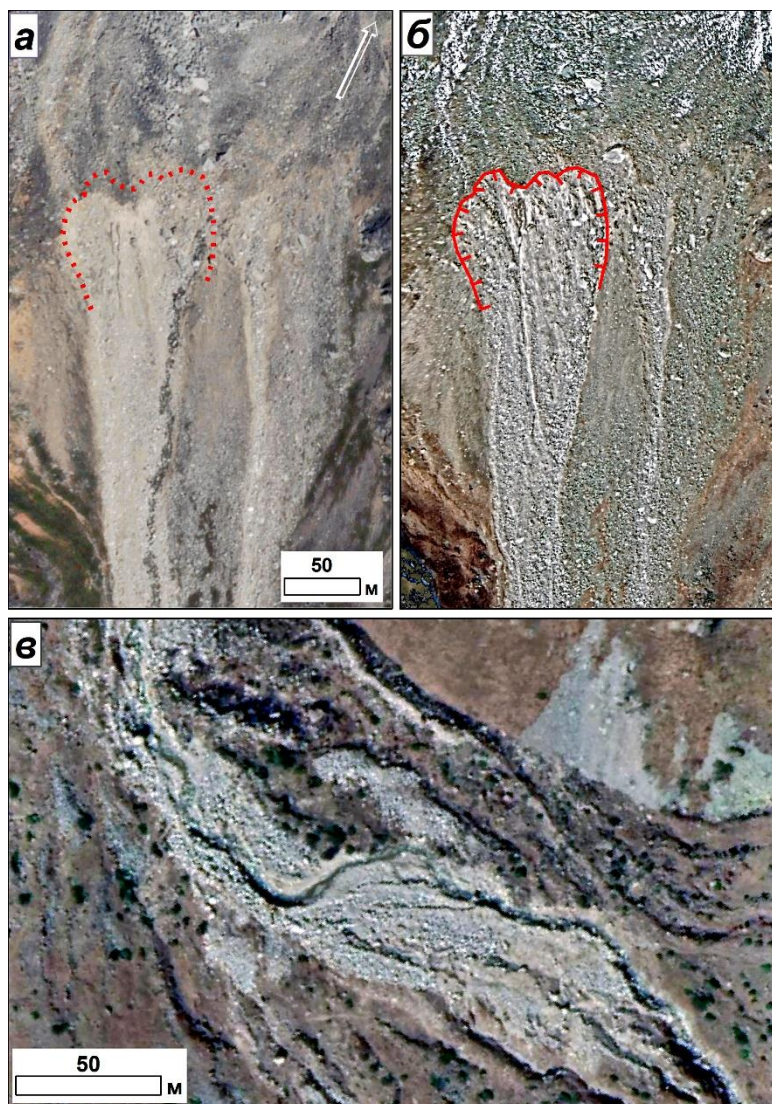


Рис. 7. Селевые рытвины, появившиеся на фронтальном уступе каменного глетчера в верховьях левого притока долины р. Башиль-Аузу-Су (бассейн р. Чегем, Кабардино-Балкария): *а* – космоснимок WorldView2 (Bing Maps) от 08.31.2010 г. (пунктирной линией показана будущая бровка селевых рытвин), *б* – космоснимок от 17.10.2019 г. (Google Earth) (красной линией показана общая бровка нескольких селевых рытвин), *в* – отложения селя, сошедшего с каменного глетчера в 2016 г. (космоснимок от 17.10.2019 г. (Google Earth))

Fig. 7. Debris flow gullies that formed at the frontal ledge of the rock glacier in the upper reaches of the Bashil-Auzu-Su River (Chegem River basin, Russia) left tributary: *a* - WorldView-2 satellite image (Bing Maps), 31 August 2010 (red dotted line shows future edge of the debris flow gullies); *б* - satellite image from the Google Earth service, 17 October 2019 (red line shows the common edge of some debris flow gullies), *в* - deposits of the debris flow that came down from the rock glacier in 2016, (satellite image from the Google Earth service, 17 October 2019)

Протяжённость уступа каменного глетчера с обвально-осыпным шлейфом с учётом среднего угла наклона 32° составляет около 400 м. Бровка каменного глетчера вследствие образования рытвин отступила на 12-15 м (рис. 7б). Рытвины были неглубокие. Приблизительный объём отложений на конусе выноса составил около 10–12 тыс. м³ (рис. 7в).

В последние годы усилились процессы деградации мерзлоты, и происходит активизация формирования оплывин на их фронтальных уступах. Примером таких событий являются катастрофические селевые потоки в поселке Аршан Тункинского района республики Бурятия 28 июня 2014 г. [Макаров и др., 2014]. Во всех работах,

посвящённым этому событию, массивы, в которых формировались селевые потоки, не характеризовались как каменные глетчеры, хотя есть все признаки отнести их к каменным глетчерам. На рис. 8а, б показаны селепроявления на уступе каменного глетчера в истоках р. Вторая Шихтолайка бассейна р. Кынгарга в Бурятии (для сравнения приведен участок фронтального уступа каменного глетчера на Кавказе – левый склон долины р. Черек Безенгийский) (рис. 8в, г).

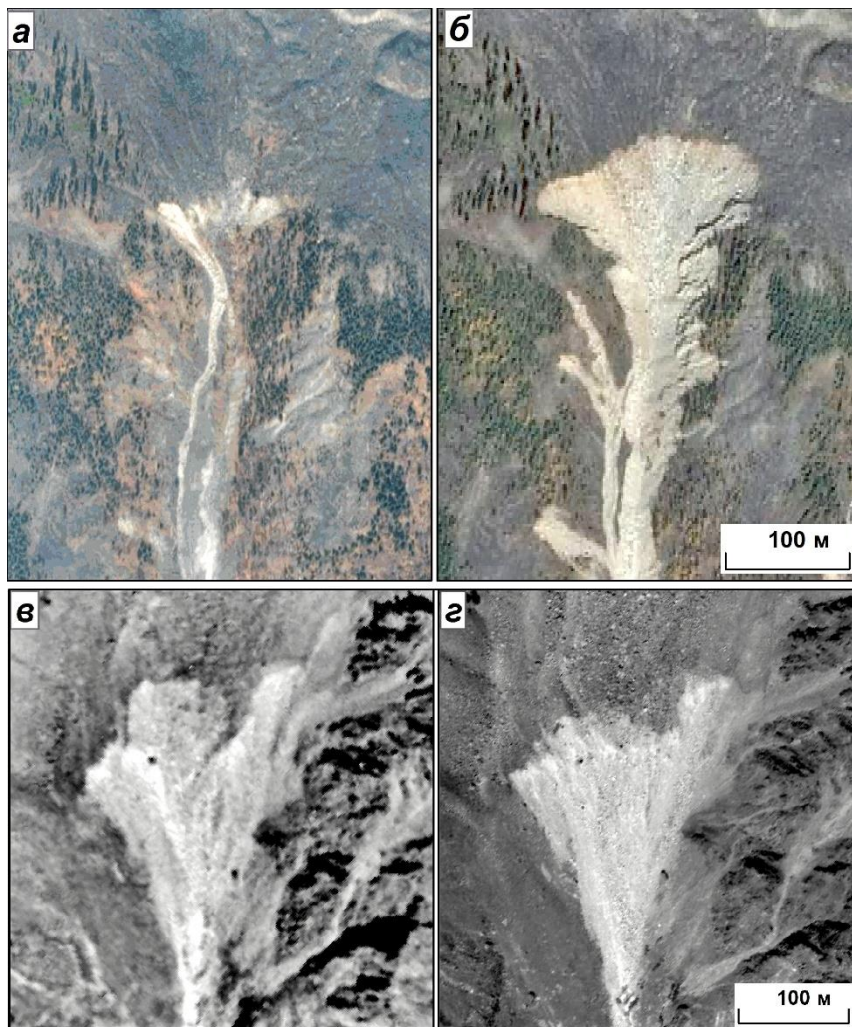


Рис. 8. Ниши оплывин на уступах каменных глетчеров на космических снимках и аэрофотоснимках в истоках р. Вторая Шихтолайка (Бурятия): а – 31.08.2013 (Google Earth), б – 26.09.2016 (Google Earth); на левом склоне долины р. Черек Безенгийский: в – аэрофотоснимок 1957 г., г – космоснимок WorldView1 от 31.08.2010.

Fig. 8. Earthflow niches on ledges of the rock glaciers in the sources of the Second Shikhtolaika River (Kynrgarga River basin, Tunka Ridge, Russia): а - satellite image from the Google Earth service, 31 August 2013; б - satellite image from the Google Earth service, 26 September 2016 and on the left slope of the Cherek Bezengiyskiy River valley (Cherek River basin, Caucasus, Russia); в - aerial image, 1957; г - WorldView-1 satellite image, 31 August 2010

Объём отложений селя 2014 г. на р. Вторая Шихтолайка составил 720 тыс. м³ [Макаров и др., 2014]. Сели 2014 г. на склонах хребта Тункинские гольцы были вызваны ливнями, которые не оценены количественно, так как метеостанция Аршан была закрыта в 1997г. Подобные процессы в 1962 г. проходили вследствие выпадения 176,6 мм осадков за 16 и 17 июля.

Анализ изменений на уступе каменного глетчера на склоне долины р. Черек Безенгийский показал, что ниша отрыва оплывины селя, сошедшего до 1957 г.,

постепенно заполняется наступающей массой каменного глетчера. Скорость наступания по данным смещения крупных глыб составила 0,7-0,8 м/год. Предположительно, в связи с этим селевая опасность каменного глетчера со временем повышается. Массовый сход селей с уступов каменных глетчеров был отмечен после ливней 1983 г. в бассейне р. Чегем в Кабардино-Балкарии [Докукин, 1987; Сейнова, Мезенина, 1987]. И в будущем возможны селевые потоки, подобные событиям 2014 г. в бассейне р. Кынгарга.

В результате анализа динамики каменных глетчеров и селепроявлений в них можно сделать вывод о том, что при выпадении аномальных атмосферных осадков на участках уступов глетчеров в будущем возможны катастрофические селевые потоки, превышающие по объёму выноса, ранее зафиксированные в XX веке.

Список литературы

- Бруханда В. И. (1976). Каменные глетчеры Кавказа и Памиро-Алая и их связь с пульсациями ледников. // *Материалы гляциологических исследований*, вып. 27: 63–70.
- Володичева Н. А., Лабутина И. А. (1996). Каменные глетчеры Приэльбрусья. *Материалы гляциологических исследований*, вып. 80: 98–102.
- Галанин А. А. (2009). Каменные глетчеры северо-востока Азии: строение, генезис, возраст, системный географический анализ. *Криосфера Земли*, т. XIII. № 4: 49–61.
- Горбунов А. П. (2006). Каменные глетчеры Азии за пределами России. // *Криосфера Земли*, т. X. № 4: 19–28.
- Докукин М. Д. (1987). Каменные глетчеры Центрального Кавказа как селевые очаги. *Труды Высокотермического геофизического института*, вып. 70: 33–42.
- Докукин М. Д. (1993). Типы моренного рельефа и селевая опасность: (На примере сев. склона Центрального Кавказа): автореферат дисс. кандидата географических наук: 11.00.04 / МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва. 22 с.
- Докукин М. Д. (2014). Выдающиеся прорывы озёр в 2012–2013 гг. (по материалам ДЗЗ). *Сборник трудов Северо-Кавказского института по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства*. Пятигорск, вып. 20: 82–97.
- Докукин М. Д. (2015). Выдающиеся прорывы озёр в 2012–2013 гг. (по материалам ДЗЗ). Часть 2. *Сборник трудов Северо-Кавказского института по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства*. Пятигорск, вып. 21: 41–58.
- Капица В., Шахгеданова М., Усманова З., Северский И., Благовещенский В., Касаткин Н., Мишенин В., Ребров Ю., Голенко А. (2018) Ледниковые озера Иле (Заилийского) Алатау: состояние, современные изменения, вероятные риски. *Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита*. Труды 5-й Международной конференции, Тбилиси: 357–366.
- Краснослободцев И. С. (1971). О каменных глетчерах Большого Кавказа. *Вестн. МГУ. Сер. 5. География*, № 1: 95–97.
- Кожевников А. В., Никитин М. Ю., Лян Р. Н. (1980). Каменные глетчеры Горного Дагестана (Восточный Кавказ). *Вестник Московского университета*, т. 4. № 2: 14–26.
- Макаров С. А., Черкашина А. А., Атутова Ж. В., Бардаш А. В., Воропай Н. Н. (2014). Катастрофические селевые потоки, произошедшие в поселке Аршан Тункинского района Республики Бурятия 28 июня 2014 г. Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. 111 с.
- Медеу А. Р., Баймолдаев Т. А., Киренская Т. Л. (2016). Селевые явления Юго-Восточного Казахстана. Т. 4. Ч. 1. *Антология селевых явлений и их исследования*, Алматы: 576 с.
- Пирмамадов У. Р. (2013). Селевые потоки в результате прорывов высокогорных гляциальных озер на территории Горно-Бадахшанской автономной области Таджикистана (из опыта работ международной организации "Фокус гуманитарная помощь"). *Геориск*. №2: 20–23.
- Сейнова И.Б., Мезенина Т.Н. (1987). Каменные глетчеры – очаги гляциальных селей в бассейне р. Чегем. *Материалы гляциологических исследований*, т. 60: 179–183.
- Тавасиев Р.А. (2011а). Каменные глетчеры восточного склона горы Кайджаны как очаги зарождения селевых потоков (Казбеко-Джимарайский массив). // *Горные регионы: XXI век: Сборник научных трудов Сев.-Осет. гос. ун-та им. К.Л. Хетагурова, Владикавказ*. Изд. СОГУ: 331–340.
- Тавасиев Р.А. (2011б). Каменные глетчеры Северной Осетии и их значение для устойчивого развития горных территорий. // *Вестник Владикавказского научного центра*, № 3: 48–54.

- Erokhin S. A., Zaginaev V. V., Meleshko A. A., Ruiz-Villanueva V., Petrakov D. A., Chernomorets S. S., Viskhadzhieva K. S., Tutubalina O. V., Stoffel M. (2018). Debris flows triggered from non-stationary glacier lake outbursts: the case of the Teztor Lake complex (Northern Tian Shan, Kyrgyzstan). // *Landslides*. 15: 83–98.
- Giardino J. R. (1983). Movement of ice-cemented rock glaciers by hydrostatic pressure: an example from Mount Mestas, Colorado // *Zeitschrift für Geomorphologie*. Bd 27. H. 3. S. 297–310.
- Haerberli W. (1985). Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. // *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. Eidgenössischen Technischen Hochschule Zurich*. Nr. 77. S. 142.
- Komatsu T., Watanabe T. (2013). Glacier-Related Hazards and Their Assessment in the Tajik Pamir: A Short Review // *Geographical Studies*. Vol. 88. No. 2. P. 117–131.
- Lugon R., Stoffel M. (2010). Rock-glacier dynamics and magnitude–frequency relations of debris flows in a high-elevation watershed: Ritigraben, Swiss Alps. *Global and Planetary. Change*. 73 (3–4): 202–200. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.06.004>
- Mergili M., Schneider J. F. (2011). Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS. // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11: 1447–1462, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/1447/2011/
- Petrakov D. A., Chernomorets S. S., Viskhadzhieva K. S., Dokukin M. D., Savernyuk E. A., Petrov M. A., Erokhin S. A., Tutubalina O. V., Glazyrin G. E., Shpuntova A. M., Stoffel M. (2018). Putting the poorly documented 1998 GLOF disaster in Shakhimardan River valley (Alay Range, Kyrgyzstan/Uzbekistan) into perspective. // *Science of the Total Environment*. Article 138287. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138287>



Гляциогеоморфологические условия формирования селей р. Герхожан-Су (Центральный Кавказ)

М.Д. Докукин¹, М.Ю. Беккиев¹, Р.Х. Калов¹, Е.А. Савернюк², С.С. Черноморец²,
Е.М. Богаченко³

¹Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, inrush@bk.ru

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия, savernyuk@gmail.com

³Кабардино-Балкарский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей
среды, Нальчик, Россия, kbmeteo.cgms@yandex.ru

Аннотация. Бассейн р. Герхожан-Су – один из самых селеактивных и селеопасных на Северном Кавказе. На основе анализа разновременной аэрокосмической информации, данных наземных и вертолётных наблюдений зона зарождения селей представлена как система моренных потенциальных селевых массивов и участков их взаимодействия с потоками талых ледниковых вод и дождевых паводков. В эволюции ледника Каяартыбаши выявлено два этапа, во время которых происходило формирование гляциальных паводков и селей вследствие прорывов внутриледниковых и подледниковых водоёмов – на участке левого ледникового цирка с высотой днища 3500-3600 м в начале 1960-х годов, и на участке верхнего ледникового цирка с высотой днища 3720-3800 м в начале 2000-х годов и в настоящий период. В моренных массивах разного генезиса и морфологии, образованных потоками льда с различными условиями питания льдом и обломками, вследствие таяния льда, заключённого в них, происходило разжижение рыхлообломочных масс с потерей устойчивости на участках откосов значительной протяжённости. При выпадении ливней, как в 1977 г., эти массы формировали селевые потоки гляциально-ливневого генезиса. Деформации участков склонов верхнего моренного каньона в сочетании с ливнями и без в настоящее время приводят к формированию селей небольших объёмов.

Ключевые слова: катастрофические сели, ледник, селевые очаги, моренные массивы

Ссылка для цитирования: Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С., Богаченко Е.М. Гляциогеоморфологические условия формирования селей р. Герхожан-Су (Центральный Кавказ). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 388–404.

Glaciogeomorphological conditions for the Gerkhozhan-Su River debris flow formation (Central Caucasus)

M.D. Dokukin¹, M.Yu. Bekkiev¹, R.Kh. Kalov¹, E.A. Savernyuk², S.S. Chernomorets²,
E.M. Bogachenko³

¹High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, inrush@bk.ru,

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, savernyuk@gmail.com

³Kabardino-Balkarian Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring,
Nalchik, Russia, kbmeteo.cgms@yandex.ru

Abstract. The Gerkhozhan-Su debris flow basin is one of the most active and dangerous in the North Caucasus. The data of different time aerospace information and ground and helicopter observations are analyzed. The debris flow origination zone is represented as a

system of moraine massifs and areas of their interaction with the flows of glacial meltwater and rainfall floods. Two stages of the Kayarta glacier evolution are revealed, when there were outbursts of intraglacial and subglacial reservoirs: 1) in the early 1960s at heights of 3500-3600 m, 2) at the beginning of the XXI century at heights of 3720-3800 m. These were periods of the formation of catastrophic glacial debris flows. Ice streams with different conditions for ice and debris feeding formed moraine massifs with different ice content. As a result of water saturation from the melting of ice contained in moraine massifs, these massifs were being liquefied and losing their stability at the areas of various length slopes. Debris flows of glacial-rain genesis, as a result of heavy rains, as it was in 1977, were formed in water-saturated moraine massifs. In recent years, small-volume debris flows have occurred due to deformations of slope sections of the upper moraine canyon under the impact of rain and without rain.

Key words: *catastrophic debris flows, glacier, debris flow origination sites, moraine massifs*

Cite this article: Dokukin M.D., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S., Bogachenko E.M. Glaciogeomorphological conditions for the Gerkhozhan-Su River debris flow formation (Central Caucasus). In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 388–404.

Введение

Река Герхожан-Су (правый приток р. Баксан, бассейн р. Терек) является одной из самых селеопасных и селеактивных на Северном Кавказе [Perov *et al.*, 2017]. Наиболее селеактивной является левая составляющая р. Герхожан-Су – р. Кая-Арты-Су, в верховьях которой находится зона зарождения катастрофических селей. Селевые потоки р. Герхожан-Су много раз наносили ущерб г. Тырнаузу. Разрушительными для г. Тырнауза были селевые потоки 1937, 1960, 1961, 1962, 1977, 1999, 2000, 2011, 2017 гг. Характеристика селей р. Герхожан-Су и условия их формирования во второй половине XX века изложены в работах [Герасимов, 1967; Герасимов, 1980; Докукин, 1987; Запорожченко, 2002; Золотарёв и др., 1982; Сейнова, Золотарёв, 2001, Тушинский и др., 1966; Флейшман и др., 1979]. Селевая катастрофа 2000 г. была самой крупной в истории. Материалы об этой катастрофе и её причинах опубликованы в работах [Запорожченко, 2002; Крыленко и др., 2004; Панов и др., 2001; Сейнова, Золотарёв, 2001; Черноморец, 2005]. Селевым потокам 2011 и 2017 гг. и сравнению их параметров с предыдущими селями посвящены работы [Докукин и др., 2012; Докукин и др., 2018]. Для оценки гляциогеоморфологических условий формирования селей составлялись карты и схемы [Герасимов, 1980; Докукин, 1987; Петраков и др., 2004; Тушинский и др., 1966]. Цель настоящей статьи – на основе анализа результатов наблюдений и дешифрирования аэрофотоснимков и космоснимков охарактеризовать гляциогеоморфологические условия формирования селей р. Герхожан-Су, их изменения во времени и современное состояние.

Материалы и методы

Исследования проведены на основе дешифрирования аэрофотоснимков и космических снимков, анализа фотографий и видеороликов вертолётных облётов и маршрутных обследований. Были использованы аэрофотоснимки 1957, 1973, 1975, 1978, 1983 и 1988 гг., космоснимки спутника Sentinel 2A (разрешением 10 м) за период 2015–2019 гг. с сайта <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>, космоснимки спутников IRS P5 от 29.08.2009 г. и SPOT 5 от 21.09.2011 г. (предоставлены ГК «СКАНЭКС»), Канопус В1 от 12.09.2017 г. (предоставлен НИЦ «Планета»), космоснимки с Интернет-ресурса Google Earth от 17.10.2019 г., 12.08.2019, 25.08.2018 г. Очень важными для

работы были видеоматериалы вертолётных съёмок 1999 и 2000 гг., фотографии М.Ю. Никитина 22.09.2000 гг., материалы международной экспедиции 2009 г., вертолётных облётов 1991, 2011, 2017 гг. и других лет, маршрутных обследований 80-х годов и периода 2000-2019 гг.

Аэрофотоснимки сканировались и затем привязывались в программе ArcGIS по опорным точкам к космоснимкам, которые были взаимоувязаны между собой в системе координат WGS84 в проекции UTM. Некоторые фотографии вертолётных облётов также ортотрансформировались (привязывались к космоснимкам). Для сравнения границ ледника и моренных массивов строились векторные слои, которые корректировались просмотром GIF-анимаций привязанных фотоматериалов.

Результаты исследований

Зона зарождения селей р. Герхожан-Су представляет собой систему селевых очагов – источников твёрдой и жидкой составляющей селей. Одним из важных компонентов этой системы является ледник Каярты (другие названия Каярта-Баши, Каяартыбаши, № 481 [Каталог ледников, 1970]). Его динамика повлияла на активность селевых процессов.

Динамика ледника Каярты и селеобразующие водные импульсы

По данным аэрофотоснимка 1957 г. и космоснимка Sentinel 2A от 28.08.2019 г. определена площадь ледников и её изменения за 62 года. На рис. 1 показаны контуры ледников в 1957 и 2019 гг. и границы языков ледников в разные годы. Площадь ледника в 1957 г. составляла 3,07 км². В то время был ещё ледник между западным и восточным языками, который имел площадь 0,07 км². К 2019 г. общая площадь оледенения сократилась на 1,1 км² (на 35%) и составила 1,99 км².

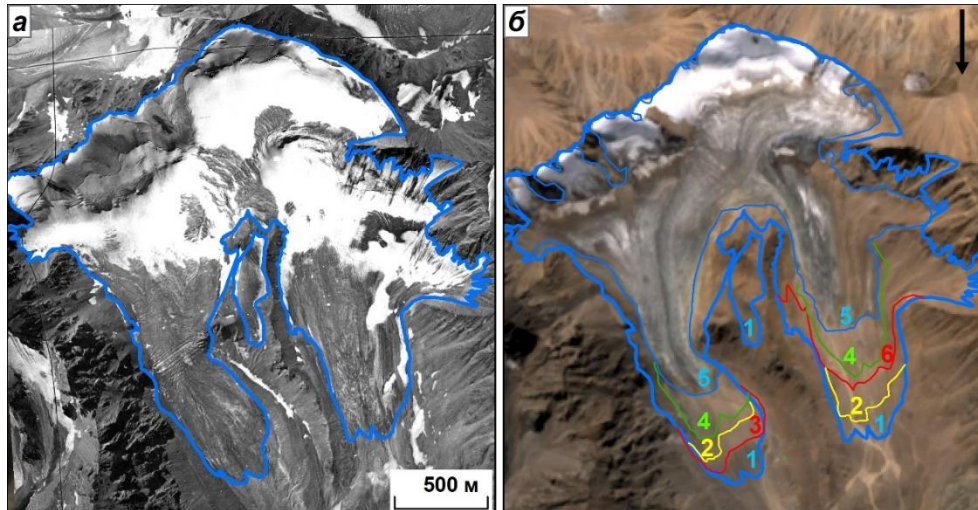


Рис. 1. Ледник Каярты (Каяартыбаши) в 1957-2019 гг.: а – аэрофотоснимок 16.08.1957 г.; б – границы ледника на космоснимке Sentinel 2A 28.08.2019 г.: 1 – 16.08.1957 г., 2 – 08.09.1973 г., 3 – в период 1988-2000 гг., 4 – 31.07.2007 г., 5 – 16.08.2019 г., 6 – 22.09.2000 г.

Fig. 1. Kayarta glacier (Kayaartybashi) in 1957-2019: а - aerial photograph of 08.16.1957; б - glacier boundaries in the Sentinel 2A satellite image on 08/28/2019: 1 - 08/16/1957, 2 - 09/08/1973, 3 - in the period 1988-2000, 4 - 07/31/2007, 5 - 16.08.2019, 6 - 22.09.2000

Для оценки динамики разных участков ледник был разделён на потоки льда, имеющие различные области питания (рис. 2). Выделено 4 потока, из которых поток III, начинающийся в верхнем цирке, раздваивается на потоки III₁ и III₂ в составе восточного и западного языков.

В период 1957-1973 гг. западный и восточный языки отступали синхронно со средней скоростью 12-18 м/год (восточный язык) и 6-11 м/год (западный язык). Ситуация изменилась в 70-х–90-х годах. Восточный язык ледника стал наступать. Величина наступания с 1973 г. до середины 90-х годов составила 85-115 м.

Самое низкое положение восточного языка ледника отмечено в период 1988-2000 гг. (граница №3 ледника на рис. 1, установленная по различию рельефа в предполье ледника на снимках 1988 и 2000 гг.). К 2000 г. ледник от самого низкого положения уже отступил на 50-80 м. Западный язык ледника за 1973-2000 гг. отступил на 170-145 м (5-6 м/год). Такие различия в динамике западного и восточного языков в работе [Золотарёв и др., 1982] объяснены следующим образом – уменьшение толщины льда привело к тому, что через подлёдный гребень в западном направлении поступало меньше льда, и основная его масса перетекала в восточном направлении. Этот подлёдный гребень (ригель) на рис. 2 отмечен под номером 2.

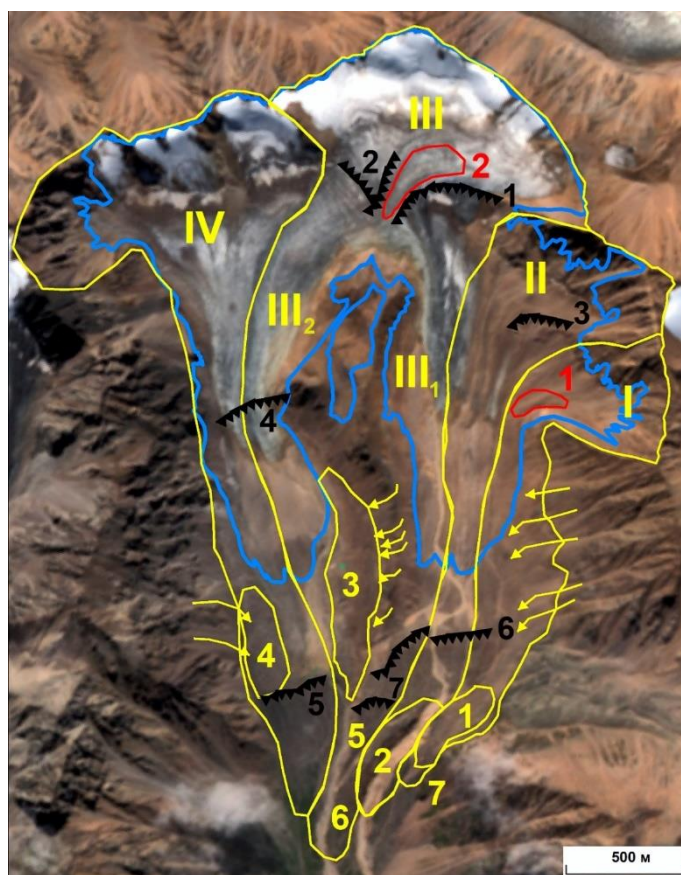


Рис. 2. Схема потоков льда и моренных массивов ледника Каярты (на космоснимке Sentinel 2A 28.08.2019): синий контур – границы ледника Каярты в 1957 г., красные контуры – предполагаемые участки аккумуляции талых ледниковых вод № 1-2, жёлтые контуры – ледниковые потоки № I-IV и моренные массивы № 1-7, чёрные зубчатые линии – ригели № 1-6, жёлтые стрелки – участки поступления обломочно-ледяных масс на поверхность потоков ледника

Fig. 2. Scheme of ice flows and moraine massifs of the Kayarta glacier (on the Sentinel 2A satellite image on 08/28/2019): blue contour - the boundaries of the Kayarta glacier in 1957, red outlines - supposed areas of accumulation of melted glacial waters No. 1-2, yellow outlines - glacial flows No. I-IV and moraine massifs No. 1-7, black jagged lines – riegels No. 1-6, yellow arrows - areas of inflow of ice-clastic masses on the surface of glacier flows

В XXI веке оба языка ледника стали отступать примерно в одном темпе. С 2007 по 2019 гг. восточный язык отступил на 235-180 м, а западный – на 250-230 м (потоки льда IV-III₂ и III₁-II соответственно). В это время сыграли роль подлёдные гребни (ригели)

№1 на рис. 2, так как толщина льда ещё уменьшилась, и ригели стали препятствием для оттока льда в восточном направлении.

Возможно, что такое соотношение высоты ригелей и толщины льда, а также поднятие высоты границы питания, способствовало тому, что, как отмечено в работах [Докукин и др., 2012; Докукин и др., 2018], в верхнем цирке ледника Каярты периодически в периоды интенсивной абляции накапливались большие объёмы воды, сброс которых становился причиной схода катастрофических селей в 1999, 2000, 2011 и 2017 гг. Участок аккумуляции талых ледниковых вод в верхнем цирке ледника Каярты на рис. 2 отмечен красной цифрой № 2.

Сопоставление условий аккумуляции талых ледниковых вод в верхнем цирке ледника Каярты в XXI веке с фактами схода селей в 1960, 1961 и 1962 гг. позволило сделать предположение о том, что в 60-х годах был аналогичный процесс. Это возможно происходило на участке левого цирка ледника на высотах 3500-3600 м (поток льда №1 на рис. 2). В течение трёх лет подряд происходило формирование устойчивой подлёдной дренажной сети из левого цирка, сопровождавшееся прорывами накопленных в леднике вследствие интенсивной абляции больших объёмов талых ледниковых вод. Предполагаемый участок аккумуляции талых ледниковых вод на рис. 2 отмечен красной цифрой №1. На рис. 3 показаны следы выхода предполагаемых водных импульсов с левого цирка у окончания западного языка ледника Каярты. Штриховой линией отмечено бывшее подлёдное русло.

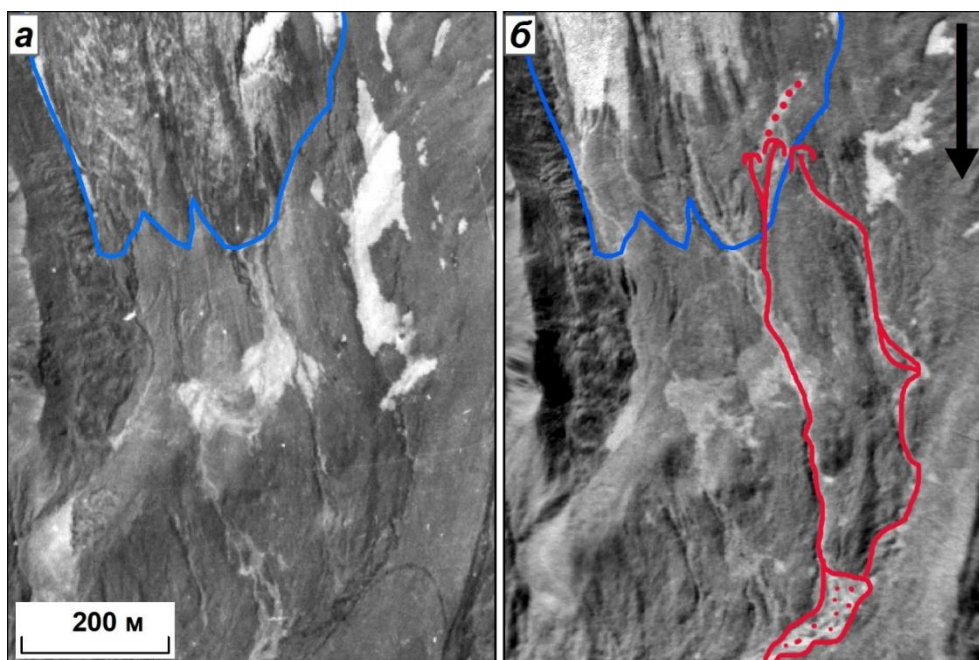


Рис. 3. Конец западного языка ледника Каярты и следы селей 60-х годов XX века на аэрофотоснимках: *a* – 16.08.1957 г., *б* – 08.09.1973 г.

Fig. 3. The end of the western tongue of the Kayarty glacier and traces of debris flows of the 60s of the XX century in aerial photographs: *a* - 08.16.1957, *б* - 09.08.1973

Примерно в эти же годы (в 1958, 1959 и 1960 гг.) произошло три прорыва озера Башкара по формировавшемуся тогда подлёдному каналу стока из озера в леднике Башкара.

Отличительной особенностью селей, сформировавшихся от водных импульсов с ледника, является минимальное отложение селевых масс на участке пролювиального поля ниже ледниково-моренного комплекса (рис. 4, фрагменты *б*, *д*, *е*) в отличие от селей 1977 г. (фрагмент *в*). В этом плане селевые потоки 2000 г. (фрагмент *з*) характеризуются

большей площадью отложений вследствие обрушения правого склона моренного каньона и прохождения многочисленных селей с меньшими расходами потоков.

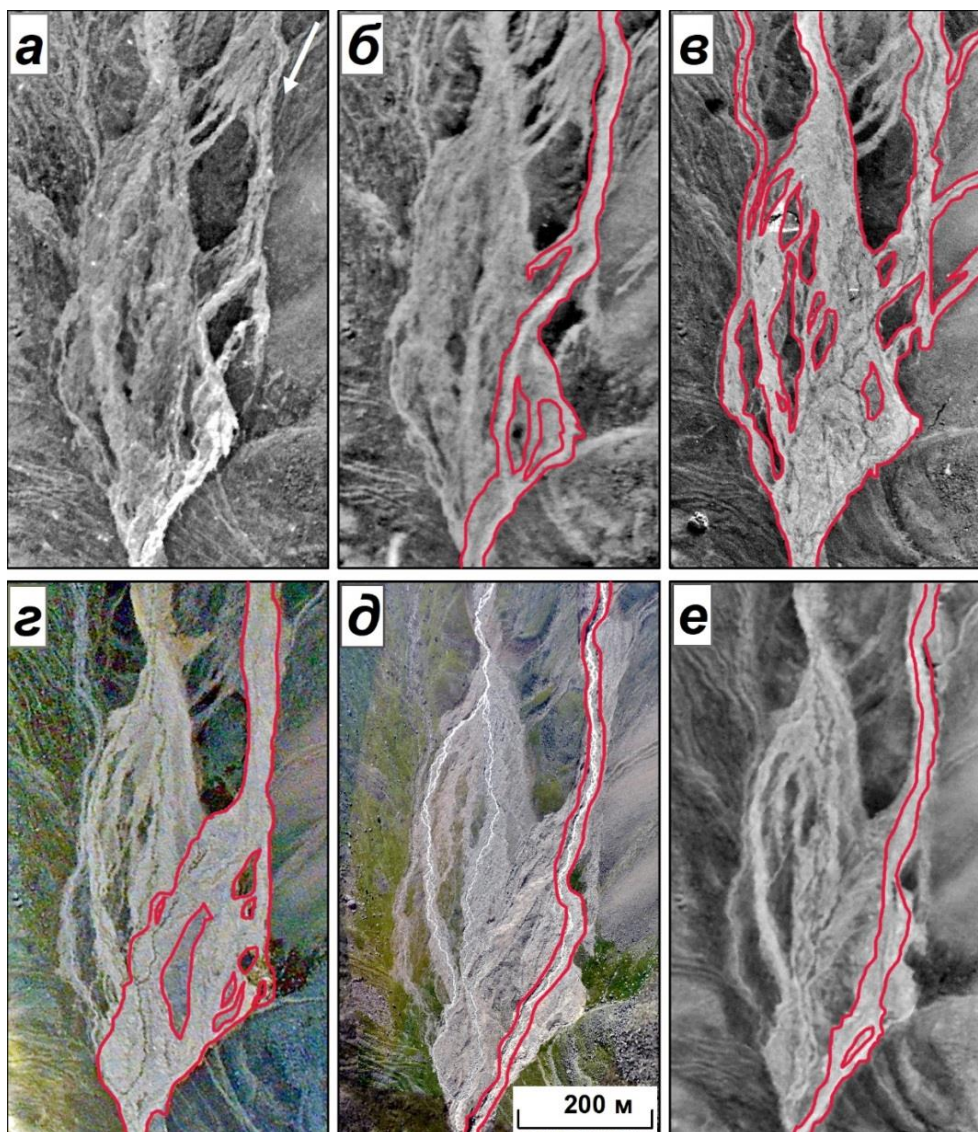


Рис. 4. Пролувиальное поле (участок промежуточной аккумуляции селевых потоков – слияние левого и правого истоков р. Кая-Арты-Су): *а* – 16.08.1957 г., *б* – 08.09.1973 г., *в* – 10.08.1978 г. (аэрофотоснимки), *г* – 22.09.2000 г. (вертолётный снимок Никитина М.Ю.), *д* – 15.08.2011 г. (вертолётный снимок Докукина М.Д.), *е* – 12.09.2017 г. (космоснимок Канопус В1). Зоны отложений селевого материала показаны красными контурами

Fig. 4. Proluvial field (area of intermediate accumulation of debris flows - confluence of the left and right sources of the Kaya-Arty-Su river): *a* - 08.16.1957, *б* - 09/08/1973, *в* - 08/10/1978 (aerial photographs), *г* - September 22, 2000 (helicopter image of Nikitin M.Yu.), *д* - August 15, 2011 (helicopter image of M.D. Dokukin), *е* - September 12, 2017 (satellite image of Kanopus V1). Areas of debris flow material deposition are shown with red outlines

Селевые процессы 1977 г. и динамика моренных массивов

Селевые потоки 1977 г. охарактеризованы в работах [Герасимов, 1980; Золотарёв и др. 1982; Флейшман и др., 1979]. Авторы проанализировали следы селей 1977 г. в результате сравнения аэрофотоснимков 1973, 1975 и 1978 гг. (рис. 5). Участок зарождения селей на схеме (рис. 2) относится к моренным массивам № 3 и 5.

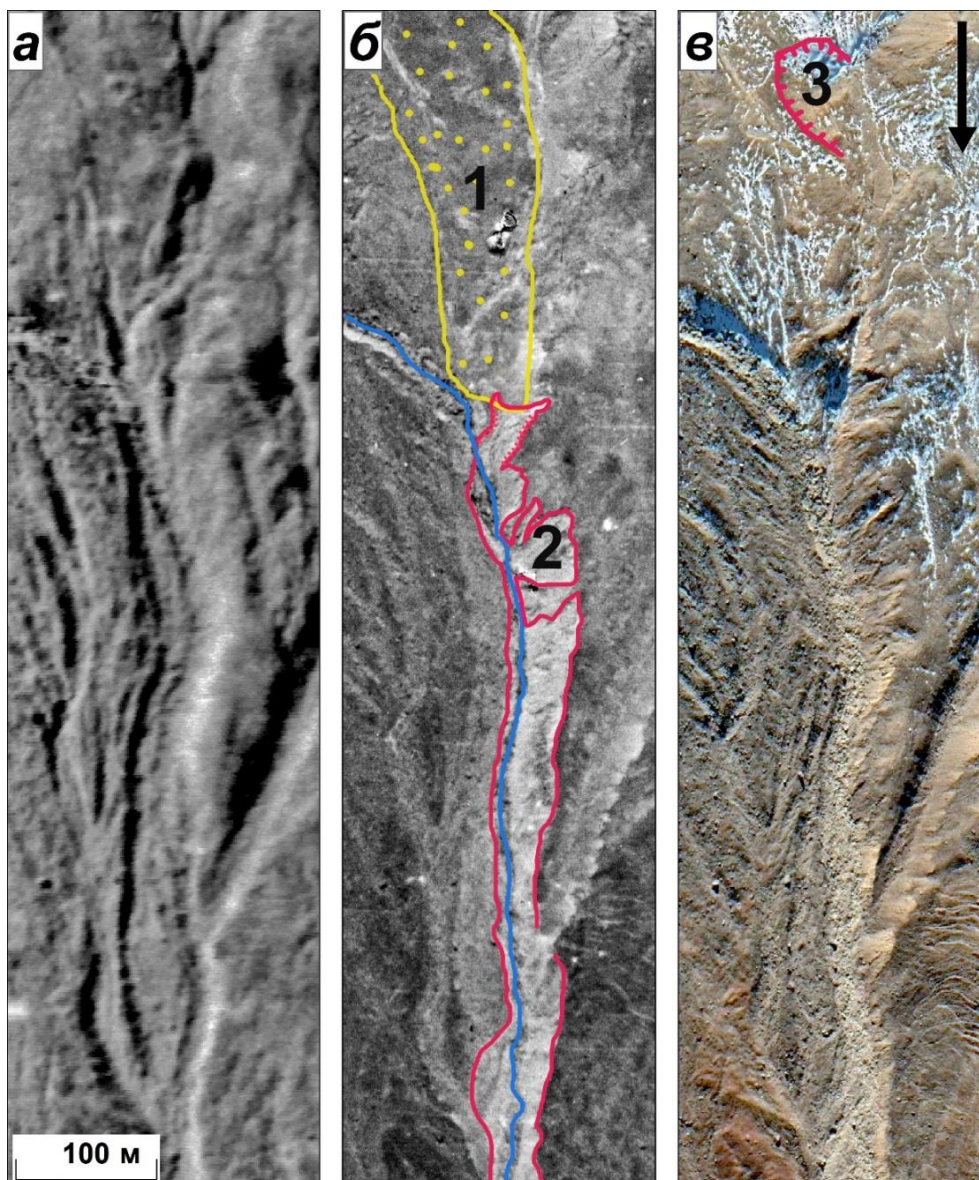


Рис. 5. Очаг селя 1977 г. (правая составляющая р. Кая-Арты-Су): а – аэрофотоснимок 08.09.1973 г., б – аэрофотоснимок 10.08.1978 г.: 1 – ледово-обломочный массив (№ 3 на рис. 2), 2 – участок массовых оплывин на левой береговой морене ледника Каярты (восточный язык, № 5 на рис. 2) и эрозионного углубления русла, в – космоснимок 17.10.2019 г. (Google Earth): 3 – термокарстовый провал

Fig. 5. The center of a debris flow 1977 (the right component of the Kaya-Arty-Su river): a - aerial photograph of 09/08/1973, б - aerial photograph of 08/10/1978: 1 - ice-clastic massif (No. 3 in Fig. 2), 2 - area of massive floods on the left coastal moraine of the Kayarta glacier (eastern tongue, No. 5 in Fig. 2) and erosional deepening of the channel, в - satellite image of October 17, 2019 (Google Earth): 3 - thermokarst dip

Моренный массив № 5 (рис. 2), на котором происходили многочисленные оплывины, обозначенные на рис. 5 под № 2, можно охарактеризовать как комплекс, образованный потоками III₁ и III₂ (рис. 2) в условиях наличия выступов коренного ложа (ригели № 6 и 7), осложнявших движение потоков. Под №1 на рис. 5 показано окончание массива террасовидной береговой морены (№ 3 на рис. 2) со следами наползания масс потока № III₁. Весь массив показан на рис. 6. На фрагменте аэрофотоснимка 1957 г. видны следы схода нескольких оплывин на участке шириной 120 м.

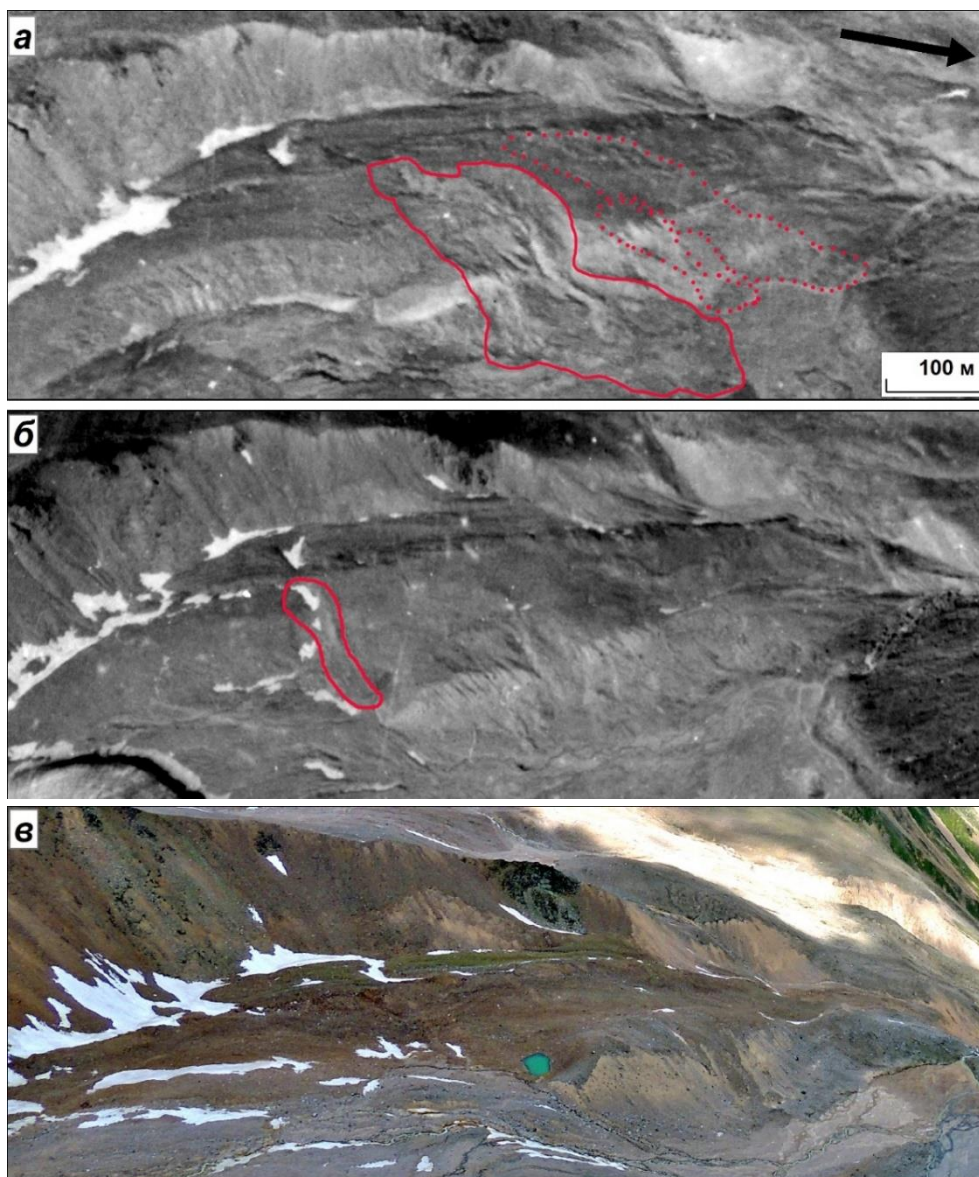


Рис. 6. Ледово-обломочный моренный массив (левая террасовидная береговая морена, № 3 на рис. 2) и следы схода опывин (красные контуры): *а* – аэрофотоснимок 16.08.1957 г., *б* – аэрофотоснимок 27.07.1988 г., *в* – 22.08.2017 г. (вертолётный снимок Докукина М.Д., без привязки к аэрофотоснимкам)

Fig. 6. Ice-clastic moraine massif (left terraced coastal moraine, no. 3 in Fig. 2) and traces of earthflows (red outlines): *a* - aerial photograph of August 16, 1957, *б* - aerial photograph of July 27, 1988, *в* - August 22 .2017 (helicopter image of Dokukin M.D., without reference to aerial photographs)

Массы опывин отложились на площади более 22 тыс. м². На аэрофотоснимке 1957 г. ниже обнаруживаются следы более старых опывин (оконтурены штриховой линией), массы которых могли быть плотиной водному потоку с восточного языка ледника и причиной формирования озера, которое, возможно, прорвалось в 1934 г. На последних снимках XXI века следы опывин уже слабо различимы – они размывы и занесены флювиогляциальными потоками с восточного языка ледника.

Относительно генезиса ледово-обломочного массива можно сделать предположение, что обломочная масса сгружалась на ледниковый поток Ш₂ в составе правой боковой морены потока Ш₁ через понижения в небольшом водораздельном гребне (показано жёлтыми стрелками на рис. 2). При этом захватывались склоновые отложения. Таким образом, формировалась двуслойная толща, содержащая в основании

лёд потока Ш₂, а в верхнем слое наложенную ледово-обломочную массу. Справа эта возвышающаяся над дном долины масса ограничена прислонённой грядой береговой морены потока Ш₂, выделяющейся на фрагменте *в* (рис. 6) светлым тоном.

Сложное взаимодействие потоков льда с ледово-обломочными массами в условиях значительных неровностей коренного рельефа (ригелей 5, 6, 7 на рис. 2) привело к тому, что моренный массив 5 имел морфологические признаки и береговой морены, и ледово-обломочной массы, и содержал в составе большие объёмы льда. Массовое формирование оплывин на участке № 5 в 1977 г. протяжённостью более 400 м было связано с таянием внутреннего льда и действием атмосферных осадков, и происходило подобно процессу на правой береговой морене ледника Чунгурчатчиран на севере Эльбруса, зафиксированному туристом М.В. Голубевым (рис. 7) в 2006 г. Само формирование нового короткого вреза в массиве № 5, отмеченное в работе [Золотарев и др., 1982], предположительно было обусловлено выбросом грязекаменной массы из массива № 3, на поверхности которого развиты термокарстовые воронки (№3 на фрагменте *в* рис. 5).



Рис. 7. Следы схода оплывин на правой береговой морене ледника Чунгурчатчиран (фото Голубева М.В., 2006 г.)

Fig. 7. Traces of the earthflows on the right coastal moraine of Chungurchatchiran glacier (photo M. Golubev, 2006)

В селевом процессе 1977 г. участвовал и ледниково-моренный комплекс в верховьях р. Сакашиль-Су – правой составляющей р. Герхожан-Су. На рис. 8 показаны изменения в массиве слившихся забронированных глетчеров с фронтальными уступами, расположенных ниже озера. В 1977 г. на фронтальном уступе массива забронированного глетчера образовались две свежие эрозионно-оползневые воронки шириной до 55 м у подножья которых отложились селевые массы на площади около 30 тыс. м². Так как на самой бровке уступа следов эрозионных размывов не было сделан вывод, что произошёл сброс грязекаменной массы из массива забронированного глетчера, внутрь которого поступали потоки воды с ледников.

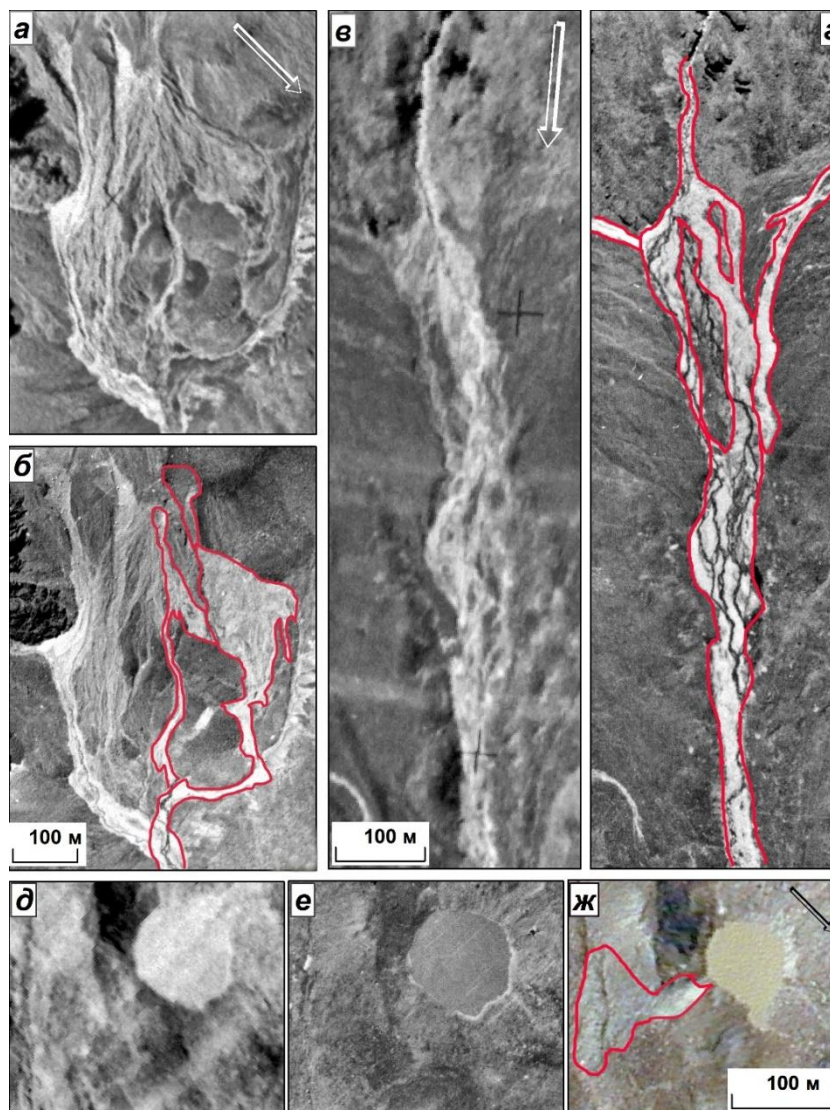


Рис. 8. Очаг селя 1977 г. в верхьях р. Сакашиль-Су на аэрофотоснимках: уступ ледниково-моренного комплекса (забронированного глетчера): *а* – 1975 г., *б* – 10.08.1978 г., дно долины р. Сакашиль-Су ниже коренной ступени рельефа: *в* – 1975 г., *г* – 10.08.1978 г., озеро на массиве забронированного глетчера: *д* – 1975 г., *е* – 10.08.1978 г., *ж* – 22.09.2000 г. (фото Никитина М.Ю.). Красные контуры – эрозионно-оползневые воронки и селевые отложения

Fig. 8. The center of the debris flow in 1977 in the upper reaches of the Sakashil-Su river on aerial photographs: the ledge glacial moraine complex (debris-covered glacier): *a* - 1975 *б* - 10.08.1978, at the bottom of the river valley Sakashil-Su below the ledge of relief: *в* - 1975, *г* - 08/10/1978, lake on the array of the debris-covered glacier: *д* - 1975, *е* - 08/10/1978, *ж* - 09/22/2000 (photo by Nikitin M.Yu.). Red outlines - erosion-landslide niches and debris flow deposits

При этом подтвердить подземный прорыв озера, расположенного выше на расстоянии 370 м от верха эрозионно-оползневой воронки, не представилось возможным, так как в 1978 г. озеро было в таких же размерах, как и в 1975 г. (рис. 8*д*, *е*). Озеро уменьшилось позже. Это зафиксировано на фотографии М.Ю. Никитина 22.09.2000 г. (рис. 8*ж*). При этом прорыва озера не было. Произошло оползание стенки моренной котловины без следов потока ниже озера. В настоящее время сток с озера осуществляется по поверхностному каналу.

Ниже по долине р. Сакашиль-Су следы селевого потока продолжались непрерывно, что позволило сделать вывод о мощном выбросе грязекаменного потока, который не отложил полностью обломочный материал у подножья уступа, а продолжил

движение вниз по долине (рис. 8в, з). Возможно, этот селевой импульс способствовал единственному сходу селя вниз по долине до слияния с р. Кая-Арты-Су в XX и XXI веках.

Опыльины на моренном массиве и процессы в моренном каньоне западной составляющей р. Кая-Арты-Су

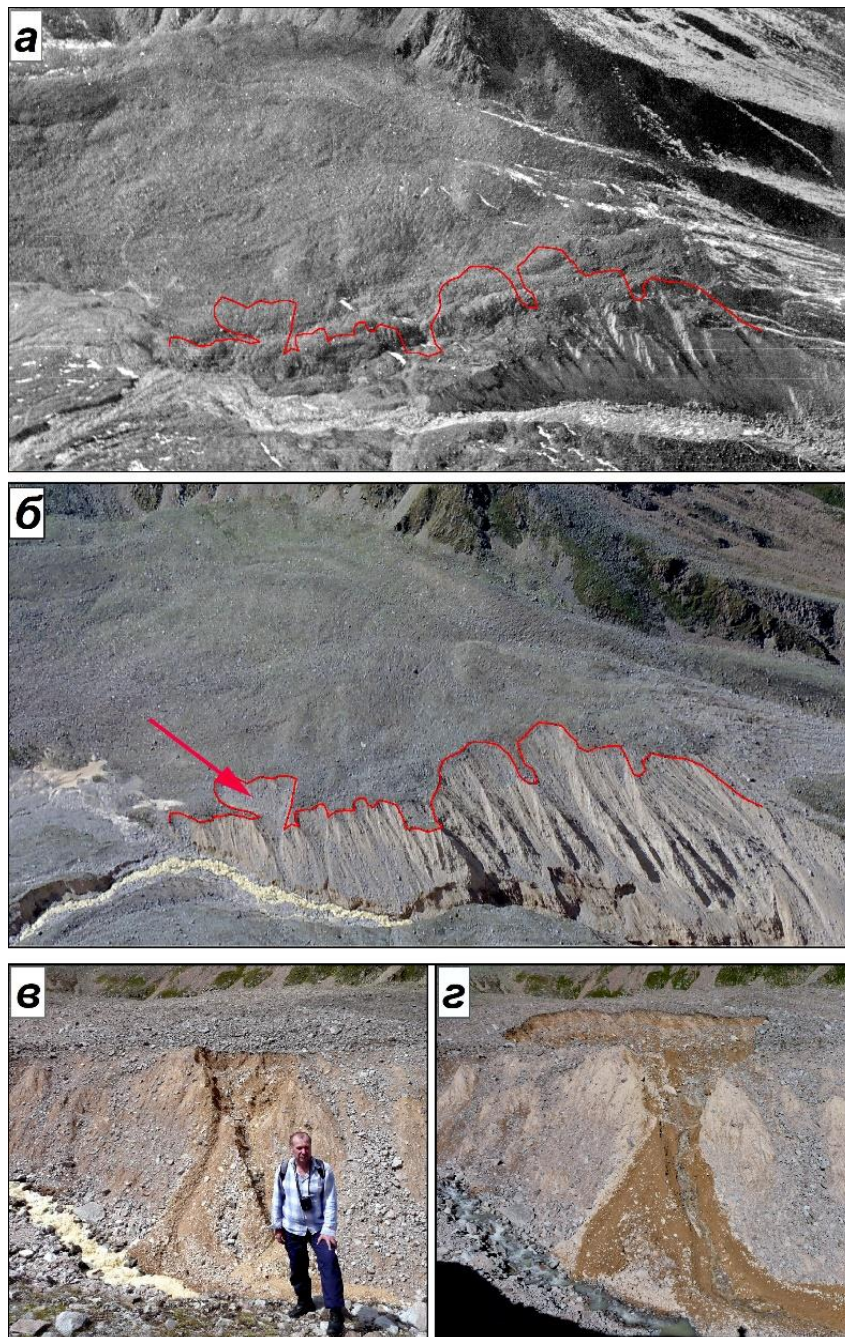


Рис. 9. Ледово-обломочный моренный массив (левая террасовидная береговая морена западного языка ледника Каярты, № 1 на рис. 2) и следы схода опыльин: *а* – 1991 г., *б* – 2017 г. (вертолётные снимки Докукина М.Д., стрелкой показан контур опыльины 2009 г.), *в* – 19.08.2009 г., *з* – 22.08.2009 г. Фото М.Д. Докукина

Fig. 9. Ice-clastic moraine massifs (left terraced coastal moraine of the western tongue of the Kayarty glacier, No. 1 in Fig. 2) and traces of earthflows: *a* – 1991, *б* - 2017 (helicopter images of M.D. Dokukin, arrow the contour of the 2009 earthflow is shown), *в* - 08/19/2009, *з* - 08/22/2009. Photo by M.D. Dokukin

На рис. 2 на участке, прилегающем к левой составляющей р. Кая-Арты-Су, показаны моренные массивы № 1, 2 и 7. Массивы № 1 и 7 образованы потоком ледника I в условиях налегания на его поверхность нескольких обломочно-ледяных конусов, стекавших с левого склона цирка. Направления таких потоков обломочно-ледяных масс показаны на рис. 2 жёлтыми стрелками. Обломочно-ледяные конуса, переходящие ниже в обломочно-ледяные потоки, формировались в процессе схода снежных лавин с большим количеством обломочного материала. Снежные массы лавин перелетовывали на высотах 3300-3400 м благодаря наличию обломочного чехла, предохраняющего от таяния. В итоге у окончания потока I образовался ледово-обломочный массив площадью около 55 тыс. м². На рис. 9 показан этот массив в разные годы и отмечены контуры образовавшихся на нём оплывин.

Ледово-обломочный массив №1 примыкает слева к моренному массиву № 2 (рис. 2), сформированному потоком II западного языка ледника Каярты, и был отделён от него продольным валом шириной около 15-18 м. Со временем, по мере формирования глубокого вреза (моренного каньона) в массиве №2 (рис. 10), этот вал оказался в верхней части склона каньона и его отдельные участки стали сползать на дно каньона в виде оплывин и микроселей.

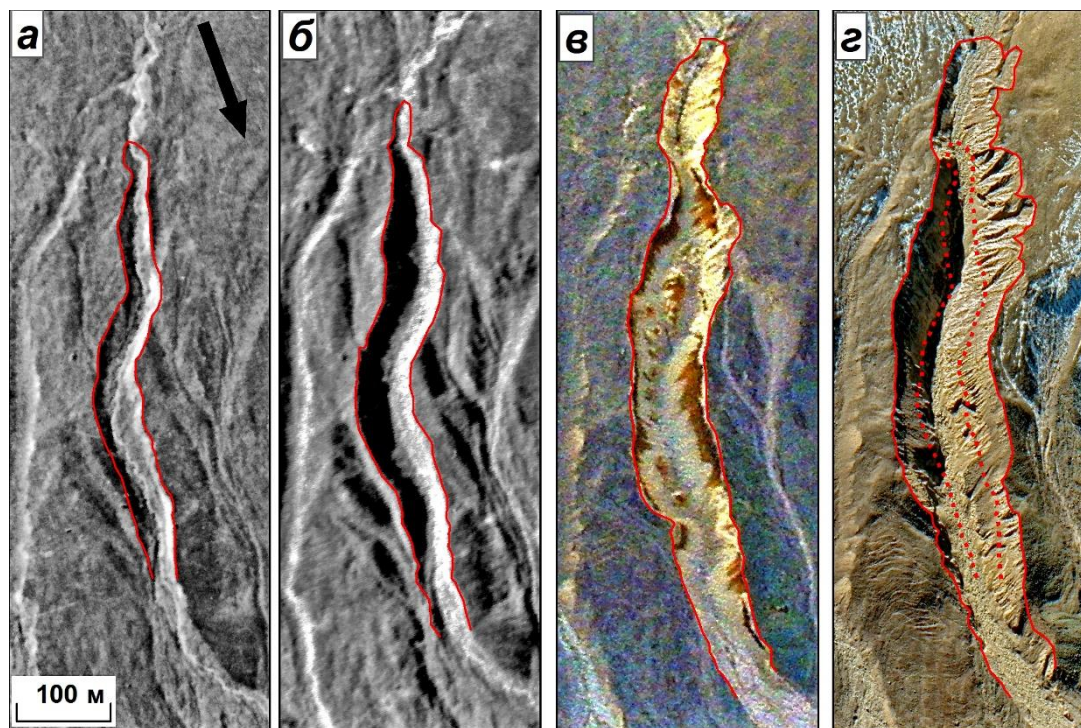


Рис. 10. Моренный каньон в верховьях левой составляющей р. Кая-Арты-Су (моренный пьедестал, № 2 на рис. 2): *а* – аэрофотоснимок 16.08.1957 г., *б* – аэрофотоснимок 08.09.1973 г., *в* – вертолётный снимок Никитина М.Ю. 22.09.2000 г., *г* – космоснимок 17.10.2019 г. (Google Earth), пунктирный контур – границы каньона в 1957 г.

Fig. 10. Moraine canyon in the upper left part of the Kaya-Arty-Su river (moraine pedestal, No. 2 in Fig. 2): *a* - aerial photograph of 08.16.1957, *б* - aerial photograph of 09/08/1973, *в* - helicopter photograph of Nikitin M .YU. September 22, 2000, *г* - satellite image of October 17, 2019 (Google Earth), dotted contour - canyon boundaries in 1957

Процесс формирования оплывин начался после селя 1977 г. и продолжается по настоящее время. По мере сползания участков продольного вала моренного массива 1 (рис. 2) в процессы формирования оплывин стали вовлекаться массы самого массива и оплывины стали заметно шире. 21 августа 2009 г. авторами был зафиксирован сход небольшого селя, вызванный оплывиной объёмом 1,5 тыс. м³. Разжиженная масса на участке шириной 45 м вытекла через горловину шириной 3-4 м (рис. 9*в, г*). Причём за

4 часа до схода оплывины не было признаков разжижения и деформации участка склона, с которого сошла оплывина. Сель прошёл через всё пролювиальное поле, но в нижней части долины он себя не проявил (уровнемер не зафиксировал подъёма уровня).

Такие оплывины могут способствовать сходу селей небольших объёмов, достигающих устья р. Герхожан-Су, если в это время проходят ливневые паводки, как это было 23 июля 2019 г.

Моренный массив № 2 (рис. 2) – главный очаг формирования селей XX и XXI веков. По геоморфологическим признакам авторами отнесён к группе моренных форм – моренным пьедесталам, охарактеризованным в работе [Докукин и др., 2016]. В моренных пьедесталах чаще всего формируются крупные эрозионные формы – селевые врезы. Селевой врез (моренный каньон), параметры которого детально описаны в работе [Черноморец, 2005], начал формироваться в первой половине XX века. Значительные изменения в его параметрах произошли в период селей 1960-х годов и после селей 2000 г. (рис. 10). Примечательно, что максимальное врезание в дно каньона и в его боковая эрозия происходили во время первой волны селя в 2000 г. На кадре видеосъёмки 19 августа 2000 г. можно оценить увеличение глубины каньона в сравнении с 1999 г. – примерно на 15-20 м. (рис. 11).

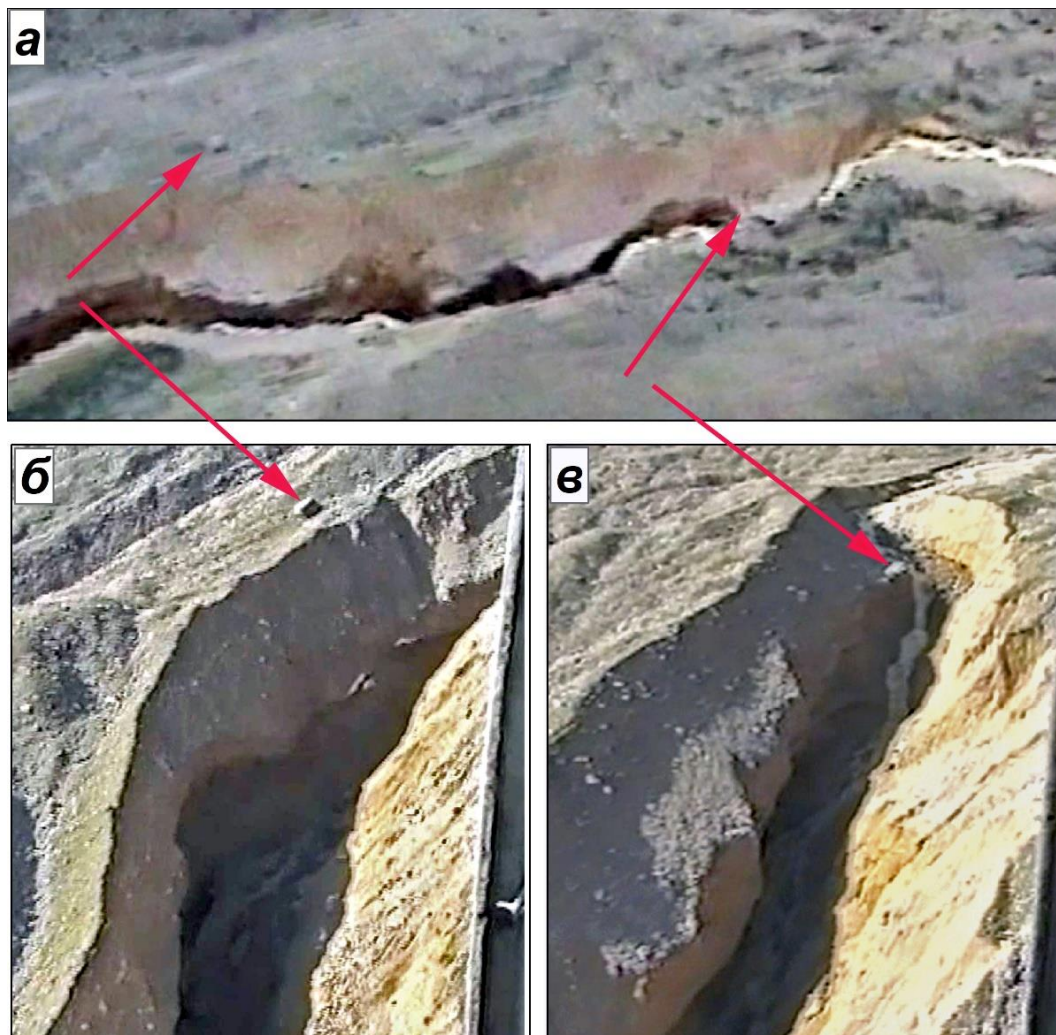


Рис. 11. Верхняя часть моренного каньона левой составляющей р. Кая-Арты-Су (кадры видеосъёмки): а – 1999 г., б, в – 19.07.2000 г. Стрелками показаны одинаковые точки для сравнения

Fig. 11. The upper part of the moraine canyon of the left part of the Kaya-Arty-Su river (video footage): а - 1999, б, в - 07.19.2000. The arrows show the same points for comparison

В дальнейшем произошло обрушение правого склона каньона, сложенного обломочной массой, сцементированной льдом, что привело к развитию длительного селевого процесса, аналогов которому не было в истории селевого бассейна р. Герхожан-Су. Сцементированные льдом моренные блоки, присыпанные сверху осыпями, продолжали лежать у подножия левого склона каньона несколько лет и окончательно были вынесены из него только в результате селей 2017 г. В этот период отклонение русла влево вызвало подрезку потоками левого склона и формирование оплывин (рис. 10). В 2019 г. оплывины с левого склона снова сместили русло вправо, и правый склон постепенно подрезается потоками с перспективой новых обрушений льдистых моренных масс.

Другие моренные массивы и селепроявления

На рис. 2 под номером 6 отмечен моренный массив между левой и правой составляющей р. Кая-Арты-Су. Он показан на рис. 12а. Размеры массива примерно 100×400 м. В верхней части массив разбит многочисленными трещинами, которые, как и активный фронтальный уступ, свидетельствуют о медленном его движении. Цифрой 1 отмечено место, где у подножия бокового уступа массива 18 августа 1983 г. был зафиксирован прорыв внутриморенной ёмкости объёмом около 10 тыс. м³, сопровождавшийся сходом селевого потока [Докукин, 1987] с расходом до 2 м³/с. После схода селя некоторое время оставался грот, сводом которого была сцементированная льдом обломочная масса. В работе [Золотарёв и др., 1982] зафиксировано понижение поверхности массива за период 1963-1977 г. на 1-3 м, что свидетельствует о процессе таяния льда, заключённого в массиве, которое сопровождается образованием полостей.

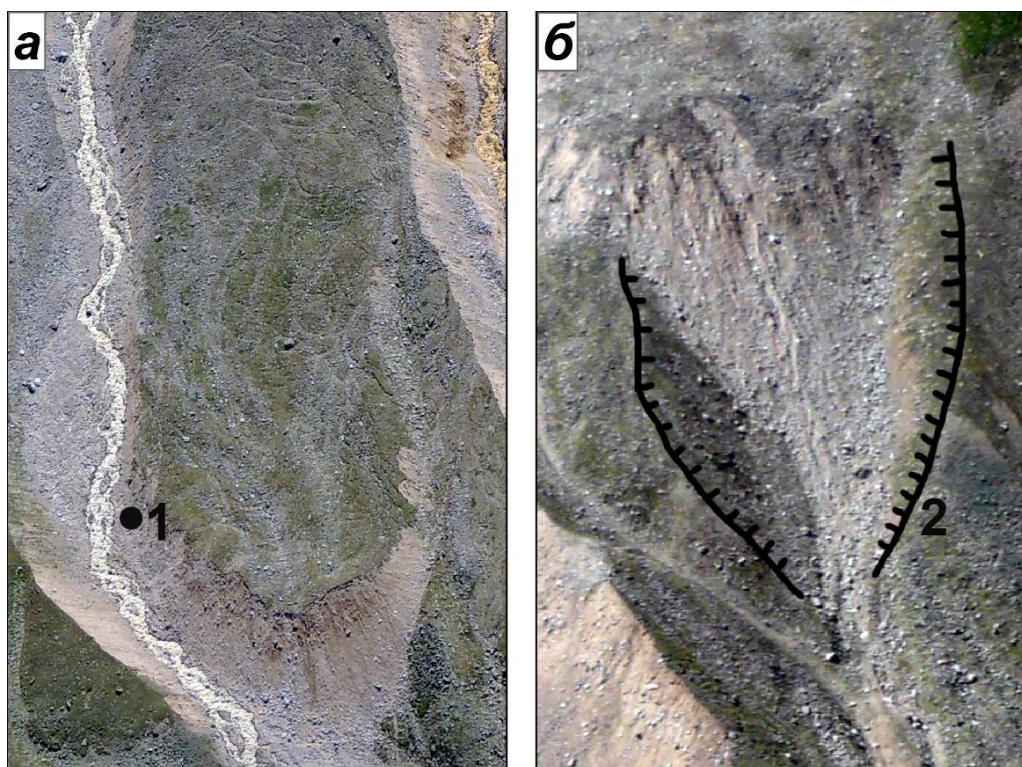


Рис. 12. Ледово-обломочные моренные массивы с фронтальными уступами (№№ 6 и 7 на рис. 2). Фото Докукина М.Д. 22.08.2017 г.: 1 – место прорыва внутриморенной полости 18 августа 1983 г., 2 – береговые морены, ограничивающие бывший моренный пьедестал исторической стадии оледенения

Fig. 12. Ice-clastic moraine massifs with frontal scarps (Nos. 6 and 7 in Fig. 2). Photo of M.D.Dokukin 08/22/2017: 1 - the place of the breakthrough of the intramoraine cavity on August 18, 1983, 2 - coastal moraines, bordering the former moraine pedestal of the historical stage of glaciation

На рис. 12, б цифрой 2 показаны гребни береговых морен, между которыми расположен фронтальный уступ ледово-обломочного массива 1 (рис. 2). По соотношению с многочисленными селевыми валами ниже этого участка, а также по аналогии с многочисленными селевыми врезам в моренных пьедесталах [Докукин и др., 2016] был сделан вывод о том, пространство между береговыми моренами раньше было заполнено моренными массами. По-видимому, ещё в историческую стадию оледенения с этого места сошёл селевой поток с выносом масс моренного пьедестала.

На схеме рис. 2 показан ледово-обломочный массив № 4, образование которого связано с поступлением обломочно-ледяных масс конусов подножия склона на поверхность ледника (рис. 13). После отступления ледника остался массив мёртвого льда, который постепенно деградирует без формирования селевых потоков. Ниже массива № 4, частично налегающем на ригель 5 (рис. 2), находится склон с большим количеством неглубоких русел, образовавшихся в то время, когда ледник покрывал ригель, и с него стекали потоки талой воды. В отличие от других потоков льда ледника Каярты поток IV (рис. 2) откладывал перенесённый им материал в виде равномерного слоя основной морены, и фронтального вала или пьедестала не образовал. В настоящее время эти морены потока IV в селеобразовании не участвуют.



Рис. 13. Ледово-обломочный массив № 4 (рис. 2) и отложения потока IV ниже ригеля, прорезанные сетью старых русел. Цифрой 3 отмечен ледово-обломочный массив № 3 (рис. 2). Фото М.Д. Докукина, 22.08.2017 г.

Fig. 13. Ice-clastic massif No. 4 (Fig. 2) and sediments of stream IV below the riegel, cut by a network of old channels. Number 3 marks ice-clastic massif No. 3 (Fig. 2). Photo by M.D. Dokukin

Обсуждение результатов и выводы

В работах по селевому бассейну р. Герхожан-Су при описании условий формирования селей приводятся схемы, в которых моренные массивы идентифицируются упрощённо как мощные валы конечных и береговых морен разного возраста (обычно исторические и современные морены или морены фернау и эггесен, а также каменные глетчеры) без учёта рельефа коренного ложа и специфических особенностей различных участков. Авторы попытались составить гляциогеоморфологическую схему на основе анализа морфологии участков морен разных потоков льда ледника с учётом механизма формирования обломочно-ледяных потоков. Кроме этого, проводилась оценка динамики ледника, моренных массивов, и на основе этого моренные массивы идентифицировались как селевые очаги обводнения и взаимодействия с различными периодами активности.

Особое внимание уделено динамике ледника Каярты и её связи с селепроявлениями и особенно с катастрофическими селями. Определено, что основной причиной схода катастрофических селей были мощные водные импульсы с ледников (1960-1962 гг., 1999, 2000, 2011 и 2017 гг.) в условиях длительных периодов высоких температур воздуха.

Катастрофический сель 1977 г. был вызван ливневыми осадками, локальным прорывом моренной ёмкости и массовым сходом оплывин. Предположительно сход оплывин с ледово-обломочного массива левой террасовидной береговой морены восточного языка ледника Каярты приводил к перекрытию стока с ледника и образованию подпрудного озера с дальнейшим его прорывом в первой половине XX века.

Выявленный факт прорыва моренной ёмкости в 1983 г. позволил считать такой процесс одним из возможных генетических типов селеформирования в настоящее время на различных участках моренных массивов, в том числе в верховьях р. Сакашиль-Су.

Сложность мониторинга процессов формирования селеобразующих водных импульсов с ледника Каярты не позволяет сделать однозначный вывод об их прекращении в связи с образованием устойчивой дренажной подлёдной сети с верхнего цирка ледника. Можно отметить, что вероятность повторения селеобразующих водных импульсов уменьшилась, так как метеоусловия 2018 и 2019 гг. были такими же, как в годы схода катастрофических селей XXI века.

Повышенная активность селевых и склоновых процессов в моренном каньоне левой составляющей р. Кая-Арты-Су указывает на сохранение угрозы схода катастрофических селей в ближайшем будущем в периоды высоких температур воздуха и аномальных ливней. В связи с этим повышается значение регулярного мониторинга ледниково-моренного комплекса Каярты.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы 6.3.2 плана НИТР Росгидромета при финансовой поддержке РГО (грант № 12/2019-Р) и по теме МГУ имени М. В. Ломоносова I.7 АААА-А16-116032810093-2 «Картографирование, моделирование и оценка риска опасных природных процессов» (ГЗ). Авторы благодарят ГУ МЧС России по КБР за предоставленную возможность участия в вертолётных облётах и содействие проведению маршрутных обследований, ГК «СКАНЭКС» и ФГБУ НИЦ «Планета» за предоставленные космические снимки.

Список литературы

- Герасимов В.А. (1967). Селевые потоки в районе г. Тырныауз 1/VIII 1960 г., 14/VIII 1961 г. и 31/VII 1962 г. Труды ВГИ, вып. 6, с. 198-205.
- Герасимов В.А. (1980). Селевые потоки 10 и 11 августа 1977 г. в бассейне р. Герхожансу (Северный Кавказ) и условия их образования. Селевые потоки, сб. 4, с. 68-76.
- Докукин М.Д. (1987). Эволюционная модель формирования гляциальных селей р. Каяартысу (бассейн р. Баксан). Труды ВГИ, вып. 66, с. 33-47.
- Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Богаченко Е.М., Иванов Г.И. (2012). Сель 3 августа 2011 г. в бассейне реки Герхожан-Су: причины, динамика и возможные последствия. Геориск, № 2, с. 48-56.
- Докукин М.Д., Черноморец С.С., Савернюк Е.А. (2016). Моренные пьедесталы - очаги формирования катастрофических гляциальных селей. Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита Материалы IV Международной конференции, с. 67-71.
- Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Богаченко Е.М., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Хаджиев М.М. (2018). Селевые потоки 14-15 августа 2017 г. в бассейне р. Герхожан-Су (Центральный Кавказ): условия и причины формирования, динамика, последствия. Геориск, №3, с. 82-94.
- Запорожченко Э.В. (2002). Сели бассейна р. Герхожан-Су: история проявления, условия формирования, энергетические характеристики. Сборник научных трудов ОАО «Севкавгипроводхоз», Вып. 15, с. 80-148.
- Золотарев Е.А., Поповнин В.В., Сейнова И.Б. (1982). Режим ледника Каярты на Центральном Кавказе – активного селевого очага. Материалы гляциологических исследований, вып. 43, с. 69-75.
- Каталог ледников СССР.(1970). Том 8. Северный Кавказ. Часть 5. Бассейны рек Малки, Баксана. Л.: Гидрометеиздат, 146 с.
- Крыленко И.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Журавлева П.Г. (2004). Динамика селевого бассейна р. Герхожан-Су (Кабардино-Балкария) после катастрофы в июле 2000 года. Материалы гляциологических исследований, № 96, с. 159–166.
- Панов В.Д., Лурье П.М., Заруднев В.М. (2001). Селевые потоки в бассейне реки Герхожансу (Северный Кавказ) в июле 2000 г. Метеорология и гидрология, № 2, с. 89–97.
- Петраков Д. А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Крыленко И. В. (2004). Методика мониторинга селевого бассейна в условиях горной криолитозоны (на примере долины реки Герхожан-Су, Кавказ). Криосфера Земли, т. VIII, № 3, с.57-67.
- Сейнова И.Б., Золотарев Е.А. (2001). Ледники и сели Приэльбрусья. (Эволюция оледенения и селевой активности). М.: Научный мир, 203 с.
- Тушинский Г.К., Попов А.И., Голубев Г.Н., Мудров Ю.В., Тумель Н.В. (1966). Опыт изучения гляциальных селей Большого Кавказа (на примере реки Герхожансу бассейна реки Баксан). Информационный сборник о работах по Международному геофизическому году, № 13, с. 5-106.
- Флейшман С.М., Сейнова И.Б., Золотарев Е.А. (1979). Формирование гляциальных селей непромышленного генезиса в бассейне р. Герхожан-Су на Северном Кавказе. Материалы гляциологических исследований, вып. 35, с. 195-198.
- Черноморец С.С. (2005). Селевые очаги до и после катастроф. М.: Научный мир, 184 с.
- Perov V., Chernomorets S., Budarina O., Savernyuk E., Leontyeva T. (2017). Debris flow hazards for mountain regions of Russia: regional features and key events. Natural Hazards, Vol. 88, No. 1, pp. 199-235, <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2841-3>.



Применение лесомелиорации для селезащиты на Черноморском побережье Западного Кавказа

Л.М. Дзагания

*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени
К.А. Тимирязева, Москва, Россия, dzagluba@gmail.com*

Аннотация. До недавнего времени большая часть Черноморского побережья Западного Кавказа относилась к районам со слабой селевой активностью, во многом, благодаря высокой залесенности горной части территории. В связи с масштабным расширением строительства риск образования селевых потоков значительно увеличился. В сложившейся практике защиты от селевых потоков на Черноморском побережье чаще активно используются сооружения инженерной защиты, действие которых направлено на снижение разрушительной мощности и ограничение зоны воздействия уже сформировавшегося селевого потока. Мелиоративные (в том числе лесомелиоративные мероприятия) ориентированы на долгосрочное изменение условий формирования селевых потоков, существенно снижают риск возникновения селевых потоков и степень селевой активности.

Ключевые слова: *селевая активность, селевой бассейн, селевой очаг, селезащита, мелиорация, эрозия, растительность, корневая система*

Ссылка для цитирования: Дзагания Л.М. Применение лесомелиорации для селезащиты на Черноморском побережье Западного Кавказа. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 405–417.

Application of forestry to protect against debris flows on the Black Sea coast of the West Caucasus

L.M. Dzaganiiia

*Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow,
Russia, dzagluba@gmail.com*

Abstract. Until recently, most of the Black Sea coast of the Western Caucasus belonged to areas with weak mudflow activity, mostly due to the high afforestation of the mountainous part of the territory. Due to the large-scale expansion of construction, the risk of mudflows has increased significantly. In the current practice of protection against mudflows on the Black Sea coast, engineering protection facilities are often used more often, the action of which is to reduce the destructive power and limit the impact zone of an already formed mudflow.

Reclamation (including forest reclamation measures) are focused on a long-term change in the conditions for the formation of mudflows, significantly reduce the risk of mudflows and the degree of mudflow activity.

Key words: *debris flows activity, debris flows basin, mudflow source, debris flow mitigation, reclamation, erosion, vegetation, root system*

Cite this article: Dzaganiiia L.M. Application of forestry to protect against debris flows on the Black Sea coast of the West Caucasus. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 405–417.

Введение

Основными условиями возникновения селевых потоков являются:

- а) наличие способного к смещению и размыву рыхлообломочного материала (очагов твердого питания селей);
- б) значительная крутизна склонов и большие продольные уклоны эрозионно-русловой сети;
- в) обильное водонасыщение и повышенный поверхностный сток в результате выпадения интенсивных осадков, снеготаяния, прорыва водоемов, запруд и пр.

В речных бассейнах Черноморского побережья Западного Кавказа наиболее изменчивым и поддающимся искусственному регулированию является количество потенциальных и действующих очагов твердого питания селей. Снижение селевой активности бассейнов за счет противоэрозионных лесомелиоративных мероприятий на территориях с благоприятными условиями для произрастания леса позволяет значительно уменьшить риск образования и масштабы селевых потоков.

До недавнего времени на большей части Черноморского побережья Западного Кавказа, за исключением участка Новороссийск – Туапсе, не было необходимости проводить агролесомелиоративные мероприятия [Ворошилов, 1972], благодаря высокой залесенности и слабонарушенному дерново-растительному покрову, которые хорошо защищали склоны от эрозионного воздействия поверхностных вод. Ситуация изменилась при росте хозяйственного освоения территории.

Черноморское побережье Западного Кавказа является благоприятной для жизни и привлекательной для инвестиций курортной территорией. Это повлекло рост населения, туристов и масштабное строительство в сложных условиях горного рельефа, которое, в свою очередь, вызвало рост селевой активности в результате негативного антропогенного воздействия. В настоящее время, практически при каждом прогнозе интенсивных осадков в регионе, Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России) предупреждает население о возможности схода селевых потоков.

Целью настоящей работы является исследование возможностей использования лесомелиорации как одного из наиболее приближенных к природе, перспективных, долговременных, надежных и эффективных методов предупреждающей противоселевой и противопаводковой защиты на Черноморском побережье Западного Кавказа. В задачи работы входит оценка современной селевой активности региона и изучение методов лесомелиорации рассматриваемого региона на основании полевых исследований и использовании опыта селезащиты и лесомелиорации в изучаемом районе.

Условия селеобразования и возможности для лесомелиорации как одного из основных методов селезащиты на Черноморском побережье Западного Кавказа

Физико-географическая характеристика

Черноморское побережье Западного Кавказа простирается в субмеридиональном направлении более чем на 600 км с северо-северо-запада на юго-юго-восток полосой от 10 км до 190 км вдоль берега Черного моря. К территории Российской Федерации относятся 350 километров в северной части участка.

Площадь территории составляет около 50 тысяч квадратных километров (рис. 1).

На севере регион ограничен Главным Кавказским хребтом, простирающимся к юго-востоку от Таманского полуострова (45°с.ш., 36°з.д.). Южная граница региона совпадает с государственной границей Грузии с Турцией южнее города Батуми (41°30'с.ш., 42 з.д.). С востока регион Черноморского побережья Кавказа ограничен отрогами Большого и Малого Кавказа и находящейся между ними Колхидской низменностью, с запада – береговой линией Чёрного моря. Высота территории меняется

от 0 м до 4000 м. Значительные перепады высот, сложность и разнообразие рельефа обуславливают как высотную, так и широтную зональность и разнообразие ландшафтов.

Наиболее характерная черта гидрографии побережья – сильное расчленение его на отдельные малые водосборные бассейны при небольшой длине водных потоков и крутых уклонах русла. Большая часть территории, за исключением участка Новороссийск – Кабардинка, покрыта лесами.



Рис. 1. Черноморское побережье Западного Кавказа. Спутниковый снимок Яндекс-карты, обработка © ООО ИТЦ «СКАНЭКС»

Fig. 1. Black Sea coast of West Caucasus. Satellite picture of Yandex-map, processing © ООО ИТЦ «SCANEX»

Населенные пункты до недавнего времени были сосредоточены преимущественно на морском побережье и в приустьевых частях рек. После начала строительства объектов для проведения XXII Зимних Олимпийских Игр 2014 года темпы застройки значительно увеличились с расширением в низкогорные и среднегорные районы. Горнолыжные комплексы продолжают продвигаться в высокогорные области.

Климат

Северная часть региона протяженностью около 150 км на участке от Новороссийска до Туапсе частично расположена в климатической зоне субтропического пояса сухого типа, а территория южнее Туапсе – в зоне влажного субтропического пояса.

Близость моря и открытость района для вторжения холодных и тёплых воздушных масс способствует установлению зимы мягкой и неустойчивой, с длительными оттепелями и значительными понижениями температуры воздуха. Меридиональный обмен и циклоническая деятельность воздушных масс весной и в начале лета обуславливают заметное увеличение числа гроз и ливневых дождей в этот период. Сухую и жаркую погоду летом и устойчивую теплую - осенью обеспечивает ослабление межширотного обмена в июле-августе и вторжение континентального тропического воздуха степей и пустынь. Прорывы западных и южных циклонов нарушают такую погоду сильными ливневыми осадками.

Средняя годовая температура воздуха на побережье Черного моря составляет от 10,9°C в северной части региона до 14 °C – в южной. В горах, соответственно, температура понижается в зависимости от высоты местности. Абсолютная максимальная температура – +41,4°C (метеостанция «Туапсе», 1957 г.), абсолютная минимальная – минус 34,5°C (Горячий Ключ, 1935 г.).

Средняя продолжительность безморозного периода в северной части региона составляет 193-258 дней. В южной части региона в приморской зоне заморозки наблюдаются редко.

Среднегодовое количество осадков по территории изменяется от 979 до 3255 мм/год (метеостанция Ачишхо). Преобладающими в течение всего года являются жидкие осадки. Интенсивность осадков достигала 311 мм/сутки (Геленджик, 6-7 июля 2012 г.). Максимальная декадная высота снежного покрова наблюдалась по метеостанции Ачишхо (закрыта в 1988 году) в третьей декаде марта 1987 г. и достигла 796 см.

В районе от Новороссийска до Туапсе сравнительно невысокие горные хребты не препятствуют проникновению северных и восточных ветров (бора). Южнее от них защищают побережье высокогорные хребты Большого Кавказа. На данном участке преобладают ветра северо-западных, западных и южных румбов. Для района характерна возможность выхода смерчей с моря на сушу. Они могут вызывать внезапные паводки, в том числе и селевые.

Почвы

Горные склоны на Черноморском побережье сложены глинистыми, угольными сланцами, мергелями, песчаниками и другими породами юрского, мелового и палеогенового возраста, подверженными интенсивному выветриванию.

Характерной чертой распространения почв на территории является их вертикальная зональность и большое разнообразие по видовому составу, обусловленное сильной расчлененностью рельефа и пестротой литологического состава почвообразующих пород.

Почвы горных районов отличаются маломощностью и скелетностью. Они формируются в условиях значительного поверхностного стока. Почвообразующими породами горных почв служат преимущественно маломощные элювиально-делювиальные отложения.

На древних морских террасах и холмистых предгорьях на территории влажных субтропиков встречаются горные желтоземы и подзолисто – желтоземные почвы.

Зона горно-лесных почв охватывает широкую зону южного склона Большого Кавказа с его отрогами и расположена в пределах высот от 300 до 2000 м. Распространены перегнойно-карбонатные серые и бурые горно-лесные почвы. Количество гумуса в верхних горизонтах составляет 6 – 10%, структура гумусовых горизонтов мелкокомковато-зернистая, прочная, строение рыхлое. По механическому составу большинство перегнойно-карбонатных почв представлено глинистыми разностями [*Ресурсы поверхностных вод СССР под. Ред. Г.Н. Хмаладзе, 1969*].

В поясе хвойных лесов встречаются преимущественно оподзоленные буроземные лесные почвы. Они отличаются относительно небольшой мощностью и хорошо выраженным гумусовым горизонтом, количество которого составляет 6-8% [*Атлас почв СССР. Под общ. ред. И.С. Кауричева, И.Д. Громыко, 1974*].

Субальпийская горно-луговая почва формируется под высокотравными субальпийскими лугами и занимает промежуточное положение между альпийскими горно-луговыми и горными лесными почвами. От альпийских почв они отличаются более мощным профилем, лучше выраженной структурой и высоким плодородием. Горизонт А₁ достигает 20-25 см, имеет темную буроватую окраску и содержит до 10-12% гумуса.

Зона альпийских горно-луговых почв занимает высокогорные области (выше 2000 м). Для этой зоны характерно преобладание дерновых и слабоподзоленных луговых почв, развитых под густым луговым покровом. Почвы характеризуются малой мощностью и большим содержанием органических веществ. Под слоем дернины горно-луговых почв залегает сильно окрашенный перегноем темно-бурый гумусовый горизонт. С глубины 20-25 см резко уменьшается содержание гумуса и увеличивается количество

грубых обломков горной породы. Почвы сильно каменисты. При нарушении целостности легко поддаются эрозии.

На днищах долин рек расположены аллювиальные слоистые дерновые почвы прирусловой поймы, аллювиальные дерновые суглинистые почвы поймы, аллювиально-слоистые дерновые песчаные почвы поймы.

Обилие осадков преимущественно ливневого характера на фоне расчлененного рельефа вызывает развитие процессов водной эрозии. Важнейшие противоэрозионные мероприятия – террасирование склонов, постройка гидротехнических сооружений для регулирования стока поверхностных вод, шпалерная посадка кустарниковых растений, создание полос-буферов из многолетних трав, посадка лесных полос.

Растительность

Регион занимает северо-западную часть Эвксинской флористической провинции. На территории России это единственный район, где довольно полно представлена эвксинская (колхидская) флора. В ней представлены реликтовые растения, существовавшие 20 млн. лет назад. Для рассматриваемого региона характерно поясное расположение типов растительности от приморской песчаной до альпийской. Особую ценность имеют реликтовые смешанные широколиственные леса глубоких речных долин, леса колхидского типа, скально-лесные комплексы, субальпийское высокоотравье, уникальные скально-луговые комплексы в высокогорье с множеством эндемиков.

Лиственные широколиственные леса распространены от берега моря до высоты 1400 м. Среди древесных пород распространены каштан, дуб, бук, граб, липа, черешня, клен, ясень, ольха. Наиболее характерными элементами подлеска являются вечнозеленые кустарники и древесная поросль: рододендрон, лавровишня, волчегондик, падуб, кавказская черника, боярышник, ежевика, орешник. Под пологом леса широко распространены папоротники.

Примерно с 1300 метров лиственный лес кавказского типа сменяется темнохвойными лесами, где наряду с лиственными породами произрастают ель и пихта. От 1700 м леса сменяются субальпийским редколесьем, еще выше - альпийскими лугами. Субальпийские редколесья состоят из клена, дуба высокогорного, дуба понтийского, рябины кавказской и березы.

К сожалению, в период подготовки и проведения XXII Зимних олимпийских игр в Сочи были завезены вредители растений, повредивших популяции многих растений: самшита, каштана и др. До настоящего времени существует угроза исчезновения реликтовых самшитовых лесов.

Краткая гидрографическая характеристика

Реки исследуемого региона относятся к бассейну Черного моря. Густота речной сети составляет 0,79 км/км² [РПВ, т. 9, выпуск 1, 1969]. Реки относятся к горному типу. В северной части территории преобладают реки со сравнительно небольшими площадями водосборов и длиной менее 100 км (Туапсе, Аше, Псезуапсе, Шахе, Сочи, Мзымта, Псоу). К юго-востоку, по мере удаления горных хребтов от Черного моря, размеры речных бассейнов увеличиваются, а длины рек достигают 300 км (реки Бзыбь, Кодори, Ингури, Риони) (таблица). Реки характеризуются многоводностью, большим падением и быстрым течением, протекают по дну глубоких ущелий. Притоки, стекающие с крутых склонов долин, как правило, имеют русла водопадного типа. Питание рек смешанное: грунтовое, дождевое, от снеготаяния и таяния ледников (для отдельных рек). Реки относятся к Черноморско-Алазанскому гидрологическому району с преобладанием паводочного гидрологического режима. Для рек с паводочным режимом характерно почти непрерывное чередование резко выраженных подъемов и спадов уровня воды в течение всего года. Широкое распространение лесных угодий на территории сглаживало интенсивность подъемов уровня воды в реках при интенсивных осадках. Уменьшение площадей, занятых лесом, способствует росту скоростей течений

в потоках, сокращает время формирования паводочной волны, увеличивает эрозионный смыл и опасность формирования дождевых селей.

Озера и болота преобладают в южной части региона. В центральной и северной частях заболоченность и озерность бассейнов не достигает 1%.

Таблица. Сведения о параметрах части рек Черноморского побережья Западного Кавказа [Том 9. Закавказье и Дагестан. Выпуск 1. Западное Закавказье, Л., Гидрометиздат, 1978]

Table. Information on the parameters of some rivers of the Black Sea coast of the West Caucasus [Vol. 9. Transcaucasia and Dagestan. Issue 1. Western Transcaucasia, L., Gidrometizdat, 1978].

Река	Площадь водосбора, км ²	Длина, км	Средняя высота водосбора, м	Средний уклон водосбора, ‰	Лесистость, %
Гастогай	106	18	160	92,4	52
Дюрсо – свх. Абрау-Дюрсо	51,9	12	190	233	82
Вулак – с. Архипо-Осиповка	265	28	240	266	92
Туапсе – г. Туапсе	351	29	390	274	93
Аше – с. Аше	282	39	570	404	97
Куапсе – Мамедова Щель	14,6	6,2	380	467	99
Псезуапсе – с. Татьяновка	255	28,6	760	381	97
Сочи – г. Сочи	296	44	720	388	93
Мзымта – пос. Казачий Брод	839	74	1340	280	76
Бзыбь - Пицундский мост	1510	99	1630	416	60
Кодори – с. Варча	2020	113	1910	450	46

Оценка селевой активности

Степень селевой опасности зависит от интенсивности проявления процесса, разрушительных свойств процесса и активности использования данного участка человеком. До недавнего времени большая часть территории относилась к зонам с низкими удельными коэффициентами селеактивности z_i . Это зоны под сомкнутым лесом с полноценной подстилкой и правильно организованным лесным хозяйством (z_i составляет 0,01-0,03) и зоны под альпийскими лугами с полноценным дерновым покровом и нормально организованным выпасом скота (z_i составляет 0,04-0,06) согласно категориям [ВСН 03-76, 1979].

Увеличение антропогенной нагрузки привело к увеличению площади зон с нарушением естественного покрова (коэффициенты селеактивности от 0.1 до 0,2), активной эрозии, обвалов, оползней, осыпей (коэффициенты селеактивности от 0.7 до 1,0). В результате, в настоящее время в районах интенсивного хозяйственного освоения территории селевая опасность оценивается как высокая (рис. 2).

На территории Черноморского побережья Западного Кавказа из-за крутизны склонов и высокой интенсивности осадков образуются селевые потоки как естественного происхождения, так и вызванные техногенным воздействием. Следует отметить, что селевые потоки природного происхождения зачастую носят более масштабный характер, чем техногенные сели. Селевыми очагами в горных районах становятся крупные обвально-оползневые массивы, запруды, лавинные отложения (рис. 3, 4). Так, к селевым процессам естественного происхождения можно отнести сели

из селевых очагов на реках Кепша (правый приток реки Мзымта) и Бжижу (правый приток реки Псеуапсе), возникших в результате крупных обвалов/оползней. Под воздействием сходящих отсюда после прохождения интенсивных дождевых осадков мощных селевых потоков оказывались села Кепша и Тхагапш. Сели, формирующиеся в результате техногенного воздействия и застройки горных склонов, менее масштабны, но происходят намного чаще (несколько раз в год) и распространённость их намного выше.



Рис. 2. Карта селеопасных районов побережья Чёрного моря в Краснодарском крае. Условные обозначения: 1 - Новороссийский район селеподобных водокаменных паводков (слабая опасность); 2 - Туапсинский район селеподобных водокаменных паводков и селей (слабая и высокая опасность); 3 - Сочи-Краснополянский район типичных грязекаменных селей (высокая и катастрофическая опасность) [Паспорт гидрометеорологической безопасности Краснодарского края. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», Обнинск, 2017 г.]

Fig. 2. Map of debris flows dangerous areas of the Black Sea coast in Krasnodar Territory. Symbols: 1 - Novorossiyskiy district of weak danger; 2 - Tuapse district of weak and high danger; 3 - Sochi-Krasnopolyanskiy district of high and catastrophic danger [Passport of hydrometeorological security of Krasnodar Territory. VNIIGMI-MCD, Obninsk, 2017]



Рис. 3. Селевое русло реки Кепша

Fig. 3. Debris flow channel of Kepsa River

Росту селевой опасности способствовали увеличение площади территорий, подверженных эрозионным процессам в результате вырубке лесов, строительства, повреждения почвенного и растительного покрова, отвалов грунта на крутые склоны, подрезки склонов, изменения естественного стока при отсутствии рекультивации поврежденных строительством склонов и недостаточном их укреплении (рис. 4, 5).



Рис.4. Селевой очаг на северном склоне хребта Аибга, возникший в результате вырубке леса, повреждения почвенного покрова и отвалов грунта. Фото Л.М. Дзагания

Fig. 4. The village hearth on the northern slope of the Aibga Ridge resulted from logging, damage to soil cover and soil dumps. Photo by L.M. Dzaganiya



Рис.5. Зоны техногенного воздействия в верховье реки Сулимовской, северный склон хребта Аибга, п.Красная Поляна. Фото Е.В. Дзагания

Fig. 5. Man-made zones in the upper part of the Sulimovskiy River, northern slope of the Aibga Ridge, Krasnaya Polyana village. Photoby E.V. Dzaganiya

Усугубляет ситуацию «лоскутное» проектирование и строительство в горах, когда застройщик не обеспечивает безопасность смежных и, особенно, нижележащих территорий при отсутствии надлежащего контроля со стороны государственных структур.

Так, в долине реки Мзымта на участке от горнолыжного курорта «Альпика-Сервис» до устья реки Пслух селевые выбросы на дорожное полотно происходят практически при каждом сильном ливне, иногда нанося значительный материальный ущерб (рис. 6).



Рис. 6. Селевой конус выноса реки Сулимовской. Фото А. Букинича

Fig. 6. Debris cone of the Sulimowska River. Photo by A. Bukinich

Применение лесомелиорации для селезащиты на Черноморском побережье Западного Кавказа

Для инженерной защиты территории от селевых потоков в Новороссийском и Сочинском районах Черноморского побережья Западного Кавказа активно применяются искусственные сооружения: противоселевые барьеры, барражи, сетки, селепропуски, селеспуски, галереи, дамбы. Все эти способы – это борьба с последствиями, оставляющая смертельные риски для населения и угрозы разрушения или недостаточной защиты объектов народного хозяйства от природной стихии.

Дорогостоящие гидротехнические сооружения для защиты от селей необходимы при наличии крупных неустраняемых селевых очагов, содержащие миллионы тонн рыхлообломочного материала. В то же время, в таких случаях необходимо рассматривать целесообразность сохранения объектов и населенных пунктов, находящихся на селеопасных территориях, инженерная защита которых сопоставима со стоимостью этих объектов, и в то же время не может полностью обеспечить сохранность земельных угодий и безопасность населения.

Для защиты от селевых потоков сравнительно небольших объемов, на территориях, благоприятных для произрастания растений, но нарушенных деятельностью человека, перспективным является метод агромелиорации (высев трав, посадка кустарников и деревьев), сопровождающийся дополнительными гидротехническими мероприятиями (рассредоточение стока для уменьшения эрозии, укрепление откосов, защита от лавин в местах их зарождения для уменьшения объемов рыхлообломочного материала на склонах).

К положительным примерам противоэрозионной и противоселевой защиты следует отнести лесопосадки хвойных деревьев в районе города-курорта Геленджик

(рис. 7). По сравнению с Новороссийском, расположенным в 25 километрах к северу в сходных климатических и орографических условиях, где нередки сходы селевых потоков на городские территории, склоны Геленджика искусственно залесены и намного меньше подвержены эрозии и селевой опасности, чем склоны Мархотского хребта в районе Новороссийска.

Метод агролесомелиорации направлен на предотвращение возможности возникновения селевых потоков, значительно снижает селевую опасность территории. При успешном восстановлении и сохранении почвенного и растительного покрова, с комплексным применением системы водоотведения поверхностного стока, направленной на рассредоточение поверхностного стока и снижение скоростей течений в потоках. Защита методом агролесомелиорации является максимально приближенной к естественной, самовоспроизводится, является надежной и долговечной.



Рис. 7. Комбинированная защита от эрозии в районе Геленджика

Fig. 7. Artificial forest planting in the Gelendzhik area

В районе поселка Красная Поляна также имеются положительные примеры применения агролесомелиорации как противоэрозионного мероприятия (рис. 8). На склонах хребта Аибга применяется комплексный подход для защиты почв от эрозии: установлены почвоудерживающие сетки, закрепленные анкерами, выполнено террасирование, регулирование поверхностного стока. В большей степени применяется восстановление почвенного и травяного покрова вдоль лыжных трасс, но при этом посадка древесных растений и уход за ними проектами, к сожалению, не предусмотрены.

Почвы на склонах резко отличаются от почв на равнинных участках, поэтому и приемы земледелия в первом случае должны иметь специфический характер.

Видовой состав насаждений должен определяться исходя из высотного пояса и характерного для него перечня растений. Для субальпийского и альпийского поясов – это травянистые растения, ниже – хвойные и лиственные древесные насаждения.

Наибольший противоэрозионный эффект обычно достигается при рядовой посадке поперек склона.

В первую очередь могут применяться древесные виды с разветвленной, достаточно объемной корневой системой, такие как: рябина обыкновенная, рябина промежуточная, липа мелколистная, ясень высокий, черемуха обыкновенная, клен остролистный, клен ясенелистный, клен красный, большинство вязов и буков, пихта; сосна; каштан, дуб, граб, груша.

Для укрепления крутых склонов используют посадку стелющихся и ползучих кустарников, а кроме того, многолетников зарослевого типа, помогающих создать

плотный или даже сплошной напочвенный покров. Среди кустарников следует остановить выбор на формах с распростертой или прижатой к земле кроной.



Рис. 8. Пример противоэрозионной защиты. Фото Л.М. Дзагания

Fig. 8. Example of anti-erosion protection. Photo by L.M. Dzaganiya

Наиболее простыми мероприятиями по регулированию поверхностного стока являются культивация и рядовой посев травяных культур поперек склона, по возможности параллельно основному направлению горизонталей с небольшим углом к ним.

Следует учитывать, что характер корневой системы одних и тех же видов существенно изменяется в зависимости от типа почв и грунтов, на которых они произрастают. Так, многие растения на легких по механическому составу почвах развивают более глубокую, стержневую корневую систему, а на сильно уплотненных, а также тяжелых, сырых почвах – поверхностную.

Существует довольно много древесных видов, которые образуют укореняющиеся побеги или корневые отпрыски. Благодаря этому они могут сравнительно быстро закреплять поверхность почвы на значительной площади вокруг материнского растения. Такой способностью обладают: дерен белый, дерен отпрысковый, облепиха, ольха серая, осина, тополь, черемуха обыкновенная, слива колючая.

Склонность растений к образованию отпрысков существенно повышается при механическом повреждении корневой системы, поэтому с помощью рыхления приствольного круга этот процесс можно усилить. Данной особенностью отличаются растения: белая акация, малина обыкновенная, ежевика; ежевика, лох серебристый, шиповник, рябинник рябинолистный, крушина, чай.

Ряд видов деревьев и кустарников легко укореняются при размножении их зелеными и одревесневшими стеблевыми черенками, а также корневыми черенками. Высаживая их рядами или в шахматном порядке в почву на склонах холмов, крутых берегах рек, на дорожных откосах и дамбах, можно быстро создать посадки, эффективно задерживающие развитие эрозии. К таким растениям относятся: ольха серая, многие виды ив и тополей, барбарис обыкновенный, бамбук.

Лесомелиоративные мероприятия проводятся для приостановления роста и закрепления действующих оврагов с целью перевода поверхностного стока во

внутрипочвенный, увеличения противозерозионной устойчивости почвы, распыления поверхностного стока и скрепления почвенного грунта. Лесомелиоративные почвозащитные насаждения способствуют повышению эффективности всех мероприятий единого противозерозионного комплекса. Применяются два вида насаждений:

- а) приовражные, прибалочные и надвершинные лесонасаждения;
- б) облесение дна и откосов оврагов, балок.

Приовражные и прибалочные лесные полосы создаются на расстоянии 2-5 м от бровок и над их вершинами для перехвата поверхностных вод и скрепления почвенного грунта корневыми системами с целью замедления или полного прекращения роста оврагов.

Ширина приовражных лесных полос должна быть не менее 15 метров. Надвершинные насаждения создаются в основном над головными вершинами действующих эрозионных врезов. Ширина их соответствует ширине водоподводящих ложбин; протяженность зависит от площади водосброса.

Сплошное облесение проводится на откосах оврагов крутизной 8° и более, а также на берегах логов. Облесение откосов эрозионных врезов допускается только в том случае, если откосы сформировали устойчивый профиль, т.е. угол их естественного откоса составляет не более 32° на суглинках и 26° - на супесях. Лесные насаждения в тальвегах логов позволяют избежать дальнейшего их углубления. Днища оврагов закрепляют влаголюбивыми быстрорастущими породами деревьев.

В период строительства объектов XXII Зимних Олимпийских Игр проектами были предусмотрены компенсационные посадки для восстановления лесов. Зачастую эти лесопосадки выполнялись совершенно на иных территориях, удаленных от зон строительства, на залесенных и не требующих восстановления растительного покрова территориях. Так, компенсационные посадки каштана и клена белого выполнялись в Марьинском лесничестве, расположенном в десятках километров от поврежденных эрозией территорий. В то же время, в зонах техногенного воздействия, где в значительной степени был поврежден почвенный и растительный покров, агролесомелиорация выполнялась в незначительных объемах, в основном, в виде посева трав вдоль дорог.

Заключение

Черноморское побережье Западного Кавказа является благоприятным районом для эффективного применения предупреждающих агролесомелиоративных мероприятий для снижения селевой опасности. Данный метод позволяет в значительной степени предотвращать селевые потоки небольших объемов техногенного происхождения.

Лесомелиорация наиболее эффективна в комплексе с террасированием, рассредоточением стока, устройством нагорных канав, укреплением русел, противооползневыми мероприятиями.

В современной практике защиты от селей методы агролесомелиорации, на мой взгляд, используются недостаточно. Одной из причин является необходимость достаточно длительной процедуры подготовки почв, посадочного материала, посадки и регулярного ухода длительное время, до укрепления растений.

К сожалению, в России нормативная база, система проектирования, прохождения экспертиз, строительства и эксплуатации объектов не требует и не способствует расширению применения методов агролесомелиорации.

При передаче территорий в аренду рекреационным комплексам природоохранные организации слабо контролируют процессы сохранности лесного фонда. Отсутствуют службы, которые бы контролировали развитие опасных экзогенных процессов после завершения строительства.

Полагаю, что осуществление экспериментальных научных проектов по применению агролесомелиорации может способствовать разработке эффективных методик защиты от селей на антропогенно измененных территориях в благоприятных для

произрастания растений природных зонах и содействовать принятию нормативных требований по применению этого метода.

Список литературы

- Атлас почв СССР. Под общ. ред. И.С. Кауричева, И.Д. Громыко. М., Колос, 1974.
- Ворошилов В.И. Селевые паводки и меры борьбы с ними на южном склоне Северо-Западного Кавказа: автореф. дис. канд. геогр. наук. Сочи: Изд-во Сочинского филиала Краснодарского политехнического института, 1972. 25 с.
- Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики (за 1971-1975 гг. и весь период наблюдений). Том 9. Закавказье и Дагестан. Выпуск 1. Западное Закавказье, Л., Гидрометиздат, 1978
- Инструкция по определению расчетных характеристик дождевых селей ВСН 03-76. Л., Гидрометиздат, 1976
- Паспорт гидрометеорологической безопасности Краснодарского края. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», Обнинск, 2017 г.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 9. Закавказье и Дагестан. Выпуск 1. Западное Закавказье. Под. ред. д-ра геогр. наук Г.Н. Хмаладзе, Л., Гидрометеиздат, 1969.
- Флейшман С.М. Сели. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 237 с.



Оценка глубины промерзания грунта как сдерживающего фактора селевого процесса

Д.М. Фролов

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия, denisfrolovm@mail.ru*

Аннотация. Поскольку в книге «Селеведение» В.Ф. Перова промерзание грунта указывается одним из определяющих сдерживающих факторов селевого процесса, в данной работе производится оценка глубины промерзания грунта на основе разработанной расчётной схемы за зимние сезоны 2015/16-2019/20 в Приэльбрусье. Расчётная схема строилась на основе задачи теплопроводности трехслойной среды (снег, мерзлый и талый грунт) с фазовым переходом на границе. Уравнение теплового баланса включало энергию фазового перехода, приток тепла из талого грунта и отток в мерзлый грунт и при наличии снежного покрова через него в атмосферу.

Ключевые слова: *сель, сдерживающий фактор, промерзание грунта, температура воздуха, толщина снежного покрова*

Ссылка для цитирования: Фролов Д.М. Оценка глубины промерзания грунта как сдерживающего фактора селевого процесса. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 418–421.

Estimation of ground freezing depth as deterrent factor of debris flow process

D.M. Frolov

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia,
denisfrolovm@mail.ru*

Abstract. As in the book “Selevedenie” (Debris Flow Science), V.F. Perov appointed ground freezing as one of the main determining deterrent factor of debris flow process, the ground freezing depth for winter periods 2015/16-2019/20 was estimated on basis of developed calculating scheme for Elbrus region. The calculating scheme for ground freezing is constructed on the basis of three-layer media heat conductivity problem (snow cover, frozen and thawed ground) with phase transition on the boundary of frozen and unfrozen ground. Heat balance equation includes phase transition energy, inflow of heat from unfrozen ground and outflow to frozen ground, snow cover and atmosphere.

Key words: *debris flow, deterrent factor, ground freezing, air temperature, snow cover thickness*

Cite this article: Frolov D.M. Estimation of ground freezing depth as deterrent factor of debris flow process. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 418–421.

Введение

Одним из факторов устойчивости склонов к воздействию селевых процессов согласно книги «Селеведение» [Перов, 2012] является промерзание подстилающего грунта, когда в горных районах, где грунт находится в мерзлом состоянии в течение восьми и более месяцев, селевые процессы на нём происходят реже. Однако, происходящее последнее время изменение температуры воздуха и количества осадков (в первую очередь в виде снега) [Golubev et al., 2008] ведут к изменению глубины и длительности промерзания грунта и как следствие уменьшение его устойчивости. Модельное исследование промерзания грунта в горах производилось в работах [Habekorn et al., 2016]. В данной работе на основе разработанной расчётной схемы производится оценка глубины промерзания грунта для последних пяти зимних сезонов на основе данных о толщине снежного покрова и температуре воздуха для метеостанции Терскол. Метеостанция Терскол расположена в долине Азау в Приэльбрусье на высоте 2141 м над уровнем моря. Средняя температура января составляет там -7°C , июля $-13,4^{\circ}\text{C}$, а средняя сумма отрицательных месячных температур зимнего периода (ноябрь-март) составляет -20°C . За период снегонакопления (в ноябре-марте) выпадает в среднем около 280 мм осадков, вызывая накопление снежного покрова до 70–80 см толщиной. Расчёты изменения глубины промерзания грунта производились по предложенной расчётной схеме по данным о толщине снежного покрова и температуре воздуха на основании трехслойной модели среды (талый грунт, мерзлый грунт, снег) и при предположении линейного изменения температуры в средах и тепловому потоку согласно закону Фурье.

Материалы и методы

В работе произведены расчёты глубины промерзания на основе данных о температуре воздуха и толщине снежного покрова для метеостанций Терскол для покрытой снегом поверхности почвы за зимние сезоны 2015/16–2019/20 по предложенной расчётной схеме. Расчётная схема строилась на основе задачи теплопроводности трехслойной среды (снег, мерзлый и талый грунт) с фазовым переходом на границе мерзлого и талого грунта. Уравнение теплового баланса включало энергию фазового перехода, приток тепла из талого грунта и отток в мерзлый грунт и при наличии снежного покрова через него в атмосферу. Поток тепла рассчитывался по закону Фурье, как произведение теплопроводности и градиента температуры. Предполагалось, что температура в каждой из сред изменяется линейно (например, [DeGaetano et al., 2001]). Для снежного покрова и мерзлого грунта использовалась формула теплопроводности двухслойной среды.

Расчет промерзания грунта на основе данных о температуре воздуха, толщине и теплопроводности снежного покрова в течение зимнего периода позволял оценить интенсивность движения фронта промерзания в этот период времени. Зависимость скорости движения фронта промерзания находилась по расчетной схеме. Схема учитывала намерзание грунта снизу на массиве мерзлого грунта в зимний период на основе данных о ежедневной температуре воздуха (и толщине и теплопроводности снежного покрова).

Уравнение теплового баланса записывалось как $F_1 = cLV + F_2$ или как:

$$dh_{mz}/dt = V = (F_1 - F_2)/cL, \quad (1)$$

где F_1 – отток тепла через замёрзший грунт (и снежный покров) от фронта промерзания ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в атмосферу; $c L V = c L dh_{mz}/dt$ – расход тепла на фазовый переход, c – влагосодержание грунта ($1-4 \text{ кг}/\text{см}^3 \cdot \text{м}^2$), (последнее значение соответствует полному заполнению пор водой у легкой глины с плотностью $2000 \text{ кг}/\text{м}^3$ и коэффициентом пористости $0,617$ [Грунтоведение, 2005]); L – энергия фазового перехода ($335 \text{ кДж}/\text{кг}$);

$V = dh_{мг} / dt$ – скорость движения фронта промерзания (см/с); F_2 – отток тепла на охлаждение талого грунта перед фронтом промерзания (Вт/м²).

Тепловой поток выражался по закону Фурье: $F = -\lambda \text{ grad } T$. Тепловой поток через замёрзший грунт от фронта промерзания в атмосферу в случае наличия снежного покрова выражался через теплопроводность и тепловой поток комбинации из двух сред (снежный покров и мерзлый грунт) согласно данным справочника [Мухеев, 1977] как:

$$F_1 = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{-\Delta T}{\frac{\Delta x_c}{\lambda_c} + \frac{\Delta x_{мг}}{\lambda_{мг}}} = \frac{-T_{возд}}{\frac{h_c}{\lambda_c} + \frac{h_{мг}}{\lambda_{мг}}} \quad (2)$$

Здесь $T_{возд}$ – температура воздуха, h_c и $h_{мг}$ – толщина снега и глубина промерзания, а λ_c и $\lambda_{мг}$ – теплопроводность снега и мёрзлого грунта.

Предполагалось, что на глубине 10 м в грунте находится точка нулевых годовых колебаний температуры T_0 со среднегодовым значением около 7°C. Поэтому

$$F_2 = -\lambda_{мг} \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda_{мг} \frac{T_0}{10 - h_{мг}} \quad (3)$$

Здесь $\lambda_{мг}$ – теплопроводность талого грунта. Вычисления производились с шагом в один день. На первый момент предполагалось, что толщина мерзлого грунта $h_{мг}$ равнялась 0,5 см. На каждом шаге по времени (каждый день) вычислялась (рассчитывалась) скорость промерзания V и значение толщины мерзлого грунта $h_{мг}$ для следующего дня (шага по времени). Согласно [Грунтоведение, 2005], средняя теплопроводность талого и мерзлого глинистого грунта могла быть взята как 1,4 и 1,8 Вт/м°C. Средняя теплопроводность снега λ_c рассчитывалась относительно плотности по формуле А.В. Павлова [Павлов, 1979] и бралась равной 0,18 Вт/м°C.

Результаты и выводы

В работе для выведенного дифференциального уравнения по времени первого порядка для изменения глубины промерзания грунта была построена разностная схема посредством аппроксимации этого дифференциального уравнения явным методом Эйлера: $h_{мг}(t_{n+1}) = h_{мг}(t_n) + \Delta t V(t_n)$. По полученной разностной схеме для каждого зимнего сезона 2015/16-2019/20 были произведены расчёты изменения глубины промерзания грунта. Пример результатов расчёта для зимнего сезона 2016/17 приведён на рисунке.



Рис. Изменение расчётной глубины промерзания (3) на основе температуры воздуха (1) и толщины снежного покрова (2) для метеостанции Терскол в зимний период 2016/17 гг.

Fig. Change in the estimated freezing depth (3) based on the air temperature (1) and the thickness of the snow cover (2) for the Terskol weather station in the winter 2016/17

Примененный метод расчёта является хорошо физически обоснованным. Решение по методу хорошо описывает процесс изменения глубины промерзания в течение зимнего сезона. Важным для успешной работы метода является наиболее возможно точное задание начальных данных.

Результаты расчета максимальной глубины промерзания грунта для метеостанции Терскол за зимние периоды 2015/16–2019/20 приведены в таблице.

Таблица. Изменение максимальной глубины промерзания грунта, средней за февраль толщины снежного покрова и суммы отрицательных месячных температур для метеостанции Терскол за зимние периоды 2015/16–2019/20

Table. Changes in the maximum depth of soil freezing, average for February snow cover thickness, and the sum of negative monthly temperatures for Terskol weather station for winter periods 2015/16–2019/20

Зимний период	Сумма отриц. мес. температур, °С	Сред. за февраль толщина снежного покрова, см	Макс. глубина промерзания грунта, см
2015/16	-18,7	60	21
2016/17	-27,7	40	23
2017/18	-14,2	70	8
2018/19	-19,4	60	20
2019/20			20

Таким образом, предложенный метод расчёта динамики глубины промерзания грунта на основе данных о температуре воздуха и толщине снежного покрова позволяет оценить промерзание грунта как сдерживающего фактора селевого процесса.

Благодарности

Работа выполнена на основе темы I.7 АААА-А16-116032810093-2 «Картографирование, моделирование и оценка риска опасных природных процессов» (ГЗ).

Список литературы

- Грунтоведение. Под ред. В.Т. Трофимов. — М.: Изд-во МГУ, Наука, 2005, 1024 с.
- Кудрявцев В.А. Температура верхних горизонтов вечномерзлой толщи в пределах СССР / М.: Изд-во АН СССР, 1954. 183 с.
- Михеев М.А. Основы теплопередачи. Изд. 2-е / М.А. Михеев, И.М. Михеева. М., Энергия, 1977, 344 с.
- Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск, «Наука», 1979. 284 с.
- Перов В.Ф. Селеведение. Учебное пособие. – М.: Географический факультет МГУ, 2012. 272 с.
- DeGaetano, A.T., Cameron M.D., Wilks D.S. Physical simulation of maximum seasonal soil freezing depth in the united states using routine weather observation // *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(3), pp. 546–555.
- Golubev V.N., Petrushina M.N., Frolov D.M. Winter regime of temperature and precipitation as a factor of snow-cover distribution and its stratigraphy // *Annals of Glaciology*, 2008, 49, pp. 179-186.
- Haberkorn A., Wever N., Hoelzle M., Phillips M., Kenner R., Bavay M., Lehning M. Distributed snow and rock temperature modeling in steep rock walls using Alpine3D. *Cryosphere Discuss.* 2016. <https://doi.org/10.5194/tc-2016-73>.



Vulnerability of buildings exposed to dynamic flooding

S. Fuchs¹, M. Papathoma-Köhle¹, M. Keiler^{2,3}

¹*Institute of Mountain Risk Engineering, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria, sven.fuchs@boku.ac.at*

²*Institute of Geography, University of Bern, Bern, Switzerland*

³*Oeschger Centre for Climate Change Research, Mobiliar Lab for Natural Risks, University of Bern, Bern, Switzerland*

Abstract. Repeatedly, dynamic flooding causes high loss in many mountain regions all over the world. Dynamic flooding is a group of hazard processes including fluvial sediment transport, debris floods, and debris flows, as well as to some extent flash flood hazards if these are related to mountain catchments. Regardless of the magnitude and frequency, the consequences of dynamic flooding are strongly connected to the vulnerability of elements at risk, such as people, buildings and infrastructure. Several methods to assess physical vulnerability of buildings towards these processes are available. The plethora of methods and approaches, however, makes a comparison between different case studies challenging. Assessment methods can be classified in three categories: vulnerability matrices, vulnerability curves and vulnerability indices. We provide a short review of these methods and discuss their dominance in the scientific debate on mountain hazard risk management over the last decade, giving an emphasis to vulnerability curves. Furthermore, challenges in vulnerability assessment including data requirements, uncertainties, and needs for improved event documentation are outlined.

Key words: *vulnerability, indicators, functions, elements at risk*

Cite this article: Fuchs S., Papathoma-Köhle M., Keiler M. Vulnerability of buildings exposed to dynamic flooding. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 422–429.

Уязвимость зданий, подверженных динамическим наводнениям

С. Фукс¹, М. Папатхома-Кёле¹, М. Кейлер^{2,3}

¹*Институт инженерии горных рисков, Университет природных ресурсов и наук о жизни, Вена, Австрия, sven.fuchs@boku.ac.at*

²*Институт географии, Бернский университет, Берн, Швейцария*

³*Центр исследований изменения климата им. Эизгера, Мобильная лаборатория природных рисков, Бернский университет, Берн, Швейцария*

Аннотация. Неоднократно динамические наводнения приводили к большим потерям во многих горных регионах по всему миру. Динамические наводнения представляют собой группу опасных процессов, включающих транспорт речных наносов, селевые паводки и потоки, а также в некоторой степени ливневые паводки, если они связаны с горными речными бассейнами. Независимо от масштабов и частоты, последствия динамических наводнений тесно связаны с уязвимостью подвергающихся риску элементов, таких как люди, здания и инфраструктура. Существует несколько методов оценки физической уязвимости зданий по отношению к этим процессам. Однако обилие методов и подходов затрудняет сравнение различных тематических исследований. Методы оценки можно разделить на три категории: матрицы уязвимости, кривые уязвимости и индексы уязвимости. В данной статье дается краткий обзор этих методов и обсуждается их доминирующее положение в научных дискуссиях по управлению рисками,

связанными с опасностями в горных районах, за последнее десятилетие, особое внимание уделяется кривым уязвимости. Кроме того, излагаются задачи в области оценки уязвимости, включая требования к данным, факторы неопределенности и потребности в улучшении документации событий.

Ключевые слова: уязвимость, индикаторы, функции, элементы риска

Ссылка для цитирования: Фукс С., Папатхома-Кёле М., Кейлер М. Уязвимость зданий, подверженных динамическим наводнениям. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 422–429.

Introduction

Mountain areas are high-risk environments threatened by a range of natural hazards, such as dynamic flooding, landslides and snow avalanches. Dynamic flooding is defined as constantly or temporarily flowing watercourses with strongly changing perennial or intermittent discharge and flow conditions, originating within small and steep catchment areas often located in mountain environments [ONR, 2009]. Despite their differences in terms of time of onset, duration, frequency and magnitude, dynamic flooding includes a variety of different processes which can be categorised by peak discharge [Hungr *et al.*, 2001] or sediment concentration [Costa, 1984]. These processes include fluvial sediment transport, debris flows and debris floods. Furthermore, even if defined by space-time scales rather than sediment concentration, flash floods in mountain areas can be included if these are related to torrential catchments [Borga *et al.*, 2014]. All these processes are further referred to as “dynamic flooding”.

Dynamic flooding repeatedly results in considerable damage to infrastructure and buildings, despite high investments in hazard and risk mitigation [Fuchs *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2018; Zischg *et al.*, 2018; Zou *et al.*, 2018; Schlögl *et al.*, 2019] which is frequently attributed to both, the effects of climate change leading to changes in frequency and magnitude of events [Huggel *et al.*, 2019] and the effects of socio-economic development leading to a higher asset concentration [Fuchs *et al.*, 2017; Löschner *et al.*, 2017; Röthlisberger *et al.*, 2017]. Other drivers, such as urbanization, economic degradation, deforestation and overgrazing may additionally influence the impact of natural hazards on mountain communities [Zimmermann and Keiler, 2015; Klein *et al.*, 2019]. As the vulnerability of communities experiencing the impact of such dynamics is still less well known [UN/ISDR, 2015], there is a need for improved understanding of disaster risk in all its dimensions, above all, exposure and vulnerability.

Vulnerability is multidimensional [physical, social, economic, environmental, etc., Fuchs and Thaler, 2018], however, despite a considerable amount of research efforts, only little is known with respect to the physical vulnerability and resilience of elements at risk [Golz *et al.*, 2015; Schinke *et al.*, 2016; Bozza *et al.*, 2018; Fuchs *et al.*, 2018; Sturm *et al.*, 2018a]. With respect to methods for an assessment of the physical vulnerability of exposed buildings, some scholars focused on mountain hazards in general [Papathoma-Köhle *et al.*, 2011] and some specifically on dynamic flooding [Papathoma-Köhle *et al.*, 2017]. Short reviews can be found in many papers and studies such as the ones of Fuchs *et al.* [2007], Akbas [2009], Sterlacchini *et al.* [2013], Totschnig and Fuchs [2013], Carisi *et al.* [2018] and Milanese *et al.* [2018] who provide short discussions on functional vulnerability relationships to be used in risk assessment. This paper summarises methods for physical vulnerability assessment as far as dynamic flooding is concerned, with a particular focus on vulnerability curves, on alternative assessment methods and on challenges and recommendations for future research.

The first attempts to assess physical vulnerability to the built environment were vulnerability matrices, a qualitative method to relate hazard intensities to associated consequences such as damage or loss. Over time, these matrices evolved to the more quantitative methods such as vulnerability curves, and, more recently, vulnerability indicators

employed for the assessment of physical vulnerability of buildings. The advantages and disadvantages of these three methodological approaches are summarised in Table [Papathoma-Köhle et al., 2017].

Table. Overview of existing methods for the assessment of physical vulnerability regarding torrential hazards [modified from Papathoma-Köhle et al., 2017]

Method	Advantages	Shortcomings
Vulnerability matrices	Qualitative method, no need for ex-ante data or detailed information	Results may not be translated into monetary loss. Assessment of damage under specific intensities or process characteristics is objective.
Vulnerability curves	The method is quantitative and may “translate” an event into monetary cost	Important characteristics of the natural process (e.g. velocity, duration, direction etc.) as well as the element at risk (number of floors, construction material) are ignored. Highly-demanding in ex-post information
Vulnerability indicators	Characteristics of the element at risk are taken into consideration	The intensity of the process is not considered, demanding in data (detail, amount quality)

Vulnerability functions

Vulnerability functions are a quantitative method for assessing the vulnerability of buildings. They are widely used for assessing risk from hazards such as earthquakes and riverine floods where data is available in a sufficient quantity to create a reliable curve. Vulnerability functions are continuous curves that relate the hazard intensity (X-axis) to the damage state of a building (Y-axis) [Tarbotton et al., 2015]. In the case of static (riverine) flooding, intensity on the X-axis is often expressed as the inundation height. In dynamic flooding, however, damage patterns may be different from static inundation. Although the flow height of debris is mostly used as proxy for the hazard intensity [see Fuchs et al., 2019 for an overview], other factors such as velocity, orientation and duration of the flow as well as viscosity of the material are also important [Quan Luna et al., 2011; Rheinberger et al., 2013; Mazzorana et al., 2014; Carisi et al., 2018]. Such information, however, is rarely measured during event documentation [Fuchs et al., 2007], and only little information is available from laboratory experiments [Zhang et al., 2016; Sturm et al., 2018b], and effects of these factors on the overall degree of loss remain largely unknown. Moreover, recent studies unveiled limitations during model application with respect to the spatial extent of deposition heights [Chow et al., 2018; Milanesi et al., 2018] and resulting loss pattern [Fuchs et al., 2012]. Consequently, only a simplified representation of complex damaging processes is repeatedly used in vulnerability assessment, and results are therefore hardly transferable among different case studies [Cammerer et al., 2013; Papathoma-Köhle et al., 2017; Mosimann et al., 2018].

Hence, the majority of studies on dynamic flooding rely on vulnerability functions with limited data quantity and a high spread in data [Eidsvig et al., 2014]. The shape of the final curve depends on the statistical method used (regularly curve fitting based on non-linear regression) and therefore on the type of function selected. In more detail, once individual buildings are represented as points on a XY axis system then a function ensuring the best fit to the data may be chosen, and the associated error statistics such as R² (coefficient of determination) or RMSE (Root Mean Square Error) define its reliability. The function with the best fit should minimize the squared differences in data, which is consistent with the classical approach of curve fitting. Recent studies repeatedly computed Weibull distribution functions to mirror the overall relationship between hazard magnitude and observed degree of loss [Totschnig and Fuchs, 2013; Papathoma-Köhle et al., 2015].

Uncertainties of aleatory type can be expressed by confidence intervals, which depend on the distribution of errors. These uncertainties are based on the assumption of symmetrically

distributed errors around the mean degree of loss, which is hardly confirmed by empirical data. Moreover, the data spread of Weibull functions results in theoretical loss values above one and below zero, which is inconsistent with the definition of vulnerability. The observed loss pattern is characterized by less data with high values (larger degree of loss until complete destruction) than with small values (lower degree of loss), and the data showed a right-skewed distribution [Totschnig and Fuchs, 2013; Papathoma-Köhle et al., 2015]. The larger loss values tended to be farther away from the mean degree of loss than the smaller values. Hence, a suitable and stochastically valid probability model should be able to represent this skewness, which requires a parametric assumption and the selection of a probability distribution enabling the statistical treatment of uncertainties. A lack of predictive power of the degree of loss for future events is evident since current approaches were based on spurious error assumptions [Fox, 2016].

Furthermore, even if information on the monetary loss per building is required for the computation of vulnerability curves, such data are not always available and the cost of necessary repair works have been used as a proxy instead [e.g., Holub and Fuchs, 2008; Papathoma-Köhle et al., 2012; Golz et al., 2015; Neubert et al., 2016; Schinke et al., 2016]. Furthermore, economic values may differ significantly between individual buildings concerning the economic assessment of the overall reconstruction value. Consequently, the degree of loss (the ratio between the monetary loss and the value of the building) is often misleading since some buildings have an remarkably high value due to a high number of floors which influences the degree of loss in a negative way. An alternative approach to calculating loss (e.g. damage/m² per affected floor) may be the key to reduce uncertainties in this respect. Moreover, bias may occur as data on monetary loss often also includes additional compensation for the content of buildings or auxiliary buildings in the property, such information has to be excluded before vulnerability computation.

Vulnerability indicators

The use of vulnerability indicators could be useful to qualitatively assess vulnerability since physical vulnerability is dependent on building characteristics. This approach includes the selection of indicators relevant for the occurrence of a loss, the identification of their variables, weighting and finally aggregation in a vulnerability index. One of the first attempts to use such indices was made by Papathoma-Köhle et al. [2007] for buildings exposed to landslides in mountain areas. The method was later applied by Kappes et al. [2012] without considering the hazard intensity; this was only done by Silva and Pereira [2014] by using indicators such as construction material and technique, number of floors, floor and roof structure, etc. A similar approach was also chosen by Mazzorana et al. [2014] and Milanesi et al. [2018] in order to link the structural resistance of a building to the hazard magnitude. Thouret et al. [2014] as well as Ettinger et al. [2016] used indicators to assess the physical vulnerability of buildings to debris flows in the Peruvian Andes. Thouret et al. [2014] presented results from an analysis of high-resolution satellite imagery based on indicators such as building type, number of floors, percentage and quality of building openings and roof type. Using the same data together with ground truth observation, Ettinger et al. [2016] reported vulnerability indices based on indicators such as shape of city block and building density, building footprint, number of stories, as well as distance of buildings from channels and bridges. Finally, Thennavan et al. [2016] reported physical vulnerability indices for buildings in Indian Western Ghats hill ranges, based on the method of Papathoma-Köhle et al. [2007]. With respect to dynamic flooding, however, Papathoma-Köhle et al. [2017] concluded that the fact that the required data are of high resolution and detail makes the use of indicators challenging. In contrast, once also empirical data on damage are available, the interaction of the process with different building characteristics can be studied and empirical weighting may become possible. Nevertheless, additional research is needed for an improved selection of indicators, a better and reliable weighting and aggregation method and for consistent scenarios as a basis of the assessment [Papathoma-Köhle et al., 2019]. Moreover, as indicator-based approaches require detailed inventories of elements at risk, alternative ways of data mining such as remotely-sensed data

(e.g. Google street view), using questionnaires, and citizen-science increasingly gain importance [Haworth and Bruce, 2015].

Laboratory experiments supporting vulnerability assessment

Despite the numerous studies on the physical vulnerability of buildings, there is still a gap concerning the interaction between the hazard process and the building envelope. Numerical modelling based on laboratory experiments may be used to overcome this gap [Gems *et al.*, 2016]. The information acquired may replace or complement empirical data, as shown by some scholars for static inundation [Armanini *et al.*, 2011; Scheidl *et al.*, 2013; Mazzorana *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2016]. However, similar studies focusing on dynamic flooding in mountain catchments are still scarce. Regarding laboratory experiments, a remarkable effort to study and quantify the interaction between buildings and dynamic flooding has been made by Sturm *et al.* [2018a, b]. They used a 1:30 scaled fan model including building stock to capture the process impact pressure on the building envelope under different scenarios. The results of the measurements not only provided information on flow heights and impact pressure per building, but they also demonstrated the importance of scale in vulnerability assessment: while some of the buildings acted as protective shields for neighbouring buildings, they redirected the flow and finally increased the damage for other buildings. Moreover, it was shown that windows and other openings reduce the impact pressure on the walls decreasing at the same time the probability of a wall to collapse. Finally, Milanesi *et al.* [2018] studied the stability thresholds and the collapse mechanisms of traditional alpine masonry buildings exposed to hyperconcentrated flows using limit analysis, and the results were compared to the results of finite element analysis. Such studies can enhance the knowledge on building retrofitting and local structural protection, as shown by Holub *et al.* [2012] with respect to an idealised hazard-proof residential building in the Austrian Alps.

Conclusion and the way forward

The reliability of vulnerability curves is based on available empirical data related to the damage pattern of buildings following the impact of dynamic flooding. A thorough and standardised post-event documentation is necessary to increase the overall preciseness of such curves and to compute multiple curves for different building types as well as for buildings with common characteristics (e.g. buildings with basement, brick buildings, reinforced concrete buildings). Vulnerability indicators may be used to supplement vulnerability curves and to overcome the current scarceness in data.

The predictive power of vulnerability curves together with vulnerability indices could be enhanced using complementary empirical data based on a classification of elements at risk. In particular, a building-type based approach that uses dependencies between hazard and damage patterns for specific building categories can be helpful to estimate potential damage costs prior to disastrous events, provided it will be extended for dynamic flooding [e.g., Golz *et al.*, 2015; Schinke *et al.*, 2016].

Additionally, no physical vulnerability assessment is complete without the consideration of buildings of special use and infrastructure (critical infrastructure). So far, buildings such as hospitals or those related to other critical infrastructure cannot be included in the traditional vulnerability curves based on residential or commercial buildings. Moreover, studies of vulnerability curves for roads or other transport networks are also limited [Unterrader *et al.*, 2018; Schlögl *et al.*, 2019], and future research should be conducted in this direction. Finally, yet importantly, a significant challenge is the fact that vulnerability curves are often site-specific and therefore not always transferable among case studies.

The recent advances in vulnerability assessment methods for buildings threatened by dynamic flooding presented in this paper clearly show that there is still a need for further research in this field. Existing vulnerability curves may be improved with the availability of additional damage data and alternative methods such as indicator approaches may be used alone or in combination to shed light on the interaction between natural processes and elements at

risk. All this knowledge will contribute to the enhanced assessment of risk, to target-oriented mitigation and to the design of suitable risk reduction strategies.

References

- Akbas S, Blahut J, Sterlacchini S (2009) Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows. In: Malet J, Remaître A, Bogaard T (eds) *Landslide processes: From geomorphological mapping to dynamic modelling*. CERG Editions, Strasbourg, pp 229-233
- Armanini A, Larcher M, Odorizzi M (2011) Dynamic impact of a debris flow against a vertical wall. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment* 11:1041-1049
- Borga M, Stoffel M, Marchi L, Marra F, Jakob M (2014) Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology* 518:194-205
- Bozza A, Asprone D, Manfredi G (2018) Physical resilience. In: Fuchs S, Thaler T (eds) *Vulnerability and resilience to natural hazards*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 145-189
- Cammerer H, Thieken A, Lammel J (2013) Adaptability and transferability of flood loss functions in residential areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13:3063-3081
- Carisi F, Schröter K, Domeneghetti A, Kreibich H, Castellarin A (2018) Development and assessment of uni- and multivariable flood loss models for Emilia-Romagna (Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18:2057-2079
- Chow C, Ramirez JA, Keiler M (2018) Application of sensitivity analysis for process model calibration of natural hazards. *Geosciences* 8:218
- Costa J (1984) Physical geomorphology of debris flows. In: Costa J, Fleisher P (eds) *Developments and applications of geomorphology*. Springer-Verlag, Berlin, pp 268-317
- Eidsvig UMK, Pappathoma-Köhle M, Du J, Glade T, Vangelsten BV (2014) Quantification of model uncertainty in debris flow vulnerability assessment. *Engineering Geology* 181:15-26
- Ettinger S et al. (2016) Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. *Journal of Hydrology* 541:541-563
- Fox J (2016) *Applied regression analysis and generalized linear models*. Sage Publications, Los Angeles
- Fuchs S, Frazier TG, Siebeneck L (2018) Physical vulnerability. In: Fuchs S, Thaler T (eds) *Vulnerability and resilience to natural hazards*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 32-52
- Fuchs S, Heiss K, Hübl J (2007) Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7:495-506
- Fuchs S, Keiler M, Ortlepp R, Schinke R, Pappathoma-Köhle M (2019) Recent advances in vulnerability assessment for the built environment exposed to torrential hazards: challenges and the way forward. *Journal of Hydrology* 575:587-595
- Fuchs S, Keiler M, Zischg A (2015) A spatiotemporal multi-hazard exposure assessment based on property data. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15:2127-2142
- Fuchs S, Orntsmüller C, Totschnig R (2012) Spatial scan statistics in vulnerability assessment – an application to mountain hazards. *Natural Hazards* 64:2129-2151
- Fuchs S, Röthlisberger V, Thaler T, Zischg A, Keiler M (2017) Natural hazard management from a coevolutionary perspective: Exposure and policy response in the European Alps. *Annals of the American Association of Geographers* 107:382-392
- Fuchs S, Thaler T (eds) (2018) *Vulnerability and resilience to natural hazards*. Cambridge University Press, Cambridge
- Gems B, Mazzorana B, Hofer T, Sturm M, Gabl R, Aufleger M (2016) 3-D hydrodynamic modelling of flood impacts on a building and indoor flooding processes. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16:1351-1361
- Golz S, Schinke R, Naumann T (2015) Assessing the effects of flood resilience technologies on building scale. *Urban Water Journal* 12:30-43
- Haworth B, Bruce E (2015) A review of volunteered geographic information for disaster management. *Geography Compass* 9:237-250
- Holub M, Fuchs S (2008) Benefits of local structural protection to mitigate torrent-related hazards. In: Brebbia C, Beriatos E (eds) *Risk Analysis VI*. WIT Transactions on Information and Communication Technologies 39. WIT, Southampton, pp 401-411.
- Holub M, Suda J, Fuchs S (2012) Mountain hazards: reducing vulnerability by adapted building design. *Environmental Earth Sciences* 66:1853-1870
- Huggel C, Muccione V, Carey M, James R, Jurt C, Mechler R (2019) Loss and damage in the mountain cryosphere. *Regional Environmental Change* 19:1387-1399

- Hungr O, Evans S, Bovis M, Hutchinson J (2001) A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience* 7:221-238
- Kappes M, Papathoma-Köhle M, Keiler M (2012) Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography* 32:577-590
- Klein JA, Tucker CM, Nolin AW, Hopping KA, Reid RS, Steger C, Grêt-Regamey A, Lavorel S, Müller B, Yeh ET, Boone RB, Bourgeron P, Butsic V, Castellanos E, Chen X, Dong SK, Greenwood G, Keiler M, Marchant R, Seidl R, Spies T, Thorn J, Yager K, the Mountain Sentinels Network (2019) Catalyzing transformations to sustainability in the world's mountains. *Earth's Future* 7:547-557
- Löschner L, Herrnegger M, Apperl B, Senoner T, Seher W, Nachtnebel HP (2017) Flood risk, climate change and settlement development: a micro-scale assessment of Austrian municipalities. *Regional Environmental Change* 17:311-322
- Mazzorana B, Simoni S, Scherer C, Gems B, Fuchs S, Keiler M (2014) A physical approach on flood risk vulnerability of buildings. *Hydrology and Earth System Sciences* 18:3817-3836
- Milanesi L, Pilotti M, Belleri A, Marini A, Fuchs S (2018) Vulnerability to flash floods: A simplified structural model for masonry buildings. *Water Resources Research* 54:7177-7197
- Mosimann M, Frossard L, Keiler M, Weingartner R, Zischg A (2018) A robust and transferable model for the prediction of flood losses on household contents. *Water* 10: 1591-1524
- Neubert M, Naumann T, Hennersdorf J, Nikolowski J (2016) The Geographic Information System-based flood damage simulation model HOWAD. *Journal of Flood Risk Management* 9:36-49
- ONR (2009) *Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung*. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- Papathoma-Köhle M, Gems B, Sturm M, Fuchs S (2017) Matrices, curves and indicators: a review of approaches to assess physical vulnerability to debris flows. *Earth-Science Reviews* 171:272-288
- Papathoma-Köhle M, Kappes M, Keiler M, Glade T (2011) Physical vulnerability assessment for alpine hazards: state of the art and future needs. *Natural Hazards* 58:645-680
- Papathoma-Köhle M, Keiler M, Totschnig R, Glade T (2012) Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: debris flow event in South Tyrol. *Natural Hazards* 64:2083-2105
- Papathoma-Köhle M, Neuhäuser B, Ratzinger K, Wenzel H, Dominey-Howes D (2007) Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7:765-779
- Papathoma-Köhle M, Schlögl M, Fuchs S (2019) Vulnerability indicators for natural hazards: an innovative selection and weighting approach. *Scientific Reports* 9:15026
- Papathoma-Köhle M, Zischg A, Fuchs S, Glade T, Keiler M (2015) Loss estimation for landslides in mountain areas - An integrated toolbox for vulnerability assessment and damage documentation. *Environmental Modelling and Software* 63:156-169
- Quan Luna B, Blahut J, van Westen C, Sterlacchini S, van Asch T, Akbas S (2011) The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11:2047-2060
- Rheinberger C, Romang H, Bründl M (2013) Proportional loss functions for debris flow events. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13:2147-2156
- Röthlisberger V, Zischg A, Keiler M (2017) Identifying spatial clusters of flood exposure to support decision making in risk management. *Science of the Total Environment* 598:593-603
- Scheidl C, Chiari M, Kaitna R, Müllegger M, Krawtschuk A, Zimmermann T, Proske D (2013) Analysing debris-flow impact models, based on a small scale modelling approach. *Surveys in Geophysics* 34:121-140
- Schinke R, Kaidel A, Golz S, Naumann T, López-Gutiérrez JS, Garvin S (2016) Analysing the effects of flood-resilience technologies in urban areas using a synthetic model approach. *International Journal of Geo-Information* 5:202 (214 pages)
- Schlögl M, Richter G, Avian M, Thaler T, Heiss G, Lenz G, Fuchs S (2019) On the nexus between landslide susceptibility and transport infrastructure – an agent-based approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19:201-219
- Silva M, Pereira S (2014) Assessment of physical vulnerability and potential losses of buildings due to shallow slides. *Natural Hazards* 72:1029-1050
- Sterlacchini S, Akbas SO, Blahut J, Mavrouli O-C, Garcia C, Quan Luna B, Corominas J (2013) Methods for the characterization of the vulnerability of elements at risk. In: van Asch T, Corominas J, Greiving S, Malet J-P, Sterlacchini S (eds) *Mountain risks: from prediction to management and governance*. Springer, Dordrecht, pp 233-273
- Sturm M, Gems B, Keller F, Mazzorana B, Fuchs S, Papathoma-Köhle M, Aufleger M (2018a) Experimental analyses of impact forces on buildings exposed to fluvial hazards. *Journal of Hydrology* 565:1-13

- Sturm M, Gems B, Keller F, Mazzorana B, Fuchs S, Papathoma-Köhle M, Aufleger M (2018b) Understanding the dynamics of impacts at buildings caused by fluvial sediment transport processes. *Geomorphology* 321:45-59
- Tarbotton C, Dall'Osso F, Dominey-Howes D, Goff J (2015) The use of empirical vulnerability functions to assess the response of buildings to tsunami impact: Comparative review and summary of best practice. *Earth-Science Reviews* 142:120-134
- Thennavan E, Ganapathy GP, Sekaran SSC, Rajawat AS (2016) Use of GIS in assessing building vulnerability for landslide hazard in The Nilgiris, Western Ghats, India. *Natural Hazards* 82:1031-1050
- Thouret J-C et al. (2014) Assessing physical vulnerability in large cities exposed to flash floods and debris flows: the case of Arequipa (Peru). *Natural Hazards* 73:1771-1815
- Totschnig R, Fuchs S (2013) Mountain torrents: quantifying vulnerability and assessing uncertainties. *Engineering Geology* 155:31-44
- UN/ISDR (2015) Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. United Nations, Geneva
- Unterrader S, Almond P, Fuchs S (2018) Rockfall in the Port Hills of Christchurch: Seismic and non-seismic fatality risk on roads. *New Zealand Geographer* 74:3-14
- Zhang J, Guo ZX, Wang D, Qian H (2016) The quantitative estimation of the vulnerability of brick and concrete wall impacted by an experimental boulder. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16:299-309
- Zhang S, Zhang L, Li X, Xu Q (2018) Physical vulnerability models for assessing building damage by debris flows. *Engineering Geology* 247:145-158
- Zimmermann M, Keiler M (2015) International frameworks for disaster risk reduction: Useful guidance for sustainable mountain development? *Mountain Research and Development* 35:195-202
- Zischg A, Hofer P, Mosimann M, Röthlisberger V, Ramirez JA, Keiler M, Weingartner R (2018) Flood risk (d)evolution: Disentangling key drivers of flood risk change with a retro-model experiment. *Science of the Total Environment* 639:195-207
- Zou Q, Cui P, Zhou GGD, Li SS, Tang JX, Li S (2018) A new approach to assessing vulnerability of mountain highways subject to debris flows in China. *Progress in Physical Geography* 42:305-329



Селевые процессы на Северо-Востоке России

**Ю.В. Генсировский, Л.Е. Музыченко, В.А. Лобкина, А.А. Музыченко,
М.В. Михалев, Ю.А. Степнова**

*Сахалинский филиал Дальневосточного геологического института ДВО РАН,
Южно-Сахалинск, Россия, gensirovskiy@mail.ru*

Аннотация. В работе приводятся данные о районах селеформирования в горах центральной и восточной Чукотки, в горных районах юго-восточной Якутии, полученные в ходе полевых работ. Представлены натурные сведения о характеристиках селевых потоков.

Ключевые слова: сели, многолетнемерзлые породы, селевой расход, подземный сток, селевые отложения, атмосферные осадки, Чукотка, Якутия

Ссылка для цитирования: Генсировский Ю.В., Музыченко Л.Е., Лобкина В.А., Музыченко А.А., Михалев М.В., Степнова Ю.А. Селевые процессы на Северо-Востоке России. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 430–437.

Debris flow in the North-East of Russia

**Yu.V. Gensirovskiy, L.E. Muzychenko, V.A. Lobkina, A.A. Muzychenko,
M.V. Mikhalev, Y.A. Stepnova**

*Sakhalin Department of the Far East Geological Institute, Far Eastern Branch, Russian
Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, gensirovskiy@mail.ru*

Abstract. The paper presents the debris flows data on ain the mountains of Central and Eastern Chukotka, in the mountainous regions of South-Eastern Yakutia, obtained during field work. Full-scale information about the characteristics of debris flows is presented.

Key words: debris flow, permafrost soils, subsurface runoff, alluvial deposits, debris flows deposits, precipitation, Chukotka, Yakutia

Cite this article: Gensirovskiy Yu.V., Muzychenko L.E., Lobkina V.A., Muzychenko A.A., Mikhalev M.V., Stepnova Y.A. Debris flow in the North-East of Russia. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 430–437.

О селевых процессах на Северо-Востоке России, в специальной литературе имеется небольшой объем информации [Флейшман, 1978, Лапердин, 2010, Перов, 2012]. Зачастую, это ссылки на информационные сообщения, о катастрофах, причиной которых, стал сход селевых потоков [Перов, 2012, Романенко, 2018]. Это обусловлено, в первую очередь, труднодоступностью и малой освоенностью территорий Якутии, Чукотки. Существующие специализированные карты, имеют большую генерализацию и не могут с достаточной степенью, характеризовать селевую опасность столь обширной территории [Атлас снежно-ледовых ресурсов мира, <https://национальныйатлас.рф>]

Полевые описания селевых потоков и их характеристик, крайне редки, как в архивных материалах, так и в специальной литературе [Поморцев и др., 2013]. Зачастую в научной литературе, в статьях, посвященных развитию экзогенных геологических процессов на рассматриваемой территории, селевые потоки даже не упоминаются [Спектор и др., 2015].

В выполненной нами работе, представлены данные о селевых процессах, в районах, где в 2019 гг., лаборатория лавинных и селевых процессов СФ ДВГИ ДВО РАН проводила полевые исследования. На Чукотке это районы хребта Искатень (Чукотское нагорье) и Анюйского нагорья. В Якутии, бассейнах рек Вост. Хандыга, Дыбы в пределах хр. Сетге-Дабан и хр. Сунтар-Хаята. Участки исследований выделены цветом на карте-схеме территории (рис. 1).



Рис. 1. Карта-схема территории. Участки исследований обозначены красным контуром

Fig. 1. Map of the territory. Red contours show the study sites

Хребет Искатень (Чукотское нагорье)

На рассматриваемом участке хребет Искатень имеет абсолютные отметки, превышающие 1300 м абс. Характер рельефа - альпийский. Вершины острые, а гребень хребта скалистый и узкий. Склоны имеют глубокое расчленение и большую крутизну. На отдельных участках склонов в пригребневой части крутизна склонов превышает 60° .

Наиболее яркой чертой горного рельефа исследуемого участка является распространение процессов криогенной денудации - морозного выветривания и смещение чехла рыхлых отложений вниз по склонам в виде курумов, солифлюкционных потоков и др. А также наличие моренных отложений. На склонах развит водно-эрозионный рельеф с узкими поперечными профилями речных долин, большим количеством денудационных воронок, широко распространены склоны с углом естественного откоса $30-35^\circ$. Рельеф осложнён многочисленными ледниковыми карами, озёрами, трогами и цирками [География лавин, 1992]. Повсеместное развитие имеют многолетнемерзлые породы (ММП).

Наличие ММП, создающей водоупорные горизонты на склонах и увеличивающей скорость стока со склонов, приводит к формированию потенциальных селевых массивов (ПСМ), мощность которых ограничена кровлей пород, подстилающих сезонно-талый слой. В этих условиях в селевой процесс, в основном вовлекаются рыхлые отложения до глубины 1,5-3,0 м.

Данные, полученные при полевых исследованиях, позволяют говорить о том, что в бассейне рр. Эрвыкыннотвеем, Дорожная, Матачынай их притоков, а также по всем

водотокам, самостоятельно впадающим в залив Креста в районе п. Эгвекинот, формируются селевые потоки. Кроме этого, надо отметить, что по бортам долин, вышеназванных рек, широко развиты склоновые селевые потоки, которые выносят материал в основное русло водотоков. Отмечено формирование, как связанные (грязекаменные), так и несвязанные (наносоводные) селей, а также водоснежных потоков. Твердая составляющая грязекаменных селей состоит из супесчано-глинистого материала с примесью гальки и гравия, с включением валунов.

По результатам полевых работ установлено, что максимальные расходы селей, могут превышать 500 – 600 м³/с, ширина селеопасной зоны в V-образных долинах водотоков колеблется в пределах 30 – 60 м. Обнаруженные метки высшего селевого горизонта (ВСГ) на борту притока р. Дорожная, составили - 5,5 м. При выходе селей к морскому побережью и в широкие речные долины, потоки распластываются по конусам выноса, и их ширина увеличивается 150 – 250 м. (рис.2Б, В), при этом существенно снижается высота селевой волны до 1,5 – 2,0 м.

В селеопасной зоне находится территория п. Эгвекинот, а также автодорога Эгвекинот - Иультин. Последний случай массового формирования селей в районе п. Эгвекинот отмечен в начале октября 2016 года. Селевыми потоками повреждены хозяйственные постройки и мостовые переходы в самом поселке. За пределами поселка, селями нарушено полотно автодороги, повреждены и заматы мостовые переходы (рис. 2А,Г).



Рис. 2. Отложения селевых потоков в районе п. Эгвекинот. А – конус выноса грязекаменного селя в бассейне р. Дорожная; Б – селевые отложения в долине р. Дорожная; В – расчищенное от селевых отложений русло ручья на автодороге Эгвекинот - Иультин; Г – автодорожный мост на ручье Изыскательский (пос. Эгвекинот), расчищенный от отложений селя сошедшего в октябре 2016 г. Фото Ю.В. Генсировского

Fig. 2. Debris flow situation near Egvekinot Settlement: a – debris flow fan in the Dorozhnaya River basin; б - debris flow deposits in the Dorozhnaya River valley; в - streambed cleared of debris flow deposits on the “Egvekinot-Iultin” road; г - road bridge on the Izyskatelsky Stream (Egvekinot Settlement) cleared of the deposits of debris flow occurred on 16 October 2016. Photo by Yu.V. Gensiorovskiy

Ануйское нагорье

Ануйское нагорье является частью Ануйско-Чукотской складчатой системы, входящей в состав Тихоокеанского геосинклинального пояса [География лавин, 1992].

По морфологическим признакам рельеф района относится к среднегорному, различной степени расчленения, определяемой литолого-структурными особенностями горных пород. В формировании среднегорного рельефа большую роль играют водно-эрозионные процессы. Горы расчленены глубокими эрозионными долинами рек.

Вертикальная расчлененность рельефа от 300 до 800 м. Горизонтальная расчлененность от 1,2 до 0,8 км. Углы наклона изменяются от 12 до 40°. Поверхности водоразделов в большей своей части преобразованы длительными процессами криогенной денудации, что отчетливо прослеживается в сглаженности острых гребней и выступов на склонах, смягчении очертаний денудационных воронок [География лавин, 1992]. Выполаживанию участков склонов до 25-20°. Повсеместное развитие имеют ММП. Склоны покрыты крупноглыбовыми осыпями и курумником.

Так же, как и в хр. Искатень, многолетнемерзлые породы, создают водоупорные горизонты на склонах, по которым при снеготаянии и дождях, происходит интенсивный сток внутри ПСМ и обводнение грунтов, приводя их в состояние неустойчивого равновесия. Мощность ПСМ ограничена кровлей пород, подстилающих сезонно-талый слой. Это в целом влияет на объемы селевых потоков, значительно уменьшая мощность захвата грунтов при движении селя.

Исследования проводились в горной части бассейна р. Коральвеем. Следы прохождения селей отмечены на притоках р. Коральвеем разных порядков. По результатам работ можно говорить о том, что максимальные расходы селей, колеблются в пределах: 500 – 1000 м³/с. Ширина селеопасной зоны, в узких V-образных долинах составляет 10 – 50 м. При выходе селей в корытообразные долины более крупных водотоков, потоки расплываются по конусам выноса, и ширина селеопасной зоны достигает 100 – 200 м., при этом существенно снижается высота селевой волны до 0,5 – 1,5 м. Максимальные объемы селевых потоков могут превышать 300 000 м³. Формируются как связанные (грязекаменные), так и несвязанные (наносоводные) сели, а также водоснежные потоки. Твердая составляющая грязекаменных селей состоит из супесчано-глинистого материала с примесью гальки и гравия, с включением валунов (рис.3).

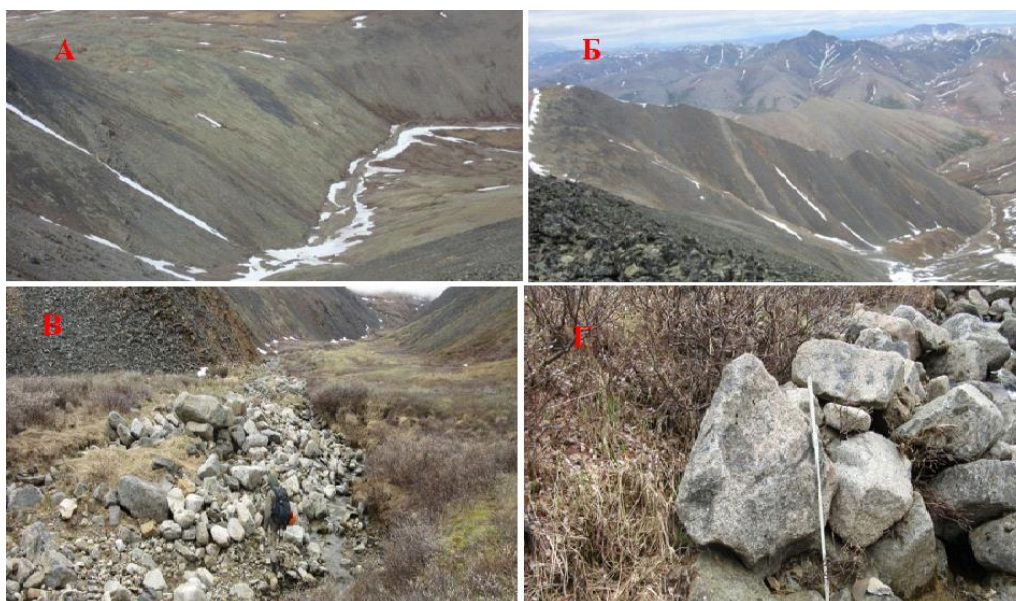


Рис. 3. Селевые отложения в долинах водотоков бассейне р. Коральвеем. А – типичные очаги селеформирования; Б – зона зарождения и отложения потока селевого потока, сошедшего в мае 2019; В – днище долины селевого водотока, заполненное разновозрастными селевыми отложениями; Г – валуны диаметром до 1,2 м в конусе выноса селевого потока. Фото Ю.В. Генсировского

Fig. 3. Koralyveem River basin: a – typical debris flow origination sites; б – initiation zone and deposits of debris flow occurred in May 2019; в - bottom of the debris flow watercourse valley, filled with multi-temporal debris flow deposits; г - boulders with a diameter of up to 1.2 m in the debris flow fan. Photo by Yu.V. Gensiorovskiy

Бассейны рек Восточная Хандыга и Дыбы в пределах хребтов Сетте-Дабан и Сунтар-Хаята

Рассматриваемая территория охватывает южную часть Верхоянского хребта, представляющего собой горно-складчатое обрамление Сибирской платформы, пересекая Скалистый хребет и отроги хр. Сетте-Дабан и хр. Сунтар-Хаята.

В рельефе наблюдается ярко выраженное альпинотипное высокогорье с абсолютными отметками вершин до 1800–2300 м и превышением водоразделов над днищами речных долин до 800–1300 м. В профилях долин выделяются крутые, часто обрывистые склоны гравитационного срыва крутизной более 40°; склоны делювиально-осыпного сноса средней крутизны (около 30°); пологие склоны делювиального сноса и делювиально-солифлюкционного накопления. Днища крупных речных долин и межгорных впадин несут следы ледниковой деятельности в виде ледниковой обработки, моренных образований и водно-ледниковых террас [География лавин, 1992]. Наблюдается сплошное распространение ММП, мощность которых колеблется от 100 до 500 м и более. Многолетняя мерзлота обуславливает широкое развитие солифлюкционных процессов на склонах долин, а также образование сезонных и многолетних наледей [Спектор и др., 2015]. Геологическое строение исследуемого района характеризуется наличием большого количества четвертичного гляцио-флювиального и моренного материала, интенсивными процессами морозного выветривания пород, образованием осыпей, курумов. Так же, как и в горных районах Чукотки, многолетнемерзлые породы, создают водоупорные горизонты на склонах, по которым при снеготаянии и дождях, происходит интенсивный сток внутри ПСМ и обводнение грунтов, приводя их в состояние неустойчивого равновесия. Как и по всей территории распространения ММП, мощность ПСМ ограничена кровлей пород, подстилающих сезонно-талый слой. В этих условиях в селевой процесс, в основном вовлекаются пролювиально-делювиальные отложения до глубины 1,5-4,0 м. Это оказывает влияние на объемы селевых потоков, уменьшая мощность захвата грунтов при движении селея.

Однако, в рассматриваемом районе, в руслах крупных рек и их притоков, накоплен значительный объем аллювиально-делювиальных отложений, под руслами таких водотоков, зачастую имеются талики, соответственно в селевой процесс вовлекается гораздо больший объем материала, и это влияет на объемы и характеристики селей. В большей части речных долин исследуемого района, прослеживаются селевые валы и селевые русла разного возраста. Средняя высота селевых валов варьирует от 1,0 до 5,0 метров. Селевые отложения представлены глыбами и валунами с включением гравия и гальки, с супесчаным заполнителем. В селевых конусах присутствует большое количество древесных стволов (рис. 4А, Г).

Максимальные расходы селей для небольших водотоков составляют 400-900 м³/с, единовременным выносом материала 100 000-150 000 м³.

На исследуемой территории на водотоках отмечаются резкие подъёмы уровней воды при снеготаянии и выпадении интенсивных дождей. Это ведет к увеличению скорости течения водотоков до 5 – 10 м/с. Такие скорости потока ведут к интенсивному выносу древесной растительности в русла водотоков, формирования в них плотин из карчей и валунов, с последующим их прорывом (рис. 5). При прорыве подобных плотин на участках, расположенных ниже по течению, формируются селевые потоки, насыщенные карчами и способные интенсивно эродировать русло и берега реки, увеличивая максимальную высоту селевой волны [Лехатинов, 1969; Генсиоровский и др., 2015, 2018].

В целом по результатам исследований можно говорить о том, что в крупных селевых бассейнах и по руслам рр. Вост. Хандыга, Дыбы, Томпорок возможно формирование селей с объемами, превышающими 1 млн м³.

В пределах горной территории хр. Сетте-Дабан и хр. Сунтар-Хаята, по селеопасной зоне проходит трасса «Колыма» (Якутск – Магадан).



Рис. 4. Селевые отложения в бассейне р. Вост. Хандыга. А – отложения грязекаменного селя на ручье в бассейне р. Вост.Хандыга; Б – конус выноса селевого потока в долине р. Куранах (бассейн р.Вост.Хандыга); В –валуны в конусе выноса селевого потока (бассейн р.Вост.Хандыга); Г – конус выноса селевого потока в русло р. Куранах (бассейн р.Вост.Хандыга). Отчетливо читаются три селевые пачки. Суммарная мощность селевых отложений – 8 м. Фото Ю.В. Генсировского

Fig. 4. Vostochnaya Khandyga River basin: а - deposits of the debris flow on the one of the streams; б - debris flow fan in the Kuranakh River valley; в- boulderson the debris flow; г - fanof the debris flow descending from tributary to the Kuranakh River channel, three layers of the debris flow deposits are identified, the total thickness of debris flow deposits is 8 m. Photo by Yu.V. Gensiorovskiy

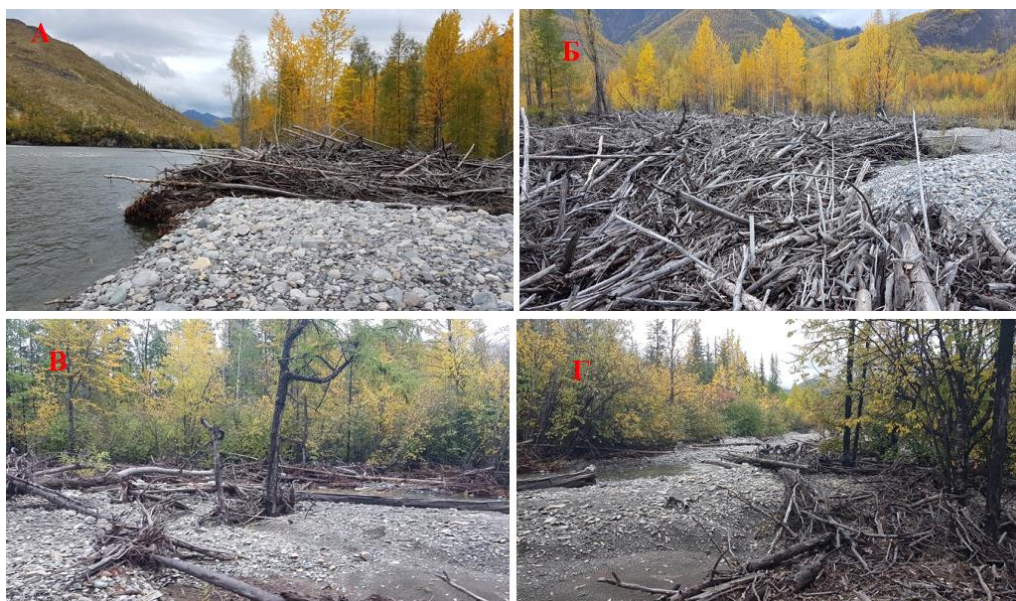


Рис. 5. Карчеходы на реках в хр. Сетте-Дабан. А,Б – залом, сформированный карчами в основном русле р. Вост. Хандыга. Мощность залома до 4,5 м., ширина по правой пойме до 100 м. В,Г – селевые отложения, насыщенные карчами в русле и пойме ручья, пересекающего трассу «Кольма» на 512+149 км. Фото Ю.В. Генсировского

Fig. 5. Timber drifting on the rivers of the Sette-Daban Range: а, б –log obstruction formed by timber drifting in the main channel of the Vostochnaya Khandyga River. Log obstruction thickness is up to 4.5 m, width of the right-bank floodplain is up to 100 m; в, г - debris flow deposits, saturated with timber drifting in the channel and on the floodplain of the stream, crossing the “Kolyma” highway at 512 + 149 km. Photo by Yu.V. Gensiorovskiy

Заключение

На рассмотренной в данной работе территории, отмечено широкое распространение селевых потоков. Это обусловлено следующими факторами.

Геологическое строение рассматриваемых районов (с точки зрения условий, благоприятных для развития селевых процессов) характеризуется большим количеством четвертичного гляцио-флювиального и моренного материала, интенсивными процессами морозного выветривания пород, образованием осыпей, курумами. Все эти породы формируют мощные ПСМ.

Атмосферные осадки, выпадающие на территории. Несмотря на то, что все рассматриваемые районы, характеризуются малым количеством выпадающих осадков (от 209 мм в Анойском нагорье до 540 мм в районе пос. Эгвекинот), надо отметить, что это данные станций наблюдательной сети Росгидромета, подавляющее большинство станций которого находятся в днищах речных долин в абсолютных отметках 5-500 м. С учетом того, что средняя высота водосборных площадей горных водотоков, превышает 1000 мабс., эти данные нуждаются в серьезной корректировке. В зависимости от экспозиции склона и его ориентации к влагонесущим потокам, а также от абсолютной высоты местности, количество выпадающих осадков сильно варьирует. Наивысшие наветренные участки могут получать более 1000 мм осадков в год. Подветренные склоны получают осадков меньше в 1,5- 2,5 раза [Дмитриев, 2013]. Так как снежный покров играет существенную роль в формировании селей и водоснежных потоков, то надо учитывать его перераспределение метелями по территории. В частности, формированию мощных снежных надувов на подветренных склонах. Тем самым, способствуя возникновению участков с избыточным увлажнением и как следствие, появлению зон зарождения склоновых селей и поверхностных оползней-оплывин.

Характерной особенностью для всей рассмотренной территории является наличие, многолетнемерзлых пород. ММП играют заметную роль в селеформировании. С одной стороны, они создают водоупорные горизонты на склонах, по которым при снеготаянии и дождях, происходит интенсивный сток внутри ПСМ и обводнение грунтов, приводя их в состояние неустойчивого равновесия. И при дальнейшем обводнении приводят к формированию селевых потоков. А с другой стороны, ограничивают вовлечение грунтов ПСМ в селевой процесс, в основном, сезонно-талым слоем. Глубина которого колеблется от многих факторов и в целом составляет 1,5-4,5 м.

Вышеприведенные факторы, на наш взгляд, являются ведущими в формировании селей на рассматриваемой территории. По результатам исследований можно говорить о том, что в рассмотренных районах сели формируются гораздо чаще, чем это было принято считать.

Список литературы

- Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. М.: ГУГК, 1998.
География лавин. (Под ред. Мягкова С.М., Канаева Л.А.). М.: МГУ, 1992, 332 с.
Романенко Ф.А. Селевые потоки на островах и побережьях арктических морей /Труды 5-й Международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». Тбилиси, Грузия, 2018, с. 521-528.
Генсиоровский Ю.В., Казаков Н.А., Жируев С.П., Павлов В.С. Влияние гидрометеорологических факторов на массовое селеобразование в горных районах Восточной Сибири // Сборник трудов III Международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита», Южно-Сахалинск: ИМГИГ ДВО РАН, 2014, с. 237-240.
Генсиоровский Ю.В., Казаков Н.А., Пряхина Г.В. Влияние подруслового стока при формировании дождевых паводков и селей на водотоках таежной зоны// Труды 5-й Международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита», Тбилиси, Грузия, 2018, с. 313-316.

- Дмитриев Е.П. и др. Особенности геоморфологического строения верхнего течения Восточная Хандыга // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К.Аммосова. Т. 10, № 3, 2013, с.23-29.
- Лапердин В.К., Качура Р.А. Геодинамика опасных процессов в зонах природно-техногенных комплексов Восточной Сибири. Иркутск, ИЗК СО РАН, 2010, 311 с.
- Лехатинов А.М. Роль заломов в формировании селей // Инженерно-геологическое изучение селей. Сер. гидрогеол. и инж. геол. М., ЦБНТИ, №4. 1969, с. 95-104.
- Поморцев О.А., Гукаев А.Ю., Поморцев В.А., Петрова М.В. Изменение климата и инженерно-геологические проблемы на трассе «Колыма» в южном Верхоянье// Разведка и охрана недр. №12, 2013, с. 70-75.
- Перов В.Ф. Селеведение. М., МГУ, 2012. 271 с.
- Спектор В.Б., Шестаков А.А., Торговкин Я.И., Спектор В.В. Обобщение данных о криолитозоне на инженерно-геологической карте Республики Саха (Якутия) м 1:1 500 000// Научный вестник. 2015, №2(4), с. 59-73.
- Флейшман С.М. Сели. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 312 с.
<https://национальныйатлас.рф>



Геоморфологические последствия и гидрометеорологические предпосылки экстремального паводка в бассейне р. Цаньк, район Большого Сочи

В.Н. Голосов^{1,2}, Ю.С. Кузнецова¹, Н.Н. Иванова¹, А.С. Цыпленков¹, Д.В. Ботавин¹,
М.М. Иванов^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, gollossov@gmail.com, atsyplenkov@gmail.com, nadine_iv@mail.ru, kuzyulia@gmail.com, dmitry.botavin@gmail.com, ivanovm@bk.ru

²Институт географии РАН, Москва, Россия

Аннотация. Субтропическая зона Черноморского побережья Кавказа являются регионом с высокой повторяемостью внезапных паводков, которые провоцируют существенные переформирования русел водотоков и вынос значительного объема наносов. Исследованы гидрометеорологические причины формирования и количественно оценены геоморфологические последствия прохождения мощного внезапного паводка на р. Цаньк (приток Мацесты) 8 сентября 2018 года. Установлено, что внезапный паводок сформировался при ливне слоем 23 мм, выпавшем на следующий день после ливня со слоем 43 мм. Ключевую роль в образовании внезапного паводка 8 сентября сыграло расположение ядра ливня и охват бассейна по площади этим дождем. На 2,3 км участке русла верхнего течения р. Цаньк и примыкающем к нему водосборе с 2014 г. проводятся наблюдения за интенсивностью основных экзогенных процессов. Годовой цикл стационарных полевых наблюдений был завершён за 2 дня до прохождения паводка. Это позволило, повторив наблюдения сразу после прохождения паводка, количественно оценить суммарный объём перемещённого материала за данное единичное событие. Максимальные расходы воды при прохождении внезапного паводка как минимум вдвое превышали ранее наблюдавшиеся за период с 2014 г. Установлено, что суммарный объём наносов, включая материал, поступивший со склонов водосбора и сформированный за счёт размыва русла на исследованном участке водосбора, составил 650-700 м³. Это больше суммарных годовых объёмов перемещённого материала за период наблюдений. Почти половина наносов сформировались за счёт размыва берегов русла, сложенных рыхлообломочным материалом и коренными породами.

Ключевые слова: внезапный паводок, перераспределение наносов, русловая эрозия

Ссылка для цитирования: Голосов В.Н., Кузнецова Ю.С., Иванова Н.Н., Цыпленков А.С., Ботавин Д.В., Иванов М.М. Геоморфологические последствия и гидрометеорологические предпосылки экстремального паводка в бассейне р. Цаньк, район Большого Сочи. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 438–445.

Geomorphological consequences and hydrometeorological conditions of extreme flood in the Tsanyk River basin, Sochi region

V.N. Golosov^{1,2}, Yu.S. Kuznetsova¹, N.N. Ivanova¹, A.S. Tsyplenkov¹, D.V. Botavin¹,
M.M. Ivanov^{1,2}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, gollossov@gmail.com, atsyplenkov@gmail.com, nadine_iv@mail.ru, kuzyulia@gmail.com, dmitry.botavin@gmail.com, ivanovm@bk.ru

²Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow Russia

Abstract. The subtropical zone of the Black Sea coast of the Caucasus is a region with high frequency of flash floods, which led to significant river channel transformation and the removal of a huge amount of sediment. The hydrometeorological causes of the formation are investigated and the geomorphological consequences of the powerful flash-flood on the Tsanyk River (tributary of the Matsesta River) September 8, 2018 are quantified for a 2.3 km section of the channel of the upper reach of the river. It was found that a flash flood formed during a shower with a layer of 23 mm, which fell the day after a shower with a layer of 43 mm. The key role in the formation of the flash-flood on September 8 was played by the location of the shower core and the coverage of the basin over the area by this rain. Since 2014, the intensity of the main exogenous processes the have been monitoring in the 2.5 km reach of the Tsanyk River channel and the adjacent part of the catchment. The annual cycle of stationary field observations was completed 2 days before the flash flood. This made it possible to quantify the total volume of displaced material for this single event by repeating the observations immediately after the flash-flood. The maximum water discharge during given flash flood was at least twice that previously observed for the period from 2014. It was established that the total volume of sediment, including material from the slopes of the catchment and formed due to erosion of the channel in the studied catchment area, amounted to 650-700 m³. This is more than the total annual volumes of displaced material for previous years of observation. Almost half of the sediment was formed due to erosion of the river banks, composed of friable material and bedrock.

Key words: *flash flood, sediment redistribution, channel erosion*

Cite this article: Golosov V.N., Kuznetsova Yu.S., Ivanova N.N., Tsypfenkov A.S., Botavin D.V., Ivanov M.M. Geomorphological consequences and hydrometeorological conditions of extreme flood in the Tsanyk River basin, Sochi region. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 438–445.

Введение

Усиление частоты и величины экстремальных гидрологических событий (ЭГС) отмечается на Северном Кавказе в связи с климатическими изменениями [Алексеевский и др., 2016]. Среди ЭГС, зафиксированных на реках Северного Кавказа, значительное место занимают сели [Шнытарков и др., 2012; Магрицкий, 2014]. Между тем, в субтропической зоне Черноморского побережья, которая охватывает достаточно узкую полосу с низкогорным рельефом, нередки явления, которые в англоязычной литературе называются flash-flood, или внезапные ливневые паводки [Kuksina et al., 2017]. Судя по крупности аллювия в руслах малых водотоков, где наблюдаются подобные явления, их мощность вполне сопоставима с селями. Тем не менее, несмотря на достаточно хорошую изученность повторяемости и последствий подобных паводков, которые наиболее широко распространены в субтропическом поясе, до сих пор нет ясного представления об условиях, способствующих их формированию [Куксина и др., 2020].

Цель данного исследования состоит в характеристике причин возникновения и оценке последствий внезапного ливневого паводка, который прошёл в начале сентября 2018 на водосборе р. Цанык (район Большого Сочи).

Объект и методика исследований

Водосбор р. Цанык с площадью водосбора 11,7 км² располагается в центральной части Большого Сочи и по своим морфометрическим параметрам и степени антропогенной нагрузки является типичным речным бассейном предгорно-низкогорной зоны Черноморского побережья Кавказа. Его физико-географическая характеристика бассейна приведена в работах [Цыпленков и др., 2017; Иванова и др., 2018]. В пределах

бассейна выделяются четыре участка с различной степенью антропогенной нагрузки и морфологией дна долины. Участок 6-9 км от устья является наиболее слабо антропогенно преобразованным. Он находится в пределах Сочинского заказника. Русло развивается в естественных условиях, образуя серию вынужденных и адаптированных излучин. На данном участке и примыкающей к нему части водосбора проводятся детальные наблюдения за темпами экзогенных процессов (рис. 1).

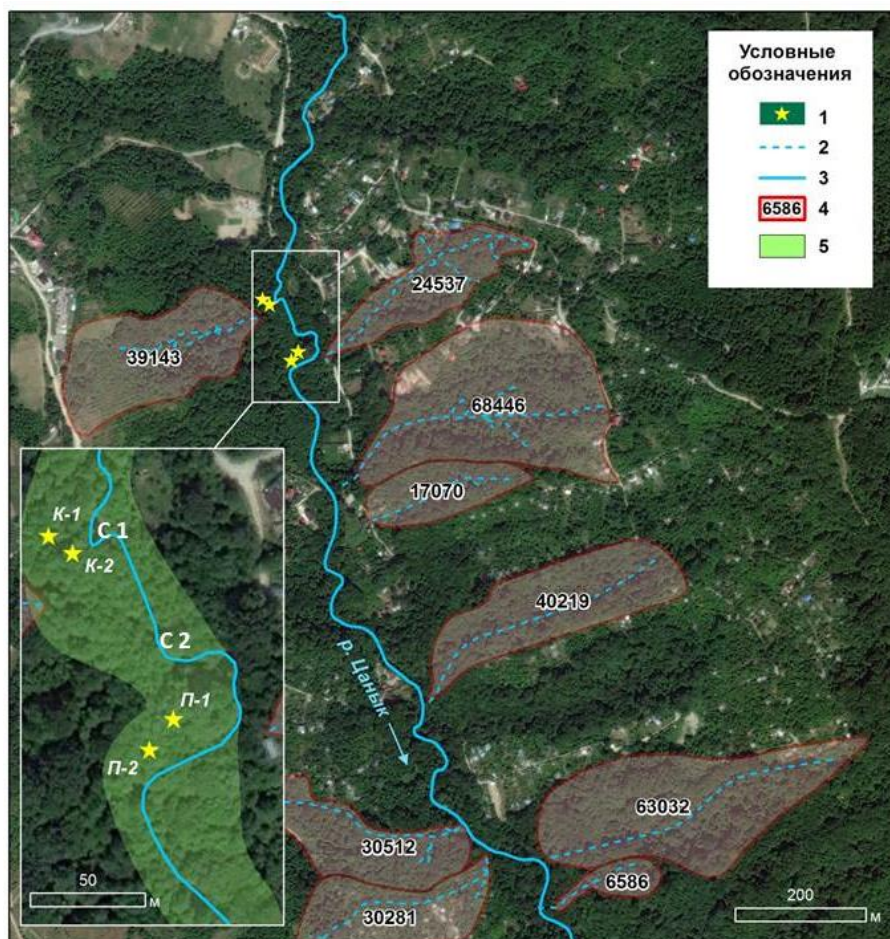


Рис.1. Исследуемая часть водосбора р. Цанык, расположенная в Сочинском заповеднике. Условные обозначения: 1 - разрезы; 2 – временные водотоки; 3 – постоянный водоток; 4 - площади водосборов притоков р. Цанык; 5 - карта врезка , где К-1, К-2 – разрезы на конусе выноса, П-1, П-2 – разрезы на пойме; С1 и С2 – стационары по мониторингу размыва берегов и дна реки

Fig. 1. The studied part of the Tsanyk River catchment, located in the Sochi Reserve. Legend: 1- pits; 2 - temporary watercourses; 3 - permanent watercourse; 4 - catchment areas of the tributaries of the Tsanyk River; 5 - inset map, where K-1, K-2 - pits on the sediment cone, P-1, P-2 - pits on the floodplain; C1 and C2 are section for monitoring bank and bottom erosion

Возможность оценить геоморфологические последствия внезапного паводка на р. Цанык, прошедшего в период 7-9 сентября 2018 г. связана с тем, что на этом объекте несколько лет проводятся ежегодные наблюдения за темпами размыва берегов и характером проявления эрозионно-аккумулятивных процессов на конусах выноса оврагов-притоков. В сентябре 2018 г. ежегодные наблюдения и замеры были проведены за 1-2 дня до паводка, а после его завершения были выполнены повторные замеры, что позволило оценить последствия данного паводка.

Для оценки переформирования пойменно-руслового рельефа р. Цанык на участке русла реки проводится повторная тахеометрическая съемка с помощью электронного

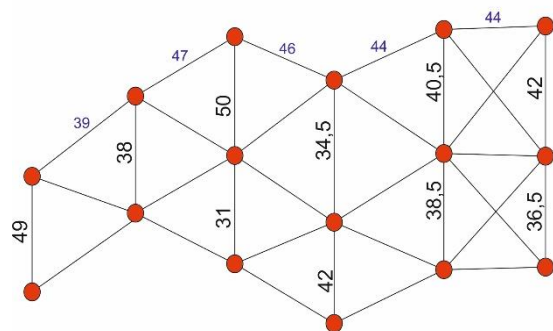
тахеометра Leica в условной прямоугольной системе координат с привязкой к реперной системе. Составление плана рельефа и дальнейший анализ производился в геоинформационной системе ESRI ArcGIS. Оценка темпов размыва бортов русла р. Цаньк проводилась с использованием метода шпильек [Кузнецова и др., 2015]. Ранее были выделены основные типы бортов русла в зависимости от их литологического состава. Основные группы включали: а) коренные склоны, сложенные флишевыми толщами (переслаивание песчаников, аргиллитов и алевролитов); б) уступы пойменно-террасового комплекса, сложенные рыхлыми отложениями. Всего на участке днища долины длиной 2,3 км в сентябре 2016 г. было организовано 6 площадок мониторинга за динамикой размыва береговых уступов. На каждом участке перпендикулярно подмываемому борту забивались шпильки, расположенные рядами, преимущественно в шахматном порядке через 40-60 см (рис. 2).

ЦГ-04

подмываемый коренной склон,
 правый борт долины

рыхлые отложения

шпильки забиты полностью



ЦГ-04	2016-09-01T08:11:55Z	39,79159800000	43,61570500000	195,62352000000
-------	----------------------	----------------	----------------	-----------------

Рис. 2. Участок мониторинга размывов бортов русла р. Цаньк ЦГ-04, схема расположения реперов-шпильек

Fig. 2. The monitoring site TsG-04 for observation for the bank erosion, River Tsanyk, view of pin locations on the channel bank

На двух участках высокой поймы был проведён отбор послойный проб из разрезов для определения содержания в них ¹³⁷Cs. Отбор проводился из передней стенки разреза с площади 15x15 через каждые 3-4 см. Перед отбором было проведено описание отложений. Также на исследуемом участке днища долины регулярно проводилось полевое геоморфологическое картирование, с особым вниманием к элементам рельефа, активно преобразуемым в процессе русловых переформирований. Была определена протяжённость и высота над урезом участков подмыва берегов, сложенных разными породами, зафиксирована крупность аллювия на участках руслах с различной морфологией.

Для оценки динамики и повторяемости выпадения стокоформирующих ливней были собраны данные 3-х часовых осадков за период 1966 по 2018 гг. по метеорологической станции Раздольное, расположенной на западной границе водосбора. Среднегодовое количество осадков в данном регионе составляет 1570 мм за более чем 100-летний период наблюдения [Цыпленков и др., 2017]. Данные с автоматического уровнемера АГК-0193, входящего в Автоматизированную систему мониторинга паводковой ситуации на реках Краснодарского края [<http://emergit.ru/map>] (координаты датчика: 43,57661; 39,7823) использовались для анализа гидрологического режима р. Цаньк.

Результаты и обсуждение

Внезапный паводок, последствия которого оцениваются в статье, сформировался в начале сентября. За день до его формирования на водосборе прошёл ливень 43 мм, который привёл к подъёму уровня воды на 36 см. Максимальный подъём уровня, когда за 40 минут уровень воды достиг 117 мм, был спровоцирован ливнем в 23 мм, выпавшем утром 8 сентября 2018 года. Данный внезапный паводок с гидрологической точки зрения является уникальным для данного водосбора для периода наблюдений за уровнем воды с 2014 года. Следует отметить, что если исходить из данных наблюдений на метеостанции Раздольное, расположенной на западной границе водосбора, он был вызван осадками 99.9% обеспеченности (23 мм), выпавшими примерно через 24 часа после осадков 90% обеспеченности (43 мм). При этом осадки более низкой обеспеченности (25% и менее) не вызывали таких подъёмов уровня на протяжении 5 лет наблюдений.

Ряд исследователей [Бондырев, Церетели, 2007] считают интенсивность осадков 50-80 мм/сутки достаточной для формирования селевого потока на всех водотоках, дренирующих горы Северного Кавказа. На наш взгляд, что данное условие необходимо, но недостаточно для возникновения внезапного дождевого паводка. Ключевую роль в образовании внезапного паводка 8 сентября сыграло расположение ядра ливня и охват бассейна по площади этим дождем. По одной точке измерения слоя осадков, невозможно судить о фактическом максимальном слое, который выпал по площади всего бассейна за дождь с зафиксированным слоем осадков в 23 мм. Ещё более важным фактором является интенсивность ливня, которая, скорее всего, превышала 1 мм/мин, что на фоне выпадения в предшествующий день дождя слоем 43 мм привело к очень быстрому сбросу воды со склонов в русло, что обусловлено перенасыщением влагой относительно маломощных (60-80 см) почв, сформировавшихся на коренных отложениях.

Полевые наблюдения за стоком воды и наносов в период прохождения внезапного паводка проводились на его спаде. Был установлен факт формирования поверхностного плоскостного стока, охватывающего все склоны водосбора, большая часть которых на исследуемом участке находится под лесом. Мутность поверхностного стока была сравнительно невелика. В расширениях днища долины на участках поймы и, особенно, на конусах выноса ряда притоков происходило переотложение наносов. Мощность отложившихся наносов достигала на конусах выноса >10 см. Выполненные ранее расчёты позволяют оценить смыв за подобное событие в 2-3 т/га (Цыпленков и др., 2017), что соответствует поступлению в днище долины р. Цанык на исследуемом 2,3 км участке 250-370 м³ наносов. На участках расширения днища долины, наносы, смываемые со склонов, частично, переоткладываются. Об этом свидетельствует эпюра вертикального распределения ¹³⁷Cs на пойме р. Цанык (рис. 3Б).

Высокие концентрации ¹³⁷Cs в верхних 21 см однозначно указывают на то, что переотложившийся материал поступил за счёт смыва с поверхности склонов. Установлено, что большинство притоков, впадающих в р. Цанык на исследуемом участке, являются зонами транзита наносов, поступающих в них со склонов, что связано с тем, что они уже врезаются до коренных пород. Исключением является правобережный приток, устье которого выходит на высокую пойму в районе стационара (С1 на врезке рис. 1). Здесь при формировании поверхностного стока происходит активное врезание в рыхлые отложения и подмыв берегов, что способствует выносу большого объёма наносов, часть которых переоткладывается на пойме, формируя большой конус выноса площадью порядка 750-800 м². Оценки суммарной аккумуляции, выполненные на основе использования ¹³⁷Cs в качестве маркера, позволили оценить их в 69 -70 см, отложившихся за период с 1986 г до 2015 г., когда проводился отбор (рис. 3А). Среднегодовые темпы аккумуляции составляют 2,3 см/год. Но фактические наблюдения за развитием конуса, которые проводятся с 2014 г., показывают, что было только 2 случая мощной аккумуляции, охватившей большую часть площади конуса выноса. Исходя из предположения, что повторяемость подобных событий была примерно одинаковой за прошедшие с 1986 г. 32 года, можно оценить, что всего за этот период

было 5-6 событий, аналогичных по стоку воды и наносов внезапному паводку 8 сентября 2018 года. Не более 10-20% материала, или 15 м³, вынесенного в днище долины, поступает вместе со стоком воды в русло р. Цанык.

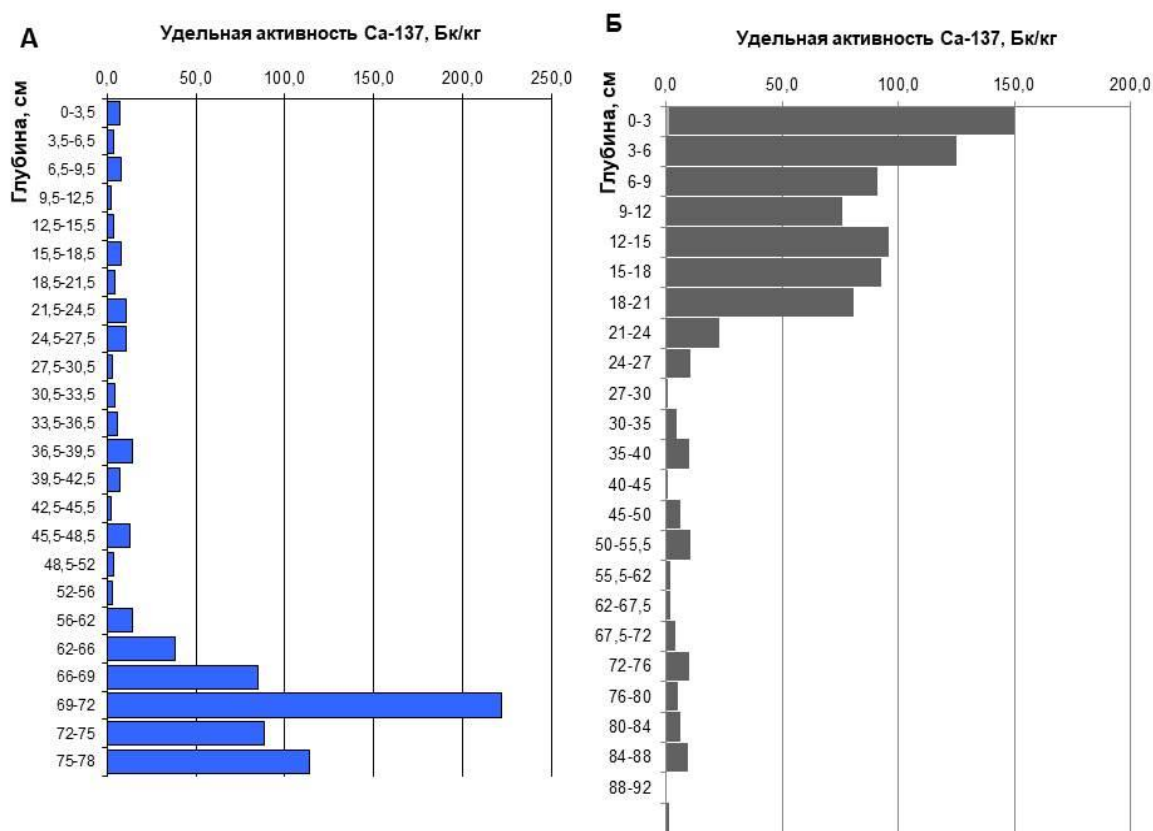


Рис. 3. Эпюры вертикального распределения ¹³⁷Cs в отложениях конуса выноса притока (разрез К-1, врезка на рис.1) и высокой поймы (разрез П-2)

Fig. 3. Plots of the ¹³⁷Cs vertical distribution in the sediments of the tributary cone (K-1, inset in Fig. 1) and high floodplain (pit П-2)

Сравнение результатов тахеометрических съемок днища долины на участке между стационарами 1 и 2 (рис. 1, врезка) до и после паводка 7-9 сентября 2018 г. показало, что это гидрологическое событие привело к изменениям как его плановых очертаний, так вертикальных отметок. Максимальное зафиксированное отступление бровки подмываемого склона составило 30-50 см, для большинства участков средние значения – 10-30 см, что соответствует максимальному и среднему объему материала, вынесенного при разрушении уступа пойменного яра, в 0,38 м³/м² и 0,16 м³/м² соответственно. На прямолинейном участке русла между стационарами был перемещён примерно 10 сантиметровый слой донных отложений, что составило порядка 24 м³, из которых не более 6-7 м³ переотложилось в русле в виде конуса выноса перед резким поворотом русла реки (рис. 4). Аналогичные изменения произошли на других прямолинейных участках, где русло продолжает врезаться в рыхлообломочные отложения пролювиально-аллювиального происхождения. Ниже по течению начиная с середины исследуемого 2,3 км участка р. Цанык, поток протекает по коренным породам и здесь донные наносы, поступающие с верхних участков, в основном переносятся транзитом. Врезание русла происходит локально на участках, где коренные породы более податливы к разрушению благодаря процессам выветривания.



Рис. 4. Конус выноса на участке изгиба русла р. Цанык в районе стационара 2 (рис. 1, врезка С2) до (А) и после (Б) внезапного паводка (Фото Голосова В.Н.)

Fig. 4. The sediment cone in the bend of the riverbed Tsanyk, section for monitoring bank and bottom erosion (Fig. 1, inset C2) before (A) and after (B) the flash flood (Photo by Golosov V.N.)

Обобщённые результаты оценок темпов размыва берегов по всем 6 участкам мониторинга свидетельствуют, что размыв берегов за внезапный паводок 8 сентября 2018 г. превышает суммарный размыв за год, как для бортов, сложенных рыхлыми отложениями, так и для сложенных коренными породами (флиш), причём в последнем случае более чем вдвое (таблица).

Таблица. Средние удельные объёмы размыва берегов с различным литологическим строением за разные интервалы времени (m^3/m^2)

Table. Average specific volumes of erosion of banks with different lithological structure in different time intervals (m^3/m^2)

Литология подмываемых берегов	Период наблюдений		
	Сентябрь 2016 - сентябрь 2017 гг.	Сентябрь 2017 - 6 сентября 2018 гг.	6 – 9 сентября 2018 г.
Рыхлые аллювиально-пролювиальные отложения	0,035	0,042	0,045
Переслаивание песчаников, аргиллитов и алевролитов	0,014	0,012	0,025

Таким образом, учитывая протяжённость секторов размыва берегов, объём наносов, вынесенных при прохождении внезапного паводка, составил на исследованном участке русла порядка 285-290 м³. Суммарный, включая вынос со склонов и размыв русла, объём наносов, перемещённых водотоком за экстремальный паводок, составил 650-700 м³, из которых не менее половины было вынесено за счёт размыва берегов и дна русла основного водотока.

Заключение

По результатам стационарных наблюдений удалось оценить условия формирования и геоморфологические последствия внезапного паводка на минимально нарушенном участке водосбора р. Цанык – типичной малой реки низкогорной зоны субтропического пояса ЧПК. Показано, что данный паводок, по максимальному расходу воды вдвое превышающий все паводки за 5-летний период наблюдения, сформировался при выпадении ливня со слоем 23 мм (99% повторяемость), но после 43 мм ливня, выпавшего за день до него. Суммарный объём наносов, вынесенный за пределы данного участка за данный паводок, составляет 650-700 м³, из которых более половины сформировалось за счёт размыва берегов и дна русла. Согласно данным стационарных наблюдений это превышает суммарный вынос материала с данной части водосбора за год.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проекты №16-05-00815 (полевые данные), №20-35-70035 (обработка, анализ гидрометеорологических данных) и РНФ проект №19-17-00181 (расчёты бассейновой и русловой эрозии, подготовка текста).

Список литературы

- Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Колтерманн П.К., Торопов П.А., Школьный Д.И., Белякова П.А. Наводнения на черноморском побережье Краснодарского края. - Водные ресурсы. 2016, № 1 (43), с. 3–17.
- Бондырев И.В., Церетели Э.Д., 2007. Катастрофические селевые потоки на юге Кавказа. В кн.: Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа, Труды Международной научн.-практич. конференции. Владикавказ, 20-22 сентября 2007 г., Владикавказ, ВНЦ РАН и РСО-А., с. 108-115.
- Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Цыпленков А.С., Кузнецова Ю.С., Ботавин Д.В. Источники бассейновой составляющей стока наносов малой реки низкогорно-предгорного пояса Черноморского побережья Кавказа (на примере р. Цанык). - Инженерные изыскания, 2018, № 7–8 (12), с. 62–76.
- Кузнецова Ю.С., Голосов В.Н., Куксина Л.В. Внезапные паводки: факторы формирования, распространение и методы прогнозирования. ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России, Москва, 2015, с. 207–214.
- Куксина Л.В., Голосов В.Н., Промахова Е. В. Причины возникновения и география внезапных ливневых паводков. - Вестник МГУ, сер.5, география, 2020, №1, с.11-22.
- Магрицкий Д.В. Пространственно-временные характеристики наводнений на Черноморском побережье Российской Федерации. - Вестник Московского университета, серия 5: География, 2014, №6, с. 39–47.
- Цыпленков А.С., Голосов В.Н., Куксина Л.В. Оценка бассейновой составляющей стока взвешенных наносов 2015 в малых речных бассейнах сухих и влажных субтропиков при экстремальном стоке. - Инженерные изыскания, 2017, № 9, с. 54–65.
- Шныпарков А.Л., Колтерманн К.П., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Перов В.Ф., 2012. Селевой риск на Черноморском побережье Кавказа. Геориск, № 4, с. 20–25.
- Kuksina L.V., Golosov V.N., Kuznetsova Y.S. Cloudburst floods in mountains: State of knowledge, occurrence, factors of formation. - *Geography and Natural Resources*. 2017, Vol. 38(1), p. 20–29. <http://emercit.ru/map/> (дата обращения: 27.09.2018).



Роль селей в цикле экстремальных экзогенных процессов в горах Центрального Кавказа (на примере бассейна реки Черек Балкарский)

В.А. Караваяев¹, А.В. Воскова², С.С. Семиноженко³, А.В. Федин¹, Е.Г. Лаппо¹,
С.А. Буланов¹

¹Институт географии РАН, Москва, Россия, karavaev@igras.ru,
fedinanton@mail.ru, ellappo@igras.ru, bulanov@igras.ru

²НИИПИ Генерального плана Москвы, Москва, Россия, avoskova@yandex.ru

³ФГБУ «Рослесинфорг», Москва, Россия, grey_wolf88@mail.ru

Аннотация. В статье предполагается, что процессы, связанные с накоплением и перемещением обломочного материала – обвально-осыпных и селей, имеют цикличность и подвержены комплексному воздействию нескольких факторов. Новизной является совместное их рассмотрение. Цикл развития экстремальных экзогенных процессов завершается сходом селя. В ходе цикла одни процессы обуславливают другие, он способен длиться в течение ряда лет и на исследуемой территории составляет от 3 до 6 лет. Проводится анализ данных 2019 г. основных факторов проявления экстремальных экзогенных процессов в бассейне р. Черек Балкарского, где авторы проводят мониторинг последних, начиная с 2009 г. Показатели основных факторов экстремальных экзогенных процессов в 2019 г. не способствовало активизации последних, а в зимний сезон 2019/20 гг. – селевой активности летом 2020 г.

Ключевые слова: сель, цикл, экстремальные экзогенные процессы, горный ландшафт, Центральный Кавказ

Ссылка для цитирования: Караваяев В.А., Воскова А.В., Семиноженко С.С., Федин А.В., Лаппо Е.Г., Буланов С.А. Роль селей в цикле экстремальных экзогенных процессов в горах Центрального Кавказа (на примере бассейна реки Черек Балкарский). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 446–450.

Role of debris flows in the cycle of extremal exogenic processes in the mountains of the Central Caucasus (case study of the Cherek Balkarsky river basin)

V.A. Karavaev¹, A.V. Voskova², S.S. Seminozhenko³, A.V. Fedin¹, E.G. Lappo¹,
S.A. Bulanov¹

¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
karavaev@igras.ru, fedinanton@mail.ru, ellappo@igras.ru, bulanov@igras.ru

²Genplan Institute, Moscow, Russia, avoskova@yandex.ru

³FSBI “Roslesinforг”, Moscow, Russia, gray_wolf88@mail.ru

Abstract. The article assumes that the processes associated with the accumulation and movement of clastic material - landslide and debris flows, are cyclical and are subject to a complex effect of several factors. The novelty is their joint consideration. The cycle of development of extremal exogenic processes ends with debris flows. During the cycle, some processes cause others, it can last for a number of years, and in the study area is from 3 to 6 years. An analysis is made of the 2019 data of the main factors for the manifestation of extremal exogenic processes in the Cherek Balkarsky basin, where the authors monitor

the latter, starting in 2009. The state of the main factors of extremal exogenic processes in 2019 did not contribute to their active course, and their indices in the winter season of 2019/20. – debris flows activity in the summer of 2020.

Key words: *debris flows, cycle, extremal exogenic processes, mountain landscape, Central Caucasus*

Cite this article: Karavaev V.A., Voskova A.V., Seminozhenko S.S., Fedin A.V., Lappo E.G., Bulanov S.A. Role of debris flows in the cycle of extremal exogenic processes in the mountains of the Central Caucasus (case study of the Cherek Balkarsky river basin). In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 446–450.

Введение

Авторы проводят мониторинг экстремальных экзогенных (геоморфологических) процессов (далее – ЭЭП) в бассейне р. Череха Балкарского, включающего в себя долины рек Карасу, Ахсу, Дыхсу, Лькези, Метиан-Суу, нескольких ручьёв и собственно Череха Балкарского, начиная с 2009 г. (рис. 1). Цель многолетних исследований состоит в выявлении закономерностей протекания этих процессов.

Анализируя вклад различных факторов в активизацию или ослабление процессов, связанных с накоплением и перемещением обломочного материала – обвально-осыпных [Воскресенский, 1992] и селей, мы предположили, что они имеют цикличность и подвержены комплексному воздействию нескольких факторов. Снежные лавины и русловые процессы сами не зависят непосредственно от накопления подобного материала, но способствуют разрушению литогенной основы и сведению растительности. Тем самым они активизируют процессы, участвующие в цикле [Караваяев, Семиноженко, 2016].

Схема цикла представляется нам так. После схода крупных селей в горном ландшафте в результате обвально-осыпных, русловых процессов, сходов лавин начинает накапливаться обломочный материал. По достижении критической массы даже при слабом воздействии любого из факторов, которые рассматриваются далее, происходит следующий сход. В качестве отправной точки был выбран именно **сход крупного селя**, поскольку он является наиболее комплексным процессом, по отношению к которому другие выступают как подготовительные [Опасные..., 2013]. К основным факторам подготовки горного ландшафта к проявлению экстремальных экзогенных процессов (далее – ЭЭП), помимо очевидных - осадков, температуры воздуха и сейсмичности [Уломов, 2008], предлагается относить также морозное выветривание - количество переходов температуры воздуха через ноль в холодное время года – в зимне-весенний период, химическое выветривание и микроморфологию обломочного материала – влияние химического состава и морфологии его частиц соответственно на вовлечение в ЭЭП, а также снегонакопление. Новизной является **совместное** рассмотрение этих факторов. Цикл развития этих экзогенных процессов, в ходе которого одни обуславливают другие, способен длиться в течение ряда лет.

В настоящее время мы получили результаты пробных химических анализов образцов обломочного материала, сделанных с.н.с. Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, к.г.н. Т.И. Знаменской, за что сердечно признательный ей. Микроморфологическое исследование образцов на электронном микроскопе совместно с н.с. Института географии РАН, к.б.н. В.А. Шишковым, которого мы также благодарим, тоже находится в начальной стадии. В связи с этим, два данных фактора в статье не анализируются.

Финал предыдущего цикла ЭЭП. Крупные сели на исследуемой территории сошли в июле 2017 г., до того – летом 2012 г. Цикл экстремальных процессов, таким образом, продлился 5 лет. По нашим наблюдениям, в бассейне р. Череха Балкарского он

длится от 3 до 6 лет. Предпосылками его завершения летом 2017 г. послужила совместная активность нескольких факторов, причём, в значительной степени, не непосредственная, а **заблаговременная**: необычайно обильные (более 240 мм) майские осадки, 3,5–балльное землетрясение в марте и, наконец, – многочисленные переходы температуры воздуха через ноль в марте и апреле. И если в марте морозное выветривание было незначительным вследствие скудных – менее 30 мм – осадков, то в апреле оно ощутимо усилилось, поскольку осадки составили уже более 120 мм. А уже в июле крупные сходы были предварены значительным повышением температуры воздуха, которое, таким образом, послужило «спусковым механизмом», и бурным летним половодьем. С тех пор идёт накопление обломочного материала – местные ландшафты проходят следующий цикл.

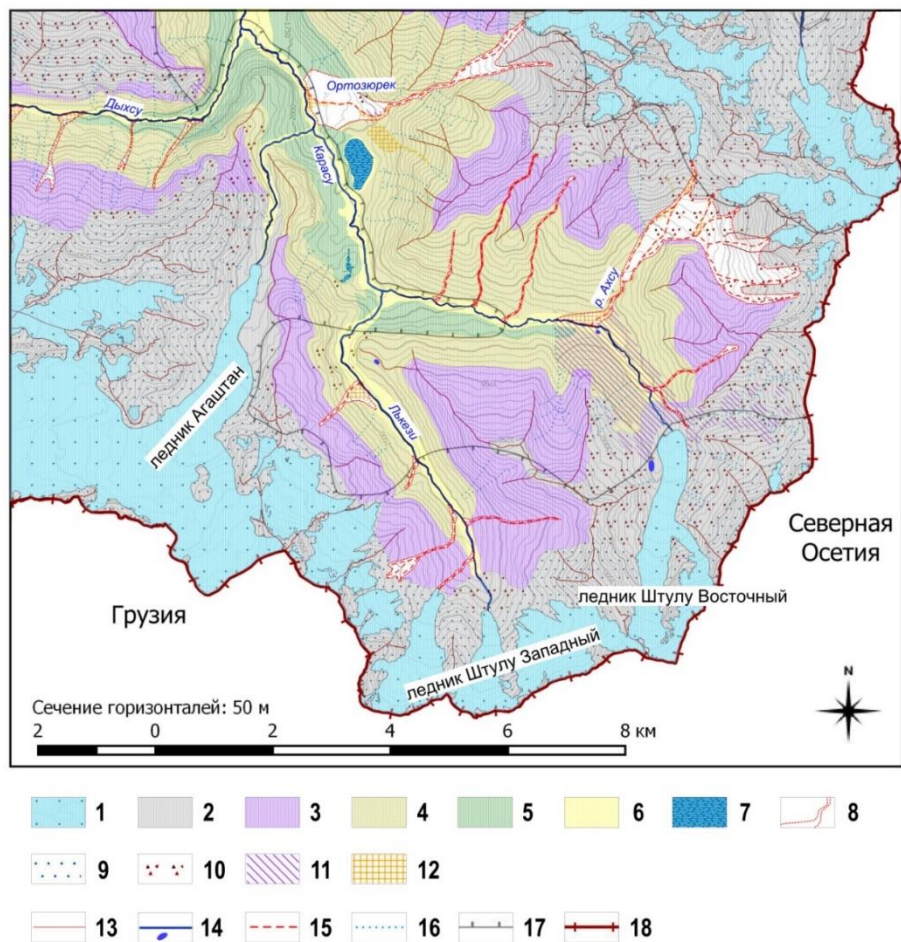


Рис. 1. Ландшафтные местности и участки интенсивного проявления экзогенных процессов (цит. по [Кароваев и др., 2019]). Типы ландшафтных местностей: 1 – нивальные, 2 – субнивные, 3 – альпийские, 4 – субальпийские, 5 – горно-лесные, 6 – речных долин, 7 – болотные, 8 – селевые и селево-лавиновые. Участки интенсивного проявления экзогенных процессов: 9 – нивально-гравитационных, 10 – гравитационных, 11 – оползневых, 12 – пролювиальных. Линии развития экзогенных процессов: 13 – гребни горных хребтов, 14 – водные объекты, 15 – селевые русла, 16 – лавинные лотки. Границы: 17 – Кабардино-Балкарского высокогорного заповедника, 18 – исследуемой территории

Fig. 1. Landscape areas and areas of intense manifestation of exogenic processes [Karavaev et al., 2019]. Types of landscape areas: 1 – nival, 2 – subnival, 3 – alpine, 4 – subalpine, 5 – mountain forest, 6 – river valleys, 7 – marsh, 8 – debris flow-avalanche and debris flow. Areas of intense manifestation of exogenic processes: 9 – nival-gravitational, 10 – gravitational, 11 – landslide, 12 – proluvial. Lines of development of exogenic processes: 13 – ridges of mountain ranges, 14 – water bodies, 15 – debris flow channels, 16 – avalanche trays. Borders: 17 – Kabardino-Balkarian high mountain reserve, 18 – study area

Анализ факторов в 2019 г. – начале 2020 г. Очевидно, что ведущую роль в создании условий для ЭЭП и, в частности, – селей – играют метеорологические факторы и производные от них – температура воздуха, осадки и, в меньшей степени, – морозное выветривание. Поэтому анализ метеорологических предпосылок зимнего сезона позволяет в большой степени представить картину протекания экзогенных процессов летом.

Ход температуры воздуха зимой 2019/20 гг. был не совсем традиционным для холодного времени года на исследуемой территории. Среднемесячные значения ноября и декабря составили обычные $-1,7$ и $-4,7^{\circ}\text{C}$ соответственно. Однако переход от тёплого времени года к холодному был резким – среднемесячная температура октября была намного выше и составляла $5,9^{\circ}\text{C}$ (рис. 2а).

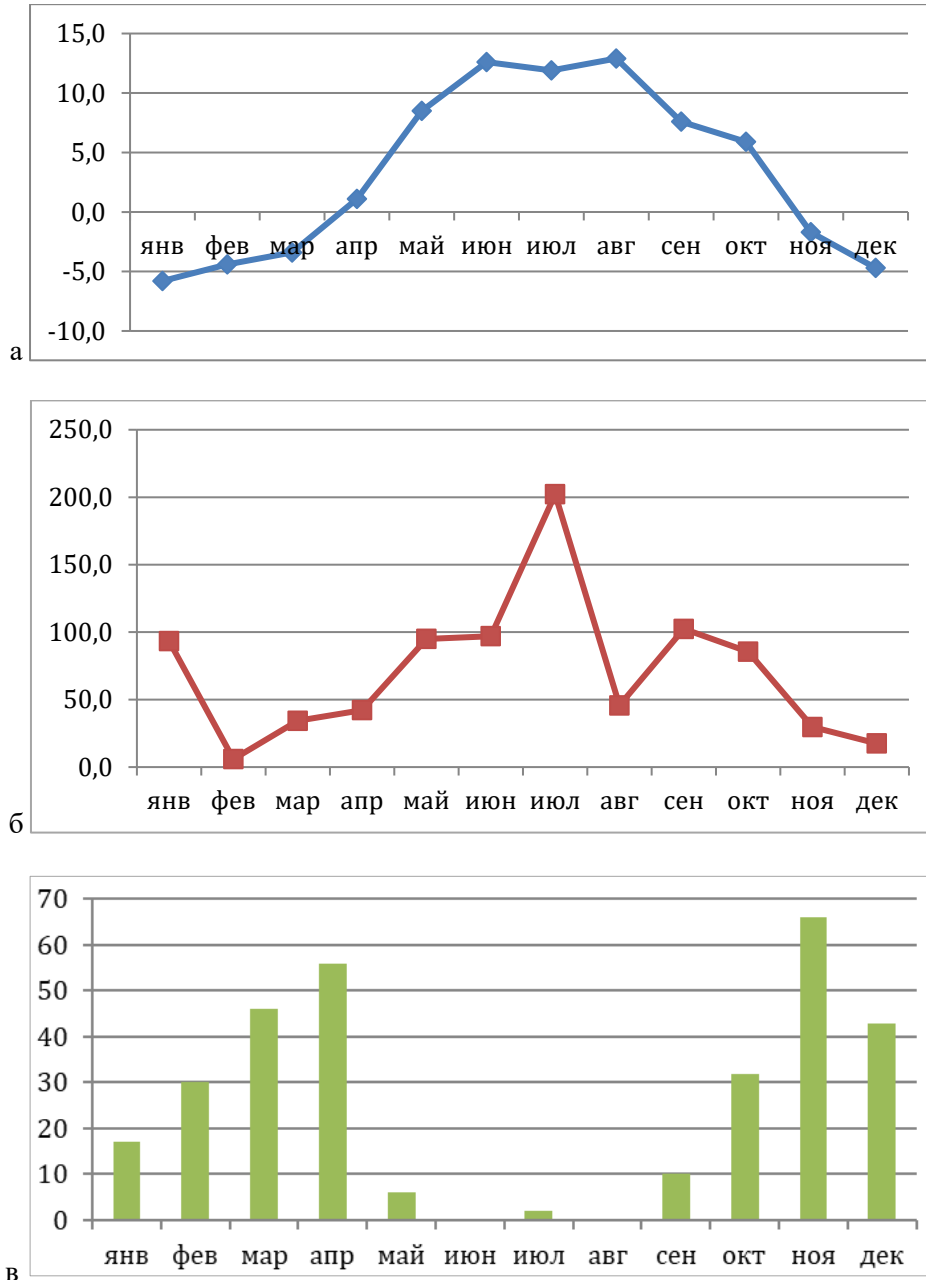


Рис. 2. Температура воздуха (а), осадки (б) и количество переходов температуры воздуха через ноль (в) в 2019 г.

Fig. 2. Air temperature (а), precipitation (б), number of air temperature through zero transitions (в) in 2019

Отметим прохладное лето 2019 г. – во все летние месяцы прошлого года её значения необычно низки для этого времени. Причём самым прохладным месяцем лета был июль, традиционно самый тёплый – был нетипично холоднее не только августа, но даже июня – температура составляла в среднем 11,9°C, в то время как в июне и августе наблюдалось 12,6 и 12,9°C соответственно – на графике хорошо виден «провал» (рис. 2а). Кроме того, в отличие от этих месяцев, в июле дважды были заморозки – отмечено два перехода через ноль. Низкая температура июля в значительной степени способствовала нейтрализации выпавших в этом месяце обильных (202,2 мм) осадков (рис. 2б) с точки зрения их вклада в активность ЭЭП: таяние ледников и снежников в высокогорье было слабым, а именно они питают многие селевые бассейны в верхних частях. Только 24 июля 2019 г. сошёл сель, перекрывший дорогу «Верхняя Балкария–Уштулу». Работы по расчистке заняли два дня.

Зима 2019/20 гг. была на редкость малоснежной. Так, в декабре выпало всего 17,5 мм осадков. Соответственно, лавинная активность в этом сезоне была очень слабой: единственная снежная лавина, заслуживающая внимания, сошла в районе Суру, в верховьях Черка Балкарского, после нетипичного для этой зимы мартовского снегопада. Русловые процессы весной также развиты слабо.

Сейсмическая активность в 2019 г. в местах исследования не проявлялась¹ – последнее землетрясение (4,8 баллов) случилось в ноябре 2018 г. Предыдущее – 4,2 балла – ровно за год до того.

Таким образом, состояние основных факторов ЭЭП в 2019 г. не способствовало активному протеканию последних и накоплению обломочного материала. Показатели факторов в зимний сезон 2019/20 гг. предполагают невысокую активность экзогенных процессов летом 2020 г.

Список литературы

Воскресенский С.С. Склоновые процессы и морфолитогенез на склонах // Динамическая геоморфология. Изд-во Моск. ун-та, 1992. С. 112-136.

Каравасев В.А., Воскова А.В., Семиноженко С.С., Федин А.В., Лаппо Е.Г., Буланов С.А. Экстремальные экзогенные процессы в горных ландшафтах Центрального Кавказа // География и современные проблемы географического образования: мат-лы Всерос. научно-практич. конференции, посвящён. 100-летию со дня рождения В.И. Прокаева, 16-20 сентября 2019 г., г. Екатеринбург. Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т, 2019. С. 15-19.

Каравасев В.А., Семиноженко С.С. Цикл экстремальных геоморфологических процессов в бассейне р. Черек Балкарский // Геоморфология. 2016. № 2. С. 34-40.

Опасные природные процессы Северного Кавказа / В.В. Разумов (ред.). М.: Феория, 2013. – 320 с.

Уломов В.И. Выявление потенциальных очагов и долгосрочный прогноз сильных землетрясений на Северном Кавказе // Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 1. Сейсмические процессы и катастрофы /А.О. Глико (под ред.). М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 127-146.

¹ В данном случае мы учитываем землетрясения свыше 3,5 баллов.



Временной анализ изменения селевой активности на северном склоне Большого Кавказа

Н.В. Кондратьева, А.Х. Аджиев, В.В. Разумов, А.Б. Узденова

*Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия,
kondratyeva_nat@mail.ru, adessa1@yandex.ru, razumov_vv@mail.ru,
albina_uzdenowa@mail.ru*

Аннотация. Как показано в Докладе Росгидромета Правительству Российской Федерации, во второй половине XX столетия на Земле началось устойчивое изменение климатических условий, которые отмечаются и на Северном Кавказе. Климатические изменения оказывают большое влияние на сток рек, масштабы оледенения, режим осадков и температуры воздуха, вследствие чего происходят изменения и селевой активности.

Ключевые слова: сели, климатические изменения, температура воздуха, атмосферные осадки, сток рек

Ссылка для цитирования: Кондратьева Н.В., Аджиев А.Х., Разумов В.В., Узденова А.Б. Временной анализ изменения селевой активности на северном склоне Большого Кавказа. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 451–459.

Temporary analysis of change of debris flow activity on the northern slope of the Great Caucasus

N.V. Kondratyeva, A.Kh. Adzhiev, V.V. Razumov, A.B. Uzdenova

*High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, kondratyeva_nat@mail.ru,
adessa1@yandex.ru, razumov_vv@mail.ru, albina_uzdenowa@mail.ru*

Abstract. As shown in the Roshydromet Report to the Government of the Russian Federation, in the second half of the 20th century, a steady change in climatic conditions began to be observed on Earth, which are also observed in the North Caucasus. Climatic changes have a great influence on river flow, the extent of glaciation, the mode of precipitation and air temperature, as a result of which changes occur and mudflow activity.

Key words: debris flows, climate change, air temperature, precipitation, river runoff

Cite this article: Kondratyeva N.V., Adzhiev A.Kh., Razumov V.V., Uzdenova A.B. Temporary analysis of change of debris flow activity on the northern slope of the Great Caucasus. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 451–459.

Введение

Климатические изменения на территории Северного Кавказа, где формируются основные селевые потоки, анализируются многими учеными. На этой территории хорошо развита метеорологическая сеть, поэтому для всего региона имеется достаточно полная информация о климатических условиях. Знание особенностей развития селевой деятельности на Кавказе в связи с климатической изменчивостью имеет важное практическое значение, поскольку происходит интенсивное освоение горных районов.

Климатическая изменчивость на северном склоне Большого Кавказа

Согласно данным Северо-Кавказского управления гидрометеорологической службы [Панов и др., 2015], на северном склоне Большого Кавказа средняя годовая температура воздуха на высоте 2500 м повышается в направлении с северо-запада на юго-восток от 6°C в районе г. Фишт (Западный Кавказ) до 11°C в районе г. Базардюзю (Восточный Кавказ). Среднегодовое количество атмосферных осадков на высоте 2500 м на территории Западного, Центрального и Восточного Кавказа составляет 2150, 930 и 1030 мм соответственно. Число дней со снежным покровом на высоте 2500 м уменьшается с северо-запада на юго-восток весьма значительно – от 250 дней на территории Западного Кавказа до 160 и 100 дней на территории Центрального и Восточного Кавказа соответственно.

Амплитуда средней температуры самого холодного и самого теплого месяцев в ряде районов низменности исследуемой территории составляет 28–29°C, а в среднегорной части 25°C, что указывает на значительное смягчение континентальности климата в направлении от равнины к горам.

Для анализа изменений климатических условий на Северном Кавказе использовались многолетние метеоданные, характеризующие режим осадков и температуры воздуха в горных условиях. Была собрана информация с метеостанций, расположенных максимально близко к зонам зарождения селей: Клухорский перевал (2037 м); Теберда (1328 м); Терскол (2150 м); Владикавказ (668 м); Мамисонский перевал (2800 м); Казбеги, в/г (3656 м); Сулак, в/г (2923 м); Гуниб (1551 м). Оказалось, что общим периодом наличия данных по всем указанным метеостанциям является период с 1971 по 2011 г.

Из таблицы видно, что за период с 1971 по 2011 г. в рассматриваемом регионе произошло повсеместное повышение средней годовой температуры воздуха с положительным трендом по региону, равным 0,029°C/год, и увеличением годовой суммы атмосферных осадков с трендом 3,45 мм/год. Таким образом, за 1971–2011 гг. среднегодовая температура воздуха повысилась на 1,2°C, а годовая сумма атмосферных осадков увеличилась на 138 мм. Среднегодовая температура воздуха на Северном Кавказе как за теплый, так и за холодный период за 1971–2011 гг. изменилась с положительными трендами 0,026 и 0,032°C/период соответственно. Наиболее значительные годовые тренды отмечены на метеостанции Владикавказ и Мамисонский перевал, а минимальные – на метеостанциях Терскол и Клухорский перевал. В теплый период тренды температуры воздуха изменялись от 0,013°C/период на метеостанции Мамисонский перевал, до 0,047°C/период на метеостанции Владикавказ. В холодный период тренды на большинстве станций были более значительными, чем в теплый, и достигали на метеостанциях Владикавказ и Мамисонский перевал 0,058 и 0,059°C/период соответственно. Исключение составляет метеостанция Терскол, где тренд за холодный период оказался отрицательным и составил –0,0058°C/период. Тренды количества атмосферных осадков в среднем по региону за теплый и холодный периоды были также положительные и составили 1,206 и 2,28 мм/пер. соответственно. Для теплого периода тренд осадков по данным метеостанции Клухорский перевал оказался отрицательным, а для остальных метеостанций тренды в этот период были положительными.

Таким образом, в регионе в среднем за 1971–2011 гг. среднегодовая температура воздуха за холодный период повысилась на 1,1°C, а за теплый – на 1,4°C. Количество атмосферных осадков за холодный и теплый период увеличилось на 35 и 107 мм, или на 5 и 20% от нормы соответственно.

На рис. 1 приведены графики изменения среднегодовой температуры воздуха и среднегодовых сумм осадков на северном склоне Большого Кавказа по данным всех перечисленных выше метеостанций (с 1971 по 2011 г.).

Таблица. Линейные тренды температуры воздуха и атмосферных осадков за 1971–2011 гг. [Аджиев и др., 2009]

Table. Linear trends of air temperature and precipitation for 1971-2011 [Аджиев и др., 2009]

Метеостанция	Высота, над ур. моря, м	Температура воздуха, °С			Атмосферные осадки, мм		
		Год	Период абляции	Период аккумуляции	Год	Период абляции	Период аккумуляции
Клухорский перевал	2037	0,017	0,019	0,015	5,876	-0,619	6,49
Теберда	1328	0,036	0,039	0,034	3,581	0,579	3,002
Терскол	2150	0,0041	0,015	-0,0058	4,48	2,23	2,45
Владикавказ	668	0,053	0,047	0,058	4,863	2,802	2,06
Мамисонский перевал	2800	0,035	0,013	0,059	1,357	0,803	0,55
Казбеги, в/г	3656	0,028	0,018	0,044			
Сулак, в/г	2923	0,029	0,033	0,028	1,549	0,91	0,633
Гуниб	1551	0,028	0,025	0,031	2,45	1,736	0,75
Среднее	2258	0,029	0,026	0,032	3,45	1,206	2,28

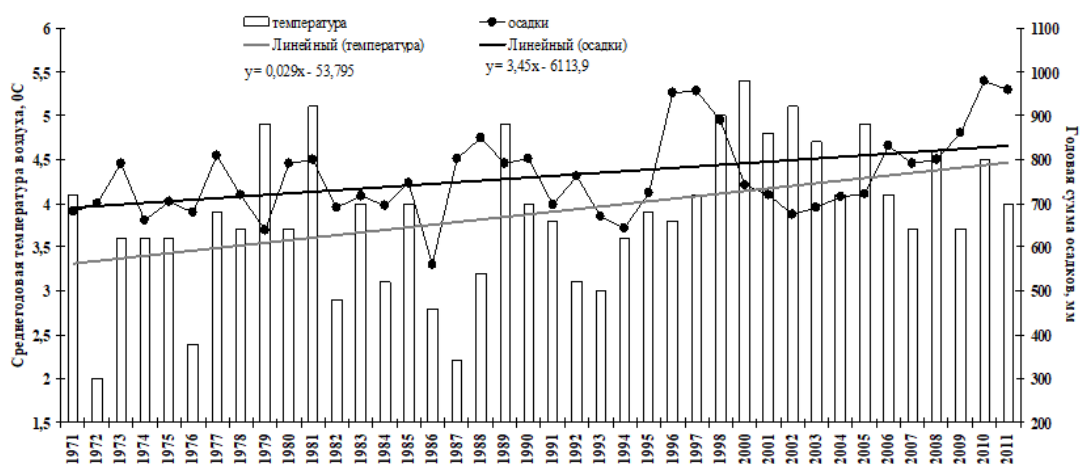


Рис. 1. Графики изменения среднегодовой температуры воздуха и среднегодовых сумм атмосферных осадков (1971-2011 гг.) на северном склоне Большого Кавказа

Fig. 1. Changes in average annual air temperature and precipitation graphs (1971-2011) on the northern slope of the Great Caucasus

Изменение климатических условий на Кавказе сказывается и на оледенении. Для высокогорного Кавказа отчетливо прослеживается тенденция отступления ледников, вызванная региональной климатической изменчивостью [Панов, 1993]. Скорость отступления ледников значительно возросла в последние пять-шесть лет и достигла максимальных значений, равных 25–27 тыс. м²/год (ледники Малый Азау и Терскол) и 23 тыс. м²/год (ледник Гарабаши) [О проведении исследовательских и изыскательских работ..., отчет о НИР, 2015].

В период отступления ледников у их концов оголяется большое количество обломочного материала, который впоследствии становится твердой составляющей ледниковых и ледниково-дождевых селей.

Причиной деградации исследуемых ледников являются аномалии летней температуры воздуха. В XXI веке темпы деградации ледников возросли под влиянием повышения среднесуточной температуры воздуха в летний период – по сравнению с прошлым веком температура повысилась летом на 25% [*Оценочный доклад об изменениях климата...*, 2008].

С 1971 по 2011 г. на территории Северного Кавказа зафиксировано довольно значительное число селевых потоков (1479 случаев) всех генетических типов [*Кондратьева и др.*, 2015]. Анализ динамика числа селевых потоков на изучаемой территории показал, что годовое число селей за разные десятилетия за период 1971–2010 гг. составило: с 1971 по 1980 г. – 321, с 1981 по 1990 г. – 457, с 1991 по 2000 г. – 125, а с 2001 по 2010 г. – 576. Таким образом, за 40 лет среднее годовое число селей увеличилось почти на 80% (низкое значение в 90-х годах XX столетия обусловлено тем, что мониторинг за селевой активностью в регионе осуществлялся не в полной мере в связи с упадком экономики страны и военными действиями на Восточном Кавказе – фиксировались только сели, вызвавшие ЧС).

Аналогичный анализ изменения селевой активности, проведенный для бассейна реки Терек [*Кондратьева и др.*, 2015], показал увеличение с 1974 по 2013 г. среднего годового числа селей на 79%, что сопоставимо с полученной нами оценкой селевой активности для всего Северного Кавказа.

Анализ влияния метеопараметров на динамику селевой активности (на примере Кабардино-Балкарии)

Для подтверждения полученных выводов об увеличении количества селепроявлений на региональном уровне за последние 40 лет в связи с климатической изменчивостью, нами были изучены (с применением методов математической статистики) особенности развития селевой активности для наиболее типичного и изученного района Центрального Кавказа – высокогорной территории Кабардино-Балкарии - с временным рядом наблюдений более 50 лет. Необходимость использования такого длительного временного ряда подтверждена в работе [*Самнер, 1981*]. Такой ряд наблюдений за селями и климатическими характеристиками нам удалось собрать только по метеостанции «Терскол», находящейся в Кабардино-Балкарской республике (КБР). По данным этой метеостанции нами был проведен указанный анализ влияния метеопараметров на динамику селевой активности.

Основные площади селепроявления в Кабардино-Балкарии сосредоточены в высокогорной зоне, здесь высока вероятность прохождения селей почти на всех речных притоках. Селевой период в КБР, как правило, продолжается с мая по сентябрь.

Важнейшими факторами, влияющими на селеобразование, служат осадки, определяющие степень увлажнения территории, а также изменчивость температуры воздуха, а, следовательно, и активность процессов, приводящих к формированию жидкой и твердой составляющей селей. Наиболее информативными при анализе селевой активности являются: сумма среднемесячных температур за весь селевой период (май – сентябрь), сумма осадков за весь селевой период (май – сентябрь).

На рис. 2 и 3 представлены графики изменения суммы среднемесячных температур воздуха за селевой период (май – сентябрь) по годам (1953–2015 гг.).

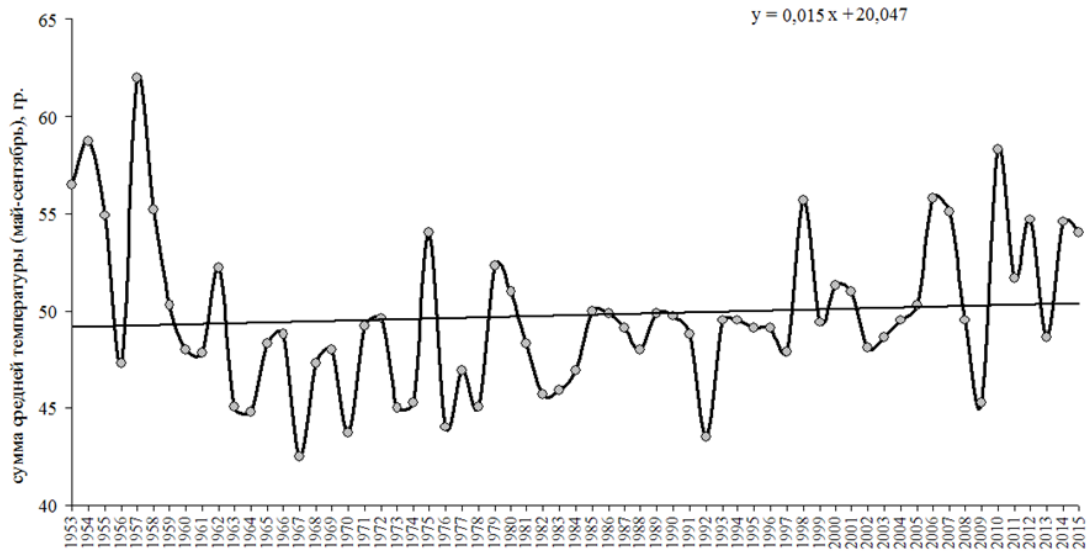


Рис. 2. Изменения суммы среднемесячных температур воздуха за селевой период (май-сентябрь)

Fig. 2. Changes in the sum of average monthly air temperatures over the debris flows period (May-September)

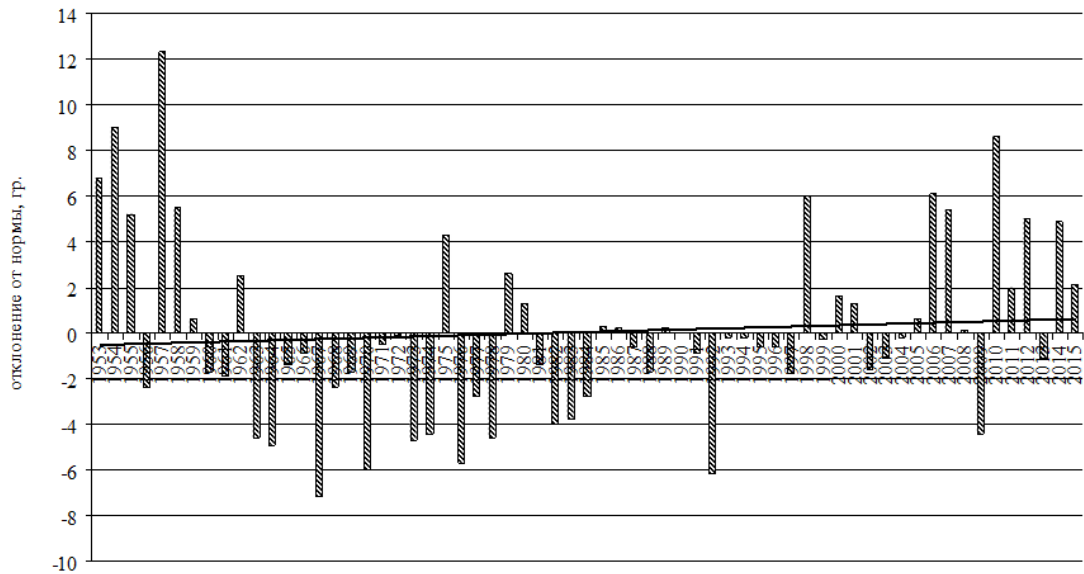


Рис. 3. Аномалии суммы среднемесячных температур воздуха за селевой период (май – сентябрь)

Fig. 3. Sum of the average monthly air temperatures anomalies over the debris flows (May - September)

Тренд изменения суммы среднемесячных температур воздуха за селевой период (май – сентябрь) положительный, имеет место незначительное летнее потепление. С 1953 по 2015 гг. сумма среднемесячных температур воздуха за селевой период (май – сентябрь) незначительно выросла на $0,9^{\circ}\text{C}$.

На рис. 4, 5 представлены графики изменения суммы осадков за селевой период (май – сентябрь) по годам (1953–2014 гг.).

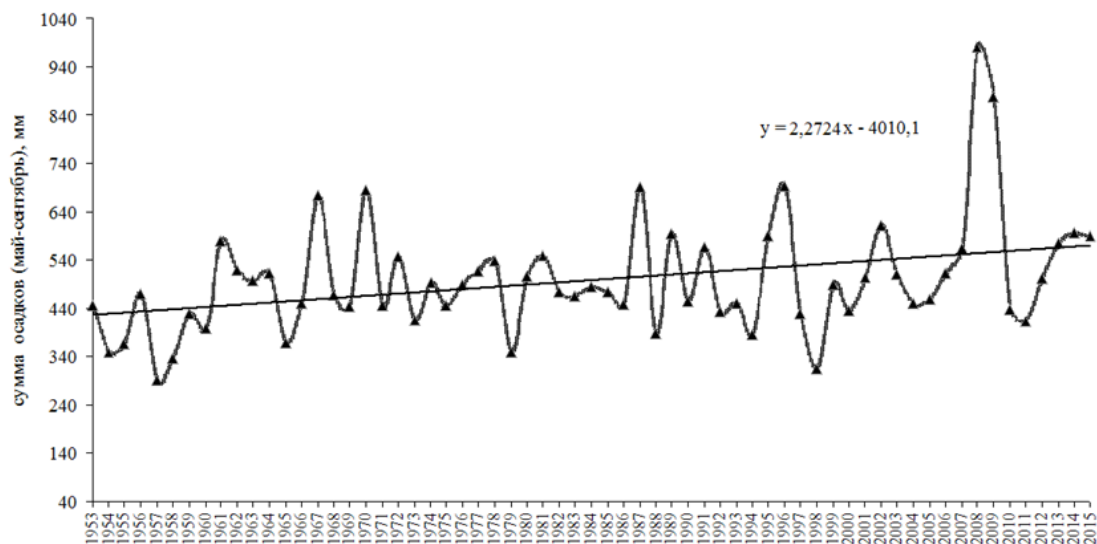


Рис. 4. Изменения суммы осадков за селевой период (май-сентябрь)

Fig. 4. Changes in precipitation over the debris flows period (May-September)

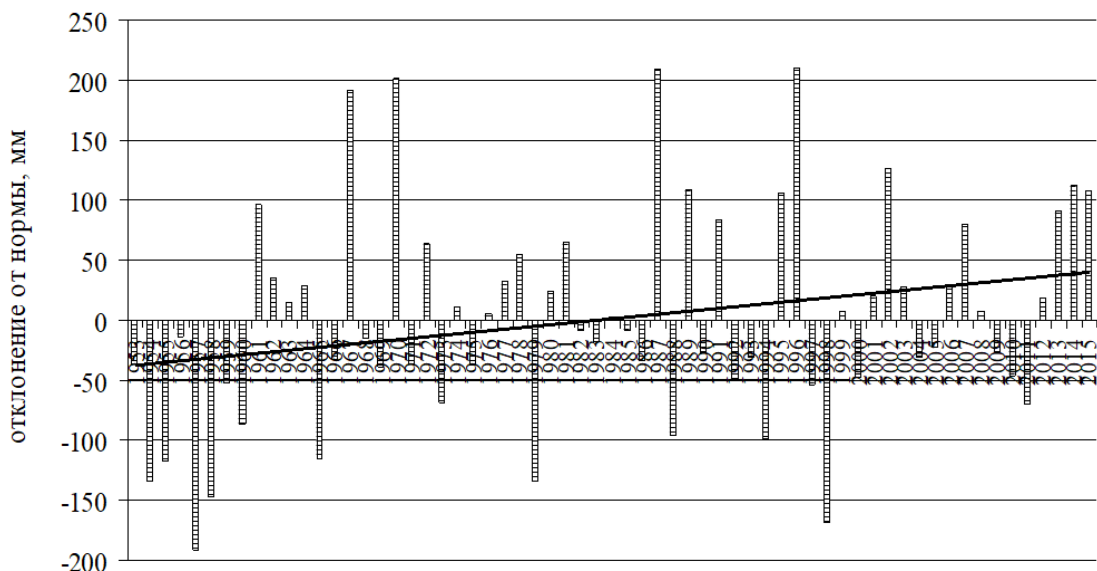


Рис. 5. Аномалии суммы осадков за селевой период (май-сентябрь)

Fig. 5. Precipitation anomalies over the debris flows period (May-September)

Тренд изменения суммы осадков за селевой период (май – сентябрь) положительный. С 1953 по 2014 гг. сумма осадков за селевой период (май – сентябрь) увеличилась на 138 мм.

В высокогорной части Кабардино-Балкарии за период с 1953 по 2015 гг. зарегистрировано 459 селевых потоков. Изучение их временной динамики с 1961 по 2010 гг. (рис. 6) показало, что начиная с 1981 г. отмечается тенденция к их увеличению: с 1961 по 1970 – 58, с 1971 по 1980 – 59, с 1981 по 1990 – 92, с 1991 по 2000 – 101, с 2001 по 2010 – 99, т.е. за 50 лет количество селей в год в высокогорной части КБР выросло на 70%. Таким образом, подтверждается факт увеличения селевой активности в связи с климатической изменчивостью на республиканском уровне. При этом коэффициент множественной корреляции, показывающий связь селевой активности с климатическими характеристиками (температура, осадки), составил 0,9.

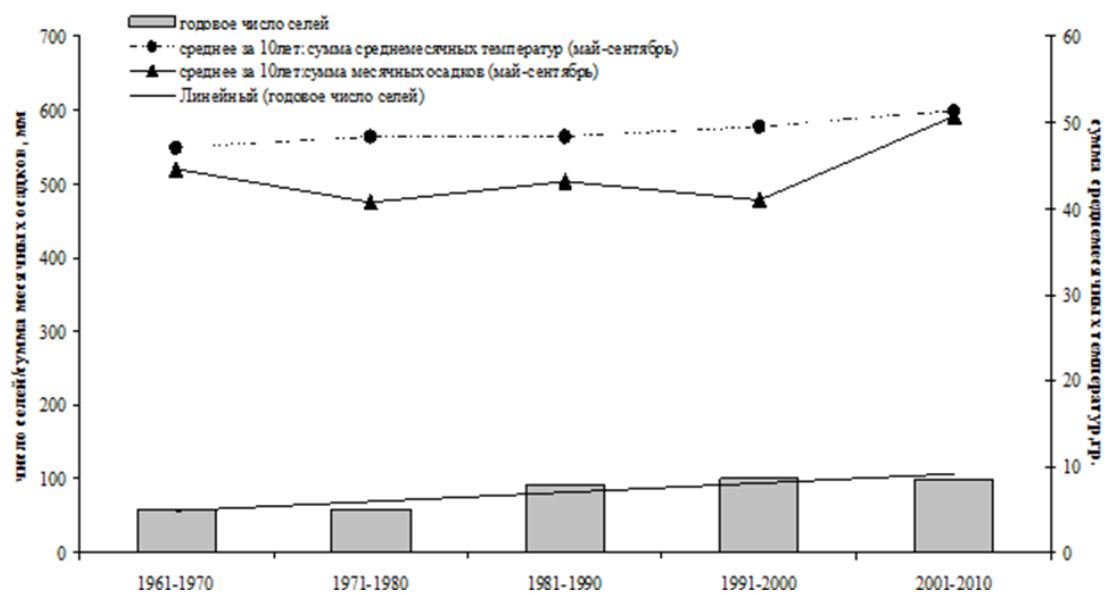


Рис. 6. Тенденция изменения количества селепроявлений в высокогорной части Кабардино-Балкарии за разные десятилетия в зависимости от сумм среднемесячных температур воздуха и сумм осадков за селевой период (май–сентябрь)

Fig. 6. The tendency of changes in the number of debris flows in the highlands of Kabardino-Balkaria for different decades, depending on the sums of average monthly air temperatures and the sums of precipitation for the debris flows period (May – September)

Можно отметить, что всплески селевой активности в высокогорной части КБР проявлялось в 1953, 1966, 1967, 1975, 1977, 1983, 1984, 1987, 1995, 1996 гг.

В 1953 г. количество селей в высокогорье Кабардино-Балкарии составило 24 (по всей территории КБР – 27). Сумма среднемесячной температуры за селевой период (май – сентябрь) составила 57°C, что на 6,8°C превышало норму, сумма положительных температур с начала теплого периода по данным метеостанции Терскол достигла экстремальных значений и составила 1255,7°C, что на 400°C больше, чем в предыдущие селеопасные годы. Сумма осадков за селевой период (май – сентябрь) составила 447 мм, что меньше нормы на 36 мм, хотя в отдельные дни присутствовали аномальные осадки (обеспеченность 10%). Сели этого года в основном активизировались в бассейнах с оледенением (гляциальный, гляциально-дождевой генезис селей).

В 1966 г. (количество селей в высокогорье КБР 10, по всей территории КБР - 44) сумма среднемесячной температуры за селевой период (май – сентябрь) составила 49°C, что на 0,9°C меньше нормы, сумма осадков за селевой период 451 мм, что на 32 мм ниже нормы. Массовый сход селей в этом году спровоцировал ливень (24,5 мм) 3 августа. В остальные дни селевого периода этого года сели не зарегистрированы [Кононова и др., 2007].

Селевая активность 1967 г. (количество селей в высокогорье КБР 15, по всей территории КБР – 39) вызвана экстремальной суммой осадков 1% обеспеченности. Так, в Терсколе 5 августа выпало 69,9 мм осадков при интенсивности ливня 0,42 мм/мин. Поскольку ливень был теплый, то он максимально способствовал усилению абляции [Кононова и др., 2007]. Сумма осадков за селевой период составила 674 мм, что на 191 мм выше нормы. Сумма среднемесячной температуры за селевой период (май – сентябрь) составила 42,5°C, что на 7,2°C ниже нормы. В этом году в высокогорье КБР преобладали дождевые сели.

Сели 1975 г. (количество селей в высокогорье КБР 11, по всей территории КБР - 34) вызваны высокими температурами, сумма среднемесячной температуры за селевой период (май – сентябрь) составила 54°C, что на 4,3°C выше нормы. Сумма осадков за селевой период составила 446 мм, что на 38 мм ниже нормы.

Лето 1977 г. отмечено по количеству (13 в высокогорье КБР и 67 по всей территории КБР) и мощности селей в р. Баксан. Сумма среднемесячной температуры за селевой период (май – сентябрь) составила 46,9°C, что на 2,8°C ниже нормы. Сумма осадков за селевой период составила 516 мм, что на 33 мм выше нормы. Массовый сход селей наблюдался в августе. С июня по первую декаду августа суммы положительных температур и количество осадков отличались аномально высокими значениями, при этом небольшие положительные аномалии температуры наблюдались каждый день. Но в целом год не был экстремально влажным и жарким. В этом году преобладали сели ледниково-дождевого генетического типа.

Катастрофическая активизация селей летом 1983 г. (количество селей в высокогорье КБР – 15, по всей территории КБР – 70) подготовлена длительным сухим жарким июльским периодом (сумма температур за июль составила 393,3°C), хотя сумма среднемесячной температуры за селевой период (май-сентябрь) составила 45,9°C и была ниже нормы на 3,8°C, сумма осадков за селевой период составила 466 мм, что на 17 мм ниже нормы. Массовый сход селей спровоцировал интенсивный ливень 19 июля (36,4 мм, за весь июль выпало 134,4 мм).

В 1984 г. было зафиксировано 13 случая селепроявлений в высокогорье КБР (по всей территории КБР – 32). Сумма среднемесячной температуры за селевой период (май-сентябрь) составила 46,9°C и была ниже нормы на 2,8°C, сумма осадков за селевой период составила 486 мм, что всего на 3 мм выше нормы. Сели сошли в результате интенсивного ливня 24-25 июля (23,8 мм; 51,6 мм соответственно), всего в июле выпало 172,1 мм осадков. Сели были дождевого генезиса.

Сели 1987 г. (количество селей в высокогорье КБР – 30, по всей территории КБР – 45) были в основном дождевого генетического типа. Сумма среднемесячной температуры за селевой период (май-сентябрь) составила 49,1°C и была ниже нормы на 0,6°C, сумма осадков за селевой период составила 692 мм, что на 209 мм выше нормы.

Сели в 1995, 1996 гг. (количество высокогорных селей в КБР – 20, 17 соответственно, по всей КБР – 22, 18 соответственно) были вызваны интенсивными ливнями. Сумма осадков за селевой период существенно превышала норму (в 1995 г. на 107 мм, в 1996 г. на 210 мм).

В знаменательном 2000 году, когда сошел катастрофический сель по реке Герхожан, норма суммы среднемесячной температуры за селевой период была превышена на 1,6°C, а сумма осадков за селевой период была на 48 мм ниже нормы. Количество селей по всей территории КБР было незначительно, всего 9 случаев, из них в высокогорной зоне 7.

Выводы

1. Выполнена оценка возможных изменений в активности распространения селевых процессов в результате региональной климатической изменчивости.

Имеет место следующая динамика климатических факторов селеформирования:

а) на Северном Кавказе за 1971-2011 гг. среднегодовая температура увеличилась на 1,2°C, а годовая сумма атмосферных осадков на 138 мм;

б) температура воздуха по Северному Кавказу, как за теплый, так и за холодный периоды за 1971-2011 гг. изменилась с положительными трендами 0,026 и 0,032°C/пер., соответственно;

в) тренды атмосферных осадков в среднем по Северному Кавказу за теплый и холодный периоды также положительные и соответственно составили 1,206 и 2,28 мм/пер.;

г) на Северном Кавказе в среднем за 1971-2011 гг. температура воздуха за холодный период возросла на 1,1°C, а за теплый на 1,4°C. Атмосферные осадки за эти периоды увеличились соответственно на 35 и 107 мм, или на 5 и 20% от нормы.

2. С 1971 по 2011 гг. среднее число селей в год на Северном Кавказе увеличилось почти на 80%. Основной причиной увеличения количества селевых потоков с 1971 г.

явилось увеличение температуры воздуха и атмосферных осадков, как среднегодовых их значений, так и за теплый период года.

3. По данным метеостанции «Терскол», тренды многолетних изменений суммы среднемесячной температуры и суммы осадков за селевой период (май – сентябрь) положительные. С 1953 по 2015 годы сумма среднемесячных температур за селевой период (май – сентябрь) выросла на 0,9°C, а сумма осадков за селевой период (май-сентябрь) увеличилась на 138 мм.

4. За 50 лет среднее количество селей в год в высокогорной части КБР выросло на 70 %. Таким образом, подтверждается факт увеличения селевой активности в связи с климатической изменчивостью на региональном уровне.

5. Проведенный анализ показывает, что активизация селевой активности в меньшей степени связана с абсолютными значениями метеопараметров за год, за сезон, за месяц. Существенную роль играют только суточные экстремальные значения температуры и осадков. В то же время важен предшествующий экстремальной дате режим различных метеорологических показателей.

Список литературы

- Аджиев А.Х., Аджиева А.А., Кумукова О.А., Кондратьева Н.В. Влияние изменений климата на гидрометеорологические явления на Центральном Кавказе // Материалы гляциологических исследований. 2009. № 107. С.137–139.
- Кондратьева Н.В., Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Гяургиева М.М., Перов В.Ф., Разумов В.В., Сейнова И.Б., Хучунаева Л.В. Кадастр селевой опасности юга европейской части России. – М.: ООО «Феория» – Нальчик: Печатный двор, 2015. 148 с.
- О проведении исследовательских и изыскательских работ по ледникам Малый Азау, Гарабаши, Терскол и прилегающей территории в границах ВТРК «Эльбрус» / Отчет о НИР. Нальчик, фонды ФГБУ «ВГИ», 2015. 453 с.
- Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [Электронный ресурс]. – М.: Изд-во Росгидромета, 2008. http://climate2008.igce.ru/v2008/pdf/tesume_ob.pdf.
- Панов В.Д., Базелюк А.А., Лурье П.М. Река Терек. Гидрография и режим стока. – Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, 2015. 607 с.
- Панов В.Д. Эволюция современного оледенения Кавказа. – СПб: Гидрометеиздат, 1993. – 431 с.
- Самнер Г. Математика для географов. М.: «Прогресс», 1981. 29 с.
- Кононова Н.К., Мальнева И.В., Сейнова И.Б. Циркуляционные механизмы формирования катастрофических селей на стадии оледенения Центрального Кавказа // Материалы гляциологических исследований. 2007. № 102. С. 154-160.



Особенности селеформирования в вулканических регионах

Е.В. Лебедева

Институт географии РАН, Москва, Россия, Ekaterina.Lebedeva@gmail.com

Аннотация. Вулканические сели – лахары, образование которых связано со смещением по склонам и долинам чехла пирокластического материала под воздействием талых вод и/или атмосферных осадков как во время, так и после эруптивных извержений, – достаточно хорошо изучены. Однако детальный анализ вулканически активных регионов показывает, что сели могут формироваться там и под действием иных разнообразных факторов. Здесь часто наблюдается образование подпрудных водоемов в результате перегораживания долин вулканическим (пирокластические и лавовые потоки) и резургентным (обломочные лавины, взрывные отложения) материалом и последующее разрушение плотин в результате эрозии, сопровождающееся катастрофическим спуском озер. Кроме того, извержения в пределах или в непосредственной близости от крупных масс воды в твердом или жидком состоянии приводят к катастрофическому таянию ледников, выплеску озер или формированию в них цунами, что также неизбежно сопровождается сходом селей. Особое место занимают вулкано-тектонические события (кальдерообразование, формирование протяженных трещин, рост экструзий), приводящие к достаточно быстрым изменениям топографии местности, что, в свою очередь, вызывает возникновение новых водоемов, смещение водных масс, активизацию эрозии с высокой вероятностью последующего селеформирования. Сопровождающие извержение сейсмические толчки, хотя и являются относительно слабыми, но могут вызывать разрушение стенок кратерных озер, провоцировать формирование оползней и обвалов, в том числе, с временным перегораживанием речных долин, тем самым также создавая предпосылки возникновения селей. Наиболее активно эти процессы происходят в зонах гидротермальной деятельности, где под воздействием агрессивных термальных вод происходит выветривание коренных пород до податливых глин. Рассмотрены конкретные примеры селевых событий, обусловленные разноплановой вулканической деятельностью, сопутствующими сейсмическими толчками и гидротермальной активностью.

Ключевые слова: вулканический сели, извержение, пирокластический материал, подпрудное озеро, вулкано-тектонические процессы, гидротермальное изменение пород, временная плотина

Ссылка для цитирования: Лебедева Е.В. Особенности селеформирования в вулканических регионах. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 460–469.

Features of debris flow formation in volcanic regions

E.V. Lebedeva

*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
Ekaterina.Lebedeva@gmail.com*

Abstract. Volcanic debris flows - lahars, the formation of which is associated with the displacement of pyroclastic material along the slopes and valleys by melt water and / or precipitation both during and after eruptions - are well studied. However, a detailed analysis of volcanically active regions shows that debris flows can form there under the influence of various other factors. In particular, the formation of dammed water bodies as a result of blocking the valleys with volcanic (pyroclastic and lava flows) and resurgent

material (debris avalanches, explosive deposits) and the subsequent destruction of dams as a result of erosion, accompanied by a catastrophic descent of lakes, are observed there. Eruptions within or in close proximity to large masses of water in a solid or liquid state lead to catastrophic melting of glaciers, splashing of lakes or the formation of tsunamis in them, which is also inevitably accompanied by debris flows. Volcanic-tectonic events (caldera or fault formation, extrusion growth) occupy a special place. They are leading to fairly rapid changes in the topography of the area, which, in turn, causes the occurrence of new water bodies, the displacement of water masses, and the intensification of erosion with a high probability of subsequent debris flow formation. Seismic shocks accompanying the eruption, although they are rather weak, can cause the destruction of the walls of crater lakes, provoke the formation of rockfalls and landslides, with temporary blocking of river valleys, thereby also creating the prerequisites for debris flows. Most actively, these processes occur in hydrothermal zones, where, under the influence of aggressive thermal waters, bedrock weathering occurs to the state of malleable clays. Concrete examples of debris flow events caused by diverse volcanic activity, accompanying seismic shocks and hydrothermal activity are considered.

Key words: *volcanic debris flow, eruption, pyroclastic material, dammed lake, volcanic-tectonic processes, hydrothermal change of rocks, temporary dam*

Cite this article: Lebedeva E.V. Features of debris flow formation in volcanic regions. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 460–469.

Введение

Лахары, или вулканические сели, формируются в результате перемещения водой рыхлого вулканического материала. Вулканические регионы часто страдают от горячих лахаров, возникающих при таянии ледников или снега непосредственно в момент извержения или сразу после него. Одним из самых масштабных событий такого плана был лахар при извержении влк. Руис (Колумбия) в 1985 г., унесший жизни почти 23 тыс. человек [Whitham, 2005]. Наряду с горячими лахарами выделяют и холодные, или вторичные, которые по времени тесно не связаны с эксплозиями, а формируются спустя месяцы или годы при наличии благоприятных условий – крутых склонов и мощного чехла рыхлого пирокластического материала на них – при/ после выпадения ливневых осадков и снеготаяния. Оба вида лахаров достаточно детально описаны в литературе, в частности [Черноморец, Сейнова, 2010]. Также как и в невулканических селях, концентрация твердой составляющей в лахарах колеблется от 40 до 80%, объемный вес – от 1300 до 2400 кг/м³. Их скорость может достигать 30 м/с с пиковыми расходами до 48 000 м³/с, а объем – до 100 млн м³; они могут смещаться по речным долинам на расстояние в сотни км от места формирования [Thouret et al., 2020].

Однако детальное изучение литературных материалов и полевые наблюдения в различных вулканических регионах мира показывают, что причины формирования селей на таких территориях гораздо разнообразней, да и сам спектр провоцирующих их факторов - весьма широк. Результаты анализа конкретных примеров селевых событий, обусловленных разноплановой эндогенной деятельностью, сопутствующими сейсмическими толчками и гидротермальной активностью обобщены нами в виде таблицы 1.

Причины и факторы селеформирования в вулканически активных регионах

Самыми главными провокаторами селеобразования, бесспорно, являются эксплозивные извержения, каждое из которых сопровождается выбросом рыхлого материала, причем при крупных эксплозиях его объемы могут составлять от 50 до 300 км³. В целом доминируют небольшие извержения, но при них также выбрасываются

кубические километры пирокластики, и в результате мощность покрова рыхлого материала в непосредственной близости от центра извержения и в направлении доминировавших в этот момент ветров может составить первые метры. Например, влк. Безымянный (Камчатка) в конце 1950-х гг. выбросил до 3 км³ тефры, покрывшей слоем до 40 м более 70 км² и до 40 см почти 500 км² [Виноградов, 1967; Мелекесцев, 1967].

Таблица 1. Особенности селеформирования в вулканических регионах

Table 1. Features of debris flow formation in volcanic regions

Характер селевого события	Конкретный пример	Дополнительные условия	Характер эндогенного фактора
Классические лахары			
Горячий лахар в результате таяния ледников, снежного покрова или выпадения обильных осадков при /после извержения	а) влк. Руис (1985), Колумбия б) влк. Безымянный (1956), Камчатка в) влк. Чайтен (2009), Чили	Наличие ледников (а), снежного покрова (б) или выпадение обильных осадков (в)	Извержение эффузивное или эксплозивное
Холодный (вторичный) лахар – при выпадении обильных осадков и снеготаянии в постэруптивный этап	Конус Штюбеля (1907), Камчатка	Накопление пирокластического чехла мощностью более 1м, его смещение со склонов и заполнение долин	Постэруптивный этап
Сели в результате спуска подпрудных вулканических озер при прорыве плотин различного генезиса и состава			
Из пирокластического материала	Влк. Шивелуч (2010), Камчатка	Сход пирокластического потока	Извержение эксплозивное, постэруптивный этап
Из крупнообломочного материала	р. Теплая – конус Штюбеля (1907), Камчатка влк. Безымянный (1956), Шивелуч (1964), Камчатка Сент-Хеленс (1980), США	Обрушение привершинной части или одностороннее разрушение конуса (направленный взрыв, обломочная лавина)	
Лавовые плотины а) при выполнении долин лавой	р. Мал. Енисей (Южно-Байкальская вулк. область), р. Квита, Исландия	Движение лавового потока по долине	Извержение эффузивное, постэруптивный этап
	б) при перегораживании долин лавой	р. Колорадо (Мендоса, Аргентина) р. Джиды (Забайкалье)	

Характер селевого события	Конкретный пример	Дополнительные условия	Характер эндогенного фактора
Сели в результате иных событий при наличии значительных объемов воды в жидкой или твердой фазе			
Прорыв подледного озера – сход йокульлаупа (вулканогенного ледникового паводка)	влк. Гримсвётн (1996), Катла (1918) Исландия	Наличие полупокровного или покровного оледенения Формирование подледного озера, проседание поверхности льда	Извержение в непосредственной близости или под значительными объемами воды в жидкой или твердой фазе
Выплеск озера при извержении	оз. Штюбеля – р. Теплая (1907), Камчатка	Наличие озера рядом с центром извержения	
Разрушение стенки кратерного озера	влк. Агуа, Гватемала (1541)	Трещиноватые породы	Сейсмическое событие
Перелив озера, возникшего в результате деформации поверхности при росте вулканического купола	руч. Лагерный в кальдере Ксудач, Камчатка	Рост вулканического купола в бассейне реки, формирование просядок и трещин	Вулкано-тектоническая деятельность
Сели в результате иных событий			
Формирование кальдеры обрушения с заполнением долин пирокластическим материалом, усиление врезания и размыв пирокластики	Водотоки кальдеры Ксудач, Камчатка	Усиление эрозии в посткальдерный этап	Вулкано-тектоническая деятельность
Активное развитие оползневых процессов в зонах гидротермальной проработки пород с перегораживанием долин	Долина р. Гейзерной (2007, 2014), Камчатка	Наличие выветрелых до глини и увлажненных пород	Гидротермальная проработка пород

В результате вулканических выбросов на склонах формируется чехол тефры, который при мощности более 30–40 см вызывает усыхание или гибель растительности, что приводит к изменению характера эрозионных и склоновых процессов [Лебедева, 2017 а, б]. Выпавший при извержении пирокластический материал характеризуется высокой пористостью и легкостью, поэтому он может активно переноситься как ветром, так и водой и постепенно концентрируется в понижениях рельефа, в том числе, в днищах долин. Обильные осадки или снеготаяние вызывают сходы селей (твердая составляющая более 60%) или гиперконцентрированных потоков (твердая составляющая 20–60%). Иногда протяженность вулканических селей может достигать 185 (влк. Келуд, Индонезия, 1919 г.) и даже 300 км (влк. Котопахи, Эквадор, 1877 г.) [Thouret, 2010].

Следы лахаров зафиксированы на склонах большинства действующих вулканов мира, для которых характерны эксплозии, причем они сходят там с завидной регулярностью. Так, на влк. Котопахи (Анды) исследователями [Tilling, 2009; Лебедева и др., 2014, 2015] описано 22 таких крупных события, на Ключевском – 20, на влк. Шивелуч (Камчатка) – 11 [Черноморец, Сейнова, 2010]. Только во время извержения небольшого вулкана Чайтен (Чили) в 2008–2009 гг. сошли 3 лахара, от одного из которых в мае 2009 г. пострадал и одноименный город (рис. 1). Наблюдения показали, что опасность схода холодных (вторичных) лахаров сохраняется в течение десятилетий после извержения [Thouret, 2010].



Рис. 1. Пос. Чайтен (Чили), разрушенный в результате схода лахара 2009 г. (здесь и далее фото автора, 2010 г.)

Fig. 1. Chaiten village (Chile), destroyed by the 2009 lahar descent (Here and below the author's photo, 2010)

Эксплозии иногда сопровождаются взрывом привершинной части вулкана, при разбросе крупных глыб на первые сотни метров [Thouret, 2010] возможно перегораживание прилежащих долин, в результате чего может образоваться подпрудное озеро или повысится уровень существовавшего там ранее водоема. При последующем разрушении такой плотины практически неизбежно формирование селя (рис. 2).



Рис. 2. Фрагмент разрушенной плотины в истоке р. Теплой (стрелка), вызвавшей поднятие уровня озер в кальдере Ксудач на 15 м после извержения 1907 г. Пунктиром показана уничтоженная в результате взрыва при извержении вершина конуса Штюбеля (Камчатка, 2016 г.)

Fig. 2. A fragment of a destroyed dam at the source of the river Teplaya (arrow), which caused a rise in the level of Ksudach caldera's lakes by 15 m after the eruption of 1907. The dotted line shows the top of the Shtübel cone destroyed by the explosion (Kamchatka, 2016)

Вообще при вулканической деятельности достаточно часто формируются различного рода плотины, препятствующие стоку и вызывающие образование подпрудных водоемов. Так, при одностороннем разрушении вулканического конуса – при направленном взрыве - нередко формируются обломочные лавины, что приводит к отложению обломочного материала различной крупности на той части склона, куда был ориентирован взрыв, на расстоянии до 29-30 км [Пономарева, 2010] и даже до 85 км от места обрушения конуса [Thouret, 2010]. Этот резургентный материал также может создавать упомянутые плотины. Например, на Аляске обломочная лавина привела к формированию не одной, а серии плотин и созданию ряда подпрудных водоемов в долине р. Чакачатна [Waythomas, 2001].

При эксплозивных извержениях наиболее тяжелая часть эруптивной колонны может формировать пирокластические потоки (ПП), которые представляют собой смесь раскаленных глыб, пепла и вулканических газов. Со скоростью иногда более 100 м/сек [Thouret, 2010] они спускаются от жерла по склону вулкана. В результате происходит выполнение близлежащих долин пирокластическим материалом, а при последующем врезании водотоков в рыхлую толщу пирокластики и ее размыве – сход селей. Площади участков, подвергшихся воздействию ПП, могут составлять десятки и сотни квадратных километров: при извержении Шивелуча 1964 г. они достигли 45.5 км² [Belousov et al., 1999]. В последующие годы потоки неоднократно сходили по долинам рек южного склона вулкана и их протяженность составляла от 8 до 28 км [Мелекесцев и др., 1991]; известно, однако, что длина их может достигать и 100 км [Witham, 2005]. После извержения влк. Сент-Хеленс (США) в 1980 г. потоки сходили по склонам вулкана крутизной 10–30°, так и по пологой пемзовой равнине подножия (~ 5°), их протяженность достигала 8 км, а суммарная мощность – 12 м [Brand et al., 2016]. На влк. Шивелуч мощность отложений ПП колеблется от 2-5 м на склонах и до 40-50 м в долинах [Мелекесцев и др., 1991; Belousov et al., 1999].

Попадая в долину, пирокластический поток заполняет ее днище, а его отложения могут перегораживать устья притоков реки с формированием в них подпрудных озер. Подобные явления наблюдаются, например, в водотоках южного склона влк. Шивелуч (Камчатка) [Лебедева, 2016 б]. Эти водоемы существуют недолго – первые годы, т.к. плотина, сложенная рыхлым материалом, довольно быстро разрушается; при спуске также формируются сели. Озера, подпруженные спекшейся пирокластикой – игнимбритами – более долговечны и масштабны, их глубины могут достигать 100 м [Kataoka, 2008].

И.Б. Сейнова с соавторами [2014] рассматривают пирокластические потоки как триггерный механизм зарождения лахаров, так как за период вулканической активности Шивелуча в 1964–2013 гг. формированию лахаров всегда предшествовало извержение пирокластических потоков. При извержении влк. Пик Сарычева на о. Матуа (Курилы) в 2009 г. сформировавшиеся 8 ПП впоследствии дали начало 7 лахарам различной протяженности [Рыбин и др., 2012]. Лахары регулярно образуются и после извержений влк. Мерапи (Индонезия), которые также сопровождаются формированием ПП. Из 18 долин наиболее крупных водотоков, берущих начало на вулкане, 10 многократно подвергались сходо лахаров [The Atlas..., 2015].

Эффузивное извержение может приводить к заполнению долины реки лавовым потоком, причем иногда на десятки и первые сотни километров. При этом происходит как подпруживание основной реки, так и ее притоков. В результате вытеснения реки из долины и частичного затопления боковых долин опять-таки происходит формирование подпрудных озер, глубина которых может достигать десятков метров – в зависимости от величины исходного расчленения рельефа и мощности лавы. Например, в приустьевых частях притоков р. Мал.Енисей после ее заполнения лавой существовали озера глубиной до 50–70 м [Ярмолюк, 2004]. Подобные озера, существующие в настоящее время в бассейне р. Жом-Болок, и, соответственно, образовавшие их притоки сейчас имеют подлавовый сток [Сковитина, 2002; Щетников, 2002]. При отсутствии такого стока события могут развиваться по нескольким сценариям. Например, сформировавшееся

подпрудное озеро через сниженный участок водораздела переливается в соседнюю долину или даже речной бассейн. Следы подобного явления описаны на базальтовых плато Сихотэ-Алиня [Короткий, 2010]. Со временем может произойти и полное или частичное эрозионное разрушение (пропиливание) лавовой плотины: свидетельства подобных событий сохранились в бассейне рр. Джиды (Забайкалье) [Базаров, Антощенко-Оленев, 1974], Малого Енисея [Ярмолюк и др., 2004], Квиты (Исландия), Оки (Восточный Саян) и др. [Лебедева, 2016а]. В любом случае, интенсивное протекание процесса эрозии (врезания) через какое-то время вызывает сход селя (или селей).

Но извержения не только приводят к образованию новых водоемов: они сами могут происходить в непосредственной близости от уже существующих значительных объемов воды в твердом или жидком виде. Если извержение происходит в озере (например, в кальдере или в подпрудном водоеме в долине) или в непосредственной близости от него, неважно, является ли это событие надводным или подводным, в любом случае оно, как правило, сопровождается выплеском озера, что приводит к сходу селя со склонов или по долине, которая вытекает из данного водоема. При наблюдении за извержением Карымского вулкана в январе 1996 г., сопровождавшегося подводным извержением в северной части расположенного рядом Карымского озера, фиксировались формирование в водоеме многочисленных цунами высотой до 29 м и неоднократный сход лахаров по вытекающей из озера р. Карымской [Муравьев и др., 1997].

В случае покровного оледенения, когда извержение идет под мощным слоем льда, формируются гигантские по масштабам потоки талых ледниковых вод – йокульлаупы. В настоящее время они наблюдаются в Исландии, хотя в периоды четвертичных похолоданий, очевидно, имели место и на Камчатке, и в Восточно-Тувинском лавовом нагорье, и в других вулканических регионах умеренных широт [Мелекесцев, 1976]. При подледном извержении происходит просадка протаявшего льда, формирование подледного водоема с последующим его прорывом и выносом громадных объемов ледяного и обломочного материала на значительные расстояния. Большое количество вовлеченной в процесс воды приводит к гигантским масштабам данного явления: так, извержение влк. Катла (Исландия) под ледником Мирдальсйёкюдль в 1918 г. привело к возникновению йокульлаупа объемом до 8 км³ и затоплению территории в 600–800 км² [Заботкин, 1951; Galeczka et al., 2015; Gudmundsson, 2013].

Многие извержения сопровождаются вулкано-тектоническими явлениями, которые приводят к изменению топографии местности, к деформации продольных профилей долин, плановым смещениям речной сети. Такие примеры описаны нами ранее в кальдерном комплексе Ксудач: это и переформирования приустьевых частей долин при образовании кальдеры обрушения 1725 л.н., и перестройки водотоков в результате роста конуса Штубеля [Лебедева, 2017а, б]. Перестройки речной сети часто сопровождаются прорывами или переливами сформировавшихся подпрудных озер и, соответственно, сходами селей.

В результате слабых сейсмических событий, сопровождающих извержения, может происходить разрушение стенок кратерных озер по зонам трещиноватости, что также провоцирует сход селей. Кроме того, совокупность таких факторов, как наличие толщ трещиноватых, слабосвязанных или гидротермально измененных слабостойких пород, сейсмические толчки и/или выпадение обильных осадков, способствует развитию катастрофических процессов в вулканических регионах и после завершения активной стадии извержений.

Особый интерес представляют собой зоны развития гидротермальных процессов. На таких участках породы интенсивно гидротермально проработаны и нередко в результате химического выветривания превращены в глины, а также значительно обводнены. Они могут легко смещаться, формируя масштабные оползни или оползнисплывы даже при слабых сейсмических событиях (рис. 3). Перегораживание долин смещенными массами приводит к подпруживанию рек и сходу селей, как это неоднократно наблюдалось за последние десятилетия, например, в долине р. Гейзерной (Камчатка) [Кугаенко и др., 2007; Пинегина и др., 2008; Лебедева и др., 2020]. Судя по

морфологии долины этой реки, подобные явления случались там неоднократно и ранее. Следы оползневых цирков хорошо видны на бортах и других рек зон развития гидротермальных процессов, например, на склонах влк. Мутновский, Баранского, Менделеева и др.

Заключение

Таким образом, в вулканических регионах наблюдается широкий спектр процессов, приводящих к формированию селей. Наряду с лахарами, возникающими при выпадении осадков и таянии снега/льда как во время, так и после эруптивных извержений, наблюдаются сели в результате катастрофического спуска подпружных озер, возникших при перегораживании долин вулканическим (пирокластические и лавовые потоки) и резургентным (обломочные лавины, взрывные отложения) материалом. Неизбежно сопровождаются сходами селей и извержения в пределах или в непосредственной близости от крупных масс воды в твердом или жидком состоянии, т.к. они приводят к таянию ледников, выплеску озер или формированию в них цунами. Особое место занимают вулкано-тектонические события (кальдерообразование, формирование трещин, рост экстрезий), приводящие к достаточно быстрым изменениям топографии местности, что, в свою очередь, вызывает перемещение водных масс, возникновение новых водоемов, активизацию эрозии с высокой вероятностью дальнейшего селеформирования.

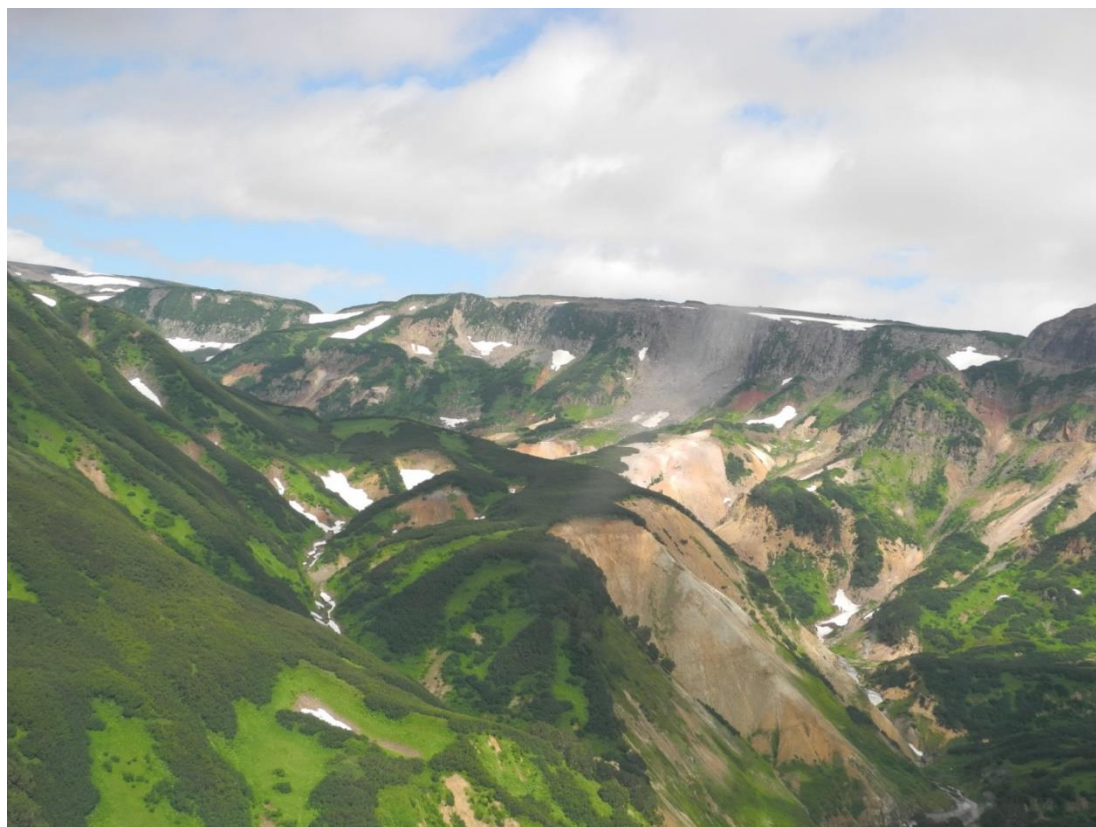


Рис. 3. Оползневые тела на бортах долины р. Гейзерной (Камчатка), периодически перегораживавшие реку с последующим сходом селей (2013 г.).

Fig. 3. Landslides on the sides of the valley of the Geysernaya River (Kamchatka), periodically blocking the river with subsequent debris flows (2013)

Сопровождающие извержение сейсмические толчки, хотя и являются достаточно слабыми, но могут вызывать разрушение стенок кратерных озер, провоцировать

формирование оползней и обвалов, в том числе, с временным перегораживанием речных долин и формированием тех же подпрудных водоемов. Наиболее активно оползни происходят в зонах гидротермальной деятельности, где под воздействием агрессивных термальных вод происходит выветривание коренных пород до податливых глин.

Благодарности

Сбор данных осуществлен при поддержке РФФИ (проект № 18-05-00967), анализ материала выполнен в рамках Госзадания ИГ РАН № 0148-2019-000.

Acknowledgments

The data were collected with support of the RFBR (project No. 18-05-00967), the analysis of results was done in the frame of the topic of the State Administration of the IG RAS № 0148-2019-000.

Список литературы

- Базаров Д.Б., Антощенко-Оленев И.В. Селенгинское среднегорье и Джидинский горный район / Нагорья Прибайкалья и Забайкалья. М.: Наука, 1974. С. 163-209.
- Виноградов В.Н. О влиянии вулканизма на снежный покров и ледники // Вопр. географии Камчатки. 1967. Вып.5. С. 88-94.
- Заботкин П.П. Субгляциальные извержения // Уч. зап. МОИП. 1951. Т. XVII. Вып.5. С. 182-192.
- Короткий А.М. Причины и механизмы перестроек речной сети и их влияние на геоморфологические процессы в Приморье // Геоморфология. 2010. № 2. С. 78–91.
- Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Сеницын В.И. Сейсмические наблюдения в Долине Гейзеров // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. №2. Вып.10. С.171–172
- Лебедева Е.В. Влияние лавовых потоков на строение долин и развитие речной сети // Геоморфология. 2016а. № 3. С. 78-91.
- Лебедева Е.В. Влияние выбросов пирокластического материала на морфологию долин и развитие речной сети (на примере вулканов Северной группы, Камчатка) // Геоморфология. 2016б. № 4. С.56-69.
- Лебедева Е.В. Кальдера вулкана Ксудач (Камчатка) современные процессы рельефообразования и особенности строения долинной сети // Геоморфология. 2017а. № 3. С.60-75.
- Лебедева Е.В. Озера кальдерного комплекса Ксудач (Камчатка): береговые процессы и колебания уровня // Геоморфология. 2017б. № 4. С. 35-49.
- Лебедева Е.В., Михалев Д.В., Кладовщикова М.Е. Опасные и катастрофические процессы южноамериканских Анд // Геоморфологи. Вып.5: Новые решения старых проблем. М.: Медиа-ПРЕСС, 2014. С. 43-56.
- Лебедева Е.В., Михалев Д.В., Шварев С.В. Геоморфологическая напряженность центрального сектора горной системы Анд // Геоморфология. 2015. № 2. С. 77-88.
- Лебедева Е.В., Сугробов В.М., Чижова В.П., Завадская А.В. Долина р. Гейзерной (Камчатка): гидротермальная деятельность и особенности рельефообразования // Геоморфология. 2020. № 2. С. 60-73.
- Мелекесцев И.В. Особенности некоторых рельефообразующих процессов молодых вулканических районов (на примере Камчатки) // Вопр. географии Камчатки. 1967. Вып. 5. С. 80-87.
- Мелекесцев И.В. Вулканизм и рельеф // Проблемы эндогенного рельефообразования. М.: Наука, 1976. С. 350-398.
- Муравьев Я.Д., Федотов С.А. Будников В.А., Озеров А.Ю., Магуськин М.А., Двигало В.Н., Андреев В.И., Иванов В.В., Карташева Л.А., Марков И.А. Вулканическая деятельность в Карымском центре в 1996 г.: вершинное извержение Карымского вулкана и фреато-магматическое извержение в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 38-71.
- Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дроздин В.А., Калачева Е.Г., Чирков С.А., Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Леонов В.Л., Селиверстов Н.И. Камчатская долина гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. // Вестник ДВО РАН. 2008. № 1. С.33-44.

- Пономарева В.В. Крупнейшие эксплозивные вулканические извержения и применение их тефры для датирования и корреляции форм рельефа и отложений: Автореф. дис. ... доктора географ. Наук. М.: ИГ РАН, 2010. 50 с.
- Рыбин А.В., Дегтерев А.В., Разжигаева Н.Г., Ганзей К.С., Чибисова М.В. Активные вулканы Курильских островов: вулкан Пик Сарычева. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2012. 80 с.
- Сейнова И.Б., Черноморец С.С., Демянчук Ю.В. Эндогенный механизм формирования лахаров на андезитовых вулканах (на примере вулкана Шивелуч, Камчатка) // ГеоРиск. 2014. № 4. С. 44-54.
- Сковитина Т.М. Плотинные озера Саяно-Байкальской Становой горной области // Геоморфология. 2002. № 3. С. 79 – 88.
- Щетников А.А. Озера Окинского плоскогорья// Геоморфология. 2002. № 3. С.88 - 95.
- Черноморец С.С., Сейнова И.Б. Селевые потоки на вулканах. Уч. пособие. М.: УНЦ ДО, 2010. 72 с.
- Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Кудряшова Е.А., Лебедев В.И., Сугоракова А.М. Крупнейшие долинныя излияния в кайнозой Азии: особенности строения, состава и условия формирования «лавоваы реки» долины Малого Енисея // Вулканология и сейсмология. 2004. № 4. С. 3-20.
- Belousov A., Belousova M., Voight B. Multiple edifice failures, debris avalanches and associated eruptions in the Holocene history of Shiveluch volcano, Kamchatka, Russia // Bull.Volcanol. 1999. Vol. 61. P. 324-342.
- Brand B.D., Bendaña S., Self S., Pollock N. Topographic controls on pyroclastic density current dynamics: Insight from 18 May 1980 deposits at Mount St. Helens, Washington (USA) // Journ. of Volcanology and Geothermal Research. 2016. Vol.321. P.1-17.
- Galeczka I., Eiriksdottir E.S., Hardardottir J., Oelkers E.H., Torssander P., and Gislason S.R. The effect of the 2002 glacial flood on dissolved and suspended chemical fluxes in the Skaftariver, Iceland // Journ. of Volcanology and Geothermal Research. 2015. Vol. 301. P.253-276.
- Gudmundsson A.T. Living Earth – Outline of the geology of Iceland. Reykjavik: Forlagid, 2013. 408 p.
- Kataoka K.S., Urabe A., Manville V., and Kajiyama A. Breakout flood from an ignimbrite-dammed valley after the 5 Ka Numazawako eruption, northeast Japan // Geological Society of America Bull. 2008. Vol.120. Is. 9/10. P. 1233-1247.
- The Atlas of Merapi volcano. F. Lavigne, J. Morin, Surono (Eds.) 1st Edition, Paris, 2015. 64 p.
- Thouret J.-C. Volcanic hazards and risks: a geomorphological perspective// Geomorphological hazards and disaster prevention. N.-Y.: Cambridge Univ. Press, 2010. P.13-32.
- Thouret J.-C., Antoine S., Magill C., Ollier C. Lahars and debris flows: characteristics and impacts // Earth-Science Review. 2020. Vol. 201. 103003
- Tilling R.I. Volcanism and associated hazards: the Andean perspective // Advances in Geosciences. 2009. No 22. Pp. 125–137.
- Waythomas S.F. Formation and failure of volcanic debris dams in the Chakachatna River valley associated with eruptions of the Spurr volcanic complex, Alaska // Geomorphology. 2001. Vol. 39. Is. 3-4. P.111-129.
- Witham C.S. Volcanic disasters and incidents: A new database // Journ. of Volcanology and Geothermal Research. 2005. Vol.148. Is. 3-4. P.191-233.



Влияние селевых потоков на биогеоценоз и экологию национального парка «Тункинский»

А.М. Лехатинов, Э.Б. Лехатинова, А.Д. Доржиев

ФГБУ Национальный парк «Тункинский», Кырен, Республика Бурятия, Россия,
lexam29@mail.ru, tnpark@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются особенности влияния селей на развитие биогеоценоза и рекреационных ценностей ландшафтов и вопрос комплексирования исследований с целью минимизации потерь природной среды.

Ключевые слова: сели, биогеоценоз, рекреация, опасность, риск

Ссылка для цитирования: Лехатинов А.М., Лехатинова Э.Б., Доржиев А.Д. Влияние селевых потоков на биогеоценоз и экологию национального парка «Тункинский». В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 470–476.

Influence of debris flows on the ecosystem and ecology of Tunkinsky National Park

A.M. Lekhatinov, E.B. Lekhatinova, A.D. Dorzhiyev

FSBI National Park “Tunkinsky”, Kyren, Republic of Buryatia, Russia,
lexam29@mail.ru, tnpark@mail.ru

Abstract. The article deals with the peculiarities of the influence of mudslides on the development on the ecosystem and recreational values of landscapes and the issue of integrating research in order to minimize the loss of the natural environment.

Key words: debris flows, ecosystem, recreation, hazard, risk

Cite this article: Lekhatinov A.M., Lekhatinova E.B., Dorzhiyev A.D. Influence of debris flows on the ecosystem and ecology of Tunkinsky National Park. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 470–476.

Тункинский национальный парк (ТНП) расположен в одноименной впадине байкальского типа западной ветви Байкальской рифтовой зоны. Занимает горно-таежную и впадинную поверхность в границах Тункинского района Республики Бурятия Российской Федерации. Площадь парка составляет 1183 тыс. га, лесов 1171 тыс. га. Численность населения в Советское время достигала до 30–32 тыс. чел., а в настоящее время составляет около 21 тысячи человек. За последнее десятилетие, с ростом посещаемости парка возросла антропогенная нагрузка на природную среду, значительно повысилась селевая опасность. Селевые процессы Восточной Сибири и Дальнего Востока до середины XX века относились к горным паводкам, даже в те годы, когда они повреждали железнодорожные сооружения Транссиба на юге оз. Байкал. Впервые горные паводки Прибайкалья стали называться селями после катастрофы, которая произошла в г. Слюдянка на Байкале в 1960 г. Изучение последствий стихии положило начало широкомасштабных исследований по оценке селеопасности хребтов Прибайкалья Институтом земной коры Сибирского отделения Академии наук СССР (ИЗК СО РАН) В.П. Солоненко, В.И. Астраханцев, М.Д. Будз, А.М. Лехатинов и др.,

1960–1966 гг.. География изучения селей Сибири и Дальнего Востока расширилась с началом строительства Байкало-Амурской железнодорожной магистрали (БАМ) в зоне площадью 1,5 млн. кв. км. (зона БАМ). Инженерно-геологические исследования, включая селевые процессы, возглавило Министерство геологии СССР (Мингео СССР). По методике и с участием ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО: А.М. Лехатинов, А.И. Шеко, М.М. Максимов, А.Р. Онготовев и др.), Производственными геологическими объединениями (ПГО: Иркутскгеология, Бурятгеология, Читагеология, Якутскгеология, Дальгеология), АН СССР, Минвуза СССР была проведена оценка селеопасности зоны БАМ и организованы стационарные работы по выявлению закономерностей развития селей и прогнозированию их активизации. По рекомендациям Всесоюзной селевой комиссии оценка селеопасности горных регионов СССР была начата составлением карты селеопасных районов СССР [*Перов, Флейшман, 1975*].

Проблема биогенной опасности и рекреационной пригодности практически не рассматривается, хотя она не менее значима, чем остальные селевые опасности. Биогенные и рекреационные потери более существенны в селеопасных районах с гумидным (Кавказ, Карпаты, Сахалин и т.д.) и полярным гумидным климатом Сибири и Дальнего Востока, где лесная растительность является ведущим ресурсом. Поэтому, наряду с основными селевыми опасностями, должна рассматриваться и биогеоценозная экологическая опасность и рекреационный риск. Под биогеоценозной экологической опасностью (БЭО) нами понимается: ожидаемое обратимое и необратимое ухудшение устойчивого развития биологического и ландшафтного разнообразия в условиях селепроявления при частом изменении микрорельефа и микроклимата, почвенно-растительного покрова, режима стока вод и разрушения среды популяции животных. Рекреационный риск (РР) – это пригодность для отдыха ландшафта с измененным селом биогеоценозом.

Интенсивное развитие рыночной экономики активизирует освоение природных ресурсов и развитие туризма, альпинизма и бальнеолечения в горах. Поэтому в конце прошлого и в начале этого века масштаб развития селей в среднегорьях и низкогорьях с богатой растительностью и животным миром, значительно расширился. Ухудшаются экологическая обстановка и рекреационное качество ландшафтов. В 2014 году на южном склоне Тункинских гольцов Восточного Саяна (Россия) сошли сели разной плотности по распадкам и малым водотокам междуречья рек Саган-Шулута и Тубота. На этом участке хребта горизонтальное строение морфоструктуры имеет дугообразную форму, открытую на юг. Она «перехватывает» осадконесущие воздушные массы южного и юго-западного переноса. С ними теснее связана селевая активизация в районе п. Аршан на участке от р. Хурай-Хайр до р. Хурай-Хобок. Здесь на водотоках Хурай-Хайр, Бирон, Хохюр, Тунка, Булу, Угутэрэ, Барун-Хандагай, Зун-Хандагай, Мал. Бугутай, Толта, Бугутай, Кынгарга, Артемьевка, 1-я и 2-я Шихтолайка, Мал. Хайримта, Бол. Хайримта, Хурай-Хобок, сошли мощные сели, включая грязекаменный высокой плотности, вышедших на поселок. Склон хребта интенсивно расчленен селеносными водотоками с воронкообразными и ветвистыми водосборами формирования процессов. Протяженность цепи впадин байкальского типа от оз. Хубсугул (Монголия) до оз. Байкал (Россия) оказывает заметное влияние на микроклиматические особенности каждой из них, следовательно, на активность проявления селей. Размер и высота впадин увеличиваются и понижаются в восточном направлении, возрастает количество атмосферных осадков от 321 мм/год (Монды) до 506 мм/год (Аршан), а среднегодовая температура, наоборот, в Мондах более чем 2 раза ниже (-3°), чем в Аршане ($-1,4^{\circ}$). Температура и осадки определяют тип селей, которые в свою очередь, неодинаково отражаются на рекреационной ценности и биогенной экологической значимости. Селевая активность и её влияние на повышение БЭО и РР изменяются в зависимости от густоты и глубины расчленения рельефа. Тункинский национальный парк отличается от других горно-таежных районов Восточной Сибири уникальным набором природных ресурсов и исключительно комфортной средой обитания, которая в свою очередь, изменяется неравномерно под воздействием климатических и геологических и антропогенных факторов. По водному питанию селей территория, включая верховье

р. Иркут, нами подразделяется на четыре селеопасных района: верховье р. Иркут, Мондинская, Хойтогольская и, собственно, Тункинская впадины, в каждой из которых состояние биогеоценоза испытывает разную селевую нагрузку.

В верховье Иркут до Мондинской впадины селеактивные долины V-образной формы преобладают в бассейнах Белого Иркут, Бугавека, Мугавека и Аерхана, в которых ведущую роль в потоке выполняет глыбово-щебнистый материал в период активного таяния снега, снежников и ледников горы Мунку-Сардык. Нагрузка на биогеоценоз оказываются склоновыми селями, т.к. русловые сели высокогорья и среднегорья питаются, главным образом, за счет глубинной эрозии. С бортов распадков поступает в русло материалы осыпей, осов редколесного пояса гор. Биогеоценоз нарушается вдоль русла и осложняется проходимость маршрутов туристов и альпинистов – повышается рекреационный риск. На противоположном левом склоне долины Иркут преобладают склоновые сели и сели малых водотоков, которые выносят твердый материал в главное русло. Поэтому пойменная поверхность Иркут до притока Саган-Шулута, после селевых паводков, приобретает пестрый характер смены лесных и безлесных ландшафтов.

Мондинская впадина аккумулирует сели малых и временных водотоков, выпадающих в р. Иркут. Она расположена на высоте 1240–1600 м н.у.м. и является одной из самых засушливых, почти бесснежных малых впадин Тункинской рифтовой долины. Преобладают водокаменные сели левых притоков Иркут на участке от местности Булукта до р. Хулугайма. Здесь сели нарушают растительность и среду обитания животных пойменно-русловых поверхностей. Преобладает дождевое питание селей. Правые притоки Иркут существенно нарушают устойчивое развитие продуктивности ландшафтов лесостепного склона хр. Мунгийн-Даба. Склон, сложенный многолетнемерзлыми делювиально-ледниковыми отложениями, поражен термоэрозионными склоновыми селями бассейна р. Обо-Горхон. С нагорной стороны вдоль федеральной автодороги Монды - Монголия проявляются антропогенные сели. Дождевые природно-антропогенные сели повторяются реже. Они повреждают лес, пастбища и дорогу Монды – Орлик. Усиливают термокарстовое болотообразование и смену растительности в местах залегания льдистых пород. Активно развивается сукцессия антропогенных ландшафтов и на селевых отложениях. На северном селеопасном склоне г. Мунгийн-Дабан – степь наступает на лес.

Интенсивность воздействия селевых процессов на биогеоценозную и рекреационную ценность возрастает от Мондинской впадины в сторону центральной части Тункинской долины, где сплошная мерзлота с таликами меняется на островную с пышной лесной растительностью. На Харадабанском подветренном склоне лиственничное редколесье переходит в смешанный лес. В селеопасных местностях развивается процесс увеличения деградации продуктивности ландшафтов. Все селеопасные водотоки, стекающее восточнее горы с отметкой 3015 м до хр. Монго, оказывают влияние на динамику ландшафтов V-образных долин, где преобладают древеснокаменные отложения.

В Туранской впадине, где селевые выносы аккумулируются в лесном поясе предгорья вдаль от р. Иркут, нарушается баланс вещества и энергии лесных ландшафтов. Здесь богатая по разнообразию экосистема реже испытывает селевую нагрузку. В областях аккумуляции дождевых водокаменных селей и паводков при прорыве завалов и заломов, происходит смена русел, нарушается биомасса луговых и лесных ландшафтов долин рек Мал. и Бол. Харагол, Халагун, Туран и т.д. Так, например, в пойме р. Халагун селевые паводки почти ежегодно обновляют пойменно-русловой рельеф, петляя по селевому полю. Заломы, гряды, корчаги осложняют переход реки вброд, повышается рекреационный риск на «диком» курорте «Халагун» и опасность туристских переходов. Ухудшается среда обитания водных и околоводных животных и птиц. После каждого селевого потока в условиях горной тайги Хамар-Дабана, расширяется ареал неблагоприятных ландшафтов, которые в свою очередь, повышают активность миграции животных. Зона влияния селей и селевых паводков опустынивается.

На обширной территории Тункинского национального парка сход селей теснее связан с энергией рельефа, составом, состоянием и свойствами пород и местными климатическими особенностями концентрации тепла и влаги. Хамардабанская часть территории представлена средними и низкими горами с таежной растительностью на северной стороне хребта. Поверхность слабее увлажняется и прогревается южными циклонами. В годы аномального выпадения дождей, формируются селевые паводки и водокаменные и древесно-каменные сели на правых притоках Иркута. Например, р. Кыренка, при сходе мощного селевого паводка к центру с. Кырен выносит большой объем полуокатанных камней и корчаг. Русло после селевого паводка очищается и спрямляется, чтобы сохранить пойменный антропогенный ландшафт как место отдыха (на пойменных террасах стадион, парк).

Южный склон Тункинского хребта является наиболее селеопасным районом Восточной Сибири. Пораженность его селями колеблется в пределах 70–90%. После селевого потока сокращается микросреда популяции и обитания животных на обширных поверхностях, осложняется проходимость, снижается качество отдыха оздоровительных местностей Папий Аршан, Субурга, Аршан и т.д. Частота схода зависит от состава и плотности селевого потока. Катастрофические по объему, высокой плотности грязекаменные сели (типа аршанских 2014 г.) повторяются в тысячелетнем цикле 3–4 раза (рис. 1).



Рис. 1. Отложения грязекаменных селей высокой плотности р. 2-ая Шихтолайка (Аршан): А – селя-2014 «каменная пустыня»; Б – исторического селя, слой с крупными камнями 240–260-летней давности. Фото В.И. Толмачева

Fig. 1. Deposits of mud-stone mudflows of high density of the 2-nd Shikhtolaika river (Arshan): А – mudslide-2014 “stone desert”; Б – historical mudslide, a layer with large stones 240–260 years ago. Photo by V.I. Tolmachev

Водокаменные потоки сходят через каждые 2–4, 8–12 лет, а селевые паводки – через год-два или ежегодно. На участке протяженностью 120 км от верховья Ехэ-Угунь до верховья р. Бол. Хобок расположено 38 селеносных водотока с дождевым, реже снеговым, смешанным типами питания. Из них два крупных притока Иркута – Ехэ-Угунь и Кынгарга выносят твердый материал почти до главной реки. Малые и временные водотоки северного склона Собственно Тункинской впадины: Ганга-Хайр, Илтыкшин, Хэр, Булык, Хурай-Хайр, Бирон, Хохюр, Барун и Зун Хандагайка, Хайримта и другие селеносные водотоки выносят твердый материал в зону лесов. Они сформировали рельеф из конусов выноса и эрозионно-аккумулятивных микроформ с нарушенной растительностью. На участке транзита и остановки селевых потоков происходит резкая смена ландшафтной экологии – приспособленность видов к условиям обитания в связи с ухудшением продуктивности. Водокаменные сели и селевые паводки опасны для биологического и ландшафтного развития днищ долин и подножий склонов. Преобладает линейный характер воздействия на состояние лесного яруса гор. Примерная площадь ландшафтов, нарушенных селями, превышает 8000 га. Частая смена структуры и функционирования ландшафтов, обуславливает нарушение пищевой

цепи, следовательно, сокращается численность животных, включая птиц. Отложения грязекаменных селей формируют пустынную мостовую, под которой прекращается популяция землеройных животных и микроорганизмов. На каменистой селевой мостовой семенным путем приживаются растения пионеры, отдельные кусты и деревья, среда обитания животных, особенно промысловых, годами не восстанавливается.

В Восточной Сибири грязекаменные селевые потоки высокой плотности сходят исключительно редко. Разрез отложений, обнаженных в левом борту каньона 2-й Шихтолайки показывает, что исторический слой аналогичных отложениям селя-2014, четко прослеживается (см. рис. 1Б). Выше и ниже исторического слоя залегают породы менее мощных селей. Над обнажением поверхность конуса выноса занята спелым сосняком. Согласно В.А. Соколову, прирост сосняков по высоте продолжается до 170 лет и более, по диаметру до 300 лет [Соколов, 1997]. По возрасту 90-100 летних отложений, залегающих выше исторического слоя, и 120-140 летнему сосняку нами установлено, что грязекаменный сель высокой плотности повторился в 2014 г. через 240-260 лет. Аршанский сель с тремя водосборами – это уникальное многофакторное явление. Зона формирования и транзита представлена высокогорными, гольцово-тундровыми и среднегорными эрозионно-денудационными ландшафтами. Водосборная поверхность сложена элювиально-коллювиально-делювиальными и ледниковыми отложениями с широким развитием гравитационных, эрозионных и мерзлотных процессов (рис. 2Б). Рельеф альпинотипный, структурно-тектонический с ледниковыми, эрозионными и криогенными формами. Антропогенный фактор связан с рубкой леса, пожарами, сбором дикоросов, охотой и туризмом. Подгорные лесные ландшафты являются местами хозяйственной деятельности жителей п. Аршан и его рекреантов, пользующимися курортами.

В год схода катастрофического селя в Аршане синоптическую обстановку нам, как местным жителям, удалось наблюдать в конце июня 2014 г. Весна и начало лета в Тункинской впадине были теплыми и сухими. Грозы и небольшие дожди начались в третьей декаде июня. К концу месяца продолжительность и интенсивность дождей нарастали. И в ночь с 27 на 28 июня на район п. Аршан обрушился 6-ти часовой интенсивный дождь с ливнями. Инструментально определить интенсивность и количество осадков было невозможно, т.к. с развалом Советской власти прекратила работу метеостанция «Аршан», нет даже метеоплощадки. Теплая весна и обильные дожди начала лета ускорили образование сезонноталого, влагонасыщенного слоя склоновых отложений, которые сползли при «подрезке» их базиса денудации паводками. Сформировались селевые потоки одновременно на всех водотоках южного склона. Грязекаменный сель 2-ой Шихтолайки на середине конуса выноса получил дополнительную мощную селевую «подпитку» 1-ой Шихтолайки. В результате слияния селей двух Шихтолаек и ручья Безымянный, грязекаменный поток высокой плотности шириной 150-200 м продвинулся далеко вглубь впадины. По расчётам НПТ (С.В. Смолин) площадь, полностью уничтоженного селом спелого леса составляет 86 га с запасом древесины 14 тыс. кубометров. Рекреационно-хозяйственный лес за несколько часов превратился в каменную пустыню, по обе стороны которой произошло заиление лесных ландшафтов. Основная масса селевых выносов отложилась в районе гостиницы Саган-Даля в форме каменного языка с глыбами до 3-х метров в поперечнике. После полной остановки плотной грязекаменной селевой массы, обильно вытекающая из неё вода, усилила водокаменный сток, который следовал за основным валом, вынес в поселок мелкие камни, мусор и грязь, повредил строения, дорогу и придорожную коммуникацию. Ниже поселка был заилен дресвяно-песчано-суглинистыми выносами парковый лес, площадь которого составляет более 229 га. Общая площадь уничтоженных, замусоренных и загрязненных ландшафтов в районе п. Аршан составила более 315 га. За считанные часы сформировалась безжизненная поверхность, где мощность заиления местами достигла 100–120 см (рис. 2).

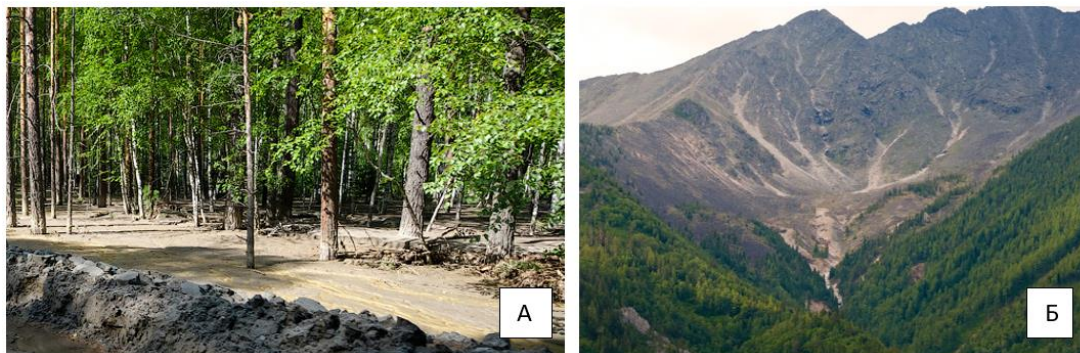


Рис. 2. Влияние селей на биогеоценоз: А – подгорный ландшафт, заиленный и замусоренный спелый лес; Б – горно-тундровый ландшафт, пораженный очагами селей

Fig. 2. The impact of floods on the ecosystem: A – sub-mountain landscape, silted and littered mature forest; Б – mountain tundra landscape, amazed with the centers of mudflows

Перекрытые и переотложенные селевыми водами песчано-глинистые грунты заилили лесную и степную поверхность до с. Хурай-Хобок, который расположен в 9–10 км южнее п. Аршан. Заились приусадебные участки, погибли посевы. В 2014 году селевые зандры разного размера изменили продуктивность ландшафтов зон аккумуляции почти всех селеносных водотоков северного борта Собственно Тункинской впадины, особенно на междуречье рек Хурай-Хайр и Бол. Хобок. Деревья, главным образом берёзовые и еловые, от заиления корневой шейки заболевают, теряют урожайность и отмирают. Селевые пески на продолжительный период вывели из пищевой цепи ягоды, грибы и другие дикоросы. На территории Тункинского нацпарка насчитывается более 1000 видов сосудистых растений, из них 68 видов включены в Красные книги Бурятии и России. Основной ареал их популяции прослеживается по левобережью р. Иркут на солнечной стороне подножья гор, где селевые потоки формируют наложенный рельеф. Сокращается ареал эндемичных и реликтовых растений. Например, реликт палеогенового возраста, эндемик Восточного Саяна, любительница солнечного света и тепла южного склона Мегадения Бардунова стала исключительной редкостью. Редкий вид Карагана гривастая – реликт неогенового периода, Рябчик Дагана и другие ценные растения приобретают статус исчезающих видов.

Оскудели нарушенные селями ландшафты подгорий хр. Хамар-Дабан и Тункинских гольцов, нарушилась и изменилась пищевая цепь. Мигрировали аборигенные животные. Так, например, кабарга – обитательница высоких гор численность её за год до селей составляла 1209 особи (2013 г.), а на второй год после их схода – 852 особи (2016 г.); сократилась численность обитателей низкогорья и подгорья: кабан – 742 особи (2013 г.) и 181 особи (2016 г.), белка – 6636 особи (2013г.) и 3411 особи (2015г.), соболь – 1620 особи (2013 г.) и 714 особи (2015 г.), глухарь -2232 особи (2013г.) и 505 особи (2016 г.) и т.д. По всем 19 видам животных, зимнее наблюдение за численностью которых ведет НПТ с 2003 г., наблюдается двух и более кратное сокращение численности популяции на 2-3 год после нарушения селями среды обитания животных, особенно травоядных, хищников и боровой дичи. По мере восстановления функционирования ландшафтов – пищевой цепи, пополнение численности приближается к среднеголетним показателям на 4–5 год. Максимальный ущерб природной среде наносят сели площадного характера растекания, которые разносят мелкозем далеко за пределы конуса выноса. На продолжительное время ухудшается сукцессия ландшафтов. Линейное нарушение состояния биотопов происходит при сходе русловых селей, выносящих твердый материал в перехватывающий водоток. Нарушаются условия развития пойменно-руслового биогеоценоза.

Сокращение богатого биологического, ландшафтного и водного разнообразия, увеличивается селями, наводнениями, пожарами и человеком. Роль селей в потере

ценностей биогеоценоза и рекреационного качества ландшафтов постоянно повторяется, но не изучается. Выявление закономерностей воздействия селей и других экзогенных процессов на природную среду, позволит более рационально выбрать мероприятия по её охране. От качества природной среды зависит и качество экологии человека. Колоссальный ущерб природным ресурсам, особенно биологическим, земельным и рекреационным лесных зон и лесостепей, наносят сели, которые сходят в режиме повторяющихся явлений. Убыток, нанесенный селями природной среде, слабо учитывается при оценке социально-экономических, после селевых потерь. Проблема изучения и прогноза изменения биогеоценозов и рекреационных ценностей на селеопасных территориях должна рассматриваться в селеведении наряду с другими опасностями и решаться совместными усилиями селеведов, биологов, экологов, охранников природы и природоведов на международном уровне.

Список литературы

- Перов В.Ф., Флейшман С.М. Карта селеопасных районов СССР. Москва: ГУГК, 1975 – 1 л.
Соколов В.А. Основы управления лесами Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 308 с.



Характеристики селей, формирующихся в районах распространения многолетнемерзлых пород

В.А. Лобкина, Ю.В. Генсировский, М.В. Михалев

*Сахалинский филиал Дальневосточного геологического института ДВО РАН,
Южно-Сахалинск, Россия, valentina-lobkina@yandex.ru*

Аннотация. Полевые работы, проведенные Сахалинским филиалом ДВГИ ДВО РАН в 2018-2019 г. в арктических и субарктических климатических поясах показали, что селевые процессы в этих зонах имеют куда большее распространение и частоту чем считается. Во многом частота схода селей и широкое распространение селевых процессов связано именно с наличием многолетнемерзлых пород. Ежегодное оттаивание поверхностного слоя грунта регулирует объем материала, вовлекаемого в селевой процесс, а глубина протаивания определяет поверхность скольжения. Наибольшие различия в характеристиках селей, развивающихся на многолетнемерзлых породах, выражаются в их скоростях, объемах и частоте формирования. В работе будут рассмотрены вопросы применения различных формул для расчета скорости селей и оценки их объема. В целом по итогу полевых работ можно говорить о более сложной типизации селей на территории данной области, а также о том, что общее распространение селевых процессов и степень селевой активности значительно выше ранее заявленной.

Ключевые слова: *Колымско-Чукотская селевая область, селевой поток, расчет*

Ссылка для цитирования: Лобкина В.А., Генсировский Ю.В., Михалев М.В. Характеристики селей, формирующихся в районах распространения многолетнемерзлых пород. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 477–481.

Characteristics of debris flows forming in permafrost areas

V.A. Lobkina, Yu.V. Gensiorovskiy, M.V. Mikhalev

*Sakhalin Department of the Far East Geological Institute, Far Eastern Branch, Russian
Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, valentina-lobkina@yandex.ru*

Abstract. Field work carried out by Sakhalin branch of Far Eastern Geological Institute of Far Eastern Branch, RAS in 2018-2019 in arctic and subarctic zones showed that debris flow processes in these zones are much more widespread and more frequent than they are considered to be. On the whole, the debris flow frequency and its widespread are associated with existence of permafrost formations. Annual thawing of surface ground layer regulates amount of material involved in debris flow process, and thawing depth determines the sliding surface. The major differences in characteristics of debris flows developing on permafrost formations are expressed in their velocities, volumes and frequency of formation. The paper will consider the application of various formulas for calculating debris flow velocity and estimating their volume. In general, based on the results of field work, it is possible to indicate more complex classification of debris flows in the territory of the region, as well as general distribution of debris flow processes and degree of debris flow activity are much higher than previously stated.

Key words: *Kolymsko-Chukotskaya debris flow region, debris flows, calculation*

Cite this article: Lobkina V.A., Gensiorovskiy Yu.V., Mikhalev M.V. Characteristics of debris flows forming in permafrost areas. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 477–481.

Введение

Многолетнемерзлые породы (ММП) имеют широкое распространение, особенно на территории Российской Арктики. Однако, работ, характеризующих сели, развивающиеся на мерзлых породах, и описывающих изменение их динамические характеристик крайне мало. На имеющихся обобщающих картах районирования селеопасных территории районы арктического и субарктического пояса России обозначены как неселеопасные или имеющие малую, реже среднюю степень селевой опасности.

Проведенные Сахалинским филиалом ДВГИ ДВО РАН в 2018–2019 г. полевые работы в арктических и субарктических климатических поясах показали, что селевые процессы в этих зонах имеют куда большее распространение и частоту чем считается. По некоторым селевым бассейнам частоту схода селей можно охарактеризовать как ежегодную.

Во многом частота схода селей и широкое распространение селевых процессов связана именно с наличием многолетнемерзлых пород. Ежегодное оттаивание поверхностного слоя грунта регулирует объем материала, вовлекаемого в селевой процесс, а глубина протаивания определяет поверхность скольжения.

Наибольшие различия в характеристиках селей, развивающихся на многолетнемерзлых породах, выражаются в их скоростях, объемах и частоте формирования. В работе будут рассмотрены вопросы применения различных формул для расчета скорости селей и оценки их объема.

Район исследования и его изученность

Район исследования находится на Северо-востоке России, в холодной зоне восточного региона и отнесен к Колымско-Чукотской области согласно карте районирования селеопасных территорий России [<https://национальныйатлас.рф/>].

Первые сведения о селях в исследуемом районе встречаются в конце 60-х – начале 70-х годов XX в. В 70–90-х годах XX в. было выпущено несколько мелкомасштабных карт, где район исследований был обозначен, как селеопасный [Флейшман, 1978].

В дальнейшем, проводились эпизодические наблюдения, за селевыми процессами и поступали отрывочные сведения о формировании селевых потоков в центральных районах Чукотки, побережье Восточно-Сибирского моря, а так же по автодороге «Колыма» (Якутск – Хандыга – Усть-Нера – Магадан) [Поморцев, Рожин, 2017; Романенко, 2018].

В силу своей масштабности имеющиеся карты [Флейшман, 1978; СП 115.13330.2016; <https://национальныйатлас.рф/>] селевых территорий не дают полной картины распространенности селевых процессов в районе исследований.

В целом можно сказать, что селевые процессы в районе исследования изучены недостаточно.

Типы селей

В работе [Романенко, 2018] указывается формирование на севере и в центральной части Колымско-Чукотской селевой области исключительно водоснежных селевых потоков, однако проведенные в 2018–2019 гг. полевые работы показали, что, несмотря на широкое распространение селей водоснежного типа на территории данной области формируются также собственно селевые типы селей.

Сотрудниками Сахалинского филиала ДВГИ ДВО РАН были зафиксированы следы схода селевых потоков грязекаменного и водокаменного типов по притокам р. Коральвеема, протекающим в центральной части Кепервеемской горной гряды Аннойского нагорья.

Твердой составляющей грязекаменных селей является супесчано-глинистый материал с примесью гальки и гравия, с включением валунов. Водокаменные сели в

данном районе, несут большее количество гравийно-галечного материала с примесью валунов и меньшее количество мелкозема.

Следы прохождения селевых паводков обнаружены по бассейнам р.р. Эрвыкыннотвеем, Дорожная, Матачъынай которые берут начало на хр. Искатень.

В южной части Колымско-Чукотской селевой области также не исключено формирование селевых паводков, о которых упоминается в работе [Поморцев, Рожин, 2017] на границах Верхоянской и Колымско-Чукотской селевых областях.

Водоснежные потоки, имеющие наибольшее распространение по территории области, представляют собой смесь снега насыщенного водой и обломочного материала, вынесенного за зимний сезон лавинами, осыпями и обвалами в тальвеги водотоков. Водоснежные потоки формируются при интенсивном снеготаянии снежных надувов и карнизов, местом их формирования являются склоны, преимущественно, южной экспозиции.

Селевой режим области делится на два периода вероятного формирования селей:

1. **Раннелетний** (май-июнь), формирование селей связано с началом интенсивного снеготаяния. В этот период формируются маломощные, преимущественно, несвязные селевые потоки, что связано с тем, что многолетнемерзлые породы еще не оттаяли и в селевой процесс преимущественно вовлекается материал, перемещенный за зиму лавинами и осыпями/обвалами в русло водотоков или отложенный на склонах. Ширина захвата таких селей не велика, обычно составляет первые метры. Зона транзита остается в русле или на его берегах, обычно прямолинейна. Аккумулируются сели этого периода, растекаясь широким шлейфом, с последующим переносом селевого материала далее тальми и дождевыми водами. Глубина выпавания составляет 0,3–0,7 м и ограничена кровлей сезонно-талого слоя (СТС). Высота заплеска селя в зоне транзита, может составлять 1,3–1,5 м. Мощность отложений составляет 0,3–1,0 м. В этот период формируются преимущественно водоснежные потоки. Частота формирования ежегодная.

2. **Позднелетний-раннеосенний** (июль-август), формирование селей связано с выпадением жидких осадков в период наибольшего отепления ММП. В данный период возможно формирование наиболее крупных связных грязекаменных и водокаменных селевых потоков. К этому моменту в селевом массиве происходит оттаивание деятельного слоя на полную глубину, источником жидкой составляющей будет талая вода, стекающая по кровле ММП, к которой дополнительно поступает дождевая. Дождь в данный период является триггером, запускающим процесс формирования селей. Данные селевые потоки наиболее опасны. Глубина выпавания селя – до кровли ММП. Высота селевой волны в узких долинах более 6,0 м. Ширина захвата, в зависимости от ширины долины, колеблется в пределах 20-100 м. Мощность отложений может составлять 3,5–6,0 м. Формирование такого типа селей – раз в 30-50 лет.

По полевым оценкам, средние объемы выноса селевого материала, колеблются в пределах 3000–10 000 м³. Однако, при определенных условиях, возможно формирование крупных селевых потоков, объемы которых могут достигать 100 000 м³ на северо-востоке области и 300 000 м³ в центральной части области.

В целом по итогу полевых работ можно говорить о более сложной типизации селей на территории данной области, а также о том, что общее распространение селевых процессов и степень селевой активности значительно выше ранее заявленной.

Особенности расчета характеристик селей

Скорость. Применения стандартных формул расчета скоростей селей показали занижение значений в сравнении с данными, полученными при полевых исследованиях (на основе следов, оставленных селевыми потоками), что объясняется гранулометрическим составом селевой массы, в котором будет малая доля мелкодисперсного материала.

Скорость движения является важнейшим параметром, характеризующим селевой поток. От правильной оценки скорости движения селя зависит расчет других динамических характеристик.

В работе [Соколова и др., 2018] приводится обзор семи формул расчета скорости селевого потока, полученные по формулам значения скорости сравниваются со скоростями, полученными в результате 5 экспериментальных спусков селевых потоков в верховьях р. Чемолган (Казахстан 1972, 1973, 1975, 1976, 1978 г.).

В результате ни одна из формул, ни дала полного совпадения с результатами натурального эксперимента.

Материал, собранный при полевых работах, проведенных на территории освоения в июне-июле 2019 сотрудниками СФ ДВГИ ДВО РАН, был проанализирован на предмет расчета скорости шестью формулами, без формулы по Срибного М.Ф. учитывающей плотность. Наилучший результат для расчета скоростей водокаменных потоков дала формула МЧС [Крюков, Буденко, 2013], которая в [Соколова и др., 2018] давала самые высокие результаты:

$$V = 11,4 * h_{cp}^{0,5} * (U_0 * \sin \alpha)^{1/3}. \quad (1)$$

Только в этой формуле учтена крупность вовлекаемых в селевой поток валунно-глыбовой составляющей, что особенно важно в районе распространения многолетнее мерзлых пород, где вовлечение в селевой процесс делювиально-пролювиальных отложений (курумы, осыпи, обвалы), будет выше чем в других районах, в то время когда доля мелкодисперсного материала будет уменьшаться. По нашему мнению, формулу МЧС корректно использовать только для водокаменных потоков. Однако, параметр U_0 – относительная гидравлическая крупность вовлекаемых в поток каменных материалов, была взята не как рекомендованная для оперативных расчетов, а фактическая, по полученным материалам.

Наилучший результат для грязекаменных селевых потоков показала формула Херхеулидзе И.И.

Средняя скорость водокаменных селевых потоков в области составляет 7–13 м/с, грязекаменных 5–8 м/с.

Объем. Довольно точно, к полевым оценкам, объем водокаменных селей был получен при изменении формулы расчета объема селя по [РД 52.30.238-89, 1990]:

$$V_c = 0.5 * (Q_c)_{max} * T_c, \quad (2)$$

где Q_c – рассчитанный максимальный расход селя, м³/с; T_c – продолжительность селя, с.

Входящая в формулу характеристику – продолжительность селя (T_c), была заменена на произведение времени добегающей первой селевой волны по С.П. Кавецкому на оценочное количество зон разгрузки селевого потока:

$$V_c = 0.5 * (Q_c)_{max} * T_K * n, \quad (3)$$

где T_K - время добегающей первой селевой волны по С.П. Кавецкому, с; n – оценочное количество зон разгрузки селевого потока.

В случае не учета зон разгрузки селя (селевых валов) будет получен объем только первой селевой волны, не будет учтен объем материала, вовлеченного в селевой процесс, оставшийся в зоне транзита, а так же вторая и возможные последующие селевые волны, которые дойдут до зоны аккумуляции.

Выводы

На территории Колымско-Чукотской селевой области в ходе полевых работ обнаружены следы формирования селевых потоков грязекаменного и водокаменного типов, селевых паводков.

Получено подтверждение, что наиболее распространенным типом селей будут являться водоснежные потоки.

Репрезентативные результаты расчета скоростей водокаменных селей дает формула МЧС (7-13 м/с), с использованием фактической крупности вовлекаемых в поток материалов, скоростей грязекаменных селевых потоков формула Херхеулидзе И.И. (5–8 м/с).

Объемы перемещенных масс могут достигать 100 000 м³ на северо-востоке области и 300 000 м³ в центральной части области.

Список литературы

- Крюков Е.В., Буденко В.М. Опасные природные процессы: учебно-метод. пособие. М., Академия ГПС МЧС России, 119 стр., 2013
- Поморцев О.А., Рожин С.С. Опасные инженерно-геологические обстановки на автотрассе «Колыма (Южное Верхоянье)» – причины, механизмы развития, прогноз // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, 5– 7 апреля 2017 г.: в 2 т. – Якутск: Изд. дом СВФУ, 2017. С. 365-371.
- Романенко Ф.А. Селевые потоки на островах и побережьях арктических морей // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 5-й Международной конференции. Тбилиси, Грузия, 2018 – с. 521-528.
- РД 52.30.238-89 Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям, 1990.
- Соколова Д.П., Виноградова Т.А., Осташов А.А. Оценка скорости движения селевого потока по различным методикам // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 5-й Международной конференции. Тбилиси, Грузия, 2018 – с. 576-586.
- СП 115.13330.2016 Геофизика опасных природных воздействий. Актуализированная редакция СНиП 22-01-95.
- Флейшман С.М. Сели. Л.: Гидрометеониздат, 1978. 237 с.
<https://национальныйатлас.рф/>. Дата обращения 13.04.2020.



Оценка влияния космической погоды на развитие селевого процесса в Приэльбрусье для уточнения оперативных прогнозов селей

И.В. Мальнева, А.А. Черкесов

*Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия, malnir@mail.ru,
cherkesov2018@yandex.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследований влияния космической погоды на проявление селей в Приэльбрусье и метеорологические условия их формирования по данным метеостанции «Терскол» ежедневно за 2016–2019 годы. Также использованы материалы, размещенные в сети Интернет, на сайтах spaceweather.com, tesislebedev.ru. В первую очередь, это скорость солнечного ветра в околоземном пространстве и плотность протонов в нем. При этом селевой процесс рассматривается как многокомпонентная система, главным звеном в которой является энергия, непрерывно поступающая от Солнца. Установлено, что наиболее опасные метеорологические условия для формирования селей в Приэльбрусье сформировались в 2017 и 2019 гг. при определенной активности Солнца. Наиболее активным был 2017 год (пятна на Солнце, магнитные бури). В этом году наблюдалось катастрофическое проявление селей в ущелье Адьлсу, связанное с прорывом озера Башкара, также в ущелье р. Герхожансу. В 2019 году активность Солнца была очень низкой. За летний период не было ни одной вспышки выше минимального уровня, способного воздействовать на Землю, но отдельные всплески плотности протонов обеспечили метеорологические условия, при которых за один день прошли сели по многим водотокам. Влияние космической погоды может проявить себя только тогда, когда для него будут подготовлены земные природные условия, в значительной степени определяющие активность опасных природных процессов. Результаты наблюдений позволяют уточнять оперативные прогнозы селей от нескольких дней до недели, что необходимо для рационального ведения мониторинга.

Ключевые слова: сели, космическая погода, солнечный ветер, солнечные вспышки, плотность протонов, прогноз

Ссылка для цитирования: Мальнева И.В., Черкесов А.А. Оценка влияния космической погоды на развитие селевого процесса в Приэльбрусье для уточнения оперативных прогнозов селей. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 482–490.

Assessment of the influence of space weather on the development of the debris flow process in the Elbrus region to clarify the operational forecasts of debris flows

I.V. Malneva, A.A. Cherkesov

*High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia, malnir@mail.ru,
cherkesov2018@yandex.ru*

Abstract. The results of studies of the influence of spaceweather on the manifestation of mudflows in the Elbrus region and the meteorological conditions for their formation according to the daily data obtained by the Terskol Weather Station for 2016 - 2019 are presented. Also, there are used the materials presented on the Internet at

spaceweather.com, tesislebedev.ru, Wetterzentrale.com. First of all, this is the speed of the solar wind in the near-Earth space and the density of protons in it. In this case, the mudflow process is considered as a multicomponent system, in which the main unit is the energy continuously supplied from the Sun. It was established that the most dangerous meteorological conditions for the formation of mudflows in the Elbrus region were formed in 2017 and 2019 at the certain activity of the sun. The most active was 2017 (sunspots, magnetic storms). In this year a catastrophic manifestation of mudflows was observed in the Adylsu gorge, associated with the breakthrough of Lake Bashkara and also in the gorge of River Gerkhonsanshu. In 2019, the activity of the Sun was very low. During the summer period, there was not any flash above the minimum level that could affect the Earth, but individual bursts of proton density provided such meteorological conditions under which many mudflows happened in many streams during one day. The influence of space weather can manifest itself only when terrestrial natural conditions are prepared for it, which largely determines the activity of dangerous natural processes. The observation results allow us to clarify the operational forecasts of mudflows from several days to a week, which is necessary for rational monitoring.

Key words: *debris flow, cosmic weather, solar flares, solar wind, operational forecast*

Cite this article: Malneva I.V., Cherkesov A.A. Assessment of the influence of space weather on the development of the debris flow process in the Elbrus region to clarify the operational forecasts of debris flows. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 482–490.

Введение

В настоящее время Приэльбрусье является важнейшим районом отдыха и туризма на территории Российской Федерации. В республике бурно развивается туристический кластер. Ежегодно сотни тысяч туристов находятся на склонах гор. В то же время необходимо обеспечить безопасность жизнедеятельности и комфортное существование как граждан постоянно проживающих на этих территориях, так и приезжающих на отдых. В то же время в Приэльбрусье за последние годы (в 2017 и 2019 гг) произошли два чрезвычайных события, связанных со сходом крупных селевых потоков. В результате этих событий, к сожалению, погибли люди, а объектам инфраструктуры нанесен ущерб на сотни миллионов рублей.

Для обеспечения безопасности населения и всех отдыхающих необходимо предупреждение о проявлении селей в этом регионе. Нужны прогнозы как на год, на сезон, так и, особенно, от нескольких дней до недели – т.е. оперативные прогнозы. Прогнозированием селей очень давно занимаются специалисты Высокогорного геофизического института, Гидрометцентра Кабардино-Балкарии и многие другие организации. Если предположение о селевой активности на год, на сезон осуществляется более или менее успешно, то достоверных оперативных прогнозов фактически не существует. Если методика краткосрочного прогнозирования селей достаточно разработана, для осуществления оперативного прогнозирования не хватает ни средств, ни приборов, ни специалистов.

Для уточнения оперативных прогнозов селей авторы в течение четырех лет (2016–2019 годы) ежедневно во время селеопасного периода вели наблюдения за условиями формирования селей в Приэльбрусье, прежде всего, за метеорологическими условиями, а также за изменением показателей космической погоды по данным сайтов tesislebedev.ru, <http://spaceweather.com> и др.

В работе использованы материалы ГМС «Терскол», метеопоста «Тырныауз», материалы наблюдений синоптиков Гидрометцентра Кабардино-Балкарии в селеопасный период. В селеопасные годы проводилось маршрутное обследование отдельных селевых бассейнов

Содержание исследований

Роль космической погоды в селевом процессе

Селевой процесс рассматривается в работе как многокомпонентная система. Главным звеном в этой сложной системе является энергия, непрерывно поступающая от Солнца, Космическая погода является одним из факторов в этой цепи [Шеко, 1980].

Все факторы, определяющие развитие селевых потоков и других опасных природных процессов, этой сложной многокомпонентной системы, взаимосвязаны и взаимообусловлены. Еще в начале прошлого века практически важные аспекты солнечно-земных связей были названы А.Л. Чижевским «космической погодой». Этим же термином часто называют весь комплекс переменных внешних космических факторов, влияющих на Землю. На вероятность влияния всплесковых значений характеристик космической погоды мы обратили внимание при ежегодных исследованиях условий формирования селей в Приэльбрусье с 2001 до 2019 года (после катастрофического селя 2000 года). Также после анализа возможной опасности формирования катастрофического гляциального селя в долине р. Адылсу в июле 2008 года, когда была потенциальная угроза прорыва высокогорного приледникового озера Башкара. Наличие опасности этой катастрофы предполагалось многими специалистами МГУ, ВГИ и других организаций, но только без учета всех причин, в число которых и входит действие космической погоды. Результаты исследования авторов неоднократно докладывались на специальных конференциях [Гонсировский, 2017]. Как показывают результаты исследования, корпускулярное излучение Солнца достаточно интенсивно проявляет себя у поверхности Земли [Плазменная гелиогеофизика, 2008]. **Постоянный поток корпускул, движущийся от Солнца, называется солнечным ветром.**

Солнечный ветер является основным агентом, посредством которого активные процессы на Солнце влияют на состояние околоземного пространства, геомагнитосферы и приповерхностной области Земли. Это дополнительный источник энергии при развитии опасных природных процессов. «Посредством солнечного ветра происходит перенос импульса и энергии от Солнца к Земле и другим планетам. Поле Земли при этом выходит из равновесия и испытывает колебания. При изменении скорости и плотности этого потока меняется и давление, которое он оказывает на атмосферу Земли – оно то усиливается, то ослабляется. Солнечный ветер становится основным фактором космической погоды». [<http://tesislebedev.ru>]. В некоторых случаях солнечная активность может влиять на возникновение циклонов, но в зависимости от начальной метеорологической обстановки. Основные параметры плазмы геоэффективного солнечного ветра вблизи орбиты Земли имеют следующие характерные значения: скорость 300–800 км/с и более; концентрация протонов в плазме солнечного ветра чаще всего 0,1–10 см³. Наибольшие амплитуды всплесков значений скорости солнечного ветра, достигающие до 1800 км/с и более, наблюдаются тогда, когда он истекает из корональных дыр – открытых магнитных конфигураций с расходимостью магнитных силовых линий [Плазменная гелиогеофизика, 2008]. На основании имеющихся данных были собраны сведения о наиболее значительных проявлениях селей на территории России и стран СНГ в XXI веке, представленные в работе [Мальнева, 2019].

Солнечный ветер мог оказать вспомогательное триггерное, а иногда и решающее влияние на развитие природных катастроф. Имеется в виду за счет энергии плазмы инжекций в приповерхностную область Земли сгустков отделившихся в магнитосферу Земли компонент «обдувающего» её всплескового солнечного ветра. Именно солнечный ветер является транспортным агентом, посредством которого последствия активизировавшихся процессов на Солнце влияют на состояние околоземного пространства и магнитосферы Земли. Эффект этих инжекций плазменных сгустков компонент солнечного ветра, может достигать и приповерхностной области Земли. Эти факторы дестабилизируют обстановку или иногда с возникновением катастроф продолжают действовать, захватывая атмосферное пространство, слои грунтовых массивов в литосфере, грунтовые воды и тела ледников. Физически это означает

проникновение в эти места дополнительной солнечной энергии. Если мощность её выходит за критические пороги, то для ледников вполне возможно достижение триггерного уровня таяния льда в самом селеопасном подошвенном его слое [Гонсировский, 2017]. При этом следует учитывать, что влияние космической погоды путём инъекций в nature может проявить себя только тогда, когда для этого уже созрел нестабильность земных природных условий.

Активность селей в Приэльбрусье в 2016–2019 годах

За 2016–2019 гг. в Приэльбрусье наблюдались селевые потоки, различные по генезису, мощности и разрушительной силе.

2017 год

14 августа по пойме р. Герхожан-Су произошел сход селевого потока. Последствиями схода селя стали полностью разрушенный пешеходный мост через реку Герхожан-Су, деформации русла. Расход селя достигал 700 м³/с, а объем селевых отложений в лотке и на конусе выноса в пойму реки Баксан составил порядка 300 тыс. м³. В результате повторных селей было частично перекрыто русло р. Баксан. 15 августа сель повторился, но мощность его была значительно меньше [Докукин и др., 2018].

1 сентября. В результате прорыва о. Башкара по долине р. Адыл-Су произошел сход селевого потока объемом около 800 тыс м³ и подъем уровня воды в реке Баксан. Селевыми потоками были снесены в реку 4 легковых автомобиля, в которых находились 5 человек, 3 человека погибло. Повреждены 8 участков дорожного полотна федеральной автодороги «Прохладный – Баксан – Эльбрус» общей протяженностью более 3 км, отрезаны оказались пять населенных пунктов с населением более 5200 человек,

2018 год

5 июля прошел катастрофический паводок и незначительные селевые потоки на р. Баксан и на притоках р. Баксан (р. Азау, р. Донгуз-Орунбаксан, р. Адыл-Су, р. Курмычи) с разрушениями участков дороги «Прохладный-Азау», газопроводов, линий и опор ЛЭП, мостов, канализационных коллекторов, участков лесных массивов и пр.

2019 год

23–24 июля – сходы селей малой мощности с незначительными разрушениями дорог по притокам рек Баксан, Адыр-Су, Тютю-Су, по руслам рек Адыр-Су, Тютю-Су (в верхней и средней части), Герхожан-Су.

Для оценки влияния космической погоды на развитие селевого процесса в эти годы необходимо прежде всего оценить особенности погоды – важнейшего из земных условий фактора формирования селей. Все эти селевые потоки были вызваны ливнями в высокогорной и среднегорной зоне, или стали последствием длительной жары (14–15 августа 2017 года при отсутствии осадков).

Опорная метеостанция в горных районах Кабардино-Балкарии – ГМС «Терскол», однако для всей территории она недостаточно репрезентативна. На территории республики имеются существенные различия метеорологических показателей с этой метеостанцией. Вместе с тем, многолетние наблюдения можно использовать только по данным этой метеостанции. В таблице 1 приведены средние за месяц показатели суточной температуры воздуха и количества осадков за 2016, 2017, 2018 и 2019 годы.

В 2017 году прохождение селей было подготовлено аномальными погодными условиями в июле и августе. Так, в июле 12 дней средняя суточная температура воздуха была выше 15 град. С (по данным ГМС «Терскол»), что является пороговым критическим значением при формировании селей. В августе с начала месяца не было средней суточной температуры ниже 15°, а доходила она почти до 20°C, что обусловлено влиянием мощного антициклона на юге Европейской России. Осадков в августе практически не было. Вследствие тенденции повышения температуры воздуха в начале XXI века были созданы условия для повышения снеговой линии на ледниках и изменения условий абляции. К 11 августа снеговая линия проходила на высоте более 3800 м. Площадь снежного покрова была такой же, как и перед селями 1999, 2000 и 2011 гг. Все это подготовило моренно-ледниковый комплекс р. Герхожансу. При этом

высокие температуры воздуха создают условия для формирования больших объемов талых ледниковых вод, которые могут накапливаться внутри ледника и затем прорываться в виде гляциальных паводков. Данные условия можно сравнить с июлем 2000 года.

Таблица. Среднемесячные температуры воздуха ($T_{\text{ср.}}$, °C) и количество осадков (Q , мм) в 2016, 2017, 2018 и 2019 годах по отношению к среднему многолетнему значению

Table. Monthly average air temperatures ($T_{\text{sr.}}$ °C) and rainfall (Q_{mm}) in 2016, 2017, 2018 and 2019 relative to the long-term average

Месяцы	май		июнь		июль		август	
	$T_{\text{ср.}}$	Q , мм	$T_{\text{ср.}}$	Q , мм	$T_{\text{ср.}}$	Q , мм	$T_{\text{ср.}}$	Q , мм
Ср. многол. значение	6,7	87	9,9	93	12,5	100	12,1	91
2016	7,6	111,1	10,5	54,8	12,5	169,5	13,8	115,3
2017	5,9	255,3	10,6	80,9	14,1	67,1	14,1	83,4
2018	8,6	46,3	11,7	44,8	14,2	146,1	12,2	96,9
2019	8,5	108,2	12,6	105,9	11,9	177,9	12,9	45,9

После длительного периода аномально жаркой погоды над высокогорными районами Центрального Кавказа установился атмосферный фронт, с которым были связаны локальные ливни. Причиной прорыва озера Башкара и катастрофического селя в Баксанском ущелье Кабардино-Балкарии стал один такой ливень. Такого сильного ливня в этом районе не было более четверти века, а его вероятность по данным многолетних наблюдений – менее чем раз в сто лет.

В результате анализа таблицы можно отметить существенные отличия средней температуры воздуха и количества осадков за последние четыре года и особенности 2019 года. Прогноз высокой температуры воздуха в начале лета в 2019 году и, соответственно, прогноз высокой опасности формирования селей, составленный сотрудниками Гидрометцентра, не оправдался. В июле средняя температура уже существенно ниже нормы, а количество осадков почти в два раза больше. Эта ситуация и определила высокую активность оползневых и селевых процессов в июле 2019 года. Причем наибольшее значение, как и в предыдущие годы, имел режим температуры воздуха и количества осадков в течение месяца. Так, осадки, с которыми связано наибольшее количество опасных геологических процессов, прошли в основном 22–25 июля, а также 12–13 июля [Мальнева и др., 2019].

Возникает вопрос: чем объясняется такой режим погоды в июле 2019 года? Ответ на этот вопрос дает анализ синоптической ситуации на Северном Кавказе и конкретно в Приэльбрусье по материалам Гидрометцентра Кабардино-Балкарской республики. Авторами произведен анализ за наиболее селеопасный месяц – июль. С начала июля на территории наблюдался циклонический характер погоды, частое прохождение фронтов. Вдоль гор часто отмечен фронт окклюзии, с которым связано формирование протяженной зоны облаков и осадков, который часто возникает за счет смыкания холодных и теплых воздушных масс. 23 и 24 июля отмечено, что погода у Земли будет определяться ложбиной с юга и влиянием холодного воздуха с северо-запада. Ожидался кратковременный дождь, местами с перерывами, в горах возможен град. Следует отметить, что катастрофический селевой поток, вызванный прорывом озера Башкара в 2017 году, обусловлен сходной синоптической ситуацией, хотя в 2017 году температура воздуха была значительно выше. Столкновение этих воздушных масс как видно всегда опасно для данной территории, оно часто приводит к опасной погодной ситуации и активизации оползневых и селевых процессов вместе с другими факторами.

Влияние космической погоды на развитие селевого процесса

Далее представлены результаты исследований влияния космической погоды на проявление селей в Приэльбрусье. Используются материалы, размещенные в сети Интернет, в основном на сайтах spaceweather.com, tesislebedev.ru. В первую очередь, это скорость солнечного ветра в околоземном пространстве и плотность протонов в нем. Установлено, что наиболее опасные метеорологические условия в Приэльбрусье для формирования селей сформировались в 2017 и 2019, как отмечено ранее, при определенной активности Солнца.

Отметим, что влияние космической погоды может проявить себя только тогда, когда для него будут подготовлены земные природные условия, в значительной степени определяющие активность опасных природных процессов.

Прежде всего, следует отметить, что период 2016–2019 гг., особенно 2019 год, – это период солнечного минимума 24-го 11-летнего цикла солнечной активности. Подсчет солнечных пятен говорит о том, что это один из самых глубоких минимумов прошлого века. Магнитное поле Солнца стало слабым, что позволяет космическим лучам проникать в солнечную систему (spaceweather.ru), [Ишков, 2017, 2020]

Главным фактором космической погоды стал солнечный ветер – поток плазмы, образующийся в результате непрерывного истечения верхних слоев солнечной атмосферы в окружающее космическое пространство. При изменении скорости и плотности этого потока меняется и давление, которое он оказывает на атмосферу Земли, – оно то усиливается, то ослабляется. Поле Земли при этом выходит из равновесия и испытывает колебания. Солнечный ветер становится основным фактором космической погоды (tesislebedev.ru). Эти процессы на Солнце оказывают влияние и на все земные процессы и их активность. На рисунке показано изменение скорости солнечного ветра за селеопасный период в наиболее селеопасные годы (рис.).

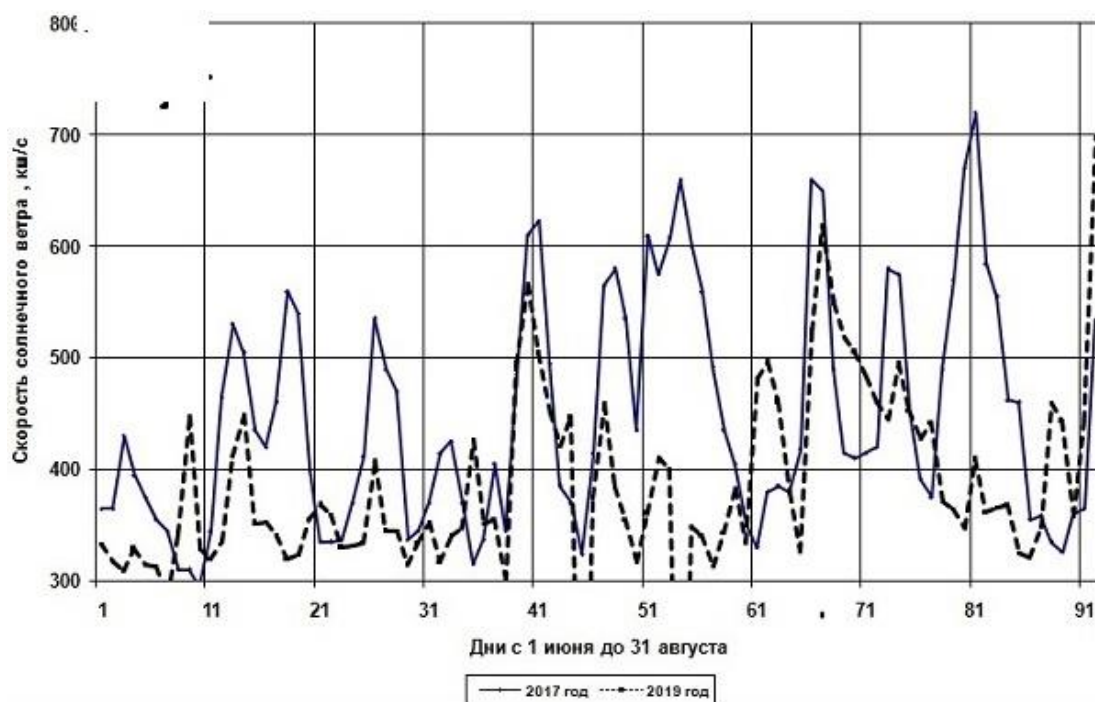


Рис. Изменение скорости солнечного ветра км/с за период с 01 июня по 31 августа в 2017 и 2019 гг. (дни)

Fig. Changes in the solar wind speed km / s for the period from June 01 to August 31 in 2017 and 2019 (days)

За указанные годы солнечная активность была наибольшей в 2017 году (пятна на Солнце, с которыми связаны вспышки, магнитные бури). Именно в этом году наблюдалось катастрофическое проявление селей в ущелье Адылсу связанное с прорывом озера Башкара, сели в ущелье р. Герхожансу, которые были гляциальными. Хотя солнечный минимум в 2017 году продолжал развиваться и в мае, и в июне или пятен на Солнце совсем нет, или они небольшие, в начале июля на Солнце появилось большое пятно размером больше Юпитера. Это самое большое пятно в 2017 году [<http://spaceweather.com>]. Через некоторое время пятна уже нет, но магнитосфера Земли остается возмущенной. К Земле движется поток солнечного ветра, часто на Солнце возникают корональные дыры. В августе, когда пошли сели по р. Герхожансу, пятна снова появились. Резкое высвобождение энергии привело к солнечным вспышкам, протонным событиям (СПС) – [tesislebedev.ru].

Регулярные наблюдения в августе 2017 года отражены в работе [Мальнева, 2019]. 12–13 августа скорость солнечного ветра составляла 540–600 км/с, а 19 августа доходила до 740. 14 августа поток высокоскоростного солнечного ветра из корональной дыры в атмосфере Солнца достиг поверхности Земли, а также отмечено наличие высоких и продолжительных отрицательных значений геоэффективного параметра B_z – южной компоненты межпланетного магнитного поля [Гонсировский, 2017]. Солнечный ветер из коронального отверстия достигает Земли примерно 13, высокая скорость и плотность протонов, кинетическая энергия тяжелых протонов переходит в тепловую энергию, которая оказывает влияние на леднике Каяартыбаши, зандровом поле, в погребённых льдах. Соответственно высвобождается большое количество влаги, а гравийная масса там имеется в огромном количестве, и готова для транзита по руслу.

Далее в течение всего августа отмечались высокие значения скорости солнечного ветра и, особенно, – плотности протонов. 30–31 августа скорость ветра доходила до 630, а плотность протонов в ночь с 31 августа на 1 сентября – от 21,7 до 52,6 на 1 см^3 [<http://spaceweather.com>, <https://www.swpc.noaa.gov/products/real-time-solar-wind>]. По предварительным оценкам, уровень воды в озере упал примерно на 15–17 м, а объем прорывного паводка составил 600–700 тыс. м^3 . Пиковый расход прорыва, судя по следам, оставленным на леднике Башкара, мог составить около 600 $\text{м}^3/\text{с}$. Прорывной паводок трансформировался в селевой поток на фронтальном уступе морены, отложенной в XIX веке отступающим ледником [Черноморец и др., 2018].

В 2018 году активность Солнца была очень низкой. Пятен на Солнце в начале лета почти не было, практически не было вспышек, наблюдались отдельные корональные дыры и небольшие магнитные бури. Так, на сайте spaceweather.ru отмечена возможность возникновения магнитных бурь 2–3 июля. Эти процессы и способствовали формированию погоды в регионе и наводнению в долине р. Баксан в ночь с 4 на 5 июля. Очень сильная жара в конце июня и отсутствие осадков практически в течение всего июня сменились обильным ливнем 44,8 мм в ночь на 5 июля.

В 2019 году активность Солнца была также очень низкой. За летний период не было ни одной вспышки выше минимального уровня, способного воздействовать на Землю., но отдельные всплески плотности протонов обеспечили метеорологические условия, при которых за один день прошли сели по многим водотокам. Их проявление обусловлено дополнительным поступлением космических лучей, поступлению энергии, способствующим увеличению активности метеорологических факторов, изменению погоды. Как отмечено выше, характер погоды летом 2017 и 2019 годов значительно отличается.

В июле 2019 года возмущения космической погоды начались 11 июля, резко увеличилась скорость солнечного ветра (почти до 600 км/с), 12 июля – прошли аномальные осадки по данным ГМС «Терскол» (48,8 мм), за этим последовало увеличение активности опасных процессов. Но массовая активизация оползней и селей в июле 2019 года произошла позднее. По материалам сайта <http://spaceweather.com/> отмечено, что 18 июля – один из худших дней в космической эре. Пятен на Солнце не было уже 55 дней, практически не было вспышек. Наблюдается глубокий солнечный минимум [Ишков, 2020]. Во время этой фазы солнечного цикла солнечные пятна и

солнечные вспышки редки, но мы получаем множество дополнительных космических лучей. Ожидается, что солнечные минимальные условия будут оставаться непрерывными в течение оставшейся части 2019 года и существенно могут измениться, примерно, в 2023 году.

24 июля Земли достиг поток солнечного ветра из небольшой корональной дыры. В ночь на 22 июля произошло протонное событие. Плотность протонов резко подскочила до 75 и выше от 10 ед./см³. Затем она уменьшилась до 50, а утром уже до 22 ед./см³. Все это дало дополнительный приток энергии, который вместе со всеми природными факторами, способствовал активизации опасных геологических процессов.

Таким образом, проявление селей в Приэльбрусье в июле 2019 года являлось результатом взаимодействия большого количества факторов [Мальнева, Черкесов, 2020]. Наиболее значительными из них были следующие:

1. Влияние космической погоды, характерное для глубокого солнечного минимума.

2. Небольшое количество снега в весенние месяцы. Высокая температура воздуха в мае – июне и, по контрасту с ней, низкая в июле по отношению к среднему многолетнему значению

3. Неустойчивый характер погоды, частый выход циклонов. Значительное влияние синоптической ситуации, при которой происходит столкновение холодных и теплых воздушных масс.

Заключение

Хотя вопрос еще мало разработан, но имеющиеся фактические данные позволяют очень серьезно относиться к возможности использования характеристик космической погоды для составления и уточнения оперативных прогнозов селей и других опасных природных процессов. Фактические данные по солнечному ветру, помещенные в сети Интернет в открытом доступе на сайтах <http://spaceweather.com/>, tesis.lebedev.ru, помогают оценить активность Солнца в конкретный момент. Следует учитывать, что в период глубокого солнечного минимума активные процессы на Солнце (солнечные пятна, вспышки, обусловленные ими), проявляются мало. Большое значение имеют космические лучи, активность которых может быть отмечена по значениям плотности протонов солнечного ветра.

На основании проведенных исследований можно отметить, что влияние космической погоды может проявить себя только тогда, когда для него будут подготовлены земные природные условия, в значительной степени определяющие активность опасных природных процессов. Активные процессы на Солнце выступают как регулятор или катализатор земных процессов.

При составлении оперативных прогнозов селей необходимо давать оценку метеорологических условий во взаимодействии с инженерно-геологическими условиями, оценку синоптической ситуации и оценку изменения космической погоды. Для этого в опасный период целесообразно ежедневно пользоваться материалами указанных сайтов или других, отражающих изменения в активности Солнца.

Результаты наблюдений позволяют уточнять оперативные прогнозы селей от нескольких дней до недели, что необходимо для рационального ведения мониторинга

Список литературы

- Гонсировский Д.Г. О возможном влиянии плазмы солнечных вспышек на возникновение гляциальных селевых потоков на Земле // Жизнь Земли. 2017. Т. 39, № 2. С. 147–154.
- Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Хаджиев М.М., Богаченко Е.М., Савернюк Е.А. Селевые потоки 14-15 августа 2017 г. в бассейне р. Герхожан-Су (Центральный Кавказ): условия и причины формирования, динамика, последствия // Геориск. 2018. Т. 12. № 3. С. 82–94.

- Ишков В.Н. Космическая погода в 24 солнечном цикле и его особенности развития в 2017 г. // Тринадцатая конференция «Физика плазмы в солнечной системе»: Сб. тез. докл. (12–16 фев. 2017 г., Москва, ИКИ РАН). С. 297).
- Ишков В.Н. Солнечная активность в фазе минимума текущего цикла; определение момента минимума // Пятнадцатая конференция «Физика плазмы в солнечной системе»: Сб. тез. докл. (12–14 фев. 2020 г., Москва, ИКИ РАН). С. 12.
- Мальнева И.В. Прогнозирование современных геологических процессов на территории России и стран СНГ в начале XXI века // Геоэкология. 2019. Вып. 1. С. 87–98.
- Мальнева И.В., Докукин М.Д., Анаев М.А., Хаджиев М.М. Особенности погоды летом 2019 года на Северном Кавказе и проявления опасных геологических процессов. // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. Материалы Пятнадцатой Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций. М.: Геомаркетинг, 2019, с. 189-197.
- Мальнева И.В., Черкесов А.А. Особенности космической погоды и метеорологических условий в Приэльбрусье летом 2019 года и проявление опасных природных процессов. // Пятнадцатая конференция «Физика плазмы в солнечной системе»: Сб. тез. докл. (12–14 фев. 2020 г., Москва, ИКИ РАН). С. 234).
- Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Л.М. Зелёного, И.С. Веселовского. М.: Физматлит, 2008. Т. 1. 672 с.
- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 2. С. 70-80.
- Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей. Москва, Недра, 1980, 296 с.
- <https://www.swpc.noaa.gov/products/real-time-solar-wind>. National Oceanic and Atmospheric Administration. Space Weather Prediction Center. U.S. Government Space Weather Bureau (2016, 2017, 2018, 2019). (дата обращения: 20.03.2020).
- <http://spaceweather.com/>. News and information about the Sun-Earth environment. (2016, 2017, 2018, 2019). URL <http://spaceweather.com/>. (дата обращения: 20.03.2020). (in Russian).
- thesis.lebedev.ru. Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца. ФИАН (2016, 2017, 2018, 2019). URL. thesis.lebedev.ru. (дата обращения 20.03.2020).



Распространение селевых процессов на территории Хабаровского края

А.А. Музыченко, Ю.В. Генсировский, Л.Е. Музыченко

*Сахалинский филиал Дальневосточного геологического института ДВО РАН,
Южно-Сахалинск, Россия, nestra1@yandex.ru*

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы распространения селевых потоков на территории Хабаровского края. Дана информация по распространению селевых потоков в хребтах Сунтар-Хаята, Джукджур, Баджальский, Буреинский и др. Приводятся некоторые характеристики селевых потоков.

Ключевые слова: *Хабаровский край, сели, селевой расход, селевые отложения*

Ссылка для цитирования: Музыченко А.А., Генсировский Ю.В., Музыченко Л.Е. Распространение селевых процессов на территории Хабаровского края. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 491–498.

Debris flow distribution within Khabarovsk Krai territory

A.A. Muzychenko, Yu.V. Gensiorovskiy, L.E. Muzychenko

*Sakhalin Department of the Far East Geological Institute, Far Eastern Branch, Russian
Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, nestra1@yandex.ru*

Abstract. This paper reviews debris flows distribution within Khabarovsk Krai territory. The data on debris flows distribution within Suntar-Khayata, Jukjur, Bajalskiy, Bureinskiy ridges etc. are presented here and also some debris flows parameters.

Key words: *debris flow, permafrost soils, alluvial deposits, debris flow deposits, precipitation, Khabarovsk Krai*

Cite this article: Muzychenko A.A., Gensiorovskiy Yu.V., Muzychenko L.E. Debris flow distribution within Khabarovsk Krai territory. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 491–498.

Введение

В последние годы, в связи с активизацией работ по разработке месторождений полезных ископаемых в горных районах Хабаровского края, остро встает вопрос недостаточной изученности селевых процессов на территории.

В специальной литературе имеется небольшой объем информации, содержащий сведения о распространении селевых процессов на территории Хабаровского края [Флейшман, 1978; Перов, 2012]. Это обусловлено слабой освоенностью горных территорий края.

Существующие специализированные карты, имеют большую генерализацию и не могут с достаточной степенью, характеризовать селевую опасность столь обширной территории [<https://национальныйатлас.рф>].

В целом, большая часть сведений относится к 60–80 гг. XX в. Результаты исследований были сведены в ряд карт, изданных различными организациями и

ведомствами. К таким мелкомасштабным картам относятся: «Районирование территории СССР по интенсивности проявления селей», «Карта селеопасных районов СССР» и т.д.

Полевые описания селевых потоков и их характеристик, крайне редки, как в архивных материалах, так и в специальной литературе.

Интенсивные работы по изучению селей на территории Хабаровского края, проводились во время строительства БАМ в 1974–85 гг. [Вардугин и др., 1978; Виноградов, 1980; Лехатинов, 1978, 2004]. Однако, эти работы охватывали только примыкающие к зоне БАМ хребты.

В данной работе рассмотрены вопросы формирования селей на территории Хабаровского края.

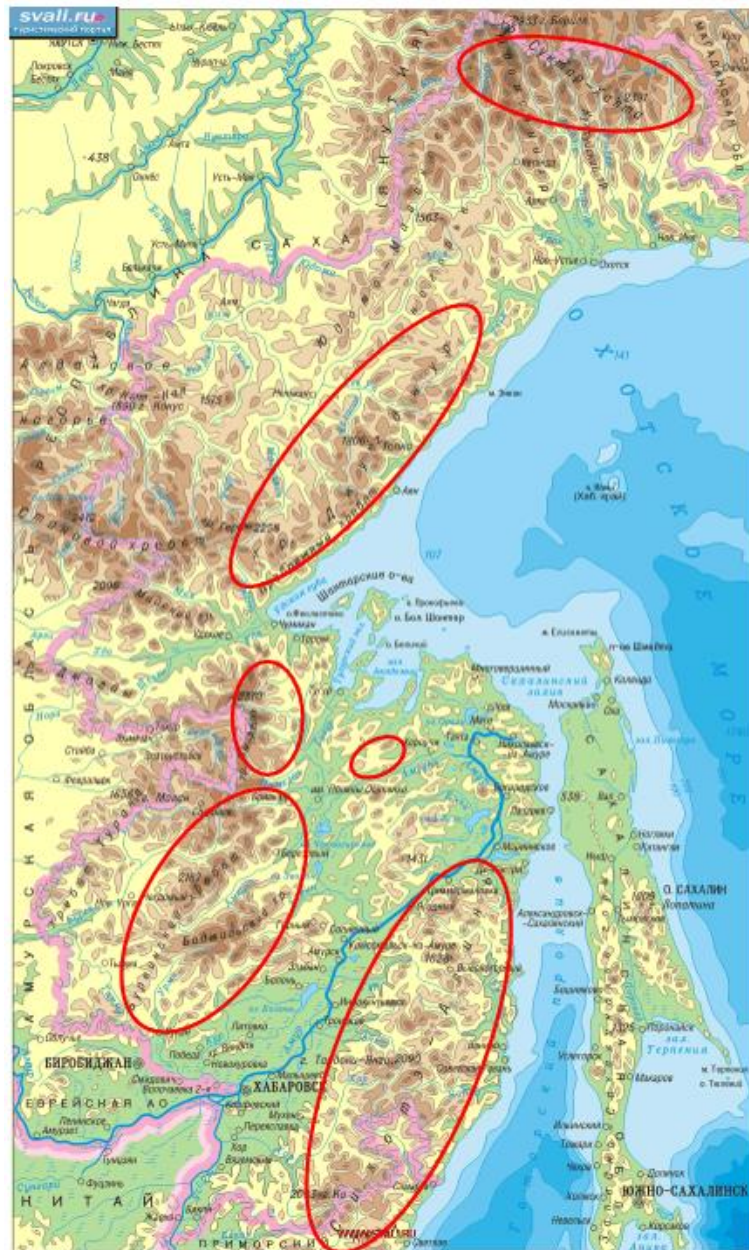


Рис. 1. Карта-схема территории Хабаровского края. Красным отмечены районы селеформирования

Fig. 1. The Khabarovsk Krai territory schematic map. Mudflow formation areas are marked in red

Рельеф

Горный рельеф занимает 80% территории края. Преобладает в основном низко- и среднегорный рельеф со средними высотами до 800 - 1500 м над уровнем моря. Абсолютные высоты наиболее высоких вершин редко превышают 2500 м. Горные хребты простираются в основном в северо-западном направлении. Так, вдоль побережья Японского и Охотского моря протянулась горная система Сихотэ-Алинь, средняя абсолютная высота которой достигает 800 м, максимальная – 2078. К северо-западу почти параллельно ему расположены хребты Баджальский (с высотами 1500 и 2157 м), Буреинский, Дуссе-Алинь, Ям-Алинь и несколько более мелких. На севере края северо-западное направление имеют хребты Прибрежный, Джугджур, протянувшиеся по побережью Охотского моря. Длина Джугджура составляет около 700 км. Абс. высота вершин 1000-1800 м, макс. высота 1906 м. над уровнем моря. На самом севере края расположен хребет Сунтар-Хаята с наивысшей в крае вершиной г. Берилл (2933 м).

Климат

Хабаровский край – преимущественно горная страна, рельеф здесь выполняет важную климатообразующую роль.

Климат территории в значительной мере формируется под влиянием муссонных процессов. Муссонный характер климата хорошо выражен в сезонном ходе выпадающих осадков. Обычно в тёплое время года выпадает около 90% годовой нормы. Максимум осадков наблюдается в июле-августе. Суточные максимумы осадков могут превышать 200 мм. Годовая сумма осадков колеблется от 400—600 мм на севере и до 600—800 мм на равнинах и восточных склонах хребтов. Наибольшее количество осадков выпадает в районе хребта Сихотэ-Алинь. (Солекуль, 960 мм) [*Научно-прикладной справочник по климату СССР, 1992; Петров и др., 2000*]. В горах наблюдается избыточное атмосферное увлажнение; в долинах весной и первую половину лета наблюдается умеренное увлажнение.

Север Хабаровского края представлен хребтами системы Сунтар-Хаята. В рельефе ярко выражено альпийнотипное высокогорье с абсолютными отметками вершин 2000–2900 м и превышением водоразделов над днищами речных долин до 800–1300 м. Борты долин крутые, часто обрывистые. Присутствуют склоны гравитационного срыва крутизной более 40°; склоны делювиально-осыпного сноса средней крутизны (около 30°); пологие склоны делювиального сноса и делювиально-солифлюкционного накопления.

Здесь распространены морозные полускальные терригенные (алевролиты, аргиллиты, песчаники) верхнепалеозойского и раннемезозойского возраста и полускальные вулканогенные и вулканогенно-осадочные грунты [*Спектор и др., 2015*]. Также характеризуется наличием большого количества четвертичного гляцио-флювиального и моренного материала, интенсивными процессами морозного выветривания пород, образованием осыпей. Наличие многолетнемерзлых пород, создающих водоупорные горизонты на склонах и увеличивающих скорость стока со склонов, приводит к формированию потенциальных селевых массивов (ПСМ), находящихся в состоянии неустойчивого равновесия. Мощность деятельного слоя, лежащего на многолетнемерзлых породах, составляет 1,5-3 м.

Многолетняя мерзлота обуславливает широкое развитие солифлюкционных процессов на склонах долин. Мощность ММП колеблется от 100 до 500 м. При таких условиях в селевой процесс идет вовлечение пролювиально-делювиальных отложений до глубины 1,5-4,0 м, т.о. оказывая влияние на объемы селевых потоков. Однако, в районе хребта Сунтар-Хаята, в руслах крупных рек и их притоков, имеется значительный накопленный объем аллювиально-делювиальных отложений. Часто под руслами таких водотоков имеются талики, поэтому в селевой процесс вовлекается гораздо больший объем материала и это влияет на объемы и характеристики селевых потоков.

Преобладающие генетические типы селей: дождевого и смешанного снегодождевого обводнения. При резком снеготаянии возможно формирование водоснежных потоков.

Максимальные расходы селей для небольших водотоков в среднем составляют 400-900 м³/с, единовременным выносом материала 100 000–150 000 м³. В крупных селевых бассейнах возможно формирование селей с объемами, превышающими 1 000 000 м³.

Хребет Джугджур характеризуется среднегорным рельефом с абс. отметками вершин 1400 – 1900 м. Рельеф - резко расчлененный с крутыми (35-40°) склонами. С точки зрения условий, благоприятных для развития селевых процессов, геологическое строение хребта характеризуется наличием большого количества обломочного флювиального материала, образованием осыпей образованного обвальным-осыпным процессом и процессом выветривания горных пород. Переслаивание горных пород, создающих водоупорные горизонты на склонах и увеличивающих скорость стока со склонов, приводит к формированию потенциальных селевых массивов (ПСМ), находящихся в состоянии неустойчивого равновесия. Мощность деятельного слоя составляет около 1 м.

В период таяния снегов, после обильных летних и особенно осенних дождей, уровень в реках повышается на 1.5–2.0 м что способствует формированию селевых и водоснежных потоков.

В долинах накоплено значительное количество осыпного материала, при резком снеготаянии и выпадении интенсивных дождей возможно формирование селевых и водоснежных потоков. Такой резкий подъем уровней воды при высоких скоростях потока приводит к почти мгновенному переходу потенциальных селевых массивов в состояние селевого потока. При этом в сели активно вовлекаются породы из размываемых старых селевых отложений, а также твердая составляющая курумников и осыпей, скопившихся в нижней части долины.

В верховьях хр. Джугджур распространены таликовые зоны, в которых формируются ПСМ. Выклинивание талых вод способствует уменьшению величины трения и уменьшению угла естественного откоса рыхлообломочного материала.

Повсеместно по речным долинам, прослеживаются селевые валы и селевые русла разного возраста. Селевые отложения представлены глыбами и валунами с включением гравия и гальки, с супесчаным заполнителем.

Ширина селевых отложений изменяется от 10–15 м в верховьях впадающих ручьев, до 150 и более метров в долинах рек и на участках впадения крупных притоков (с учетом ширины русла).

Селеопасный период длится с мая по сентябрь. Средняя повторяемость склоновых селей и селей небольшого объема – 1 раз в 1–3 года. Средняя повторяемость селей большого объема и массового селеформирования – 1 раз в 30–50 лет.

Преобладающие генетические типы селей: смешанного снегодождевого обводнения. При резком снеготаянии возможно формирование водоснежных потоков.

Формируются связные, несвязные селевые потоки (грязекаменные, наносоводные), а также водоснежные потоки.

Хребты Эзоп, Дуссе-Алинь, Ям-Алинь. Хребет Эзоп одна из самых селеактивных систем Дальнего Востока [Вардугин и др, 1978]. Повсеместно распространены скальные очаги и рытвины. Однако наибольшее количество селевых очагов встречается в восточной части хребта, где в единый узел сходятся хребты Дуссе-Алинь, Ям-Алинь и Эзоп. Основная часть селевых очагов расположена на отметках 1900-2100 м, при этом часто скальные очаги в нижней части переходят в селевые рытвины. Значительная часть селевых очагов и русел четко выражена в рельефе, а на конусах выноса имеются не задернованные селевые отложения. Самые крупные селевые рытвины приурочены к зонам тектонических разломов [Перов, 2012].

Омальский хребет является частью Сихотэ-Алинской складчатой системы. Рельеф участка низкогорный, сильно расчлененный, с преобладающими абсолютными

отметками 400–600 м. Наибольшей расчленённостью отличается осевая часть Омальского хребта, его высота достигает 700–800 м при глубине эрозионного расчленения 300–400 м. Водораздельные гребни узкие, сглаженные. Крутизна склонов достигает 20–30°. Потенциальными селевыми массивами (ПСМ) являются делювиально-пролювиальные отложения. Потенциальные селевые массивы (ПСМ) в исследуемом районе следует относить к двум типам [Руководство по изучению селевых потоков, 1976]: ПСМ накопления и ПСМ обводнения. ПСМ обводнения распространен в верхней части селевых бассейнов и на участках развития склоновых селей, тип селевого процесса – сдвиговый. ПСМ накопления зона сноса в русло водотоков мелких склоновых селей, обвалов, осыпей и т.д. в днища долин водотоков. Тип селевого процесса – эрозионно-сдвиговый и эрозионно-транспортный. Характеристики пород ПСМ и условия их залегания способствуют их вовлечению в селевые процессы при обводнении в периоды выпадения сильных дождей.

На территории Омальского хребта формирование селей возможно при длительном увлажнении пород потенциальных селевых массивов (ПСМ) и выпадением интенсивных жидких осадков. В данный период возможно формирование наиболее крупных связанных грязекаменных селевых потоков. Поступление влаги от дождя является триггером, запускающим процесс формирования селей.

При определенных условиях, возможно формирование селевых потоков, преимущественно наносоводных, объемы которых могут составлять 5000–10 000 м³.

В основном в районе формируются сели: грязекаменные, наносоводные (водокаменные). Селеопасный период длится с июня по сентябрь. Средняя повторяемость селей – 1 раз в 5–10 лет. На территории исследования выделяется 1 генетический тип селей: дождевого обводнения. Формируются связанные и несвязные селевые потоки, грязекаменные и наносоводные (водокаменные).

Баджальский и Буреинский хребты. Часть дальневосточной горной страны с преобладающим среднегорным сильно расчлененным рельефом с перепадом относительных высот до 1000 м. Горы расчленены каньонообразными и V-образными долинами рек и ручьев. На большей части водосборной площади селевых бассейнов преобладает альпинотипный рельеф, крутизна склонов в среднем составляет 35–50°, а местами достигает 60°. Наличие многолетнемерзлых пород (ММП), создающих водоупорные горизонты на склонах и увеличивающих скорость стока со склонов, приводит к формированию потенциальных селевых массивов (ПСМ) большого объема, находящихся в состоянии неустойчивого равновесия.

В верхних частях склонов и на водоразделах преобладают гольцово-тундровые условия, это способствует активному развитию процессов выветривания, особенно эффузивной и эффузивно-осадочной толщ, в элювиально делювиальных отложениях которых и развиваются селевые очаги [Лехатинов, 1978].

В древних ледниковых цирках современные и верхнечетвертичные морены прорезаются селевыми врезами, а в днищах небольших ручьев расположены селевые рытвины и мелкие скальные очаги.

Особенностью селевого процесса в районе, является, большая доля валунно-глыбового материала и малая доля селевой суспензии в селевом потоке, что характеризует сели района как преимущественно водокаменные (рис. 2). Величина вертикальных деформаций дна за явление может достигать 3,0 м.

В отложениях селевых потоков наблюдается большой объем древесного материала (карчи), что является характерной особенностью селевых потоков зоны тайги на участках развития ММП. Наличие большой доли карчей увеличивает эродирующую способность потока.

При сильных паводках, характеризующихся быстрым подъемом уровня стояния вод и резким увеличением расхода воды, происходит почти мгновенный переход потенциальных селевых массивов в состояние селевого потока. При этом в сели активно вовлекаются породы из размываемых старых селевых отложений, а также твердая составляющая курумников и осыпей с бортов долины.



Рис. 2. Селевые отложения. А) руч. Дождливый, Б) руч. Забытый. Фото Ю.В. Генсировского

Fig. 2. Mudflow deposits. А) Dozhdliviy stream, Б) Zabytiy stream. Photo by Yu.V. Gensirovskiy

По всем водотокам прослеживаются разновозрастные селевые валы и селевые русла. Высота селевых валов варьируется от 1 до 4 метров. Селевые отложения представлены глыбами и валунами с включением древесных стволов.

Длина селевых очагов и русел достигает 5-6 км и более, в бассейне р. Левый Ям-Макит (Буреинский хребет) четкие следы селевой деятельности прослеживаются на расстоянии около 20 км по основной долине [Вардугин и др., 1978]. Большинство селевых очагов приурочено к абс. Отметкам 1900–2100 м.

Следы прохождения селевых потоков отмечены, как в долинах крупных рек, так и по долинам притоков.

Ширина селевых отложений колеблется в пределах от 10–15 м в верховьях бассейна до 150 и более метров в приустьевой части реки (с учетом ширины русла).

Рельеф и гидрометеорологический режим территории, в сочетании с её геологическим строением, создают условия для формирования селевых потоков с объемом единовременных выносов, превышающих 1 000 000 м³.

Селеопасный период длится с июня по сентябрь. Средняя повторяемость селей в бассейне реки – 1 раз в 5–10 лет.

Преобладающие генетические типы селей: дождевого обводнения. Возможно формирование селей при резком снеготаянии. Формируются, в основном, несвязные селевые потоки (водокаменные). В верховьях бассейна вероятно формирование водоснежных потоков.

Хребет Тыльский. В источнике [Вардугин и др., 1978] отмечается что хребет Тыльский является наиболее селеактивной горной системой Дальнего Востока. Селевые рытвины, врезы, скальные очаги распространены практически повсеместно. Русла основных селевых бассейнов заложены по тектоническим разломам, а селевые очаги приурочены к трещинам, оперяющим тектонические разломы, что объясняется более благоприятными условиями формирования и накопления рыхлообломочного материала в этих зонах вследствие большой степени раздробленности и трещиноватости коренных пород.

Перов [Перов, 2012] также приводит сведения о селепроявлениях в бассейне р. Тыль. Большинство селей формируется в мелких водосборах площадью 2–4 км², с временным водотоком, меньшая часть – в долинах площадью 10–20 км², с постоянным водотоком. По дендрохронологическим данным повторяемость селей в мелких водосборах составляет один раз в 2–4 года, в крупных – каждые 10–12 лет. Селевые потоки вызываются ливнями. По составу селевые потоки относятся к водокаменным.

Сихоте-Алинь характеризуется низкой селевой активностью. Преобладающие абсолютные высоты лежат в диапазоне 1000–2000 м, относительные – 500–1000 м. Селевые процессы распространены в основном в приводораздельных частях склонов.

Большая часть площади гор характеризуется потенциальной селевой опасностью. Повторяемость по единичным дендрохронологическим данным в бассейне р. Кема составляет один раз в 9 лет [Перов, 2012].

Заключение

Селевые объекты являются неотъемлемой частью рельефа горных систем Хабаровского края. На рассмотренной в данной работе территории, отмечено широкое распространение селевых потоков. Это обусловлено следующими факторами.

Тектоника – селевые бассейны в большинстве случаев привязаны к зонам тектонических разломов, которые обеспечивают благоприятные условия твердого питания селей.

Осадки - в теплое время года выпадает до 90 % годовой суммы осадков.

Наличие многолетнемерзлых пород. Характерной особенностью, для большей части территории горных районов Хабаровского края является наличие, многолетнемерзлых пород. ММП играют заметную роль в селеформировании. С одной стороны, они создают водоупорные горизонты на склонах, по которым при снеготаянии и дождях, происходит интенсивный сток внутри ПСМ и обводнение грунтов, приводя их в переувлажненное состояние. Что в конечном итоге активизирует сели. А с другой стороны, ограничивают вовлечение грунтов ПСМ в селевой процесс, в основном, сезонно-талым слоем. Мощность СТС зависит от многих факторов и колеблется на рассматриваемой территории от 1,0-3,5 м.

Формирование селевых потоков в горной части Хабаровского края, зависимости от климатических особенностей, геологического и геоморфологического строения территории, можно разделить на два периода:

Раннелетний, формирование селей связано с началом интенсивного снеготаяния. В этот период можно говорить о том, что формируются маломощные, преимущественно, несвязные селевые потоки. Это обусловлено тем, что в районах с наличием ММП, сезонно-талый слой находится в замерзшем состоянии, и селями выносятся преимущественно перемещенный за зиму лавинами и осыпями в русло водотоков материал. В районах, где ММП отсутствуют, в этот период времени, деятельный слой, так же находится в мерзлом состоянии. Поэтому ширина захвата таких селей не велика, так как составляет первые метры. Глубина выпавания не превышает 0,3–1,0 м.

Позднелетний-раннеосенний, формирование селей связано с выпадением интенсивных жидких осадков. В этот период в районах распространения ММП наблюдается максимальное оттаивание СТС. И соответственно вовлечение в селевой процесс максимального объема грунтов ПСМ. В районах, где отсутствует ММП, поверхностный слой полностью оттаивает и ограничение объема селевых потоков ограничивается только глубиной залегания пород коренной основы, не вовлеченных в селевой процесс. В данный период возможно формирование наиболее крупных связанных грязекаменных селевых потоков. Ширина захвата, в зависимости от ширины долины, колеблется в пределах 20-200 м. Мощность отложений может составлять 3,5–6,0 м. Расходы таких селевых потоков будут колебаться в пределах 500–2000 м³/с. Формирование такого типа селей – раз в 30–50 лет.

Список литературы

- Вардугин, В.Н., Керемкулов В.А. Селевые явления в районе трассы БАМ. Селевые потоки. Сборник № 3. – М.: Гидрометиздат. 1978. С. 52–61
- Виноградов Ю. Б. Селевые явления на территории северной части Хабаровского края. Селевые потоки, сб. 4. М., Гидрометеиздат. 1980. С. 82–90.
- Лехатинов А.М. Экзогенные геологические процессы и их прогноз: Зона Бам и сопредельные территории: дисс. доктора геолого-минералогических наук. М.-Ирк, 2004.

- Лехатинов А.М. Оценка селеопасности дальневосточной зоны БАМ и основные очаги формирования селей. Тезисы докладов XV всесоюзной научно-технической конференции по противоселевым мероприятиям в г. Ташкент. Вып. № 1, 1978. С. 64-69.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Выпуск 25. Хабаровский край и Амурская область. 1992, 558 с
- Перов В.Ф. Селеведение. М., МГУ, 2012. 271 с.
- Петров Е.С., Новороцкий П.В., Леншин В.Т. Климат Хабаровского края и Еврейской автономной области. Влад. - Хабар. Дальнаука. 2000. 172 с.
- Руководство по изучению селевых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1976 - 142 с.
- Спектор В.Б., Шестаков А.А., Торговкин Я.И., Спектор В.В. Обобщение данных о криолитозоне на инженерно-геологической карте Республики Саха (Якутия) м 1:1 500 000 // Научный вестник. 2015 №2(4) с. 59-73
- Флейшман С.М. Сели. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 312 с.
<https://национальныйатлас.рф>.



Распространение природных и антропогенных селей на острове Сахалин

Л.Е. Музыченко, А.А. Музыченко

*Сахалинский филиал Дальневосточного геологического института ДВО РАН,
Южно-Сахалинск, Россия, allixev@yandex.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются наиболее типичные случаи формирования антропогенных селей в пределах природных селевых комплексов в различных районах о. Сахалин. Усиление антропогенной нагрузки на территорию острова приводит к увеличению масштабов и повторяемости сходов селей. В связи с этим увеличивается ущерб, наносимый окружающей среде и экономике при активизации селевой деятельности.

Ключевые слова: сели, антропогенное воздействие, селевой поток, антропогенный сели, отвалы карьеров, отложения

Ссылка для цитирования: Музыченко Л.Е., Музыченко А.А. Распространение природных и антропогенных селей на острове Сахалин. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 499–508.

Distribution of natural and man-made debris flows on Sakhalin Island

L.E. Muzychenko, A.A. Muzychenko

*Sakhalin Department of the Far East Geological Institute, Far Eastern Branch, Russian
Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, allixev@yandex.ru*

Abstract. The most typical cases of anthropogenic debris flows formation within the territories where natural debris flows were usually observed in different Sakhalin areas are reviewed in this paper. The growth of anthropogenic impact on island territory leads to debris flows scale and frequency increase. In connection of this, the losses of environment and economy also increase due to debris flows activation.

Key words: debris flow, anthropogenic impact, anthropogenic debris flow, deposit, sediment, waste pile

Cite this article: Muzychenko L.E., Muzychenko A.A. Distribution of natural and man-made debris flows on Sakhalin Island. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhiyeva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 499–508.

Введение

Хозяйственная деятельность человека приобретает все больший размах. На о. Сахалин под освоение попадают новые территории, ввиду увеличения объемов добычи полезных ископаемых, прокладки новых и реконструкции существующих линейных объектов: нефтегазопроводов, линий ЛЭП, авто и железных дорог. Отдельно стоит отметить планируемое и уже ведущееся строительство спортивных и рекреационных объектов на территории Сахалинской области. Наиболее масштабно, такие объекты

строятся в районе г. Южно-Сахалинска в пределах Сусунайского хребта. В южной части о. Сахалин, с его холмистым или низкогорным рельефом, достаточно широко распространены природные селевые процессы. Однако, при вмешательстве человека происходит наложение антропогенных факторов селеобразования на природные, в результате чего наблюдается как увеличение повторяемости формирования селей, так и масштаб событий. При этом образование антропогенных селей отмечается и в местах, где сход природных селей не наблюдался.

Целью работы является сопоставление информации о территориях, подверженных воздействию природных и антропогенных селей с выделением зон, где сочетание природных факторов с антропогенными дает наибольшую потенциальную опасность схода селей, которые в дальнейшем могут нанести существенный ущерб этим территориям и хозяйственным объектам, вплоть до катастрофического.

В работе использованы как информация, полученная в ходе полевых наблюдений Сахалинского филиала ДВГИ ДВО РАН, так и данные анализа спутниковых снимков разных лет, которые доступны в программе Google Earth.

Характеристики территории и факторы селеобразования

Значительная часть Сахалина (около 2/3) имеет холмистый и низкогорный рельеф с отметками в наивысшей части до 1600 м. Учитывая сильную расчлененность рельефа с глубиной расчленения до 500–1000 м, крутизну склонов до 35–50° и геологическое строение территории острова, можно говорить о существенной степени подверженности ее опасным экзогенным геологическим процессам (ЭГП), в число которых входят оползни и сели.

Территория Сахалина преимущественно сложена слабосцементированными осадочными породами: алевролитами, аргиллитами и песчаниками, стойкость которых к увлажнению очень низка, что приводит к быстрому разложению пород, лежащих на поверхности, и размоканию некоторых их разновидностей в течение очень короткого отрезка времени, начиная от 4-х часов.

Также проявлению опасных ЭГП способствуют особенности климата Сахалина. На острове регулярно фиксируется выпадение большого количества как твердых, так и жидких осадков (до 329 мм за событие, 127 мм за сутки и 43 мм за час для твердых осадков и до 1200 мм за событие, 230 мм за сутки и 30 мм за час – для жидких) [Генсиоровский, 2011].

На протяжении года выделяется два периода наибольшей активизации ЭГП. Первый период – весенне-летний (май-июнь), когда наблюдается переувлажнение грунтов во время весеннего снеготаяния и выпадения интенсивных жидких осадков. При значительном снеготаянии и интенсивном таянии снега с наложением сильных дождей вероятность формирования селей в этот период существенно возрастает. Второй период – летне-осенний (июль-октябрь), связан с выходом на территорию Сахалина тропических циклонов и тайфунов, несущих обильные осадки [Генсиоровский и др., 2008].

Добавление к вышеперечисленным факторам селеобразования антропогенного кардинально повышает вероятность активизации ЭГП, ввиду часто непродуманного и бесконтрольного вмешательства человека в природные селеопасные районы, которое включает подрезку склонов при строительстве различных объектов, складирование крупных объемов перемещенных грунтов на склонах гор или в руслах водотоков, пересыпка этих русел, ведущая к формированию искусственных водоемов, которые несут потенциальную опасность прорыва, сплошная вырубка лесов с нарушением требований рекультивации и восстановления лесных массивов и т.д. Зачастую, ввиду технологических причин и мест залегания полезных ископаемых, расположение промышленных объектов по их добыче приурочено к горной местности, а при прокладке протяженных линейных объектов практически неизбежно пересечение горных массивов, что способствует образованию многочисленных оползневых и селевых очагов на всем протяжении этих объектов.

Результаты и обсуждение

За последние 20 лет зафиксировано более 15 случаев схода селевых потоков антропогенного генезиса. Рассмотрим наиболее типичные случаи образования селей из материала антропогенных потенциальных селевых массивов (ПСМ), представляющих собой отвалы вскрышных и пустых пород карьеров по добыче полезных ископаемых, массы перемещенных грунтов, строительного мусора, древесных обломков после рубки леса и т.д.

Одним из наиболее примечательных примеров объектов, на которых формируются антропогенные сели, является карьер Лиственничный, расположенный недалеко от Южно-Сахалинска на склоне г. Медика на Сусунайском хребте. Это один из крупнейших действующих карьеров по добыче строительного камня на юге Сахалина. На объекте имеются два крупных отвала пустой породы размещенных на северо-западном и южном склонах одного из отрогов г. Медика, на котором и располагается карьер. Северо-западный отвал является более крупным. Начиная с 2009 года сотрудниками СФ ДВГИ ДВО РАН ежегодно фиксируются сходы антропогенных селей с северо-западного отвала карьера в долину безымянного ручья. Сели с наибольшими объемами были зафиксированы в 2009 и 2013 годах, суммарные объемы селевых отложений которых составили 10 тыс. м³ и 15 тыс. м³ соответственно [Музыченко и др., 2015]. К настоящему времени селевыми отложениями уничтожено около 4 га леса в пойме ручья (рис. 1).



Рис. 1. Погибший лес ниже северо-западного отвала к-ра Лиственничный. Май 2019 г. Фото Л.Е. Музыченко

Fig. 1. Destroyed forest downstream the S-W waste pile of Listvennichnyy mine. May 2019. Photo by L.E. Muzychenko

Все днище долины ручья от отвала карьера до места его впадения в р. Хомутовка, протяженностью 1300 м, заполнено отложениями мощностью в среднем до 1 м. В связи с расширением карьера в последние 2 года, с левого борта долины ручья через лесной массив с частей отвалов, расположенных выше леса, в основное русло сходят склоновые селевые потоки. При прохождении по лесу сели интенсивно эродировывают подстилающую поверхность, глубина выпаживания достигает 0,5 м при ширине захвата от 0,5 до 2,0 м, таким образом, формируются новые селевые русла, повреждается лесная растительность и сводится почвенно-растительный слой (рис. 2).



Рис. 2. Склоновый сель с северо-западного отвала карьера Лиственничный. Май 2019 г. Фото Л.Е. Музыченко

Fig. 2. Slope debris flow from the S-W waste pile of Listvennichniy mine. May 2019. Photo by L.E. Muzychenko

Часть твердого материала выносится в р. Хомутовка, формируя в 11 км ниже по течению реки, недалеко от ее впадения в р. Сусуя, мощный конус выноса. Нижняя зона отложений находится меньше чем в 100 м от территории ВПП аэропорта Южно-Сахалинска – Хомутово. В период с 2013 по 2016гг. русло Хомутовки было полностью замыто отложениями, что вызывало подтопление зоны ВПП во время весеннего половодья, т.к. река, не имея выработанного русла, разливалась по конусу выноса. Площадь отложений составила около 1,5–2 га, мощность в русле – до 1,5 м. В результате потребовалась расчистка русла реки. В селеопасной зоне находится планировочный район Хомутово, мостовые переходы через р. Хомутовка, расположенные ниже по течению. Кроме вышеназванных последствий надо отметить, что река Хомутовка имеет высшее рыбохозяйственное значение (на нерест заходят лососевые породы рыб), а вынос в реку большого количества делювиально-пролювиальных отложений ведет к полному уничтожению естественных нерестилищ (рис. 3).



Рис. 3. Впадение безымянного ручья в р. Хомутовка. Апрель 2020 г. Фото Л.Е. Музыченко

Fig. 3. The nameless stream influx into Khomutovka River. April 2020. Photo by L.E. Muzychenko

С южного отвала карьера (рис. 4) сели меньших масштабов сходят в один из притоков р. Христофоровка. Площадь уничтоженного отложениями леса ниже отвала составляет около 3 га. В километре ниже по течению ручья находится дорожный мост, который может быть поврежден или разрушен селевым потоком большого объема, когда создадутся условия для его схода. Ниже моста вдоль берега ручья располагается дачный поселок, которому также может быть причинен ущерб. Как и в случае с р. Хомутовка, р. Христофоровка является рекой высшей рыбохозяйственной категории и сход селевых потоков по ней ведет к уничтожению нерестилищ.



Рис. 4. Отложения с южного отвала к-ра Лиственничный, 2019 г.

Fig. 4. Sediments from the southern waste pile of Listvennichniy mine, 2019

На карьере Известковый, расположенном в юго-восточной оконечности Майорского массива Сусунайского хребта в верховьях р. Знаменка, также имеются условия для формирования селевых потоков. За последние годы площадь, занимаемая карьером, увеличилась. В нижней его части находится карьерная выработка, заполненная водой, в которую осуществляется сток воды со всей площади карьера (рис. 5). Выработка расположена в 50 м от р. Знаменка и из нее происходит перелив сильно загрязненной воды в реку. В случае выпадения большого количества осадков возможен прорыв образовавшегося водоема в реку с формированием селя. Ниже по течению реки расположен рыбообразный завод, которому может быть нанесен крупный ущерб сходом селя.

Сходная ситуация наблюдается на выработанном карьере по добыче угля в районе пос. Быков, где имеется несколько заполненных водой карьерных выработок, самая нижняя из которых находится в 80 м от р. Рогуля, притока р. Найба, также имеющей важное рыбохозяйственное значение (рис. 5). Сход оползней или оползней-потоков в нижний резервуар с бортов отвалов потенциально угрожает реке прорывом водоема с выносом в нее селевой массы.

Карьер в районе пос. Сокол Долинского района также имеет отвалы пустой породы, с которых регулярно сходят склоновые сели небольших объемов, что можно наблюдать с помощью спутниковых снимков, где виден рост зоны селевых отложений ниже отвала породы. Начиная с 2015 года, площадь, занятая отложениями, начала расти и к настоящему времени составляет около 1 га (рис. 6). Ниже отвала карьера находятся сельхозгодия.



Рис. 5. Карьер Известковый (слева), 2017 г., карьер в районе пос. Быков (справа), 2019 г. Потенциальные зоны формирования селевых потоков отмечены красными стрелками

Fig. 5. Izvestkoviy mine (in the left), 2017, mine near the Bykov settlement (in the right), 2019. Potential debris flows initiation zones are marked with red arrows



Рис. 6. Рост зоны отложений карьера Соколовский

Fig. 6. The sediment zone of Sokolovskiy mine increase

В Углегорском районе находятся несколько выработанных, а также все еще работающих карьеров по добыче угля недалеко от поселков Бошняково, Тельновский, Ольховка, Краснополе. С отвалов этих карьеров с помощью спутниковых снимков также можно наблюдать следы схода склоновых селей небольших масштабов. На карьерах имеются большие объемы вскрышной и пустой породы, образующие потенциальные селевые массивы, и этого количества породы достаточно для схода крупных селей или оползней-потоков.

В мае 2018 г. в пос. Горнозаводск Невельского района на карьере по добыче угля произошел сход оползня-потока, сформировавшегося из переувлажненного материала отвала вскрышных пород. СФ ДВГИ ДВО РАН зафиксировал параметры оползня-потока: протяженность 2000 м, высота фронта более 10 м, мощность отложений 2–6 м. Отложения заполнили собой долину небольшого ручья, стекающего в сторону ул. Бамбуковой. Поток разрушил несколько жилых домов, хозяйственные постройки, расположенные в долине ручья. По счастливой случайности люди не пострадали, но были уничтожены домашние животные в подсобном хозяйстве.

Одним из характерных примеров линейных объектов, подвергающихся воздействию селей, является трасса нефтегазопроводов «Сахалин-2». По всей длине трассы еще в 2006–2007 гг. отмечались большие объемы складирования перемещенных грунтов на водоразделах и в руслах рек, достигающих 1 млн м³. Таким образом, сохраняется потенциальная опасность схода селей в данном районе. Например, в 2007 г.

образовалось несколько антропогенных селей объемом до 3 тыс. м³ в бассейнах рек Лазовая и Кринка из грунтов, складированных в руслах и бортах долин. Несколько нерестовых рек были перекрыты отложениями мощностью до 1,2 м [Казаков, Генсиоровский, 2008].

22–24 июня 2009 года наблюдалось прохождение над территорией Сахалина глубокого циклона с большим количеством осадков. Циклон спровоцировал массовую активизацию ЭГП в южной части острова. В предшествующий прохождению циклона период грунты уже были достаточно сильно увлажнены, таким образом, имелись условия для массового схода селей. В Макаровском районе воздействию селей подверглась трасса нефтегазопроводов «Сахалин-2». Селевые потоки были отмечены в районе хребта Жданко и р. Пулька. Объемы селей достигали 1,5 тыс. м³, пробег до 1000 м, средняя толщина отложений 0,7 м. В первом случае была повреждена каменная наброска по оси створа трассы нефтегазопровода, во втором на участке 400 м повреждены элементы инженерной защиты нефтегазопроводов. Множество небольших селей сошло на подъездные дороги к трассе нефтегазопроводов, блокировав их [Генсиоровский, Казаков, 2009]. Не все из селей за это событие имели антропогенный характер, но проходя через створ трассы нефтегазопровода, потоки включали в себя техногенные грунты, за счет чего увеличивались в объеме.

В районе с. Успенское в 2015 г. сошел прорывной сель от линии электропередач, где при прокладке ЛЭП песчаным грунтом был пересыпан малый водоток, что привело к образованию искусственного водоема. Сход селя был вызван небольшим количеством осадков, и поток из материала дамбы прошел вниз по склону 180 м и выплеснулся на автодорогу Южно-Сахалинск – Холмск. Объем селя составил 1,5 тыс. м³.

Также селевые потоки отмечаются на территориях городской застройки, расположенной на горных склонах. В 2010 г. в г. Холмск образовался антропогенный сель из строительного грунта, складированного без соответствующего водоотведения в районе зданий мореходного училища по ул. Макарова, д. 1 (рис. 7). Грунт находился на бровке площадки для разворота автотранспорта и при обводнении сошел в виде оползня, который в дальнейшем перекрыл водоток и с поступлением воды трансформировался в сель, дальность пробега которого составила 500 м, а объем 1000 м³. Отложения селя замыли железнодорожное водопропускное устройство.



Рис. 7. Зона транзита селя, г. Холмск, 2010 г. Фото Ю.В. Генсиоровского

Fig. 7. The debris flow transition zone in Kholmsk city, 2010. Photo by Yu.V. Gensiorovskiy

Также к объектам, несущим селевую опасность, можно отнести спортивные объекты, располагающиеся вдоль восточной окраины Южно-Сахалинска в пределах Сусунайского хребта. Это лыже-роллерные трассы, биатлонный комплекс и спортивно-туристический комплекс «Горный Воздух». Последние два из перечисленных объектов находятся в стадии активного расширения и строительства, притом, часть объектов инфраструктуры «Горного Воздуха» уже находится на отметках около 700 м, а в дальнейшем планируется строительство горнолыжных трасс с вершин высотой около 900 м. При строительстве идет активная вырубка лесных массивов под многочисленные горнолыжные трассы, канатные дороги и т.д., полностью нарушается почвенно-растительный слой, отсыпаются рыхлым грунтом площадки для разворота автотранспорта на поворотах технологических дорог, идущим по крутым склонам (рис. 8), а также под строительство зданий и сооружений.



Рис. 8. Разворотная площадка (слева), малый сель с площадки (справа), 2019 г. Фото Л.Е. Музыченко

Fig. 8. The road turnaround area (in the left), small debris flow from the turnaround area (in the right), 2019. Photo by L.E. Muzychenko

При прокладке горнолыжных трасс и подъездных дорог зачастую не учитывается рисунок гидрографической сети. В результате пересыпаются русла водотоков, изменяется их режим, а также режим подземных вод, что приводит к изменению стока, усилению эрозионной деятельности и формированию новых русел на горнолыжных трассах и др.

В качестве примера подобных решений можно привести факт отсыпки технологической дороги к южному подножью г. Красная в долине р. Хомутовка, где в местах пересечения реки дорогой были установлены водопропускные сооружения из бетонных колец, что принципиально недопустимо на селеносной реке. Диаметр колец не рассчитывался на максимальные паводочные расходы воды р. Хомутовка, поэтому во время паводков сооружения не справляются с пропуском воды, из-за чего выше дороги образуются водоемы, при переливе которых через полотно дороги происходит смыв грунта с ее поверхности, и этот материал способен образовывать селевые потоки небольшого масштаба (рис. 9).



Рис. 9. Эрозионный врез по кромке дороги, образованный при переливе воды через дорожное полотно при паводках, 2019 г. Фото Л.Е. Музыченко

Fig. 9. Erosion along the roadside due to water overflow through the roadbed during flash floods, 2019. Photo by L.E. Muzychenko

Все перечисленные антропогенные сели сходят в селеопасных районах, таких как Макаровский, Холмский, Углегорский и др., где еще до активного вмешательства человека отмечались сходы природных селей. В настоящее время при сохранении опасности схода природных селей добавляется высокая вероятность активизации антропогенных и смешанных природно-антропогенных селей, с тем что возрастают их масштабы и повторяемость. Самыми крупномасштабными являются сели и оползні-потоки, которые сходят с отвалов пустой породы карьеров, т.к. такие ПСМ имеют наибольший объем. Отдельно нужно отметить, что селевые проявления в пределах Сусунайского хребта в настоящее время преимущественно имеют именно антропогенный характер, и природные сели в основном сходят во время выдающихся событий, подобных тайфуну Филлис 1981 г. Разница в частоте формирования природных селевых потоков в Камышовом и Сусунайском хребтах обусловлена различием их геологического строения. Породы, слагающие Сусунайский хребет, являются более древними и прочными, меньше подвержены разрушению, в ходе которого формируются естественные ПСМ [Полунин, 1983].

Заклучение

Подводя итог, можно сказать, что антропогенные сели формируются на территориях исторически ассоциируемых с деятельностью природных селевых процессов, усугубляя негативное воздействие на окружающую среду и хозяйственную инфраструктуру человека. Такие объекты, как карьеры, строящиеся спортивные комплексы, линейные объекты, где допущены нарушения при строительстве, могут не только сами пострадать от схода селевых потоков, но и являются источниками селевой опасности для окружающих их природных и антропогенных объектов. Угрозе уничтожения подвержены лесные насаждения, сельхозугодия, речные нерестилища лососевых и других видов рыб. Также ущерб причиняется объектам городской инфраструктуры и хозяйственной деятельности. Территории с преобладающим залеганием малопрочных пород в равной степени подвержены как природным, так и антропогенным селям, в то время как в районах, где преобладают более прочные породы, сильнее выражена активность антропогенных селей, т.к. образование техногенных ПСМ происходит быстрее естественных.

Список литературы

- Генсировский Ю.В. Экзогенные геологические процессы и их влияние на территориальное планирование городов (На примере о. Сахалин). Автореферат канд. дисс., Иркутск, 2011.
- Генсировский Ю.В., Казаков Н.А. Активизация экзогенных геологических процессов на Южном Сахалине 22–24 июня 2009 года. Геориск, №2, 2009. 56–60.
- Генсировский Ю.В., Казаков Н.А., Рыбальченко С.В. Гидрометеорологические условия периодов массового селеобразования на о. Сахалин. Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Труды Междунар. конф., Пятигорск, 22–29 сент. 2008 г. / Севкавгипроводхоз, Межрегион. обществ. орг. «Селевая ассоциация». Пятигорск, 2008. 95–98.
- Казаков Н.А., Генсировский Ю.В. Экзогенные геодинамические и русловые процессы в низкогорье о. Сахалина как факторы риска для нефтегазопроводов «Сахалин-2». Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, № 6 - М.: «Наука», 2008. 483–496.
- Музыченко А.А., Павлов В.С., Павлов А.С. Формирование антропогенных селевых потоков с карьеров (на примере карьера «Лиственничный»). Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всероссийская науч. конф. с междунар. участием: сборник материалов: в 2 т. Ред. Б.В. Левин, О.Н. Лихачева, т. 2, 2015. 346–349.
- Полунин Г.В. Экзогенные геодинамические процессы гумидной зоны умеренного климата (физические аспекты экзогенных процессов). М.: «Наука», 1983. 249 с.



Воздействие селевых потоков на техносферу по результатам анализа базы данных

Е.Г. Петрова

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия, epgeo@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматривается природно-техногенный риск, возникающий вследствие воздействия селевых потоков на различные объекты техносферы. По результатам статистического и географического анализа авторской базы данных природно-техногенных аварий и чрезвычайных ситуаций (ЧС), произошедших на территории России за период с 1991 по 2018 гг., выделяются основные типы природно-техногенных ЧС (ПТЧС), вызываемых селями. Наиболее уязвимы к воздействиям селевых потоков объекты транспортной инфраструктуры, линии электропередачи и связи, трубопроводы и другие линейные сооружения, оказывающиеся в зоне активизации селей. За рассматриваемый период, селевые потоки вызывали аварии на автомобильном и железнодорожном транспорте, на объектах энергетики и жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), приводили к нарушениям транспортного сообщения, электро-, тепло-, водо- и газоснабжения, связи и другим ЧС. Возникновение ПТЧС различных типов в результате селевых воздействий на техносферу было зафиксировано в 10 субъектах РФ, в том числе на территории Сахалинской и Магаданской областей, Краснодарского и Приморского краев, Республик Дагестан, Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия, Северная Осетия – Алания, Ингушетия и Чеченская. Проводится анализ событий, зарегистрированных в базе данных, дается оценка их среднесрочной повторяемости, прослеживается географическое и сезонное распределение. Доля ПТЧС, возникающих в результате воздействия селевых потоков, в общем числе ПТЧС, провоцируемых воздействиями всех неблагоприятных и опасных природных процессов и явлений, относительно невелика, но, тем не менее, потенциальную опасность таких воздействий необходимо учитывать при прокладке транспортных и других коммуникаций, особенно в районах повышенного селевого риска.

Ключевые слова: *селевые потоки, техносфера, природно-техногенные аварии и ЧС, база данных, селевая опасность, линейные сооружения*

Ссылка для цитирования: Петрова Е.Г. Воздействие селевых потоков на техносферу по результатам анализа базы данных. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 509–516.

Impacts of debris flows on the technosphere according to the database analysis

E.G. Petrova

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, epgeo@mail.ru

Abstract. The paper considers the natural-technological risk arising as a result of the impact of debris flows on various objects of the technosphere. According to the results of statistical and geographical analysis of the author's database of natural-technological accidents and emergencies (NTE) that occurred in Russia from 1991 to 2018, the main types of NTE caused by debris flows are distinguished. The most vulnerable to the impacts of debris flows are objects of the transport infrastructure, power lines and communications, pipelines, and other linear structures that are exposed to the debris flows. During the period under consideration, debris flows caused road and railway accidents, disruptions in

transport communications, power, warm, water, and gas supply, and other accidents and disruptions. The emergencies of various types as a result of debris flow impacts on the technosphere were recorded in 10 federal regions of the Russian Federation including Sakhalin and Magadan Oblast, Krasnodar and Primorsky Territory, Republics of Dagestan, Kabardino-Balkaria, Karachay-Cherkessia, North Ossetia-Alania, Ingushetia, and the Chechen Republic. The analysis of events recorded in the database is carried out, their long-term average frequency of occurrences is estimated, and their geographical and seasonal distribution is traced. The proportion of NTE caused by debris flows, in the total number of NTE caused by all adverse and dangerous natural processes and phenomena, is relatively small, but, nevertheless, the potential danger of such impacts must be taken into account when constructing transport and other communications, especially in areas of high risk of debris flows.

Key words: *debris flows, technosphere, natural-technological accidents and emergencies, data base, debris flow hazard, linear infrastructure*

Cite this article: Petrova E.G. Impacts of debris flows on the technosphere according to the database analysis. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 509–516.

Введение

Селевые потоки относятся к числу наиболее опасных природных процессов. Они способны оказывать пагубные и разрушительные воздействия на объекты техносферы, особенно на линейные сооружения, такие как линии электропередачи и связи, транспортные коммуникации и трубопроводы, а также на территории населенных пунктов и сельхозугодья, наносить значительный социальный, экологический и экономический ущерб. В связи с повышенной опасностью селевых воздействий мониторинг таких событий является чрезвычайно важным и продолжает сохранять свою актуальность на современном этапе, особенно в условиях наблюдающихся и прогнозируемых на ближайшее будущее климатических изменений, в ходе которых селевая активность может возрасти [География..., 2004].

Среди основных причин опасности от селей для жизни и здоровья людей, для объектов экономики и инфраструктуры отмечаются следующие: 1) неожиданность схода селевых потоков в связи с трудной их предсказуемостью; 2) значительная скорость и глубина потоков; 3) ударное воздействие потоков, приводящее к разрушению зданий, мостов и других сооружений; 4) глубинная и боковая эрозия русла, ведущая к обрушению полотна автомобильных и железных дорог, разрушению мостов и зданий, расположенных на берегу; 5) занос земель и различных хозяйственных объектов (полотна автомобильных и железных дорог, территорий населенных пунктов, сельскохозяйственных угодий) обломочным материалом в зонах аккумуляции [Перов, 2012].

Помимо прямого разрушительного воздействия селевых потоков на объекты, оказывающиеся в зоне их активизации, сели могут также служить своеобразным «спусковым крючком» для возникновения различных аварий в техносфере, приводить к нарушению нормальных условий жизнедеятельности людей или нормального функционирования транспортных, энергетических и других систем. Все эти негативные последствия схода селевых потоков могут приводить к созданию чрезвычайных ситуаций (ЧС), которые в данном случае можно квалифицировать как природно-техногенные (ПТЧС). Под природно-техногенными понимаются любые аварии и ЧС на объектах техносферы, возникновение которых было спровоцировано или усилено теми или иными природными событиями [Мягков, 1995], в данном случае - селями.

Целью настоящей работы является выявление и анализ чрезвычайных ситуаций природно-техногенного характера, возникающих на территории России под воздействием селевых потоков различного генезиса. Поставлены следующие задачи:

- выделить основные типы ПТЧС, которые могут создаваться в результате селевых воздействий;
- проследить географическое распределение вызываемых селями ПТЧС различных типов по территории России;
- провести оценку их среднемноголетней повторяемости на уровне субъектов РФ;
- выявить районы наиболее высокого риска возникновения таких ПТЧС с целью сосредоточения основных усилий по их предотвращению на районах потенциально высокой степени опасности.

Методика исследования

Для решения поставленных задач был проведен статистический и географический анализ информации, собранной автором в электронной базе данных по техногенным и природно-техногенным чрезвычайным ситуациям, происходящим на территории России и в других странах мира. Используемая база данных была создана автором в научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей географического факультета МГУ [Петрова, 2009]. Она постоянно пополняется новой информацией в режиме непрерывного мониторинга.

В базу данных заносятся следующие сведения:

- 1) дата и время произошедшей ЧС;
- 2) ее локализация с указанием субъекта федерации, района и расстояния до ближайшего населенного пункта;
- 3) тип ЧС; основные факторы ее формирования;
- 4) количество погибших и пострадавших;
- 5) размер нанесенного материального ущерба (при наличии такой информации);
- 6) краткое описание события с указанием причины аварии, если она известна;
- 7) источник информации.

Для наполнения базы данных используются материалы только из открытых источников. Основным источником информации служат официальные ежедневные сводки МЧС РФ, а также сообщения печатных и электронных средств массовой информации. В настоящее время база данных содержит более 20 тыс. единиц информации, в том числе для 2550 событий (около 13%) был установлен их природно-техногенный характер, - когда авария на объекте техносферы или нарушение условий его нормального функционирования были спровоцированы воздействием того или иного неблагоприятного или опасного природного процесса или явления.

Представление всей накопленной информации в виде электронной базы данных в программе Microsoft Access позволяет выполнять различные тематические поисковые запросы, производить статистическую обработку массива данных, в зависимости от поставленных целей и задач исследования. Для целей предлагаемой работы среди общей совокупности собранных данных была произведена выборка и анализ чрезвычайных ситуаций, обусловленных селевыми воздействиями (рис.1). Были выделены типы ЧС, вызываемых селями, определены их основные последствия, прослежено их географическое и сезонное распределение, проведена оценка их среднемноголетней повторяемости на уровне субъектов РФ.

При отнесении районов локализации выделенных ПТЧС к тому или иному селеопасному региону или селеопасной области автор руководствовался схемой районирования селеопасных территорий Российской Федерации, разработанной В.Ф. Перовым [Экологический атлас..., 2002; Перов, 2012].

Дата	Регион	Локализация	Тип ЧС
21.05.2014	Кабардино-Черкесская Рн	в Черкесском районе, п. н.п. Вербная Балка, в Чеченском районе Кабардино-Балкарской Республики между населенными пунктами Хурго и Бегу	ПТЧС: сели, нарушение автомобильного сообщения
23.02.2014	Карачаево-Черкесский ре	в Урупском районе	ПТЧС: сели, нарушение автомобильного сообщения
21.12.2018	Краснодарский край	в Усть-Лабинском районе, вблизи железнодорожной станции Напалкиевская	ПТЧС: дожди, оползень, сели, ЛЭП
01.08.1993	Краснодарский край	г. Сочи, Лазаревский и Тульский р-ны	ПТЧС: ливневые дожди, сморчки (ветер) / сели: ПДК-групп, разлив нефтепродуктов, порыв г/провода
26.12.2018	Краснодарский край	в населенном пункте Далинское городского округа Сочи	ПТЧС: дожди, сели, нарушение автомобильного сообщения
14.10.2015	Краснодарский край	в городском округе Сочи на н/п/д переезде «Догомос – Лос» Северо-Кавказской железной дороги	ПТЧС: сели, нарушение ЖД сообщения
11.13.2018	Краснодарский край	на территории городского округа Сочи	ПТЧС: осадки, сильный ветер до 17 м/с, селя, нарушение ЖД и автоснабжения
04.06.2018	Краснодарский край	п.п. Татышовка, Марино и Тугалаш Лазаревского района	ПТЧС: выделение обильных осадков, селевые потоки, нарушения энерго- и частично теплоснабжения
07.08.2002	Краснодарский край	поселков Каткова Щель, Чамктое вадан, Глубокая Щель, Зубова Щель	ПТЧС: ливень, оползень, сели, нарушение электроснабжения
05.06.1991	Магаданская обл.		ПТЧС: сели, обрушение
09.06.2009	Магаданская обл.	в Хасинском районе (20 км севернее г. Магадан)	ПТЧС: сильный дождь, сели, нарушение электр- и водоснабжения
11.08.2018	Приморский край	в городе Владивостоке	ПТЧС: сильный дождь, сход селевого потока, нарушение энергоснабжения, автомобильного сообщения
27.07.2005	Республика Дагестан	Ичкеринский р-н	ПТЧС: сели, ДТП
04.05.2009	Республика Дагестан	Чирковский р-н	ПТЧС: сели, ДТП
03.09.1992	Республика Дагестан		ПТЧС: сели, нарушение водоснабжения
24.08.2002	Республика Дагестан	Сулейман-Стальский р-н	ПТЧС: сели, нарушение электр-, водоснабжения, порыв г/провода
10.06.2002	Республика Дагестан		ПТЧС: дожди, сели, оползень, нарушение водоснабж., порыв г/провода
16.02.2012	Республика Дагестан	г. Дербент	ПТЧС: сели, сели, оползень, нарушение электр- и водоснабжения
11.08.2018	Республика Дагестан	в Ахтыжском районе	ПТЧС: сильный дождь, сход селевого потока, нарушение энергоснабжения, автомобильного сообщения
10.08.2017	Республика Дагестан	на территории Карабулакского района вблизи населенного пункта дортрель	ПТЧС: дожди, селевой поток, нарушение газоснабжения
01.08.2018	Республика Дагестан	в населенном пункте Аракс Буйнаковского района, 3 км.	ПТЧС: ливневые обильные осадки, порывистый ветер, селевые потоки, нарушения энергоснабжения
01.05.2003	Республика Ингушетия		ПТЧС: сели, обрушение, пожар
12.07.1998	Республика Кабардино-Балкарская Рн	в Чеченском р-н (с. Боканга) и Чеченский р-н (с. Бугунт)	ПТЧС: сели, нарушение электр-, водоснабжения, связь
02.06.2014	Республика Карачаево-Черкесия	через правый приток реки Большая Лыба в н.п. Нудинское Урупского района Республики Карачаево-Черкесия (агсагорское «Поселки-Панки») /	ПТЧС: обильные осадки, сели, нарушение дорожное сообщение
14.08.2017	Республика Карачаево-Черкесия	в населенном пункте Бурмаки Сергеевского района	ПТЧС: сели, нарушение электроснабжения, автоснабжения
12.05.1958	Республика Карачаево-Черкесия	в Адыге-Хабальском, Прикубанский р-ны, г. Черкесск	ПТЧС: оползень, сели, нарушение электроснабжения
27.07.1996	Республика Северная Осетия – Алания	в Алагирский и Ирафский р-ны	ПТЧС: сели, нарушение электроснабжения
25.08.2008	Республика Северная Осетия – Алания	в Алагирский р-н	ПТЧС: сели, нарушение электроснабжения
20.09.2017	Республика Северная Осетия – Алания		ПТЧС: обильные осадки и сход селевого масс, повреждение участка газопровода и нарушения автомобильного сообщения
16.07.2018	Республика Северная Осетия – Алания		ПТЧС: сели, нарушение автомобильного сообщения
20.02.2014	Республика Северная Осетия – Алания	в районе н.п. Гавлетта Республики Грузия	ПТЧС: сели, нарушение автомобильного сообщения
09.11.2015	Республика Северная Осетия – Алания	на территории автостанции в г.п. Бурмаки в населенном пункте Бурмаки в 800 м севернее железнодорожной станции Бурмаки	ПТЧС: сели, нарушение транспортного сообщения
06.06.2012	Республика Северная Осетия – Алания	на участке Военно-Грузинской автодороги	ПТЧС: сели, нарушение автомобильного сообщения
05.08.2012	Республика Северная Осетия – Алания	на участке автодороги п.п. Бурмаки – Северный портал Рокского тоннеля	ПТЧС: сели, нарушение автомобильного сообщения
26.05.2012	Республика Дагестан	в населенном пункте Бурмаки Сергеевского района	сход селевого потока
15.07.2002	Сахалинская обл.	Носовский р-н, Носовск, Горновладар	ПТЧС: сели, нарушение телекоммуникац., автомобильного сообщения
02.09.2002	Сахалинская обл.	Южная Сахалинская, Анива, Золотский р-н	ПТЧС: дожди, сели, нарушение электроснабжения
11.07.2002	Сахалинская обл.	Макаровский р-н	ПТЧС: сели, нарушение электроснабжения, связь
01.10.2003	Сахалинская обл.	Макаровский, Невельский, Золотский р-ны	ПТЧС: сели, нарушение электроснабжения, связь
05.06.1992	Сахалинская обл.	Макаровский р-н	ПТЧС: сели, нарушение телекоммуникац., связь

Рис. 1. Фрагмент базы данных с поисковым запросом «Сели»

Fig. 1. Fragment of the database with the search query “Debris flow”

Результаты и их обсуждение

В результате проведенного анализа накопленной информации было выявлено и исследовано 48 событий природно-техногенного характера, произошедших на территории России за период с 1991 г. по 2018 г., основной причиной возникновения которых послужило воздействие селевых потоков. Их доля в общем числе ПТЧС, зарегистрированных в базе данных, составила около 2%. Именно эти события и были использованы для дальнейшей оценки.

Было выделено восемь следующих типов ПТЧС, которые были спровоцированы селевыми воздействиями на объекты техносферы (при их перечислении ниже приводятся субъекты федерации, где были зафиксированы указанные события):

- обрушение жилых домов в результате ударного воздействия селевых потоков - Магаданская и Сахалинская области, Республика Ингушетия;
- нарушение электроснабжения вследствие выведения селевыми потоками из рабочего состояния высоковольтных опор линий электропередачи (ЛЭП), повреждений ЛЭП и разрушения или отключения трансформаторных подстанций – Краснодарский и Приморский края, Магаданская и Сахалинская области, Республики Дагестан, Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия, Северная Осетия – Алания;
- нарушение связи из-за повреждения селевыми потоками линий связи - Сахалинская область, Республика Кабардино-Балкария;
- нарушение водоснабжения, теплоснабжения и других систем жизнеобеспечения населения в связи с повреждением селевыми потоками водопроводов и других объектов ЖКХ – Краснодарский край, Магаданская и Сахалинская области, Республики Дагестан, Кабардино-Балкария и Ингушетия;
- автомобильные аварии и нарушения автомобильного сообщения по причине попадания в селевые потоки автомобилей, повреждения или затопления обломочным материалом дорожного полотна, разрушения мостов и других объектов автотранспортной инфраструктуры – Краснодарский и Приморский края, Сахалинская область, Республики Дагестан, Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия, Северная Осетия – Алания и Чеченская Республика;

- железнодорожные аварии и нарушения железнодорожного сообщения из-за повреждения или затопления селевыми потоками полотна железных дорог, разрушения мостов, линий электроснабжения, железнодорожной сигнализации или других объектов железнодорожной инфраструктуры – Краснодарский край, Сахалинская область;
- нарушение газоснабжения в результате повреждения селевыми потоками газопроводов – Краснодарский край, Республики Дагестан, Кабардино-Балкария и Северная Осетия – Алания;
- сельскохозяйственная ЧС в связи с повреждением селевыми потоками сельхозугодий или разрушением сельскохозяйственных объектов – Сахалинская область, Республика Дагестан.

В целом ряде случаев ПТЧС, вызванные селями, носили комплексный характер, когда сразу несколько из перечисленных выше типов ЧС происходили одновременно или последовательно. Это приводило к усилению тяжести последствий и увеличению времени на их ликвидацию.

Возникновение ПТЧС, обусловленных селевыми воздействиями на объекты техносферы, за рассматриваемый период 1991–2018 гг. было зафиксировано на территории 10 субъектов РФ, включая Сахалинскую и Магаданскую области, Краснодарский и Приморский края, Республики Дагестан, Кабардино-Балкарию, Карачаево-Черкесию, Северную Осетию – Аланию, Ингушетию и Чеченскую Республику. Наиболее велика их среднемноголетняя повторяемость в Сахалинской области – более 0,4 ПТЧС в среднем за год (один раз в 2 года), а также в Северокавказских субъектах РФ: Республике Дагестан – более 0,3 ПТЧС в среднем за год (один раз в 3 года), Северной Осетии – Алании, Краснодарском крае и Кабардино-Балкарии – более 0,2 ПТЧС в среднем за год (один раз в 4-5 лет). Во всех перечисленных регионах причинами возникновения ПТЧС выступали как повышенная селевая активность, так и уязвимость объектов техносферы, прежде всего – транспортной инфраструктуры, линий электропередачи и связи, трубопроводов и других линейных сооружений, пересекавших зоны активизации селей. Линейные объекты являются наиболее уязвимыми к селевым воздействиям именно в силу своей протяженности: на том или ином участке они неизбежно оказываются на пути схода селевых потоков. При этом из строя, как правило, выводится вся система, что, в конечном итоге, и ведет к нарушению на более или менее продолжительное время нормальных условий жизнедеятельности населения, тем самым создавая ЧС. Так, например, к продолжительным закрытиям автотранспортного сообщения приводит сход или угроза схода селевых потоков в районе Военно-Грузинской дороги и Транскавказской автомагистрали (Республика Северная Осетия – Алания). В Туапсинском и Лазаревском районах Краснодарского края, на территории городского округа Сочи, а также в Макаровском, Холмском и Невельском районах Сахалинской области неоднократно отмечены случаи нарушения железнодорожного сообщения.

Северный Кавказ является наиболее активным в селевом отношении регионом России, вся горная территория которого в той или иной степени селеопасна [Перов, 2012]. Это подтвердили и приведенные выше результаты нашего исследования – большая часть зарегистрированных в базе данных селевых событий (почти 70%) пришлось именно на Северокавказскую селевую область. Основная часть ПТЧС происходила здесь в теплое время года, - с мая по август, - с пиком событий в августе (рис. 2). По своему генетическому типу большая часть событий была вызвана селями дождевого происхождения, в отдельных случаях имели место также гляциальные сели (Эльбрусский район Кабардино-Балкарии, высокогорные районы Северной Осетии – Алании).

Ниже приводятся самые катастрофические ЧС, связанные с прохождением селевых потоков в Северокавказской селевой области.

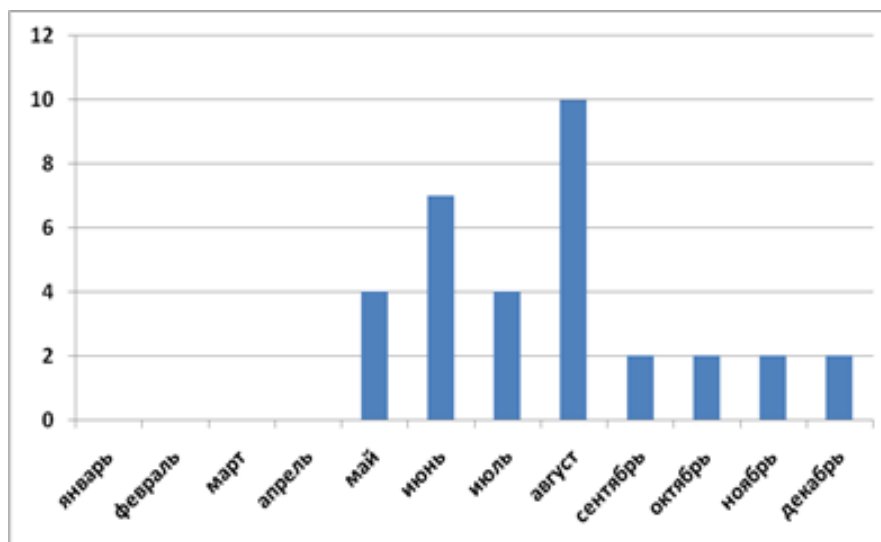


Рис. 2. Сезонное распределение ПТЧС, обусловленных воздействием селей на Северном Кавказе

Fig. 2. Seasonal distribution of emergency situations due to debris flows in the North Caucasus

К наиболее тяжелым последствиям, как по числу жертв, так и по размеру нанесенного материального и экологического ущерба привела катастрофа 1 августа 1991 г. в Туапсинском и Лазаревском районах Краснодарского края, когда в результате смерча и сильных ливневых дождей произошел сход мощных селевых потоков. Ширина потоков достигала нескольких десятков метров, а высота подъема уровня воды – до 11–12 м. В результате этого стихийного бедствия погибло 27 человек. Были разрушены железнодорожные и автомобильные мосты, повреждено полотно железной дороги Туапсе – Сочи – Грузия, магистральный газопровод Майкоп – Сочи, водопровод и ЛЭП. Разрушение нефтебазы в г.Туапсе привело к разливу 6469 т нефтепродуктов, что вызвало загрязнение природной среды.

27 июля 2005 г. в Курахском районе Республики Дагестан в селевой поток попали автобус КАВЗ-685 с пассажирами и автомобиль "Жигули". В результате погибли 8 чел., еще 13 чел. пострадали.

12 июля 1995 г. селевая катастрофа произошла в двух районах Республики Кабардино-Балкарии. В результате схода трех селевых потоков в районе с.Безенги (Черекского района) были разрушены и повреждены автомобильные дороги, два моста, 350 м магистрального водопровода. Ущерб был оценен в 0,8 млрд.руб. В с.Булунгу (Чегемского района) было разрушено и занесено селевыми отложениями 15 домов и множество хозяйственных построек, поврежден мост, линии электропередачи и связи. Количество погибших составило 5 чел., число пострадавших – 3 чел. Кроме того, погибло 80 голов скота. Материальный ущерб был оценен в 6,5 млрд.руб.

Еще одна селевая катастрофа с человеческими жертвами случилась в Кабардино-Балкарии 1 сентября 2017 г. В результате выпадения обильных осадков произошел подъем уровня воды в реке Баксан и сходы селей со склона ущелья Адыл-Су в Эльбрусском районе. Селевыми потоками были снесены в реку три легковых автомобиля, в которых находились люди. Жертвами катастрофы стали три человека [РИА Новости, 2017]. Были повреждены 8 участков дорожного полотна федеральной автодороги А-158 «Прохладный – Баксан – Эльбрус» общей протяженностью более 3 км, нарушено дорожное сообщение с 5 населенными пунктами с населением более 5200 человек и 10 туристическими базами. В 6 населенных пунктах было нарушено энерго- и газоснабжение.

Примерно 30% зафиксированных в базе данных ПТЧС пришлось на долю Тихоокеанского (Сахалинская область, Приморский край) и Восточного (Магаданская область) селеопасных регионов, при этом основная их часть была отмечена в Сахалинской области. Все ПТЧС здесь также происходили в теплое время года, - с июня

по октябрь, преимущественно - в июле, августе и сентябре (рис.3). Большая часть событий имела дождевой генезис.

5 июня 1991 г. в Магаданской области произошел сход селя на вахтовый поселок геологов. Было снесено 20 домов. Пострадало 11 чел., из которых 6 чел. погибли, 3 получили ранения, двое пропали без вести.

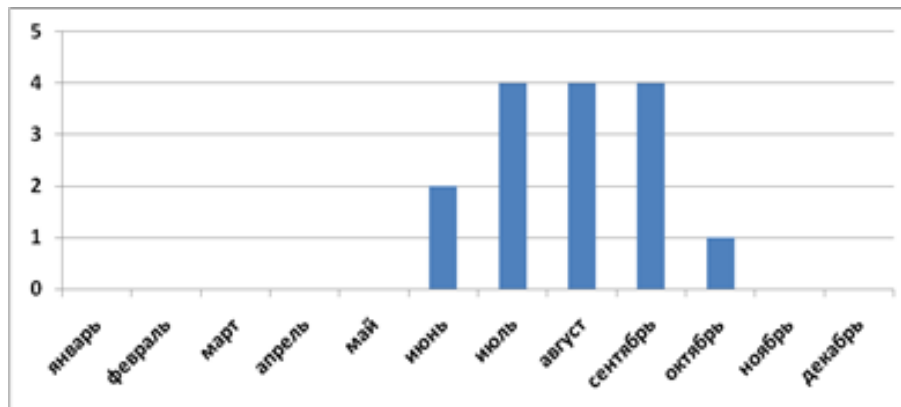


Рис. 3. Сезонное распределение ПТЧС, обусловленных воздействием селей в Тихоокеанском и Восточном регионах

Fig. 3. Seasonal distribution of emergency situations due to debris flows in the Pacific and Eastern regions

Сход селевых потоков на Сахалине сопровождался значительным экономическим ущербом. Так, в результате схода селевых потоков в июле 2002 г. в Невельском районе был нанесен ущерб в размере 8 млн руб., в Макаровском районе – 1 млн руб. В Невельске сошли 3 селя общим объемом 750 м³, были смыты два пешеходных моста, на двух улицах снесены две подпорные стенки, грязевые потоки забили ливневые и канализационные коллекторы. В Горнозаводске был смыт пешеходный мост. Сошедшими селями повреждены автодороги Невельск – Шебунино и Невельск – Холмск. Движение автотранспорта было временно прекращено. В районе населенного пункта Заозерное сошли 5 грязевых потоков. Нарушено электроснабжение поселка Пугачево, прервана телефонная связь с населенными пунктами района, смыт автомобильный мост через р.Чегана, размыто железнодорожное полотно у станции Туманово.

В июле 2000 г. сход селевых потоков на четверо суток прервал железнодорожное сообщение на линии Холмск – Невельск. Особенно сильно пострадало оборотно-локомотивное депо станции Холмск. Там был поврежден водопровод, повалены столбы ЛЭП, нарушено электроснабжение и железнодорожная сигнализация.

Выводы

Как показал проведенный анализ, доля событий, вызванных воздействием селевых потоков на различные объекты техносферы, в общем числе зарегистрированных в базе данных ПТЧС, произошедших на территории России за период с 1991 г. по 2018 г., невелика. Однако этими событиями не следует пренебрегать, поскольку они наносят значительный социальный, экономический и экологический ущерб.

Потенциальную опасность селевых воздействий необходимо учитывать при строительстве различных объектов, в первую очередь, – при прокладке транспортных, энергетических и других коммуникаций, особенно в районах повышенной селевой активности. Линейные сооружения, такие как автомобильные и железные дороги, линии электропередачи и связи, трубопроводы наиболее уязвимы по отношению к селевым воздействиям, поскольку они, как правило, протягиваются на значительные расстояния, и неизбежно пересекают пути схода селей.

Районами наибольшего риска возникновения ПТЧС, вызываемых селями, являются Сахалинская область (Макаровский, Невельский, Томаринский и Холмский районы), Республики Дагестан (Ахтынский, Буйнакский, Дербентский, Карабудахкентский, Курахский, Сулейман-Стальский, Цунтинский районы), Северная Осетия – Алания (Алагирский, Ирафский и Пригородный районы), Кабардино-Балкария (Чегемский, Черекский и Эльбрусский районы) и Краснодарский край (городской округ Сочи, Лазаревский и Туапсинский районы). Среднепогодная повторяемость таких событий в этих регионах составляет, согласно проведенной оценке, примерно – один раз в 2-5 лет. Именно в перечисленных регионах следует принимать первоочередные меры по предотвращению ЧС и снижению тяжести их последствий.

Благодарности

Работа выполнена по ГЗ по теме 1.7 АААА-А16-116032810093-2 «Картографирование, моделирование и оценка риска опасных природных процессов».

Список литературы

- География, общество, окружающая среда/ Коллективная монография. Т.4. Природно-антропогенные процессы и экологический риск. М.: Изд. дом «Городец», 2004. 616 с.
- Мягков С.М. География природного риска. М.: МГУ, 1995. 224 с.
- Перов В.Ф. Селеведение. Учебное пособие. М.: Географический ф-т МГУ, 2012. 272 с.
- Петрова Е.Г. Природно-техногенные ЧС в России: опыт составления и анализа базы данных. // Снежные лавины, сели и оценка риска. / Под ред. А.Л. Шныпаркова. Вып. 2. М: Университетская книга, 2009.С.152-162.
- РИА Новости. Жизнь после селей: Приэльбрусье возвращается к жизни после ударов стихии // <https://ria.ru/20170926/1505569089.html>, 2017. Последнее обращение: 11.10.2020.
- Экологический атлас России. М.: ЗАО «Карта», 2002. 128 с.



Эффективность селезащитных мероприятий в пределах Краснополянского горнолыжного кластера города Сочи (Западный Кавказ)

К.Г. Самаркин-Джарский, Е.В. Дзаганя

ООО «Инжзащита», Сочи, Россия, samarkin@bk.ru, krylenka@gmail.com

Аннотация. Начиная с 2007 г. началось интенсивное антропогенное освоение лесных и альпийских горных склонов Краснополянского горнолыжного кластера города Сочи. В связи со строительством рекреационных и инфраструктурных объектов значительно возросла опасность схода селевых потоков. Обеспечение безопасности территории от воздействия опасных природных процессов стало актуальной задачей как при строительстве, так и в период эксплуатации. К XXII Олимпийским зимним играм была создана комплексная инженерная защита территории от опасных природных процессов, в том числе и селезащита на притоках рек Мзымта и Псоу. Цель настоящей работы имеет прикладной характер и заключается в обобщении полученного опыта масштабного вмешательства в горные ландшафты. Для достижения цели работы рассмотрены примененные в Краснополянском горном кластере методы селезащиты, выбраны критерии оценки оптимальных вариантов инженерной защиты, описаны произошедшие в постолимпийский период селевые проявления, выполнен анализ защищенности территории от селевых потоков, даны рекомендации по совершенствованию системы инженерной защиты.

Ключевые слова: селевой поток, селевой конус выноса, активные методы защиты, селеспуск, противоселевой барьер, эффективность

Ссылка для цитирования: Самаркин-Джарский К.Г., Дзаганя Е.В. Эффективность селезащитных мероприятий в пределах Краснополянского горнолыжного кластера города Сочи (Западный Кавказ). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 517–528.

Effectiveness of debris flow protection measures within the mountain ski cluster of Krasnaya Polyana of Sochi (West Caucasus)

K.G. Samarkin-Dzharskiy, E.V. Dzaganii

LLC "Inzhzashchita", Sochi, Russia, samarkin@bk.ru, krylenka@gmail.com

Abstract. The forest and alpine mountain slopes of Krasnaya Polyana ski resort cluster of Sochi have been heavily developed since 2007. The construction of recreation and infrastructure facilities has increased the risk of debris flows. Provision of the area security from the impact of hazardous natural processes has become a high priority objective both during construction and operation periods. A complex engineering protection of the area from hazardous natural processes was developed for the XXII Winter Olympic Games, which included debris flows protection of the confluents of the Mzymta and the Psou rivers.

This paper has an applied character and its goal is to generalize the acquired experience of a large-scale interference into mountain landscapes. The following activities have been performed in order to complete this work: examination of the methods of debris flows protection applied in Krasnaya Polyana mountain cluster; definition of criterias for assessment of optimal options of debris flows protection; description of mudflow manifestations occurred during post-Olympic period; analyses of the debris flows security

rate of the area; development of recommendations on improvement of the engineering protection system.

Key words: *debris flow, debris flow cone, active protection methods, debris-flow chute, anti-debris barrier, efficiency*

Cite this article: Samarkin-Dzharskiy K.G., Dzaganiia E.V. Effectiveness of debris flow protection measures within the mountain ski cluster of Krasnaya Polyana of Sochi (West Caucasus). In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 517–528.

Введение

Целью настоящей работы является определение оптимальных решений для защиты от селевых потоков в Краснополянском горном кластере города Сочи, расположенного на Черноморском побережье Западного Кавказа.

Основные задачи исследования: сбор, обобщение и анализ опыта строительства и эксплуатации существующих объектов инженерной защиты с учетом, долговечности, надежности защиты от селевой опасности, сложности и стоимости технологических решений, экономического и экологического эффектов при их реализации, применительно к природным условиям причерноморского региона Западного Кавказа.

Масштабное строительство горнолыжных курортов в поселке Красная Поляна Адлерского района города Сочи началось в 2007 году и продолжается до настоящего времени. Исследуемый район относится к среднему течению рек Мзымта и Псоу, охватывает хребты Аибга, Псехако, Аишхо. Краснополянский поселковый округ включает поселок городского типа Красная Поляна; село Медовеевка; село Кепша; село Чвижепсе; село Эстосадок. Отметим, что застройка объектами горнолыжных курортов продолжает продвигаться к верховьям реки Мзымта, активизируя проявления опасных экзогенных процессов.

От начала создания сооружений инженерной защиты (2007 г.) прошло более десяти лет. За это время в исследуемом районе неоднократно наблюдались случаи сходов селевых потоков, в том числе и в бассейнах, где построены сооружения инженерной защиты от селевых потоков. Оценка эффективности селезащитных сооружений в настоящей работе направлена на использование накопленного опыта строительства в исследуемом районе для его использования во избежание возможных ошибок.

Общие сведения о Краснополянском горнолыжном кластере

Краснополянский горнолыжный кластер города Сочи находится на Западном Кавказе, примерно в 40–50 км от береговой линии Черного моря, в верхнем и среднем течении долины реки Мзымта и в правобережной части верхнего и среднего течения долины реки Псоу. Он включает в себя объекты горно-туристического центра (ГТЦ) ПАО «Газпром» («Альпика-Сервис» на хребте Аибга, «Псехако» на хребте Псехако), горнолыжного центра (ГЛЦ) «Роза Хутор», горнолыжный курорт (ГЛК) «Красная Поляна» на хребте Аибга, комплекс трамплинов, трассу лыжного двоеборья и объекты инфраструктуры.

В административном отношении это территория Краснополянского поселкового округа Адлерского района города Сочи Краснодарского края России, которая включает земли населенных пунктов: поселка городского типа Красная Поляна; сел Медовеевка; Кепша; Чвижепсе; Эстосадок, а также земли Сочинского национального парка и Кавказского биосферного заповедника. Площадь округа составляет около 980 квадратных километров.

Объекты инфраструктуры Горно-туристического центра ПАО «Газпром» располагаются в долине реки Ачипсе, на плато Псехако и на хребте Аибга на высотах от

540 до 2256 метров над уровнем моря. Общая площадь территории курорта составляет около 800 гектаров. Одновременная вместимость всех отелей курорта – порядка 2000 человек. Горнолыжная инфраструктура курорта представляет собой комплекс канатных дорог и горнолыжных трасс из 13 современных канатных дорог (в том числе одна из самых протяженных канатных дорог 3S длиной более 5000 м, одна кабина которой рассчитана на перевозку 30 человек).

На курорте представлено 35 трасс различных уровней сложности: 7 трасс освещены для вечернего катания. Система искусственного снегообразования позволяет в случае необходимости существенно увеличить количество снега.

К XXII Зимним Олимпийским играм на территории курорта был построен лыжно-биатлонный комплекс «Лаура». На трассах комплекса проходили олимпийские и паралимпийские соревнования по биатлону и лыжным гонкам, этапы чемпионатов мира и России по данным видам спорта, Всемирные игры IWAS [Сайт ГТЦ «Газпром»].

В настоящее время лыжно-биатлонный комплекс «Лаура» круглый год задействован для проведения тренировок российских спортсменов. Это единственный в России лыжно-биатлонный комплекс, расположенный в среднегорье, что позволяет российским спортсменам в «домашних условиях» готовиться к международным соревнованиям, проходящим на аналогичных высотах за рубежом.

Территория самого крупного горнолыжного комплекса «Роза Хутор» охватывает примерно 1820 га северного, северо-восточного и южного склонов хребта Аибга. На курорте работают 28 канатных дорог, общая протяжённость горнолыжных трасс составляет 102 км, имеется 14 отелей, В феврале 2014 года стал местом проведения соревнований XXII зимних Олимпийских игр по горнолыжному спорту, сноуборду и фристайлу.

Сеть подъемников спортивно-туристического комплекса «Красная Поляна» представляет собой 3 ступени канатных дорог гондольного типа от стартовой площадки 540 м до отметок 960 м, 1460 м, 2200 м, а также 2 линии кресельных канатных дорог в зоны «Цирк 2» и «Цирк 3». Общая протяжённость трасс курорта: 12 км. Количество трасс: 9.

По территории проходят совмещенные железная и автомобильные дороги Адлер – «Альпика-Сервис», федеральная автодорога «Альпика-Сервис» – «Роза-Хутор», автодорога на биатлонный комплекс «Лаура», автодорога «Альпика-Сервис» - подстанция «Мзымта», объекты инженерной инфраструктуры.

Земли населенных пунктов и горнолыжных курортов подвержены сильному техногенному воздействию, при этом некоторые из курортов продолжают расширяться в направлении верховьев реки Мзымта и в долине реки Псоу. На освоенных территориях горнолыжных центров лесной покров не превышает 30%.

Характеристика условий селеобразования

Рассматриваемый район имеет сильно пересеченный рельеф. Высотные отметки меняются от 500 м над уровнем моря в пойме реки Мзымта до 3280 м (гора Агепста). В зоне действующих горнолыжных курортов высота самой высокой вершины на хребте Аибга составляет 2509,7 м (гора Каменный Столб). Наиболее крупные реки района – реки Мзымта и Псоу.

Хребет Аибга является водораздельным между рр. Мзымта и Псоу. Река Мзымта берет начало на Главном Кавказском хребте на высоте около 3000м, в районе горы Люоб из озера Верхний Кардывач, на высоте 2400 м. Она впадает в Черное море в Адлерском районе города Сочи. Общая длина реки 89 км, средний уклон 27,0‰, площадь водосбора 885 км². В бассейне насчитывается 577 рек общей длиной 1025 км. Средняя высота водосбора 1309 м [Ресурсы..., 1969]. Наиболее крупными притоками рек Мзымта являются реки Пслух, Ачипсе с притоком Лаура, Бешенка, Чвижепсе, Кепша. Долины водотоков имеют преимущественно V-образную и U-образную форму, зачастую с практически отвесными склонами.

Площадь водосбора реки Псоу 407 км², длина реки 51,6 км. Река Псоу берет начало на южном склоне хребта Аибга из родника, расположенного в 4.4 километрах к западу от горы Агепста (3261 м) на высоте 2517 м, впадает в Черное море в 7.5 км юго-восточнее устья р. Мзымта. По реке проходит государственная граница России с Абхазией. К территории Краснополянского горного кластера отнесена правобережная часть бассейна реки Псоу в верхнем и среднем течении. В пределах горного кластера имеет один относительно крупный приток - р.Безымянка (длина 7км, впадает справа).

По данным мониторингового подразделения Росгидромета «СЦГМС ЧАМ», в обозримом прошлом сели на реках Мзымта и Псоу не наблюдались.

Согласно сведениям из «Отчета по созданию комплекта специализированных карт г. Б. Сочи и прилегающей части Туапсинского района для обоснования документов территориального планирования г. Б. Сочи и объектов ФЦП «Развитие г. Б. Сочи как горноклиматического курорта (2006 2014 гг.)». ОАО «РОССТРОЙИЗЫСКАНИЯ», ОАО «КАВКАЗГИДРОГЕОЛОГИЯ», 2007 г., на рассматриваемой территории практически в каждом из бассейнов притоков рек Мзымта и Псоу отмечались селевые процессы. Это свидетельствует о потенциальной селевой опасности всего района.

Велика вероятность прохождения селевых потоков на малых постоянных и временных водотоках, притоках этих рек, имеющих значительные уклоны русел: реки Менделиха, Сулимовская, Бзерпия, Ржаная, Бшенка, Чвежипсе, Кепша, ручьи Пограничный, Роза-Хутор, Кольценко, Буковый, Тобиас, Мостовой, 2-я Бригада, Фермерский. По объемам выносимого материала большая часть селевых потоков относится к микроселям. Более высокая пораженность территории приурочена к зонам значительного техногенного воздействия и строительства в зоне горнолыжных курортов (рис. 1).



Рис. 1. Селевой поток р. Ржаная (лев. приток р. Мзымта), возникший в результате складирования грунта на пойме, повреждает объект общественного питания. Август 2012 г. Фото Котенко Г.Э.

Fig. 1. The debris flow of the Rzhanaya River (left inflow of Mzymta river), resulting from the storage of soil on the floodplain, damages the catering facility. August 2012. Photo by Kotenko G.E.

Склоны долин более крупных водотоков расчленены на множество мелких водосборных бассейнов со спрямленными, крутыми руслами. Основную роль в питании рек играет дождевое и грунтовое питание. В весенний период и в периоды осенних оттепелей питание водотоков пополняется стоком от таяния снега. В эти периоды, когда

грунты склонов переувлажнены, селевая опасность возрастает. В год в бассейне реки Мзымта может наблюдаться до 25 паводков [Ворошилов, 1972].

Для района с перепадом высот почти 2 тысячи метров, характерна горная поясность. Большую часть территории составляют покрытые лесом горные склоны. Склоны хребта Аибга в пригребневой зоне почти отвесны и каменисты, растительный покров преимущественно отсутствует. В зимний период на крутом северном склоне за гребнем хребта Аибга формируются снежные козырьки, обрушение которых вызывает лавины, образующие скопления рыхлообломочного материала в зонах отложения.

Селезащитные сооружения Краснополянского горнолыжного кластера

Для защиты объектов и снижения возможных разрушений и потерь используются различные типы гидротехнических противоселевых сооружений, позволяющие задержать селевые выносы выше защищаемого объекта, отвести селевой поток от защищаемого объекта, пропустить его через объект, укрепить берега, сократить количество эрозийного материала в русле, обеспечить снижение силы ударного воздействия селевого потока.

Задержание селевых выносов осуществляется путем сооружения противоселевых барьеров, барражей, селезащитных плотин (дамб). Котлованы-наносоуловители практически не используются из-за узости долин, сложности строительства подъездных путей для эксплуатации сооружений и очистки накопителей.

Противоселевые барьеры, используемые в этом районе, преимущественно представляют собой однотипные сетчатые конструкции (рис. 2, 3). Ударное воздействие от селевого потока воспринимается с одной стороны гибкой сетью, с другой – кольцами-амортизаторами на канатах. Остаточные напряжения передаются на канаты и свайные упоры (бычки), а также на оттяжки и далее в коренные породы дна русла. В средней части сетки продольные канаты прикреплены к стальным стойкам, низ которых забетонирован в монолитные анкерные фундаменты, а верх прикреплен к оттяжкам, которые связаны с грунтовыми анкерами, забуренными по направлению оттяжек в коренные породы дна русла.



Рис. 2. Противоселевой барьер на ручье Мостовой (лев. приток р. Мзымта) выше железной дороги. Фото Самаркина-Джарского К.Г.

Fig. 2. The debris flows protection barrier on Mostovaya stream (left inflow of Mzymta river) above the railroad. Photo Samarkin-Dzharsky K.G.



Рис. 3. Противоселевой барьер на реке Сулимовская (лев. приток р.Мзымта) на спаде селевого паводка. 25.06.2019 г. Фото Иськова И.В.

Fig. 3. The debris flow protection barrier on the Sulimovskaya river (left inflow of Mzymta river) during the recession of the mud flood. 06.25.2019 Photo by Iskov I.V.

Запруды и селезащитные плотины предназначены для задержания выносов и больших объемов твердого стока, а также стабилизации и защиты русла. Они возведены из камня, бетона, железобетона, металла в виде глухих или решетчатых стенок, перегораживающих русло. Наносоуловители и барражи предназначены для уменьшения скорости селевого потока, вследствие оседания твердой массы (рис. 4).



Рис. 4. Вид вверх по течению на два барража на реке Сулимовской в правой части русла после селевого паводка 24.06.2019 г. Фото И.В. Иськова

Fig. 4. Upstream view of two barrages on the Sulimovskaya river in the right part of the channel after the debris flow of June 24, 2019 Photo by I.V. Iskov

Как видно из рис. 4, защитное действие барражей на реке Сулимовской неэффективно из-за недостаточной их ширины. После занесения барражей селевыми выносами грязекаменный или водокаменный поток обходит создавшееся препятствие сбоку или сверху. Т.е., необходимо большее число подобных сооружений и ширина их должна соответствовать ширине возможных селевых потоков.

Селепропускные сооружения предназначены для беспрепятственного прохождения селевых потоков у защищаемых объектов и представлены в виде бетонных лотков-быстроходов и каналов (рис. 5).

Для отвода селевого потока в сторону от объекта и его торможения возводятся бетонные селеотводящие сооружения, селеспуски, селепропускные сооружения, селенаправляющие сооружения.



Рис. 5. Селепропуск на ручье Шумихинский (приток реки Ржаная). Фото Е.В. Дзаганиа

Fig. 5. The debris flow control facility on the Shumikhinsky stream (inflow of the Rzhanaya river). Photo by E.V. Dzaganiia

Как правило, эти сооружения сочетаются (подстанция Лаура – ручей Тобиас), подстанция Роза-Хутор – река Сулимовская, нижняя станция лифта S –ручей Буковый, река Ржаная, ручей Шумихинский – под автодорогами. Селенаправляющие сооружения в виде стенок устраиваются вдоль берега в местах его наиболее интенсивного размыва.

При возведении селеспусков на одном уровне с защищаемым объектом их устраивают в виде канализированного русла (ручей 2-я Бригада – комплекс трамплинов).

На участке автодороги Альпика-Сервис – подстанция «Мзымта» на левобережной пойме реки Мзымта имеются галереи для защиты от микроселей-оползней.

На крутых склонах устраивают ступенчатые террасы, выполняют регулирование поверхностного стока, противоэрозионные, агролесомелиоративные мероприятия.

К наиболее селеопасным водотокам на данной территории относятся верховья и среднее течения реки Сулимовской, река Ржаная с крупным притоком ручьем Шумихинский, верховья р. Кепша.

Активизация селевых потоков происходит в зонах накопления обломочного материала в результате схода лавин, обвалов и осыпей (естественные процессы), в зонах техногенных отвалов и вырубке леса в условиях переувлажненности и изменения (концентрации) стока в результате техногенного воздействия. Также возможными селевыми очагами и очагами твердого питания селей являются участки оползнеобразования, как под воздействием природных причин, так и спровоцированные людьми.

Снеголавинные процессы в верхней части склонов хребта Аибга оказывают разрушающее воздействие на склоны и уже построенные сооружения для отвода поверхностного стока вдоль лыжных трасс и другие сооружения. Лавинные тальвеги являются одновременно природными линейными селевыми очагами, что вызывает необходимость разработки комплексной противо-лавинно-селе-эрозионной защиты.

Там, где воздействие лавин отсутствует, и системы отвода поверхностного стока соответствуют рельефу и количеству твердого и водного стока, эрозионные процессы

стабилизированы, на крутых склонах в зонах подрезки склонов и на лыжных трассах восстановлен растительный покров, близкий к естественному.

Несмотря на значительный объем выполненных мероприятий инженерной защиты, аварийные ситуации с выходом селевых потоков на селитебные территории, дороги с нанесением материального ущерба происходят ежегодно.

Наиболее часто селевые события с причинением ущерба происходят на участках автодороги Альпика-Сервис – подстанция «Мзымта» (левый приток Мзымты Салымовский и др.) и в селе Кепша. Сравнительно недавно начал осваиваться южный склон хребта Аибга. В селеопасной зоне находится рекреационные объекты курорта «Роза Хутор». При строительстве выполнены противопаводковые мероприятия без учета возросшей селевой активности при увеличении антропогенной нагрузки. Еще одним проблемным участком может стать ручей Фермерский, впадающий в реку Мзымта в районе железнодорожной станции Эсто-Садок. Водопропускные сооружения на этом водотоке не рассчитаны на селевые паводки.

За период с 2009 г. достоверно известно об одном погибшем в результате схода селя строителе в 2012 году.

Часть противоселевых сооружений полностью выполняет свое назначение и аварийных ситуаций не происходит (селепропуски на р. Ржаная и ручье Тобиас).

Оценка эффективности селезащитных сооружений

Эффективность селезащитных сооружений упрощенно может быть оценена по ряду критериев с помощью балльной системы показателей, основанных на анализе объективной информации из проектов и сведений об аварийных ситуациях.

На первом этапе оценки эффективности сооружений определяются соответствие сооружений требованиям обеспечения безопасности населения, нормативным требованиям, соответствия выбранного типа селезащитного сооружения природным и техногенным условиям, правильность выбора его местоположения с учетом степени защиты территории, объектов и населения, соответствие проекту, работоспособность при авариях, соответствие фактического срока службы проектному.

На втором этапе анализируются: стоимость строительства; возможности содержания и эксплуатации построенных сооружений в условиях горного рельефа и труднодоступности, продолжительность и стоимость эксплуатационных работ; объем и необходимое время для строительства; необходимые строительные материалы и конструкции, наличие карьеров, удаленность источников поставки материалов; потребность в трудовых ресурсах необходимой квалификации; оборудование, приборы, машины и механизмы, необходимые для строительно-монтажных работ (СМР) и эксплуатации построенных систем защиты; прогноз воздействия на окружающую среду.

Третий этап включает анализ вариантов проектных решений по технико-экономическим показателям, характеризующим экономичность как проекта в целом, так и его отдельных частей.

Ниже выполнена краткая оценка эффективности противоселевых и комплексных защитных мероприятий на двух наиболее опасных в селевом отношении участках.

1. Река Кепша - село Кепша

Река Кепша является правым притоком реки Мзымта. Впадает в реку Мзымта в 27км от ее устья (Черное море). Длина реки Кепша около 11 км, площадь водосборного бассейна – около 35км². В нижнем течении в реку Кепша впадает река Ахцу.

Село Кепша (население села около 300 человек) находится между устьевыми участками рек Ахцу и Кепша, в зоне затопления пойм этих рек. Кроме того, обычно одновременно паводок происходит и на реке Мзымта, создавая подпор рек Ахцу и Кепша и способствуя подъему уровня воды в этих притоках. Таким образом, поселок Кепша находится в зоне воздействия паводков на трех горных реках. Кроме этого, неблагоприятного фактора, река Кепша является селеопасной. Примерно в 2002 году

произошёл сход масштабного природного оползня в верховьях реки Кепша в 10 км выше по течению от села Кепша. Длина блокового оползня 0,8км, ширина около 0,3 км, глубина заложения около 50 метров. Общая площадь селевого очага 23 га, оценочный объём 10 млн м³. Часть оползневого массива объёмом около 3 млн м³ подвижна и постепенно смещается вниз по долине, эпизодически провоцируя образование селевых паводков, последствия которых хорошо видны в русле.

Большая часть селевого материала отлагается в нижней части долины, образуя внутриваловый конус выноса – участок длительной направленной аккумуляции наносов. Это привело к повышению отметок дна по руслу в нижнем течении реки Кепша, в том числе и у села Кепша. Ситуацию усложнило техногенное вмешательство при строительстве сооружений различного назначения в прирусловой части долины на участке нижнего течения Кепши и на выходе ее в долину р. Мзымта. Сооружения препятствуют транзиту твердого стока и способствуют накоплению материала на устьевом участке протяженностью около 0,6 км.

В селе в период выдающихся водных и селевых паводков площадь затопления достигала около 8 га. В зоне затопления находятся детский сад № 117, 7 многоквартирных домов, не менее 10 частных жилых домов, инфраструктурные объекты и хозяйственные постройки.

Для защиты от затопления села Кепша отсыпана временная дамба из местного рыхлого легкоразмываемого мелкозернистого аллювия по правому берегу реки, которая не является надежной защитой населенного пункта и требует постоянного восстановления (рис. 6).



Рис. 6. Правобережная дамба для защиты села Кепша от затопления. Фото В.А. Филиппова

Fig. 6. Right-bank dam to protect the village of Kepsha from flooding. Photo by V.A. Filippov

Комплексные изыскания по изучению опасных природных процессов в целом по бассейну реки Кепша не выполнялись. По имеющимся сведениям и материалам, ситуация предварительно оценивается как опасная и с тенденцией к дальнейшему ухудшению. В условиях длительного существования нестабильных крупных оползневых массивов и возможностью появления новых, имеется высокий риск эпизодической активизации опасных природных процессов и возникновения чрезвычайных ситуаций. Решение о возможности и целесообразности выполнения инженерной защиты населенного пункта либо об отселении людей из зоны чрезвычайной ситуации до

настоящего времени не принято. Селезащитные мероприятия на этом водотоке следует признать неэффективными и неудовлетворительными.

2. Река Сулимовская²

Комплекс селезащитных мероприятий в бассейне реки Сулимовской был выполнен в 2014 году для защиты подстанции «Роза Хутор» и включал как строительство противоселевых сооружений (2 барража, 2 противоселевых барьера с технологическими дорогами, селепропуск, селенаправляющие стены), так и мероприятия на притоках реки. При неоднократном прохождении селевых потоков (2014, 2017, 2019) с объемами селевых отложений 5-40 тысяч метров кубических и площадью поражения до 30 тысяч квадратных метров подстанция не пострадала. Качество выполненных монолитных работ при возведении сооружений хорошее: толщина стен, прогибы, выгибы после прохождения селевых потоков не превышают 10–15 мм.

В то же время, при селепроявлениях были частично повреждены другие объекты, расположенные на смежных территориях: муниципальная канализационно-насосная станция, габионное двустороннее берегоукрепление реки, переходы кабельных линий, коммуникации, дорожное покрытие улицы Олимпийской, мост через ручей Сулимовский, автотранспорт, ограждения Этнографического комплекса «Моя Россия», «Комплекс сборно-разборных сооружений сезонной эксплуатации для оказания спортивно-оздоровительных услуг северо-восточнее от здания ул. Набережная Лаванда, д. 6 (левый берег реки Мзымта), повреждена система оснежения ГТЦ «Альпика Сервис» ПАО Газпром, лыжная трасса №12, система водоотведения на отметках 1500 и 1100 м ГТЦ «Альпика Сервис» ПАО Газпром, противоэрозионная защита левого берега Сулимовской на отметках 680-830 метров, технологическая дорога для расчистки противоселевых сетей и барражей. Среди людей жертв и пострадавших не было.

Хотя в соответствии с проектом защита подстанции «Роза Хутор» оказалась достаточной, в целом эффективность для защиты всей селитебной территории в районе конуса выноса реки Сулимовской оценивается как неудовлетворительная. При сходе селя не глубокой ночью, а в дневной период селевой поток на данном участке может повлечь человеческие жертвы, так как селевой поток выходит в зоны, часто посещаемые людьми (рис. 7).



Рис. 7. Селевой поток на реке Сулимовской за пределами селепропуска. Слева – подстанция «Роза-Хутор». 25.06.2019 г. Фото И.В. Иськова

Fig. 7. Debris flow on the Sulimovskaya river beyond the debris flow control facility. On the left is the Rosa Khutor substation. 06.25.2019. Photo by I.V. Iskov

²Местное название - руч. Салымовский (Сулимовский)

Оценка противоселевой защиты в районе подстанции «Роза Хутор»:

- длина подходного участка селевого русла перед селеспуском должна быть не менее двадцати ширин селевого потока на подходном участке Длина подходного участка от нижней сетки до входного оголовка селеспуска - меньше требуемой. Требование действующих нормативных документов - не выполнено;
- напорные откосы дамбы обвалования не были укреплены облицовкой монолитным (сборным) железобетоном, см. требования СП 116.13330.2012, п. 6.3.3.3. Требование не выполнено;
- возвышение стен оголовка над максимальным уровнем селевого потока принимать не менее $0,5H_{max}$, см. требования СП 116.13330.2012, табл. 6.3.2.4. Глубина потока на входе в оголовок $H = 1,92$ м. Требуемая высота стен оголовка $H_{ог} = 1,92 \times 1,5 = 2,88$ м. Проектом принята высота стен $H_{ог} = 3,0$ м. Требование выполнено.
- возвышение низа пролетных строений существующего автодорожного моста над расчетным максимальным уровнем селевого потока должно быть не менее 1 м, см. требования СП 35.13330.2011, табл. 5.2. Расчетная глубина потока на входе под мост $H_{max} = 2,3$ м. Требуемая высота от дна канала до низа пролетных строений $(2,3 \text{ м} + 1 \text{ м}) = 3,3$ м. Фактическая высота до низа пролетных строений $H_{вх} = 2,6$ м. Так как мост уже был построен, то примыкание спускного канала было выполнено к существующему мосту.

Запасы материала в селевых очагах природного происхождения здесь таковы, что полностью ликвидировать селевую опасность в ближайшие годы не представляется возможным. Необходимы мероприятия по стабилизации оползневых участков, в первую очередь, в зонах техногенного воздействия и создание надежной защиты территории в местах размещения зданий и сооружений, а также пребывания людей.

Анализ ситуации показал, что текущие эксплуатационные мероприятия по расчистке и обслуживанию селеудерживающих сооружений и вывозу грунта за пределы конуса выноса не выполнялись, материал складировался на селевом конусе выноса ручья Сулимовский и в русле реки Мзымта. Со стороны реки Мзымта, при одновременном прохождении паводка по реке Мзымта и ручью Сулимовский возникает подпор потока и блокировка стока ручья Сулимовский, препятствуя прохождению карчехода и образуя завалы. При добросовестном выполнении мероприятий, предусмотренных проектом противоселевой защиты, значительного ущерба можно было избежать, либо минимизировать. Одним из основных негативных факторов является то, что при строительстве селепропуска под автомобильной дорогой его ширина была predetermined размером водопропускного отверстия уже существующего моста. При строительстве данного моста не были учтены расходы селевых паводков и карчеход. В результате затора перед этим мостом селевые массы полностью переполнили селепропуск и вышли на пойму. Помимо этого, селенаправляющие сооружения на входе в селепропуск не перехватывают селевой поток полностью, и он движется мимо селепропуска, на территорию стоянки, автодорогу, на этнографический комплекс.

Заключение

Степень ответственности сооружений инженерной защиты определяется категорией ответственности тех сооружений, которые они защищают. На территориях, которые посещают люди, селевые воздействия необходимо исключить.

Как показывает оценка эффективности уже построенных селезащитных сооружений в Краснополянском горнолыжном кластере, в большинстве своем они соответствуют природным условиям района и обеспечивают безопасную эксплуатацию тех объектов, для защиты которых они предназначены.

В то же время, рассматривая в целом защищенность данной территории от селевых потоков, ее можно оценить как недостаточную. Предусмотренные мероприятия были

выполнены не полностью, особенно в части выполнения регулирования поверхностного стока, рекультивации отвалов, восстановления растительного и почвенного покрова.

Сохраняются зоны риска для населения, хозяйственных объектов и инфраструктуры в бассейнах рек Сулимовская, Кепша, Менделиха, ручей Фермерский. Рекомендуется выполнение актуального комплексного обследования территории в целях выявления зон селевой опасности на землях хозяйственного и рекреационного использования и обеспечения защиты от опасных природных процессов.

Список литературы

- Баринов А.Ю. Геоморфологический анализ ливневой селеопасности Черноморского побережья Кавказа в пределах береговых морфосистем. // Труды международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». Пятигорск, Институт Севкавгипроводхоз, 2008, стр. 59-61.
- Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л., Гидрометиздат, 1980. 144 стр.
- Ворошилов В.И. Селевые паводки и меры борьбы с ними на южном склоне Северо-Западного Кавказа: автореф. дис. канд. геогр. наук. Сочи: Изд-во Сочинского филиала Краснодарского политехнического института, 1972. 25 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 9. Закавказье и Дагестан. Выпуск 1. Западное Закавказье. Под. ред. д-ра геогр. наук Г.Н. Хмаладзе, Л., Гидрометиздат, 1969.
- Флейшман С.М. Сели. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 237 с.



Количественная оценка антропогенного воздействия на активизацию селевых процессов в малых водосборах хр. Аибга (район пос. Красная Поляна)

С.В. Шварев^{1,2}, С.В. Харченко^{3,1}, В.Н. Голосов^{3,1}, М.И. Успенский³

¹Институт географии РАН, Москва, Россия, shvarev@igras.ru

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, shvarev@ifz.ru

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. Одной из основных задач исследования является количественная оценка вклада современных климатических изменений и усиления антропогенного пресса в увеличение доли бассейновой составляющей в сток наносов рек. Тестовым полигоном для исследований выбрана площадь на левом борту долины р. Мзымта в районе курорта Роза-Хутор. Эта территория обладает характерными чертами, позволяющими оценить основные факторы, влияющие на денудацию. С одной стороны, участок типичен по показателям современных климатических изменений. С другой – подвержен интенсивным тектоническим воздействиям, активизирующим крупномасштабные смещения склонового чехла. А с третьей стороны – участок является ареной интенсивного техногенного воздействия с четкими временными маркерами, одним из которых является этап освоения территории в ходе подготовки Олимпиады-2014 и последующего развития инфраструктуры и спортивно-туристических объектов. В пределах тестового полигона выбран типичный малый водосбор (долина ручья Сулимовский), на примере иерархической структуры которого осуществлена количественная оценка изменений рельефа, интенсивности денудационно-аккумулятивных процессов с применением дистанционного мониторинга и цифрового моделирования. С использованием БПЛА и DGPS составлены ортофотопланы и цифровые модели местности ключевых участков. Для каждого селевого водосбора оценена трансформация площади водосбора, обусловленная сооружением дорог и инфраструктурных объектов, и на основе сопоставления ЦМР для данных водосборов на момент времени перед началом строительства и на сентябрь 2019 года определены объёмы (с различной точностью в зависимости от детальности ЦМР) механического перемещения грунта и денудации за счёт активизации склоновых и водно-эрозионных процессов. Данные дешифрирования верифицированы на местности. На основании этих данных определены основные причины активизации денудационных процессов, локализованы участки с опасной ситуацией и даны рекомендации по исправлению ситуации.

Ключевые слова: малый водосбор, активизация селей, БПЛА, ЦМР, дистанционный мониторинг, Мзымта, Роза-Хутор

Ссылка для цитирования: Шварев С.В., Харченко С.В., Голосов В.Н., Успенский М.И. Название. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 529–540.

Quantitative assessment of anthropogenic impact for debris flow activation in small catchments of the Aibga Ridge (Krasnaya Polyana village area)

S.V. Shvarev^{1,2}, S.V. Kharchenko^{3,1}, V.N. Golosov^{3,1}, M.I. Uspensky³

¹*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, shvarev@igras.ru*

²*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, shvarev@ifz.ru*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Abstract. One of the main tasks of the study is to quantify the contribution of modern climate changes and enlarged anthropogenic pressure to the increase in the share of the basin component of river sediment runoff. The area on the left side of the Mzymta river valley close to the Rosa Khutor resort was chosen as a test site for research. The area has characteristic features that allow us to assess the main factors affecting denudation. On the one hand, the site is typical in terms of modern climate change. On the other hand, it is subject to intense tectonic influences that activate large-scale displacements of the slope cover. On the third hand, the site is an arena of intensive technogenic impact with clear time markers, one of which is the stage of development of the territory during the preparation of the 2014 Olympics and the subsequent development of infrastructure and sports and tourist facilities. A typical small catchment area within the test polygon (the valley of the Sulimovsky stream), was selected using the features of its hierarchical structure. The quantitative assessment of changes in terrain and intensity of denudation-accumulative processes was performed using remote monitoring and digital modelling. Orthophotographs and digital elevation models of key areas were compiled using UAV and DGPS. The transformation of each mudflow catchment caused by the construction of roads and infrastructure facilities was estimated on the comparison of the DEM at the time before construction and in September 2019. The volumes of mechanical movement of soil and denudation due to the activation of slope and water-erosion processes were determined (with varying accuracy depending on the detail of the DEM). Data interpretation was verified on the ground and based on these data, the main reasons for the activation of denudation processes were identified, areas with a dangerous situation were localized, and recommendations were made to correct the situation.

Key words: *small catchment area, debris flow activation, UAV, DEM, remote monitoring, Mzymta, Rosa Khutor*

Cite this article: Shvarev S.V., Kharchenko S.V., Golosov V.N., Uspensky M.I. Quantitative assessment of anthropogenic impact for debris flow activation in small catchments of the Aibga Ridge (Krasnaya Polyana village area). In: Chernomorets S.S., Viskhadzhiya K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: "Promotion" LLC, 2020, p. 529–540.

Введение

Долина р. Мзымты обладает высоким потенциалом развития опасных экзогенных процессов, связанным с высококонтрастным рельефом, слабоустойчивым коренным субстратом и большим объемом рыхлого чехла, значительным количеством осадков, высокими скоростями вертикальных тектонических движений и сильной сейсмичностью. Крупные селевые и оползневые катастрофы являются серьезным рельефообразующим фактором, в природных условиях проявляющимся относительно редко и связанным с исключительными гидрометеорологическими или

сейсмотектоническими событиями. До определенной степени устойчивое состояние поддерживалось естественным растительным покровом, регулирующим распределение поверхностного и подземного стока воды. Активное строительство на склонах хр. Аибга привело к масштабным преобразованиям естественных ландшафтов на водосборе р. Мзымты и кардинально изменило режим формирования стока на водосборах ручьев разной водности, дренирующих левобережную часть водосбора реки в районе п. Эсто-Садок и выше по течению вплоть до впадения р. Пслух. Перестройка малых водосборов, произошедшая в связи с сооружением объектов инфраструктуры, многократное увеличение и искусственная локализация поверхностного стока привели к резкой активизации геоморфологических процессов, в частности, селевых. Следы их (несортированные наносы по днищам небольших долин и лотков, поваленный лес, глубокие врезы, сопровождаемые оползнями) регистрируются по всей периферии отрога хр. Аибга, на северной оконечности которого стоит Горная олимпийская деревня (абс. высоты 1100 – 1250 м). Основной целью исследований является количественная оценка денудации, связанной с естественными и антропогенными причинами. Задачи работы – сопоставление динамики процессов за разные периоды времени и в разных масштабах, определение факторов, воздействующих на денудацию, и оценка скоростей и объемов стока наносов.

Объекты исследования

Район исследований расположен на левом борту долины р. Мзымта и включает тестовый полигон площадью 25,2 км² с несколькими объектами мониторинга: бассейн ручья Сулимовский (S=6,9 км²), бассейн правого притока ручья Сулимовский в районе курорта Роза Хутор (S=0,8 км²) и четыре ключевых участка для детальных исследований – «Сулимовский» (№1, S=0,2 км²), «Селевой» (№2, S=0,16 км²), «Овражный» (№3, S=0,13 км²) и «Притрассовый» (№4, S=0,38 км²). Участки выбраны с учетом естественной иерархии и «ярусного» моделирования на 4-х уровнях в масштабах 1:25000-1:10000; 1:10000-1:5000; 1:5000-1:2500; 1:2500-1:1000 (рис. 1).

Развитие селевых процессов на территории исследований определяется благоприятным сочетанием ландшафтных, геоморфологических, климатических и геологических факторов (рис. 2). В естественных условиях в постоянном (с ежегодной активизацией) и коротко-периодичном (до первых десятков лет) режиме здесь развиваются обвальнo-осыпные, лавинные, солифлюкционные процессы в верхних ярусах рельефа и оползневые, селевые и эрозионные – в средних и нижних. При этом площадь регулярно поражаемых территорий не превышает первых процентов от общей площади.

Не является исключением и водосбор ручья Сулимовский, правобережные притоки которого развиваются в крупных оползневых цирках, а основное русло обладает типичными для воздействия селей чертами рельефа: транзитный селевой лоток в верхней части, терраса и конус выноса в устье. Морфологически выраженные черты экзогенной геодинамики практически не проявляются в почвенно-растительном покрове, что свидетельствует об их редко-периодическом проявлении, при котором происходит полное восстановление леса. В оценке активизации крупных оползневых и селевых проявлений в бассейне руч. Сулимовский можно ориентироваться на периодичность около 1 тыс. лет, установленной для других участков в долине р. Мзымта [Овсюченко и др., 2016].

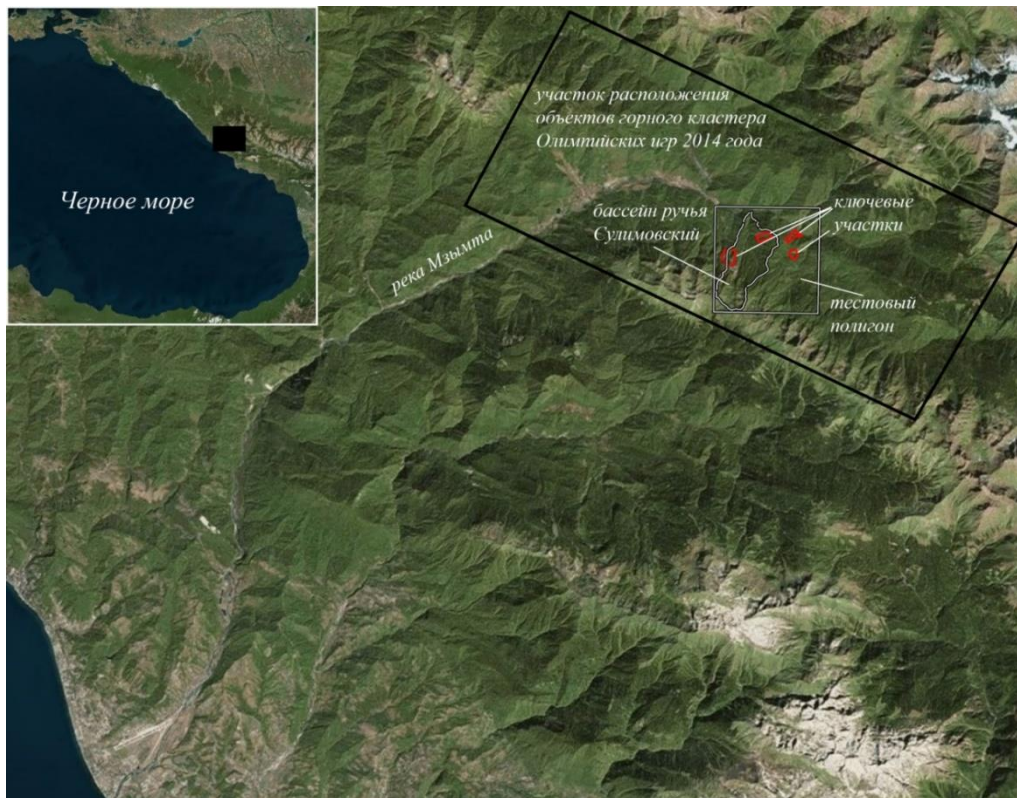


Рис. 1. Схема расположения тестового полигона и ключевых участков

Fig. 1. Scheme of the test polygon and of the key areas

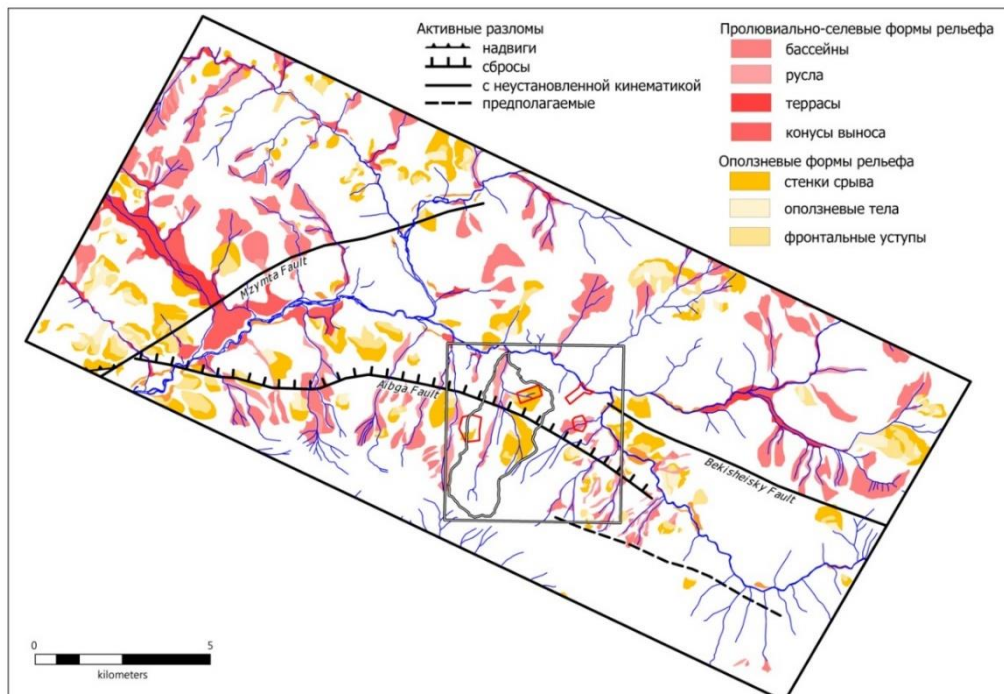


Рис. 2 Схема соотношения активных тектонических структур [Овсюченко и др., 2013; Овсюченко и др., 2016] и проявлений ЭГП [Шварев, 2009]

Fig. 2 Relationship of active tectonic structures [Ovsyuchenko et al., 2013; Ovsyuchenko et al., 2016] and of exogenic processes manifestations [Shvarev, 2009]

Материалы и методы

Оценка воздействия антропогенной деятельности на активизацию экзогенных процессов, мониторинг и расчет изменений в режиме денудации выполнена на основе сравнения иерархически соподчиненных бассейнов. Масштабный диапазон исследований (1:1000 до 1:25000) лимитируется с одной стороны детальностью разрешения $\approx 0,5$ м для оценки взаимодействия элементов структуры естественных и искусственных объектов, а с другой стороны – потребностями исследования селевых водосборов как единых систем. Временной диапазон ограничивается началом активного освоения (2006 г.) и актуальным состоянием (сентябрь 2019 г.). Для сравнения использованы материалы аэрофотосъемки и лазерного сканирования 2006 г. (выполнены ООО «Инжгео», г. Краснодар), космических съемок 2019 г. (сервис GOOGLE) и съемок с БПЛА DJI Mavic Pro.

На основе космических и аэрофотоснимков построены ортофотопланы 2006 и 2019 гг., а на базе материалов лазерного сканирования и аэрофотосъемки с БПЛА – ЦМР и ЦММ (рис. 3). В целях создания ЦММ установлены реперы по данным DGPS. Для верификации данных дешифрирования выполнены рекогносцировочные маршруты и обследования ключевых участков. Оценка антропогенной трансформации и экзогенной динамики, изменение пространственной структуры бассейнов и отдельных водотоков, расчет изменений площадей и объемов перемещенного материала проведен на основе сопоставления и точного совмещения ортофотопланов с использованием ГИС-технологий на всех иерархических уровнях, а с использованием ЦМР и ЦММ – на ключевых участках.

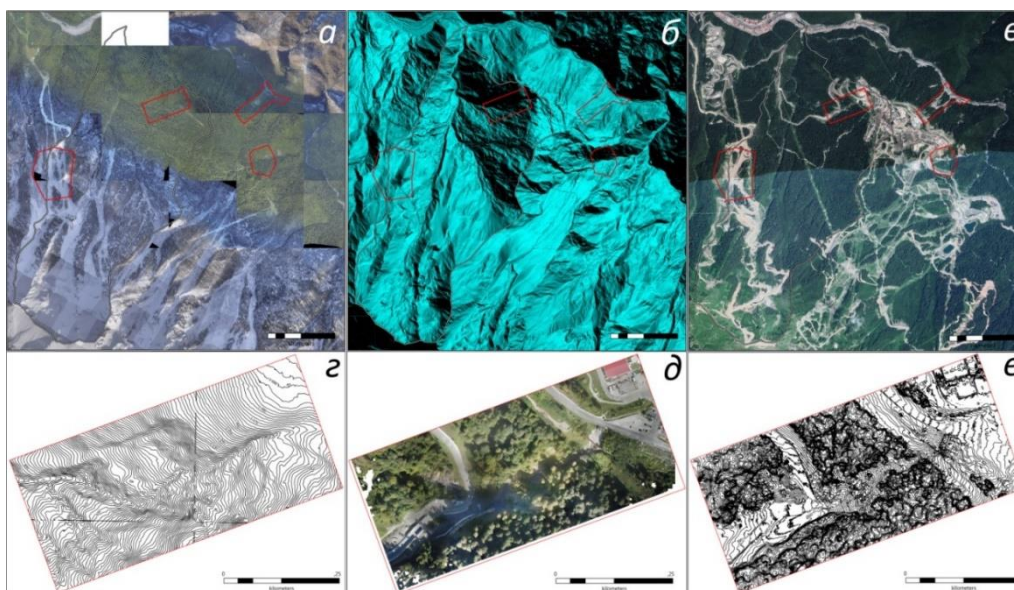


Рис. 3. Исходные материалы для анализа, тестовый полигон: а – монтаж аэро-ортофотоснимков 2006 г.; б – ЦМР, созданная по результатам съемки LIDAR (выполнена в 2006 г. ООО «Инжгео», г. Краснодар), в – монтаж космоснимков высокого разрешения (сервис GOOGLE, съемка 2019 года); ключевой участок №1 (правый приток ручья Сулимовский): г – топографическая схема с сечением горизонталей 2 м (по данным LIDAR 2006 г.); д – ортофотоснимок (по материалам съемки БПЛА, сентябрь 2019 г.); е – топографическая схема с сечением горизонталей 2 м (по данным БПЛА-съемки, 2019 г.)

Fig. 3. Initial data for analysis, test polygon: a - the combination of aerial orthophotos of 2006; б - DEM created based on the results of LIDAR survey (performed in 2006 LLC "Ingeo", Krasnodar), в - the combination of high-resolution satellite images (GOOGLE service, shooting 2019); key section #1 (right tributary of the Sulimovsky stream): г - a topographic scheme with contour lines of 2 m (according to LIDAR 2006); д - orthophotos (based on UAV shooting, September 2019); e - the topographic scheme with contour lines of 2 m (according to UAV shooting, 2019)

Результаты исследований

Тестовый полигон и бассейн ручья Сулимовский. По состоянию на 2006 г. на территории тестового полигона антропогенное воздействие (рис. 4а) затронуло около 5% площади и было распределено неравномерно с максимумом в его западной части, где на тот момент существовали объекты горнолыжной инфраструктуры. Следы активных экзогенных процессов (рис. 4б) занимали около 0,1%. К 2019 г. антропогенная трансформация продвинулась в верхние (южные) участки полигона и на восток (рис. 4в). Площадь измененных ландшафтов выросла в 5,5 раз (с 1,27 км² до 6,89 км²) и достигла 27%, а по отдельным бассейнам увеличилась в 40-45 раз. При этом произошло резкое количественное увеличение по отдельным показателям (открытый грунт), достигающее 30 раз.

Ответная реакция экзогенных процессов проявилась в прибавлении к перечню проявлений ЭГП оползней, осыпей и оврагов, а также в резком увеличении (до 7 раз) пораженных площадей суммарно достигших 0,8% площади тестового полигона, а по бассейнам ручья Сулимовский и его правого притока до 1,3 и 4% соответственно. В целом можно констатировать, что комплексная антропогенная трансформация, достигающая 10% территории при данных типах и параметрах воздействия и природных условиях, вызывает активизацию ЭГП на 0,1% площади; трансформированность 25–30% – около 1–1,5% пораженности и около 50% трансформированности – до 4% пораженности.

Бассейн правого притока ручья Сулимовский и ключевой участок №1. Эта территория и ключевой участок №1 особенно интересны в свете максимальной трансформированности (более 50%) и пораженности (4,1%) (рис. 5).

Анализ дистанционной информации – ортофотоплана (рис. 3д) и цифровой модели местности (рис. 3е) выявил пространственно взаимосвязанный комплекс эрозионно-селевых процессов, активизация которых обусловлена нерациональной антропогенной деятельностью. Исследуемый участок можно подразделить на три части; 1) верхняя, в пределах которой сток с площади, занимаемой курортом «Роза-Хутор» локализуется инженерными сооружениями и отводится в естественные русловые формы; 2) средняя, в пределах которой сток осуществляется естественным способом в русле притока ручья Сулимовский и 3) нижняя, где сток искусственно перераспределяется с локализацией под мостовым переходом и отводом вдоль склона долины.

В пределах верхнего участка сток в вершину притока ручья Сулимовский осуществляется двумя путями: а) на западном - сток локализован водопропускным сооружением под дорогой; б) на восточном определяется случайным переливом с полотна автодороги. Несоответствие водопропускных сооружений объемам стока в первом случае приводит к размыву водобойного колодца над водопропуском и габионного крепления склона под водопропуском. Во втором случае, случайный сброс вод вдоль полотна автодороги приводит к размыву укрепления откоса и русловым врезам, которые, сливаясь ниже откоса локализуются вдоль подпорной стенки с её частичным разрушением.

В пределах среднего участка русла суммируемый сток провоцирует интенсивную глубинную эрозию, сопровождаемую боковыми размывами, блоковыми оползнями и сплывами. Значительный объем размываемого материала аккумулируется в нижней части участка перед мостом. Мостовой переход в верхней (по течению) части нарушается ударным воздействием селевых потоков и сопровождающими врез оползнями. Боковой водоотвод, предназначенный для перераспределения стока, находится в подвешенном состоянии и не осуществляет запроецированных функций.

В пределах нижнего участка локализация стока под мостовым переходом провоцирует развитие глубинной эрозии, оползней и селей ниже по течению от моста. Основное русло подрезает основание моста, а боковые отвершки приближаются к полотну автодороги.

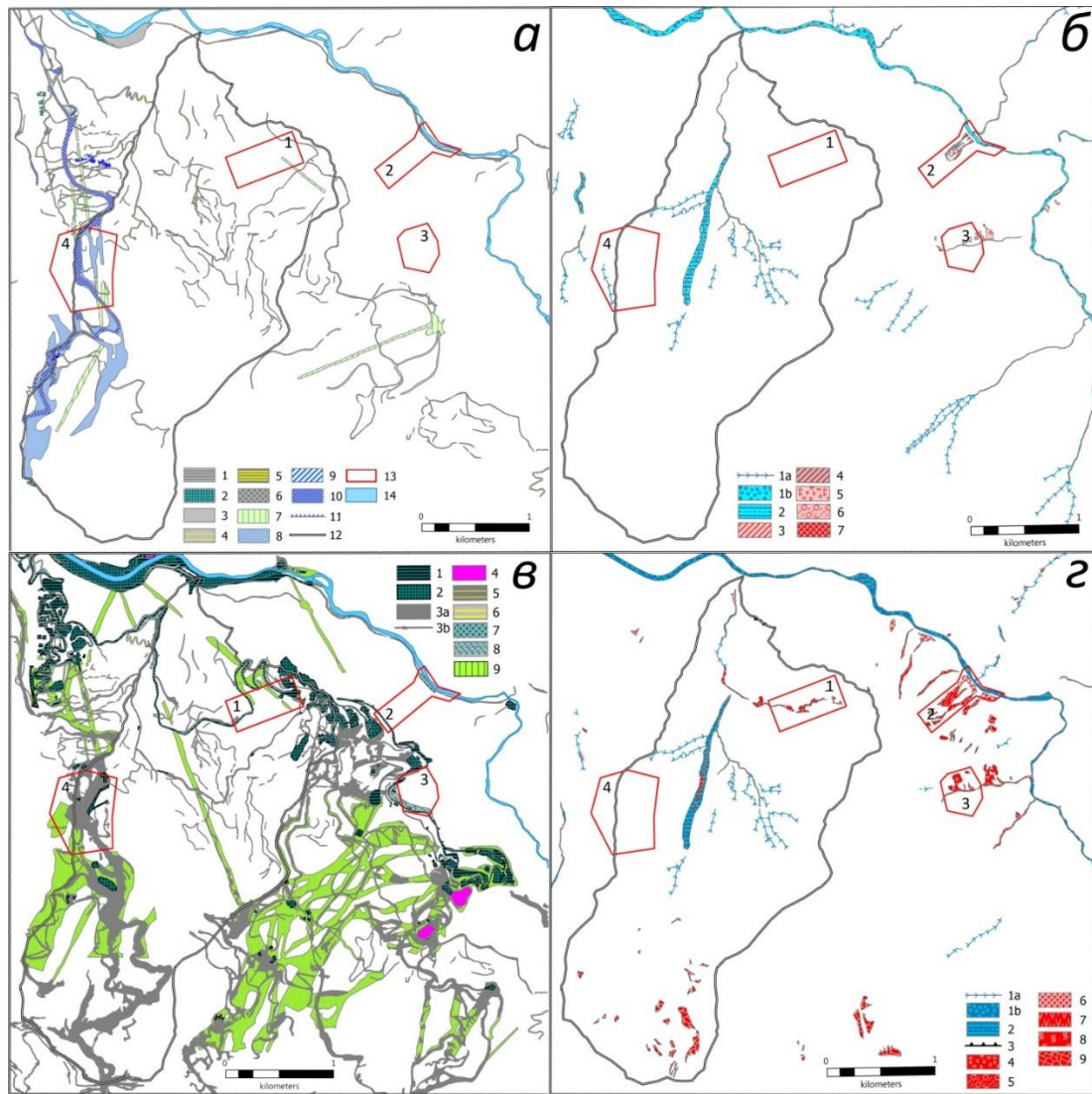


Рис. 4. Аналитические схемы по результатам интерпретации дистанционной информации: ситуация на 2006 г.: а – антропогенная нарушенность, 1 – участки с твердым искусственным покрытием (преимущественно автодороги); 2 – участки со смешанным покрытием (дороги, капитальные строения, инженерные сооружения); 3 – участки со снятым почвенно-растительным покровом (грунтовые дороги, строительные площадки и пр.); 4 – вырубки под линейные сооружения; 5 – дорожные полки; 6 – дорожные насыпи; 7 – вырубки площадные; 8 – вырубки под горнолыжные трассы; 9 – откосы горнолыжных трасс; 10 – спланированные (выровненные) площадки горнолыжных трасс; 11 – защитные террасы на склонах; 12 – граница бассейна руч. Сулимовский; 13 – границы ключевых участков; 14 – русло р. Мзымта; б – активные проявления ЭГП, 1 – участки активной русловой эрозии (а – мелких ручьев; б – крупных рек); 2 – участки пойменной аккумуляции; 3 – активные оползневые и эрозионные уступы; 4 – неактивные оползневые и эрозионные уступы; 5 – участки комплексной склоновой денудации (оползневые, осыпные, эрозионные); селевые: 6 – русла; 7 – конусы выноса; ситуация на 2019 г.: в – антропогенная нарушенность, 1 – участки с твердым искусственным покрытием (преимущественно автодороги); 2 – участки со смешанным покрытием (дороги, капитальные строения, инженерные сооружения); 3 – участки со снятым почвенно-растительным покровом (грунтовые дороги, строительные площадки и пр.); 4 – пруды; 5 – вырубки под линейные сооружения; 6 – дорожные полки; 7 – защитные галереи; 8 – насыпи; 9 – вырубки площадные; г – активные проявления ЭГП, 1 – участки активной русловой эрозии (а – мелких ручьев; б – крупных рек); 2 – участки пойменной аккумуляции; 3 – оползневые и эрозионные уступы; 4 – участки комплексной склоновой денудации; 5 – селевые русла; 6 – селевые конусы; 7 – овраги; 8 – оползни; 9 – скальные осыпи

Fig. 4. Analytical schemes based on the results of remote information interpretation: the situation for 2006: а – anthropogenic transformation, 1 – areas with a hard artificial surface (mainly roads); 2 – areas with a mixed surface (roads, capital buildings, engineering structures); 3 – areas with the removed soil and vegetation cover (dirt roads, construction sites, etc.); 4 - forest clearing for linear structures; 5 – road shelves; 6 – road embankments; 7 – area cuttings; 8 – cuttings for ski slopes; 9 – slopes of ski slopes; 10 - levelled ski slopes; 11 -protective terraces on the slopes; 12 - the border of the Sulimovsky stream basin; 13 - borders of key sections; 14 - riverbed of the Mzymta river; б - active manifestations of EGP, 1 - areas of active riverbed erosion (a - small streams; b-large rivers); 2 - areas of floodplain accumulation; 3 - active landslide and erosion ledges; 4 - inactive landslide and erosion ledges; 5 - areas of complex slope denudation (landslides, debris slopes, slope erosion); the situation for 2019: в - anthropogenic transformation, 1 – areas with a hard artificial surface; 2 – areas with a mixed surface; 3 – areas with the removed soil and vegetation cover; 4 – ponds; 5 - forest clearing for linear structures; 6 – road shelves; 7 – road galleries; 8 - road embankments; 9 – area cuttings; г - active manifestations of EGP, 1 - areas of active riverbed erosion; 2 - floodplains; 3 - landslide and erosion ledges; 4 - areas of complex slope denudation; 5 – debris flow channel; 6 - debris flow cone; 7 – gullies; 8 – landslides; 9 - taluses

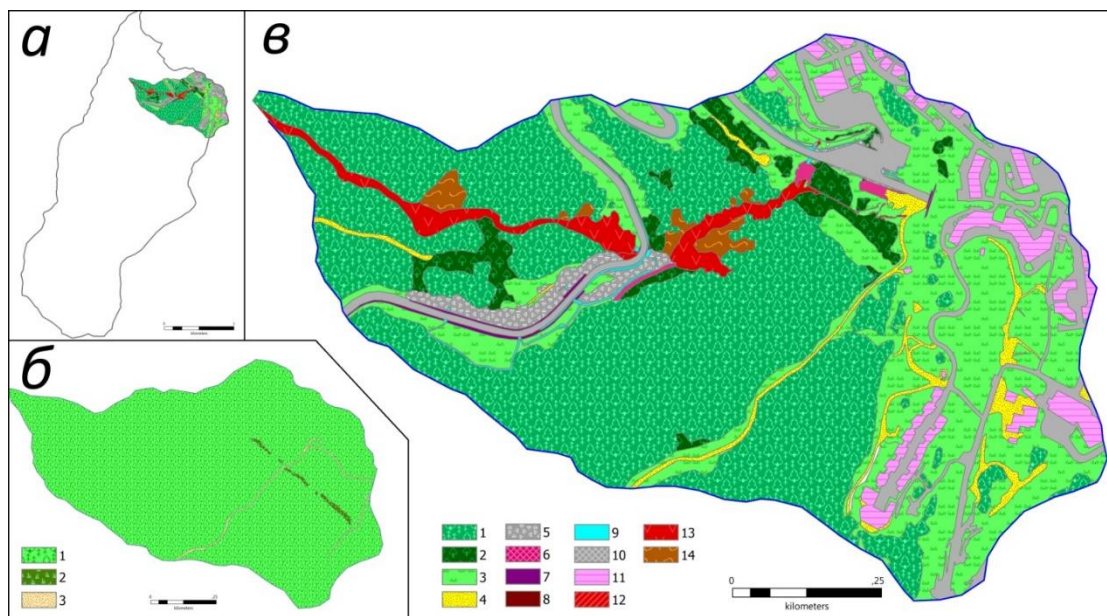


Рис. 5. Ситуационные схемы по результатам дешифрирования дистанционной информации: а) схема расположения бассейна правого притока ручья Сулимовский; б) 2006 год, 1 – древесная растительность; 2 – вырубki с нарушенным почвенно-растительным покровом; 3 – дороги с грунтовым покрытием; в) 2019 год, 1 – древесная растительность; 2 – кустарниковая растительность и мелколесье; 3 – луговая растительность и искусственные посадки (газоны); 4 – участки со снятым почвенно-растительным покровом (грунтовые дороги, строительные площадки и пр.); 5 – отсыпки щебня, отвалы; 6 – участки с укрепленным грунтом (габионы, анкеры и пр.); 7 – капитальные защитные сооружения; 8 – капитальные заборы и ограждения; 9 – капитальные водоотводные и водопропускные сооружения; 10 – участки с твердым покрытием (асфальт, бетон); 11 – капитальные здания и сооружения; 12 – активные эрозионные врезы (овраги, промоины); 13 – селевое русло; 14 – эрозионно-оползневые склоны

Fig. 5. Situational schemes based on the remote data: а) the location of the basin of the right tributary of the Sulimovsky stream; б) 2006, 1 – woody vegetation; 2 – cuttings with disturbed soil and vegetation cover; 3 - roads with an unpaved surface; в) 2019, 1 – woody vegetation; 2 – shrubby vegetation and small woodlands; 3 – meadow vegetation and artificial landings (lawns); 4 – plots with removed soil and vegetation (unpaved roads, construction Sites, etc.); 5 – gravel deposits, dumps; 6 - areas with strengthened soil (gabions, anchors, etc.); 7 - capital protective structures; 8 - capital fences; 9 - capital drainage and culverts; 10 - areas with a hard surface (asphalt, concrete); 11 - capital buildings and structures; 12 - active erosion (ravines, washouts); 13 - mudflow channel; 14 -erosion and landslide slopes

Сравнение ЦМР по результатам лазерной съемки 2006 г. и ЦММ 2019 г. выявляет изменения планового положения основного русла и притоков (рис. 6б, фрагменты 1-3), а также его продольного профиля (рис. 6в), свидетельствующие об углублении русла до 10-15 м на отрезке протяженностью около 400 м ниже организованного водосброса. Изменения рельефа, обусловленные преимущественно механическим изъятием грунта, достигают величин 25 м и более (рис. 6б, фрагмент 4). Среднее изменение высот на площади 68 тыс. м² составляет 9,7 м. Для расчета объема денудации была взята погрешность в два метра. Итоговый объем изъятых материалов (природными и антропогенными процессами) за 13 лет составляет 660 тыс. м³ с погрешностью в ± 150 м³.

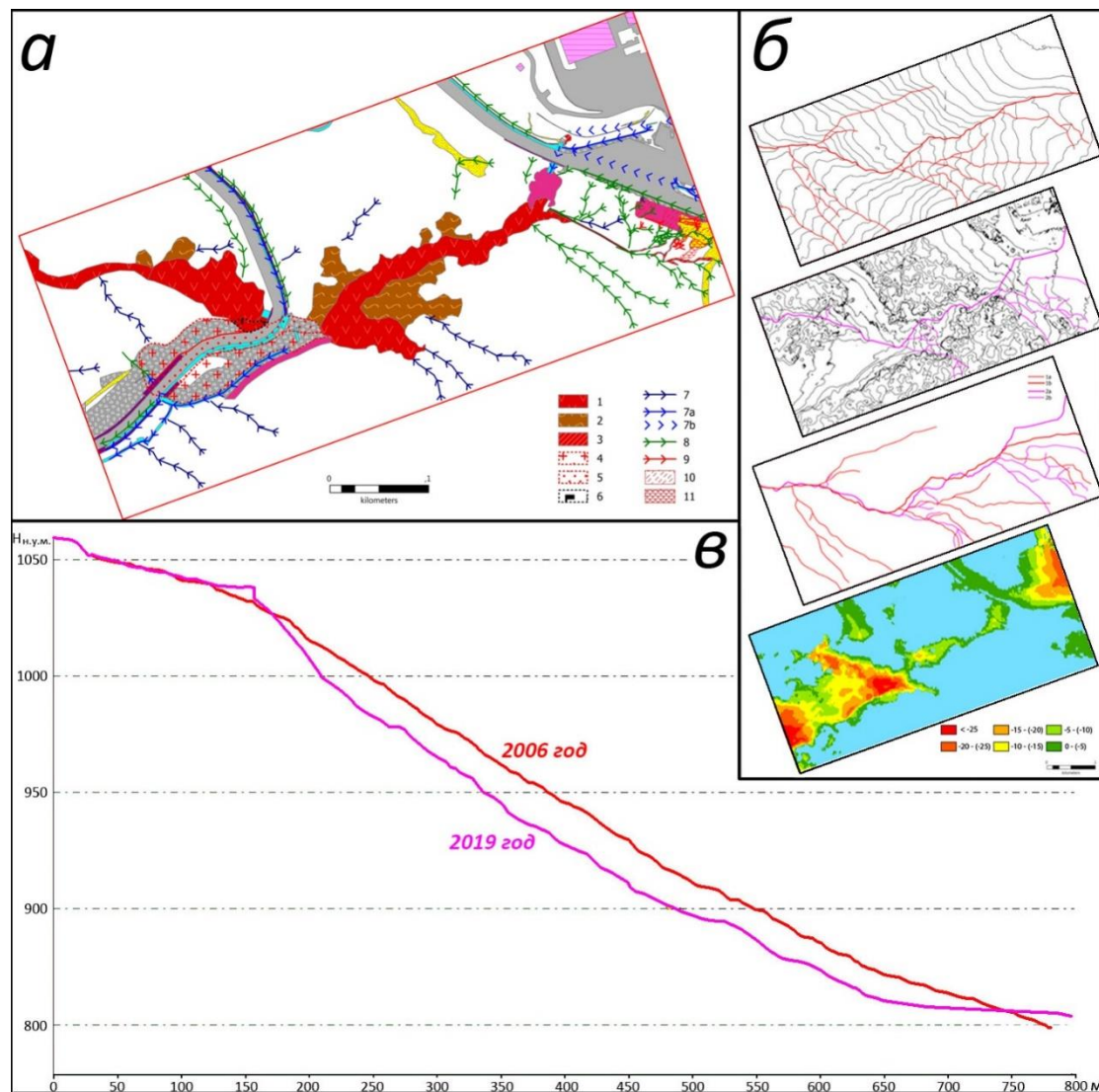


Рис. 6. Развитие эрозионно-селевых процессов в бассейне правого притока ручья Сулимовский: а) схема дешифрирования взаимоотношений ЭГП и антропогенных объектов на сентябрь 2019 г., 1 – селевое русло; 2 – эрозионно-оползневые врезы; 3 – активные овраги; 4 – фрагменты естественной поверхности селевого конуса выноса; 5 – участки расчищенного конуса выноса; 6 – эродированный участок конуса выноса; 7 – фрагменты сохранившейся естественной системы стока; 8 – участки техногенно локализованного (проектного) стока: а – поверхностного; б – подземного; 9 – участки техногенно спровоцированного (нерегулируемого) стока; 10 – активные эрозионные врезы, борозды; 11 – участки площадного смыва; б) развитие эрозионной сети: 1) – по состоянию на 2006 г (сечение горизонталей 2 м); 2) по состоянию на 2019 год (сечение горизонталей 2 м); 3) сравнительная схема русел водотоков 2006 и 2019 года; 4) схема изменения высоты поверхности по результатам сравнения ЦМР 2006 г. и ЦММ 2019 г.; в – изменение профиля основного русла правого притока ручья Сулимовский на ключевом участке №1 за 2006-2019 гг.

Fig. 6. Development of erosion-mudflow processes in the basin of the right tributary of the Sulimovsky stream: a) diagram of the relationship of EGP and anthropogenic objects for September 2019, 1 – mudflow channel; 2 – erosion-landslide slopes; 3 – active ravines; 4 – fragments of the natural surface of the mudflow cone; 5 – sections of the cleared mudflow cone; 6 – eroded section of the mudflow cone; 7 – fragments of the preserved natural erosion system; 8 – sections of technogenically localized (project) runoff: a – surface; b – underground; 9 – areas of technogenically provoked (unregulated) runoff; 10 – active erosion gully, furrows; 11 – areas of washout; 12 – plumes of temporary watercourses; б) state and dynamics of the erosion network: 1) – as of 2006 (isohypces of 2 m); 2) as of 2019 (isohypces of 2 m); 3) comparative scheme of streams configuration in 2006 and 2019; 4) change of surface obtained by the comparison of DEM 2006 and DTM 2019; в - the changing profile of the main channel, 2006-2019 years

По-видимому, активизации эрозионно-селевой деятельности способствовали не только увеличение объема поверхностного стока и его концентрация в верхней части русла, но и углубление местного базиса эрозии на уровне полки дорожного полотна. На этом уровне отмечаются остатки селевого конуса выноса частично расчищенного, а частично прорезанного более поздней эрозией.

В ходе рекогносцировочных маршрутных исследований (рис. 7) были выявлены участки активного развития селевых, оползневых обвальных процессов и подтверждены причинно-следственные связи между активизацией процессов и антропогенной деятельностью. Определены основные факторы антропогенного воздействия на активизацию процессов: 1) целенаправленная концентрация стока водосборными сооружениями; 2) случайная концентрация стока дорожной сетью и другими инженерными сооружениями; 3) увеличение поверхностного стока из-за твердого искусственного покрытия; 4) увеличение поверхностного стока из-за снятия естественного почвенно-растительного покрова; 5) подрезка склонов дорожными полками и выемками, а также горнолыжными трассами; 6) перераспределение стока с водонасыщением оползнеопасных участков. Выявлены участки нерационального строительства, как играющие активную провоцирующую роль, так и не работающие по назначению полностью или частично.

Выводы

Результаты совместного анализа дистанционных и наземных данных показывают, что за период 2006–2019 гг. произошло качественное и количественное (в среднем более чем в 5 раз) увеличение антропогенной трансформированности достигшей 25–30% территории, а по отдельным бассейнам более 50%. В свою очередь произошло качественное и количественное (в среднем более чем в 7 раз) увеличение пораженности ЭГП, достигшей в среднем 0,8% территории, а по отдельным бассейнам 4%. Объем суммарной техногенной и техногенно стимулированной денудации на отдельных участках достигает 0,0006 км³ за 13 лет.

Установлено, что активизации селевой деятельности связана с нерациональной техногенной деятельностью, включающей: 1) некорректные расчеты стока для сети водопропускных и водоотводных сооружений; 2) неправильно спланированная территория, допускающая неконтролируемый сток; 3) недоучет парагенетически взаимосвязанных процессов, интенсификация части которых приводит к саморазвитию комплекса.

Интенсивность развития эрозионно-селевых процессов, значительные скорости развития при непосредственной близости к инженерным сооружениям и транспортным коммуникациям, представляют угрозу для хозяйственной деятельности и жизни людей. Решение проблемы заключается в экстренных мерах по переоценке стоковых характеристик для всей антропогенно-трансформированной территории на основе корректной численной модели, основанной на фактических данных. На её основе необходимо перепроектирование защитных сооружений для эффективной компенсации повышенных от устойчивого природного уровня характеристик стока.

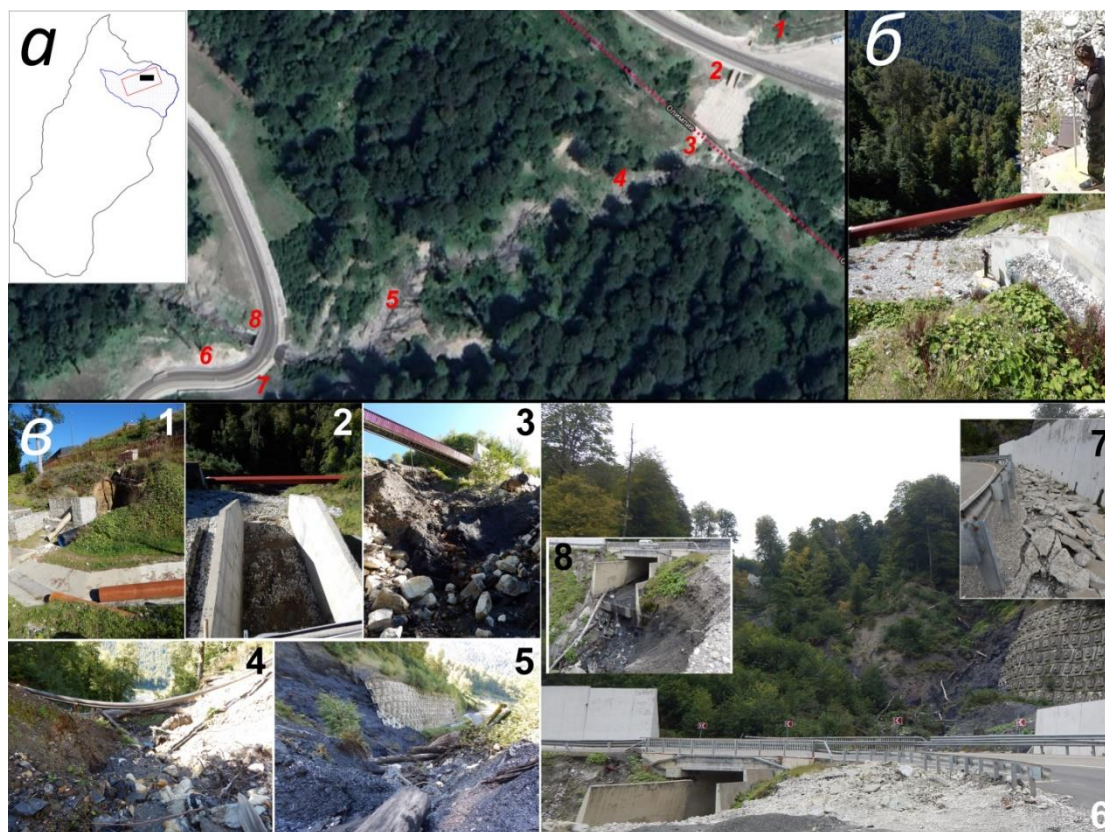


Рис. 7. Наземные исследования на ключевой площадке с активизацией селевых процессов под антропогенным воздействием: а – расположение ключевого участка в иерархической структуре бассейнов, номера точек соответствуют фотографиям ниже; б – организация дистанционной съемки с БПЛА: установка репера и расчет координат для геодезической привязки дистанционной съемки; в – участки наземного обследования: 1 – искусственный водосбор, активный размыв под трубой на склоне; 2 – бетонный водосбросовый лоток под полотном дороги; 3 – верхняя часть селевого вреза под водосбросовым лотком, разрушение анкерного крепления под лотком, боковой размыв под трубой по левому борту; 4 – селевой врез в верхней части, размыв основания водопроводной трубы; 5 – селевой врез в средней части выше дорожного полотна; 6 – участок пересечения притока ручья Сулимовский и дороги, селевой врез на контакте с анкерным противооползневым креплением; 7 – коробление бетонных плит над водопропускным лотком из-за оползневого смещения полотна дороги; 8 – активный размыв основания водопропускного сооружения под полотном автомобильной дороги.

Fig. 7. Ground study on the key area with the activation of mudflow processes under the anthropogenic influence: a - the location of the key area in the hierarchical structure of the basins, the point numbers correspond to the photos below; б - the organization of remote shooting from a UAV: setting a reference point and calculating coordinates for geodetic reference of remote shooting; c - ground points of the study: 1 - artificial catchment, active erosion under the pipe on the slope; 2 - a concrete spillway tray under the roadbed; 3 - the upper part of the debris flow erosion under spillway tray, the destruction of anchoring under the tray, lateral erosion under the pipe on the left side; 4 - debris flow erosion in the upper part, destruction of the base of a water pipe; 5 - debris flow erosion in the middle part above the roadway; 6 - the area of intersection of Sulimovskiy brook tributary and road, debris flow erosion into contact with the anchor anti-landslide mount; 7 - warping concrete slabs over culverts tray from landslide displacement of the roadway; 8 - active erosion of the base of the culverts under the road

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект 19-17-00181.

Список литературы

- Несмеянов С.А. Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа. М.: Недра, 1992. 254 с.
- Овсяченко А. Н. , Хилько А. В. , Шварев С. В., Костенко К.А. Мараханов А.В., Рогожин Е.А., Новиков С.С., Ларьков А.С. Комплексные геолого-геофизические исследования активных разломов в Сочи-Краснополяном районе // *Физика Земли*. — 2013. — С. 116–138.
- Овсяченко А.Н., Меньшиков М.Ю., Рогожин Е.А., Корженков А.М. Циклы сейсмической активности во второй половине голоцена на Западном Кавказе и их связь с этапами цивилизационного развития (на примере верховьев р. Мзымта) // *Геофизические процессы и биосфера*, 2016, Т. 15, № 2, с. 5–38
- Федоренко В.С. Горные оползни и обвалы, их прогноз. Издательство Московского университета. 1988 г. 211с.
- Шолпо В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А. Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука, 1993. 192 с.
- Шварев С.В. Детальное геоморфологическое картографирование в верховьях р. Мзымты // *ИнтерКарто/ИнтерГИС 15: Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт*. М-лы Международной конференции, Пермь, Гент, 29 июня – 5 июля 2009 г., Том 2, Пермь, 2009, с.462-464.



Использование данных дистанционного зондирования Земли при среднемасштабном геоинформационном картографировании селевой опасности Байкальской горной страны

В.П. Ступин, Л.А. Пластинин, Б.Н. Олзоев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия, stupinigu@mail.ru, plast@istu.edu, icob_irk@mail.ru

Аннотация. Анализируются источники и возможности находящихся в свободном доступе материалов дистанционного зондирования, цифровых моделей рельефа и программ по их обработке при геоинформационном картографировании селевой опасности Байкальской горной страны. Рассматриваются дешифровочные признаки селевых потоков, их морфологические, морфометрические и возрастные региональные закономерности и особенности. Показывается приуроченность селей к крутым сбросовым макросклонам горных хребтов при их сочленении с межгорными котловинами. Отмечается приуроченность селей к бассейнам I-II порядков, а селевых паводков к бассейнам III порядка и выше. Оценивается степень пораженности селями различных частей региона. Приводятся макеты авторских карт селевой опасности для наиболее селеопасных территорий.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, геоинформационное картографирование, селевая опасность

Ссылка для цитирования: Ступин В.П., Пластинин Л.А., Олзоев Б.Н. Использование данных дистанционного зондирования Земли при среднемасштабном геоинформационном картографировании селевой опасности Байкальской горной страны. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 541–552.

Use of remote sensing data for medium-scale geoinformation mapping of debris-flow hazard in the Baikal mountain country

V.P. Stupin, L.A. Plastinin, B.N. Olzoev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, stupinigu@mail.ru, plast@istu.edu, icob_irk@mail.ru

Abstract. The sources and possibilities of freely available remote sensing data, digital terrain models and programs for their processing in the geoinformation mapping of debris-flow hazard of the Baikal mountain country are analyzed. Decoding features of debris-flows, their morphological, morphometric and age-related regional patterns and features are considered. It is shown that debris-flows are confined to the steep macroslopes of mountain ranges at their junction with intermountain basins. It is noted that debris-flows are confined to basins of the third order, and debris floods to basins of the third order and higher. The degree of contamination of various parts of the region by debris-flows are estimated. Layouts of author's maps of debris-flow hazard for the most mudslide-prone territories are given.

Key words: remote sensing data, geoinformation mapping, debris-flow hazard

Cite this article: Stupin V.P., Plastinin L.A., Olzoev B.N. Use of remote sensing data for medium-scale geoinformation mapping of debris-flow hazard in the Baikal mountain country. In: Chernomoretz S.S., Viskhadzhiya K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: "Promotion" LLC, 2020, p. 541–552.

Введение

Освоение и социально-экономическое развитие Сибири требует основательных, всесторонних и надежных географических знаний о природных процессах и явлениях этого обширного и труднодоступного физико-географического региона. Особенно это касается динамичных, опасных и непредсказуемых процессов, одним из которых являются селевые. В полной мере это относится к Байкальской горнотаежной стране и, особенно, к территориям ее нынешнего и перспективного освоения: Байкало-Амурской и транссибирской железнодорожным магистралям и полосам их инфраструктуры, федеральной автомобильной дороге «Сибирь», линиям электропередач, нефтепроводам и т.п., где игнорирование реалий селевой обстановки может привести к катастрофическим последствиям.

Одним из основных методов получения географических знаний является картографирование, которое, в свою очередь, трудноосуществимо без широкого привлечения материалов и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Интеграция картографических и дистанционных методов в среде ГИС положена в основу картографо-космического мониторинга природных процессов и явлений, который является обязательным на региональном уровне [Пластинин и др., 2016].

В полной мере вышесказанное относится к картографированию пространственного распределения селей с последующей оценкой их опасности и рисков [Ступин и др., 2017].

В то же время, реалиями сегодняшнего дня является постоянное сокращение финансирования научных разработок, что, вкупе с обширностью исследуемой территории и дороговизной коммерческих данных ДЗЗ высокого разрешения, а также программ по их обработке, создает существенные трудности при картографировании. Поэтому особую актуальность представляет изыскание некоммерческих материалов ДЗЗ, ЦМР и программного обеспечения, пригодных для картографирования селей.

Цель и задачи исследования

В связи с изложенным выше, целью исследования стало изучение возможностей использования космических снимков свободного доступа, бесплатных ЦМР и специализированного программного обеспечения с открытым кодом для картографирования селевой опасности Байкальской горной страны, с их апробированием на районах социально-экономического освоения региона. Для достижения поставленной цели нужно было решить следующие задачи:

- определение состава селевых явлений, отображающихся на комических снимках;
- уточнение дешифровочных признаков селевых явления;
- выяснение приуроченности выявленных явлений к элементам ландшафта;
- определение степени пораженности территории современными (отобразившимися на снимках) селями, особенно представляющим угрозу для людей, техники и сооружений.

Исходные материалы и программное обеспечение

Справедливости ради, следует отметить, что наряду с изложенными выше проблемами и трудностями нынешнего этапа изучения и картографирования селевых процессов и явлений, в настоящее время мы имеем целый ряд новых информационных и технических возможностей, о которых совсем недавно можно было только мечтать. Это, прежде всего, наличие полного покрытия территории интереса разнотипными, одновременными и разномасштабными цифровыми материалами ДЗЗ, а также хорошего программного обеспечения по их обработке. При этом, значительная часть этих материалов распространяется бесплатно, а программные средства имеют свободные коды доступа. Разумеется, с известной степенью потери качества выходных продуктов.

На различных этапах картографирования в разной степени используются следующие материалы ДЗЗ и программные комплексы (ПК):

1. Цифровые модели рельефа SRTM и ALOS. Источники: <http://dwtkns.com/srtm> и <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>. Эти данные можно обрабатывать или на коммерческом ПК ArcGIS или на бесплатном SAGAGIS в целях выделения водоразделов и оконтуривания селевых бассейнов, нанесения тальвегов селевых русел, а также для определения их морфометрических характеристик;

2. Сканерные снимки Landsat-7, Landsat-8, Resourcesat-1, 2 и Sentinel-2 и др. Источники бесплатных онлайн-ресурсов:

- EarthExplorer от USGS <https://earthexplorer.usgs.gov/>,
- EO Browser и Sentinel Playground <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>,
- Карта России: <https://satmaps/info>, <https://satmaps.ru/>,
- Спутниковая карта России. Яндекс карты <https://yandex.ru/maps/>.

Указанные снимки обрабатываются или на коммерческих ПК ENVI, ArcGIS или на бесплатном SAGAGIS с тем, чтобы выявить современные склоновые и долинные сели, выполнить их координатную привязку (используя файлы GeoTIFF), отработать каталоги дешифровочных признаков для разных спектральных каналов, а также для панхроматических и синтезированных изображений.

3. Промежуточные материалы, полученные в результате обработки данных ДЗЗ с применением ПК. Их используют для отработки метрического и семантического содержания среднемасштабных (1:200 000–1:500 000) карт селевой опасности в ПК «Панорама» или MapInfo на подложке в виде цифровой топографической карты.

Дешифрирование космических снимков

Дешифрирование селевых явлений по материалам ДЗЗ – основной метод при их картографировании, позволяющий выявлять, определять положение, оконтуривать и определять качественные и количественные характеристики селевого рельефа и отложений с учетом ландшафтной специфики исследуемой территории.

Возможности и детальность дешифрирования определяются масштабом и пространственным разрешением космических снимков на местности. По снимкам выявляют селеопасные районы (по следам прошедших ранее селей), изучают природные условия и геологическое строение этих районов, определяют источники и направления поступления в селевые очаги твердой и жидкой составляющих селей. По завершении дешифрирования выполняется районирование и картографирование территории, рассчитывается степень пораженности селями и оцениваются возможные риски от их прохождения.

Фиксировать прохождение селевого потока и изучать его динамику с помощью методов ДЗЗ в режиме реального времени практически невозможно, поэтому необходимо использовать материалы повторных съемок.

При выявлении и районировании селеопасных районов по космическим снимкам главным источником информации о них являются следы прошедших ранее селей. Проще всего дешифрируются селевые накопления, заполняющие расширенные участки речных долин или образующие конусы выноса у подножия гор при выходе на предгорные равнины или межгорные котловины. Свежие селевые накопления, лишены растительности и отображаются на снимках почти белым светлым или даже белым тоном, древние, покрытые почвенным и растительным покровом, более темным. Древние селевые отложения часто частично размывы или расчленены эрозией. Для территории исследования характерны водокаменные, глыбовые сели, которые дешифрируются по характерной зернистой текстуре, образованной освещенными с одной стороны глыбами и валунами (рис. 3b).

В процессе дешифрирования удобно пользоваться таблицей дешифровочных признаков селевых явлений. Дешифровочные признаки подразделяются на прямые (форма, тень, размер, тон, цвет, интегральная и спектральная яркость, текстура, структура, рисунок) и косвенные (ландшафтно-индикационные). Для каждой

морфодинамической зоны (зарождения, транзита, аккумуляции) селя характерен свой специфический набор дешифровочных признаков.

Для зоны зарождения (очага) характерны следующие формы: узкие V-образные врезы на выпуклых перегибах склонов; водосборы с характерным сходящимся рисунком белых, почти белых или светло-серых полос склоновых селевых рытвин и борозд. Для изображений русла в месте зарождения селя характерна резкая смена серого тона на светло-серый и почти белый на темном окружающем фоне. В качестве дополнительных дешифровочных признаков служат сплывы и оползни на склонах, прилегающих сверху к молодому селевому врезу (рис. 1).

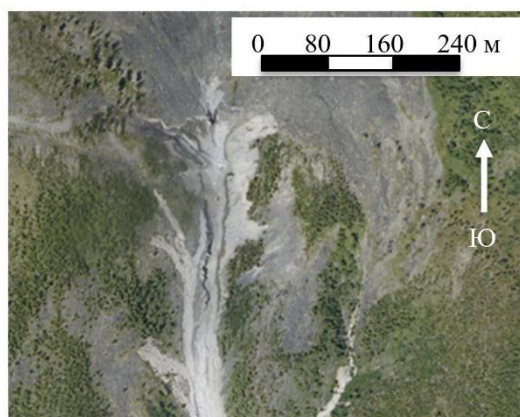


Рис. 1. Зона зарождения селя 2014 г. в районе пос. Аршан. Характерные признаки – V-образный врез с четкими бровками, светлый тон на темном фоне, оползни-сплывы по бортам вреза

Fig. 1. Zone of origin 2014 debris flow in the area of the Arshan Settlement. Characteristic features – V-shaped incision with clear edges, light tone on a dark background, landslides and earthflows along the sides of the incision

Для зоны транзита прямыми дешифровочными признаками являются характерные формы селевого рельефа – широкие русла, часто занимающие все дно долины, с резкими и четкими бровками бортов; выпуклые селевые гряды и уплощенные полосы селевых отложений, фрагменты селевых террас, прислоненных к бортам селевого вреза; чередование суженных и расширенных (четкообразная форма) участков с промежуточными полями аккумуляции; выбросы обломочного материала за пределы селевого русла в местах его резких поворотов. Тон изображения – почти белый и светло-серый, русло серое. Рисунок линейно вытянутый, фестончатый в местах заплесков и обрушений подмытых берегов вдоль бровки селевого вреза. В селевой массе иногда заметны вывороченные стволы деревьев. Старые селевые русла дешифрируются по более светлому тону первичных кустарников, тополей, осин и берез среди темного лиственничника и кедрового стланика (рис. 2).

Зоне аккумуляции часто (но не всегда) присуща характерная формой молодого конуса в виде веера или узкого сектора с рукавами (гусиная лапка). Тон очень светлый и светлый для недавно прошедших селей и серый для более старых. Рисунок поверхности конуса выноса струйчатый, образованный переплетением пересохших русел и островов селевых отложений. Также характерны одиночные отдельные крупные глыбы или их цепочки. Для разновозрастных конусов выноса характерны серии наложенных друг на друга контуров, отличающихся по тону – чем светлее, тем моложе (рис. 3).

Возраст селей, дешифрируемых на космических снимках

О возрасте селевых явлений, выявляемых на космических снимках, можно судить по степени сохранности их прямых и косвенных дешифровочных признаков, зависящей, прежде всего, от скорости зарастания форм и отложений селевого генезиса растительностью. Таким образом, тип и динамика растительных сукцессий являются

важным и надежным индикатором при определении времени схода селей, что, собственно, и положено в основу фитоиндикационных методов датировок: фитоценологических, дендрохронологических и лишенометрических, из которых при использовании данных ДЗЗ хорошо применим первый из перечисленных [Лехатинов, 2018].

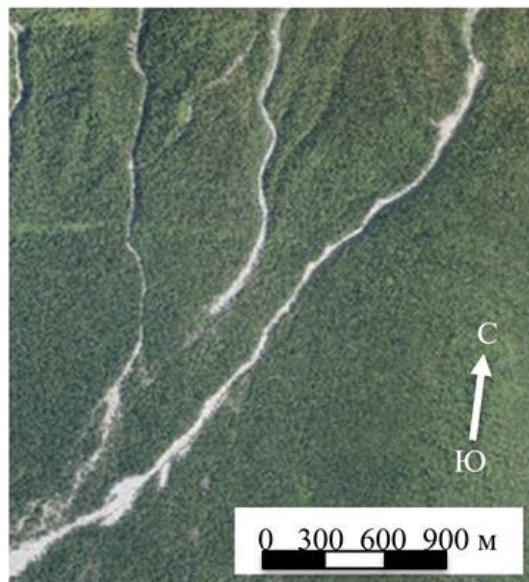


Рис. 2. Зона транзита селя 2014 г. в районе пос. Аршан. Дешифрируется по резкому контрасту белого тона селевого русла на темном фоне таежной растительности. Характерна четкообразная форма русел и наличие «карманов» заплесков селевого материала

Fig. 2. The debris flow transit zone of 2014 in the area of the village. Arshan. It is decoded by the sharp contrast of the white tone of the mudflow channel against the dark background of taiga vegetation. The distinctive form of channels and the presence of “pockets” of splashes of mudflow material are characteristic

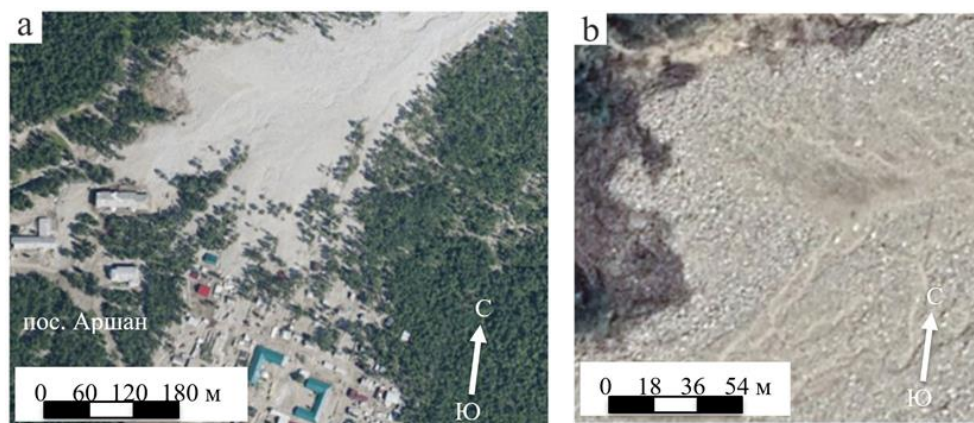


Рис. 3. Зона аккумуляции селя 2014 г. в районе пос. Аршан: а – конус выноса в форме «гусиной лапки», сложенный валунным материалом (верхняя часть) и шлейф песчано-дресвяных отложений (нижняя часть); б – зернистая структура и струйчатый рисунок поверхности валунных отложений конуса выноса

Fig. 3. The mudflow accumulation zone of 2014 in the area of the village Arshan: a - a cone in the form of a “goose foot”, folded with boulder material (upper part) and a plume of sand and crushed stone deposits (lower part); b - granular structure and stream pattern of the surface of the boulder deposits of the removal cone

В горнотаежном поясе, представленном светлохвойной тайгой, «затушевание» физиономических черт селевых явлений происходит за счет сукцессий фитоценозов порослевой, кустарниковой, жердевой и древесной первичной (осина) и вторичной (лиственница) растительности на их поверхности. Форма, тон, цвет и структура растительного покрова на снимках позволяют определить его сомкнутость, возрастной и породный состав и, тем самым, выявить положение, тип и возраст прошедших селевых потоков. Отсутствие растительности или наличие на конусах выноса кустарника, а также молодого (порослевого и жердевого) леса, указывает на сход селя не более 10-30 лет тому назад. В дальнейшем лиственница вступает в фазу быстрого роста (до 1 м/год) и формы селевого рельефа полностью зарастают.

В подгольцовом поясе основным видом растительности является кедровый стланик, который относится к медленнорастущим (около 0,15 м в год) растениям. Поэтому физиономические черты селевого генезиса сохраняются на снимках в несколько раз дольше.

В гольцовом и нивальном поясах тон селевых отложений и форм рельефа определяет степень их выветривания, а также зарастания кедровым стлаником, мхом и лишайником. О скорости процесса зарастания можно судить на примере конуса выноса селя, сошедшего в 1969 году с правого борта долины р. Сыгыкта напротив устья р. Ледниковая (хребет Кодар). На аэрофотоснимке 1971 года селевые отложения прекрасно дешифрируются по своей характерной форме («гусиная лапка») и белому тону (рис. 4а). В 1978 году, когда один из авторов статьи выполнял теодолитную съемку этого конуса, он только начинал зарастать. На фрагменте снимка со спутника LandSat-8, полученного в 2019 году видно, что конус выноса полностью покрылся растительностью и слился с общим тоном подгорного пролювиального шлейфа (рис. 4б).

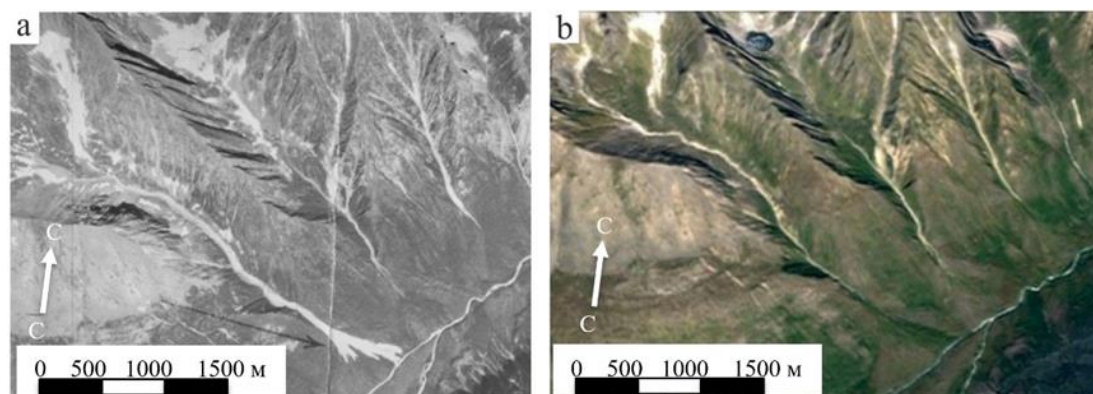


Рис. 4. Динамика зарастания конуса выноса селя 1969 г. (долина р. Сыгыкта, хребет Кодар): а — аэрофотоснимок 1971 г., б — космоснимок 2019 г.

Fig. 4. Dynamics of overgrowing of the 1969 debris flow cone (Sygykta river valley, Kodar Range): a - aerial photograph of 1971, b - space photograph of 2019. Designations: arrow – the cone of the debris flow

Показательным примером зарастания селевых врезов, террас, гряд и конусов выноса является северный макросклон хребта Хамар-Дабан. После 1971 года, когда по многим речкам, впадающим в Байкал, произошел массовый сход селевых потоков, формы и отложения селевого генезиса настолько заросли пойменной древесно-кустарниковой растительностью с преобладанием быстрорастущего (более 1 м/год) тополя душистого, что проявления этих селей практически невозможно обнаружить на современных снимках.

С другой стороны, внешний облик форм и отложений серии аршанских селей 2014 года (хр. Тункинские Гольцы) за прошедшие без малого пять лет практически не изменился, и они все так же уверенно дешифрируются на космических снимках. Другой

пример хорошей сохранности – серия селей 2001 года в районе озер Большое и Малое Леприндо (хр. Кодар), которые только начали зарастать.

Таким образом, в исследуемом регионе, по материалам ДЗЗ по прямым дешифровочным признакам можно уверенно распознавать селевые явления 20–25-летней давности. Выявление более ранних селей (в пределах 25–40 лет), а также выделение разновозрастных генераций одного и того же селевого бассейна (например, конуса выноса селевых отложений на реках. Анамакит и Анамакиткан (Верхнеангарский хребет), требует подключения ландшафтных признаков. Для идентификации еще более ранних селей (до 100–200 лет) необходимо привлекать полевые дендрохронологические и лихенометрические методы [Лехатинов, 1967].

Селевая опасность территории по данным дистанционного зондирования

Приведенный ниже обзор селевой опасности региона основан на срезе данных, полученных с помощью материалов дистанционного зондирования из космоса, то есть на селевых явлениях, произошедших за последние несколько десятков лет. Эти относятся, например, к уже рассмотренной выше ситуации на территории заведомо селеопасного южного Прибайкалья [Лапердин и др., 2016], где, при высокой потенциальной угрозе схода селей с северного макросклона хребта Хамар-Дабан, на космических снимках не наблюдается следов современных селевых потоков. Тем не менее, даже короткий временной срез в 20–30 лет может быть полезен при оценке селевой опасности и рисков региона.

Становой участок Байкало-Амурской магистрали

Байкальский хребет. Участок Даван-Нижнеангарск. На этом участке проходит трасса железнодорожной магистрали и ее автодублера. Здесь расположен Байкальский тоннель длиной 6686 м, проложенный под перевалом Даван Байкальского хребта, а также четыре мысовых тоннеля с эстакадами и виадуками на побережье Байкала между Северобайкальском и Нижнеангарском длиной 414, 1843, 1706 и 1344 м. Современных проявлений селевой деятельности на снимках не отмечается. В районе перевала Даван видны следы схода лавин, а на прижимном участке Байкала встречаются осыпные склоны.

Верхнеангарская котловина. На перегоне Ангоря-Анамакит (1181–1227 км) трасса БАМ близко подходит к южному участку Верхне-Ангарского хребта, который в гольцовой зоне носит ярко выраженный альпийский характер. Высоты в пределах участка достигают 2629 м. Склоны водоразделов круты, у их подножий формируются обширные каменистые осыпи. Гребни хребта возвышаются над дном долин на 1200–1300 м. Граница леса проходит на высоте 1000–1200 м, а кедровый стланик поднимается до 1800 м. Практически все распадки водотоков, стекающих с крутого юго-восточного тектонического склона хребта селеопасны. На космических снимках видны следы многочисленных свежих селей по руслам речек Огней, Подкаменный, Глыбовый, Анамакит, Ньюмиянда, Анамакиткан и др. Конуса выноса некоторых из них доходят до железнодорожного полотна и автодублера БАМа и представляют реальную угрозу путям и мостовым сооружениям, несмотря на имеющиеся на этих объектах селезащитные сооружения (рис. 5).

На рис. 6 представлена карта селевой опасности описанного выше макросклона. Сплошной заливкой представлены литодинамические пояса: денудационный, объединяющий альпийский, гольцовый и горнотаежный высотные уровни (1); сегмент аккумулятивных пологонаклонных подгорных шлейфов (2); сегмент аккумулятивных низких террас и плоских пойм (3). На карте также показаны: русло Нижней Ангары (4) и русла водотоков не несущих следы схода селевых потоков (5). Граница леса показана знаком (6). Стрелками выделены выявленные по снимкам свежие селевые русла с конусами выноса (7) и полузаросшие селевые русла более раннего возраста (8). Также на

карте представлены водоразделы речных бассейнов (9) и трасса БАМ (10). Площади водосборов в кв. км показаны знаком (11).



Рис. 5. Селеносные водотоки юго-восточного склона Верхнеангарского хребта. Космоснимок со спутника Landsat-8, 2019 г.

Fig. 5. Debrisflow risk watercourses of the southeastern slope of the Upper Angara Range. Satellite image from Landsat-8, 2019

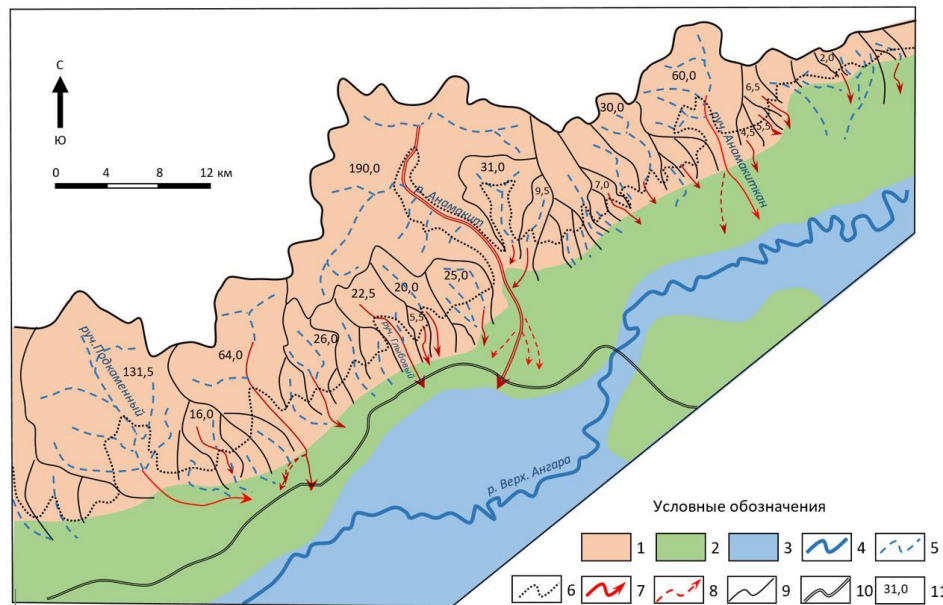


Рис. 6. Карта селевой опасности участка Верхнеангарского хребта. Пораженность выявленными по космоснимкам селями составляет 55%. Обозначения: 1 — денудационный литодинамический пояс, объединяющий альпийский, гольцовый и горнотаежный высотные уровни; 2 — сегмент аккумулятивных пологонаклонных подгорных шлейфов; 3 — сегмент аккумулятивных низких террас и плоских пойм; 4 — русло р. Верхняя Ангары; 5 — русла водотоков, не несущих следы схода селевых потоков; 6 — граница леса; 7 — выявленные по снимкам свежие селевые русла с конусами выноса; 8 — полузаросшие селевые русла более раннего возраста; 9 — водоразделы; 10 — трасса БАМ; 11 — площади водосборов, км².

Fig. 6. Map of the debris flow hazard of the North Angara Range. The prevalence of debris flows revealed by the pictures is 55%. Designations: 1 - denudation lithodynamic belt, combining alpine, alpine and mountain taiga altitude levels; 2 - a segment of accumulative gently sloping piedmont loops; 3 - segment of accumulative low terraces and flat floodplains; 4 - river bed Upper Angara; 5 - channels of watercourses that do not carry traces of debris flows; 6 - forest border; 7 - fresh debris flow channels with drift cones identified from the pictures; 8 - semi-overgrown debris flow channels of an earlier age; 9 - watersheds; 10 - BAM route, 11 - catchment areas in km²

Северо-Муйская котловина. В западной части котловины, от Северомуйска на восток отмечается серия селевых выбросов как с южного склона Северомуйского хребта, так и с северного склона Муяканского, причем большая часть последних достигает трассы БАМ и ее автодублера и проходит под мостами. В средней части котловины железнодорожная трасса и параллельная ей автодорога проходят достаточно далеко от селеопасных макросклонов, но на правом берегу Витима приближается к северному склону Южно-Муйского хребта со следами свежей селевой деятельности (рис. 7). Так, в 3,5 км от Витима, дешифрируется свежее русло и конус выноса небольшого селевого потока, проходящего под железнодорожным и автомобильным мостами. В узкой долине Сюльбана на снимках заметны свежие селевые конуса выноса в устье р. Саку (правый борт долины Сюльбана) и в устье безымянного ручья напротив устья р. Балбухта (левый борт).



Рис. 7. Сели на северном склоне Муяканского хребта. Космоснимок со спутника Landsat-8, 2019 г.

Fig. 7. Debris flow of the northern slope of the Muyakan Range. Satellite image from Landsat-8, 2019

Чарская котловина. Потенциально селеопасные участки приурочены к короткому, но крутому южному макросклону хребта Кодар. На космических снимках со спутника GeoEye хорошо отобразились следы селевой деятельности в районе оз. Большое и Малое Леприндо. Здесь, с вплотную подходящего к БАМу крутого склона хребта Кодар 27 июля 2001 года произошел синхронный сход серии селевых потоков, состоящих из смеси воды и сорванного моренного материала, оставшегося от Сюльбанского ледника, и частично повредивших полотно железной дороги [Макаров, 2012] (рис. 8).



Рис. 8. Частично заросшие следы схода серии селевых потоков 2001 г. в районе озер Большое и Малое Леприндо. Космоснимок со спутника GeoEye-1, 2019 г.

Fig. 8. Partially overgrown traces of the deletion of a series of debris flows in 2001 in the area of the Lakes Bolshoye and Maloye Leprindo. Satellite image from GeoEye-1, 2019

При дальнейшем движении на восток трасса БАМ смещается на юг, переходит на правый берег р. Чара и удаляется от селеопасных склонов Кодара.

Баргузинская котловина. Наиболее селеопасен восточный макросклон Баргузинского хребта, где практически из всех поперечных долин III-IV порядков регулярно «выстреливают» обычные и селевые паводки, следы которых хорошо видны на космических снимках.

Тункинская долина. В Тункинской долине свежие селевые формы выявляются на снимках, пожалуй, лучше, чем на остальной территории Байкальской горной страны, однако они не столь известны, так как расположены достаточно далеко от обжитых мест и крупных транспортных магистралей [Ступин и др., 2018]. Больше всего следов селей обнаруживается в районе массива Мунку-Сардык в районе слияния Белого и Черного Иркута и по крутому сбросовому южному макросклону альпинотипных Тункинских гольцов (рис. 10) в районе поселка Аршан.



Рис. 9. Руслу селевых паводков на конусах выноса Баргузинского хребта у улуса Алла (Республика Бурятия). Космоснимок со спутника Landsat-8, 2019 г.

Fig. 9. The channels of debris flows on the cones of the removal of the Barguzinsky ridge near the village Alla. Satellite image from Landsat-8, 2019

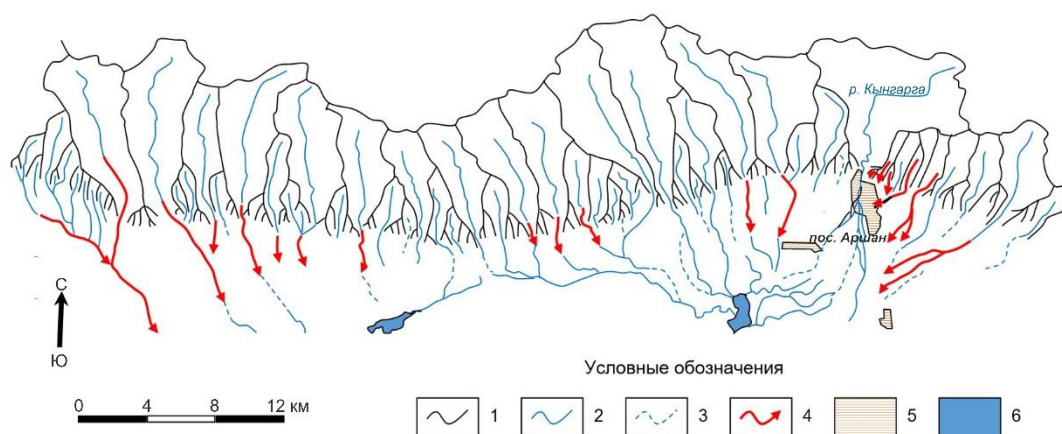


Рис. 10. Пораженность селями южного склона хребта Тункинские Гольцы. Обозначения: 1 — водоразделы, 2 — русла постоянных водотоков, 3 — русла временных водотоков, 4 — русла со следами прохождения селей, 5 — селитебные территории, 6 — озера

Fig. 10. The impact of debris flow on the southern slope of the Tunkinsky Goltzy ridge. Designations: 1 - watersheds, 2 - channels of permanent watercourses, 3 - channels of temporary watercourses, 4 - channels with traces of debris flows, 5 - residential areas, 6 - lakes

Морфометрический анализ

Количественные морфометрические показатели выявленных селевых явлений определялись по ЦМР и космическим снимкам, которые позволяют получить длины, уклоны и высоты селевых русел как для селевого бассейна, в целом, так и для их денудационно-транзитных и аккумулятивных частей. Также можно определить площади водосборов как по земной поверхности, так и в проекции на горизонтальную плоскость.

В таблице приведены данные по некоторым типичным селям региона.

Таблица. Морфометрические характеристики типичных селевых бассейнов и селевых русел

Table. Morphometric characteristics of typical debris flow basins and channels

Положение	Площадь бассейна, км ² / порядок водотока	Общая длина, м	Денудационно-транзитная часть		Аккумулятивн. часть		Превышение, м
			длина	уклон	длина	уклон	
Тункинские гольцы, Аршан, р. Безыманный	2.0 / I	3,38	2,46	48/33	0,92	29/13	1783-1012-904
Тункинские гольцы, Аршан, 2-я Шихтолайка	1.2 / I	4,56	3,20	44/23	1,36	16/9	1819-982-854
Тункинские гольцы, Аршан, р. Артемова	2.4 / I	6,30	4,30	41/25	2,00	22/10	1861-1000-813
Сев.-Муйский хр., лев. приток р. Подкаменный	16,6 / II	12,51	9,27	30/8	3,24	16/6	1298-679-490
Северо-Муйский хр, р. Глыбовый	27.3 / II	7,0	4,79	47/21	2,21	19/10	1743-706-488
Кодар, озеро Б. Леприндо, восточный сель	5.5 / II	3,53	2,49	61/31	1,04	19/8	1944-1080-978
Кодар, приток р. Сыгыкта против устья, р. Ледниковой	5.5 / II	3,0	2,4	57/31	0,6	32/18	1823-1162-1050

Выводы

– Космические снимки открытого доступа отображают широкий диапазон селевых потоков, вплоть до мелких, выносящих 1-5 тыс. м³, и, совместно с ЦМР и топографическими картами, позволяют выявлять, дешифровать и картографировать их морфологические особенности: селевые бассейны, зоны зарождения, транзита и аккумуляции.

– Прямые дешифровочные признаки позволяют выявлять селевые явления не старше нескольких десятков лет, следы селевой деятельности более раннего возраста можно выявлять на снимках только по косвенным (ландшафтным) признакам с привлечением материалов полевых исследований.

– Больше всего *свежих* долинных селепроявлений, несущих характерные черты водо- и грязекаменных потоков (селевые врезы, селевые гряды и конуса выноса), зафиксировано в руслах водотоков первого, реже второго порядков, сходящих с крутых сбросовых макросклонов Тункинских Гольцов, Баргузинского, Верхнеангарского, Северо-Муйского хребтов и хребта Кодар, расположенных в пределах бассейнов

площадью до 50 км², имеющих длины до 10 км и средние уклоны порядка 30° для денудационной и 15° для аккумулятивных частей; эти долины наиболее опасны для железных и автомобильных дорог, ЛЭП, нефтепроводов и населенных пунктов, зачастую расположенных в зоне подгорных аккумулятивных пролювиальных шлейфов.

– Свежих селевых явлений на наиболее опасных участках южного макросклона хребта Хамар-Дабан по космическим снимкам не наблюдается из-за густой растительности, покрывшей следы последних залповых выбросов селей, сошедших еще в 1971 году; это означает, что селевое затишье в этом районе затянулось и вероятность активизации селевых процессов возрастает все больше и больше.

– Водотоки более крупных порядков (третьего, четвертого), такие как Кынгарга, Тья, Анамакит и т.п., обычно несут следы селевых паводков в виде полос селевой аккумуляции вдоль расширенных пойм при отсутствии конусов выноса.

– Многочисленные *свежие* склоновые сели прекрасно выявляются по космическим снимкам в пределах элементарных бассейнов (площадью 1–2 км²) приводораздельных частей высоких альпинотипных хребтов на прямых и коротких склонах каров и трогов в гольцовой зоне; они представляют собой лишь потенциальную опасность, вследствие практической необжитости занимаемой территории (за исключением участков, примыкающим к пробитым в межгорных перемычках тоннелей – Байкальского, четырех Мысовых, Северо-Муйского, Кодарского), где они представляют определенную опасность наряду с парагенетическими лавинами, осыпями и оползнями.

Список литературы

- Лапердин В.К., Леви К.Г., Имаев В.С., Молочный В.Г. Опасные геологические процессы в юго-западном Прибайкалье. – Иркутск, 2012. – 206 с.
- Лехатинов А.М. Дендрологический метод установления времени и периодичности прохождения селевых потоков. Вестник МГУ. Серия география. 1967, 2. – с. 140-142.
- Лехатинов А.М. Природные индикаторы распространения и активности проявления селей // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Материалы V Международной конференции. – Грузия, Тбилиси, 2018. с. 438-443.
- Макаров С.А. Сели Прибайкалья – Иркутск, 2012. – 111 с.
- Пластинин Л.А., Ступин В.П. Программы картографо-космического мониторинга природных и антропогенных процессов и явлений (на примере Байкальского региона) // Мат-лы Всеросс. науч.-практ. конф. «Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов в области топогеодезического и навигационного обеспечения». – СПб, 2016. – с. 246-252.
- Ступин В.П., Пластинин Л.А., Олзоев Б.Н. Новые принципы и приемы системного картографирования селевой опасности Южного Прибайкалья с использованием ГИС и ДЗЗ из космоса // От карты прошлого – к карте будущего: сб. науч. тр. – Пермь, 2017. Т. 2. – с. 184-195.
- Ступин В.П., Пластинин Л.А., Олзоев Б.Н. Морфодинамическое картографирование селевой опасности гор Южного Прибайкалья. – Геориск, 2018. № 4 – с. 86-95.



Ground-based slope stability radar for the discrimination of superficial deformation process and their correlation with environmental triggering factors

A. Torres¹, E. Kanaev²

¹GroundProbe Pty, Windsor, Australia, Andrei.Torres@groundprobe.com

²GroundProbe Russia & CIS, Moscow, Russia

Abstract. Landslides occur in a wide variety of forms and environments. These are a direct expression of the geology, rheology, and destabilizing forces of the slope. In particular, landslides prone to abrupt drops in shear resistance over one or more surfaces of rupture pose a major threat to vulnerable communities. Precursory signs may not be obvious and evacuation times are virtually inexistent once the failure phase is initiated. Therefore, prediction and early warning are the only viable options [Kilburn, 2003]. The advent of slope stability radar technologies to monitor slope movement opened numerous applications including geotechnical hazards mitigation. The interferometric radar technology was well accepted in the mining industry since 2001, in which a system to identify and quantify the slope failure hazard is a fundamental requirement to safely sustain production [Bellett, 2013]. This technology has started to find its way to deal with geotechnical hazards in natural geotechnical hazards and civil applications as well. Due to variability of the materials involved in slopes instability and their instability mechanisms, in many cases it is difficult to characterize their behavior through traditional geotechnical modeling methods and monitoring tools when a more practical approach is required in order to make sounding decisions regarding risk management. We present a case study in which the technology has probe to be efficient for identifying and managing the geotechnical hazards in a civil application. This case is related to unstable slopes that at given moment represented a high risk to main public facilities. We demonstrate that the radar data could be used not only as a warning system but also it allows to differentiate different dynamics and processes in challenging environments and to establish their correlation with environmental triggering factors such as precipitation events and remediation works.

Key words: landslide, risk management, debris flow, slope stability radar

Cite this article: Torres A., Kanaev E. Ground-based slope stability radar for the discrimination of superficial deformation process and their correlation with environmental triggering factors. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 553–564.

Наземный радар для определения устойчивости склонов при распознавании поверхностных деформационных процессов и их корреляции с внешними триггерными факторами

A. Торрес¹, Е. Канаев²

¹GroundProbe Pty, Вундзор, Австралия, Andrei.Torres@groundprobe.com

²GroundProbe Россия и СНГ, Москва, Россия

Аннотация. Оползни встречаются в самых разных формах и природных условиях. Они являются прямым выражением геологического строения, реологических свойств и дестабилизирующих сил склона. В частности, оползни, подверженные резким скачкам сопротивления к сдвигу по одной или нескольким плоскостям, представляют собой серьезную угрозу для уязвимых населенных пунктов.

Прогностические признаки могут быть неочевидны, а времени для эвакуации после начала фазы обрыва практически нет. Поэтому прогнозирование и раннее предупреждение являются единственными жизнеспособными вариантами [Килберн, 2003]. Появление радиолокационных технологий определения устойчивости склонов для мониторинга склоновых подвижек открыло многочисленные возможности, включая геотехнические мероприятия по предупреждению последствий. Интерферометрическая радиолокационная технология успешно применяется в горнодобывающей промышленности с 2001 г., в которой система определения и количественной оценки опасности разрушения склонов является фундаментальным требованием для поддержания безопасности производства [Bellett, 2013]. Эта технология начала находить свое применение для борьбы с геотехническими опасностями как в естественных геотехнических условиях, так и в гражданском применении. Из-за изменчивости материалов, обуславливающих нестабильность склонов и механизмов их неустойчивости, во многих случаях трудно охарактеризовать их поведение с помощью традиционных методов геотехнического моделирования и инструментов мониторинга, когда требуется более практичный подход для принятия обоснованных решений по управлению рисками. В статье представлено тематическое исследование, в котором предлагаемая технология должна быть эффективна при выявлении и управлении геотехническими опасностями в гражданском строительстве. Этот вопрос связан с неустойчивыми склонами, которые в данный момент представляют высокий риск для основных общественных объектов. Показано, что радиолокационные данные могут быть использованы не только в качестве системы оповещения, но и позволяют дифференцировать различные механизмы динамики и процессы в сложных условиях и стабилизировать их взаимосвязь с триггерными факторами окружающей среды, такими как выпадение осадков и рекультивационные работы.

Ключевые слова: оползень, управление рисками, селевой поток, радар для определения устойчивости склонов

Ссылка для цитирования: Торрес А., Канаев Е. Наземный радар для определения устойчивости склонов при распознавании поверхностных деформационных процессов и их корреляции с внешними триггерными факторами. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 553–564.

Introduction

Traditional geotechnical monitoring activities are mostly focused on measuring the movement of the ground surface, these include survey stations and prisms, extensometers, inclinometers, and distance meters. These techniques aim to identify displacement patterns and characterize them in order either to validate possible instability mechanisms and displacement characteristics over time, namely: magnitude, trend and rate.

Due to the large variety of geomorphological, geological, geo-mechanical and geotechnical conditions the identification of the most suitable parameters and of the best instrumental solutions is a big challenge and many slope failures still come as a surprise because of the inability to effectively detect precursory ground displacements [Mazzanti, 2013]. This often stems from: limited number of measuring points; lack of ancillary data supporting the installation of a monitoring network; unawareness about the presence of ongoing instability phenomena; difficult site accessibility; economical or logistical constraints in general [Carlà, 2019].

Over the last years a strong increase of available techniques for the monitoring of landslides and ground instability processes has been observed [Mazzanti, 2013]. Hence, several opportunities are now available to monitor landslides processes. Moreover, some of these innovative techniques are opening new frontiers in the monitoring and analysis of landslides.

Among these techniques, ground-based slope stability radars have proved to be a unique tool for surface deformation monitoring. All slope stability radars use the same underlying

phase-based signal processing technique called interferometry. The technique calculates the deformation-induced phase shift of the back-scattered electromagnetic signal between two acquisitions, by this sub-millimetric measurement accuracy and sub-metric spatial resolution are attained with no need to install physical instrumentation and the information is obtained and updated frequently [Bellett, 2013].

The sudden increase of available technologies has not been followed by a suitable development of advanced education and training of technicians and surveyor. This paper aims to illustrate and demonstrate how ground-based radar could be effective not only as a warning system but also it allows to understand different dynamics and establish their correlation with environmental triggering factors such as precipitation events and remediation works. The first part of the document focuses in the principles of the ground-based slope stability radars technology and in the second part we present a case study in which the technology has proved to be efficient for identifying and managing the geotechnical hazards in civil applications.

Methods: Ground-based slope stability radar technique

Ground-based radar interferometry is a reliable method for spatial displacement monitoring of slopes and is especially valuable when inaccessibility prohibits the application of other traditional monitoring techniques. Slope monitoring radars have been generically described as either real aperture radar (RAR) or synthetic aperture radar (SAR). There are many differences between these radar technologies, but one of the fundamental differences is the radar dimensionality used to image and spatially map deformation for three-dimensional slope surfaces. RAR traditionally uses either a fine pencil beam to provide full 3D imaging (3D-RAR) or a fine vertically elongated fan beam for 2D imaging (2D-RAR), on the other hand SAR uses a synthetic (virtual) fine vertically elongated fan beam for 2D imaging (2D-SAR) [Noon, 2015].

Ground-based radars are also able to provide additional parameters that allows to understand, at some extent, some of the characteristics of the monitored surface, namely: coherence, amplitude and range. The following sections describes how these parameters are derived from the radar signals and their implications.

Displacement calculation using radar interferometry

In order to calculate the displacement, two subsequent radar signals are compared to calculate the phase difference between the two consecutive acquisitions (see Fig. 15). It is important to note that the system can measure only the component of the movement parallel the line of sight (LOS) of the instrument, thus the real displacement vector of the observed object can be calculated only if its direction is a priori known.

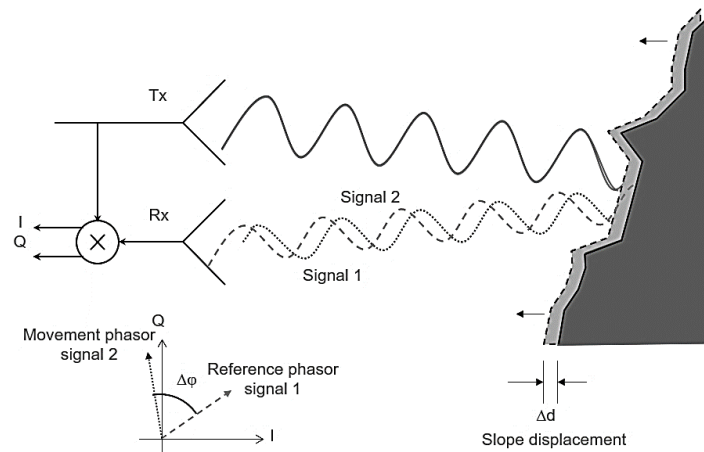


Fig. 15. Displacement calculation using ground-based radar interferometry

The corresponding displacement of the slope surface is then obtained as:

$$\Delta d = \frac{\Delta\varphi}{4\pi} \lambda, \quad \text{Equation 1}$$

where Δd is the displacement between the consecutive acquisitions, $\Delta\varphi$ is the phase difference and λ is the wavelength of the signal. An important property of the method is the ambiguity of the phase differences, which can only vary between $\pm\pi$. Thus, displacements smaller or larger than $\pm\pi/4$ result in apparent values between $\pm\pi/4$ differing from the real value by a multiple of the full wavelength. This effect is called phase wrapping and is important for interpretation of the displacement results [Gischig, 2009].

Coherence

The reliability of the ground-based data is controlled by both the reflectivity of the ground and temporal decorrelation between acquisitions. Reflectivity of a surface determines the strength of the signal reflected back to the receiver by the target. It is generally low for densely vegetated areas and smooth targets not perpendicular to the line-of-sight (LOS). Decorrelation results from strong movements within a resolution cell between two acquisitions (e.g. due to unstable debris cover or differential displacements). A measure of the strength of decorrelation is the signal coherence from two subsequent acquisitions, which is defined as:

$$\gamma = \frac{E(ms^*)}{\sqrt{E(m)^2 E(s)^2}}, \quad \text{Equation 2}$$

where m and s are the complex numbers of two acquisitions for one resolution cell, $(*)$ denotes complex conjugate, and E signifies the expectation value. The signal coherence is a number between 0 and 1 and is a measure of the similarity of the transmitted and the received signal [Gischig, 2009].

In order to generate coherence value of each scan, ground-based radars will conduct a complex cross-correlation function of amplitude signature relation with range measurement. If this correlation remains the same with the next scan, the value of coherence will be 1. On the other hand, if this comparison in a successive scan exhibit a degree of difference, the coherence will have a lower value, the more haphazard the difference of the amplitude signature between one scan to the next scan, then the lower the coherence value that will be generated.

In practice, coherence value equal to 1, means that the surface of the area monitored by the ground-based slope stability radar remains intact and undisturbed. Any surface disturbance at the area being monitored by ground-based radar will be expressed by drop in coherence value below 1. The Fig. 16 illustrates this concept.

Range

Range is defined as the distance measured from the radar toward the observed target. It is calculated from the time of flight of the signal as follows:

$$R = \frac{cT}{2},$$

where R is the range, c is the speed of the light (3×10^8 m/s) and T is the time required for radar signal to be transmitted and reflected to radar.

Amplitude

Amplitude refers to the strength of the wave energy. In ground-based radars, amplitude measurement is based on the magnitude of the resultant phase vector formed by the incoming signal. Reflectivity of a surface determines the amplitude of the signal reflected back to the

receiver by the target and it is a function of the characteristics of the surfaces such as shape and material, hence amplitude allows to understand, at some extent, some of the characteristics of the monitored surface.

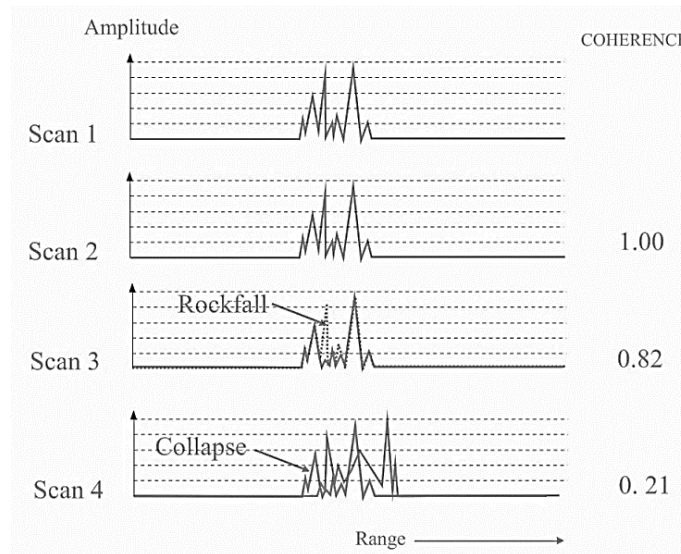


Fig. 16. Coherence calculation concept using ground-based radar data

Study area: Bogota-Medellin highway landslide

On December 2016, some minor rock falls and debris flows were observed on the Bogota-Medellin highway (K14+000) in north Colombia (see Fig. 17). Field inspections revealed some cracks in the upper hill that may be associated with a simple translational mechanism, which has presumably driven by a period of unusual adverse weather conditions for the local climate. The event partially interrupted the heavy traffic between Bogota and Medellin cities (around 22.000 vehicles/day) and since the slope showed signs of further instability it remained closed during the following days.



Fig. 17. Study area Bogota-Medellin highway (K14+000) in north Colombia

A real aperture slope stability radar was deployed at site on December 28 in order to verify the stability conditions, determine the size of the unstable area and characterize the displacement processes. The system was located around 500-800 m on the opposite side to area of concern. The Fig. 18 shows the area of concern as seen from the radar location. System specifications and acquisition parameters for this radar survey are summarized in Table 1, while campaign dates and time intervals are shown in Table 1.

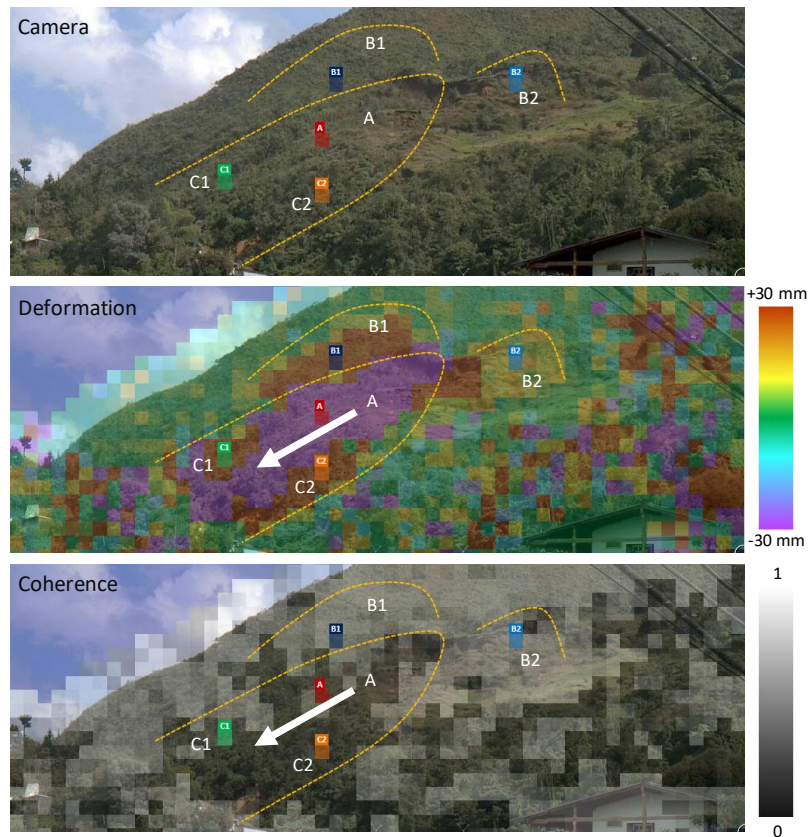


Fig. 18. Ground-based radar imagery for the first 12 hours

Table 10. Acquisition parameters for the GB-3DRAR survey

Radar type	3D real aperture radar RAR
Radar antenna aperture	1.8 m
Frequency	9.55 Mhz
Wavelength	32 mm
Target distance	500 – 800 m
Pixel size	4x4m at 500 m to 7x7m at 800m
Acquisition frequency	6 minutes (240 acquisitions a day)
Monitoring period	November 2, 2016 – August 8, 2017

The 3D-RAR information (accumulated displacement, coherence, amplitude and range) is overlain on a high-resolution camera image which allows to visually correlate this resulting information. The advantage of such integration consists in facilitating the detection of the features in the scan areas throughout the cumulated 2D imagery, hence there is no need to geo-reference the dataset or perform further surveys with other instrumentation (such as topographic stations or laser scan).

First results

12 hours after the deployment of the GB-RAR system, the radar imagery revealed the extent of the landslide area it was possible to validate the assumptions that were done by field inspection about the failure mechanism. The color scale in the radar displacement image shows displacements from -30 to $+30$ mm during these first 12 hours. Positive values (red to yellow) show displacement along the LOS towards the observer, negative values (light blue to violet) away from the observer, and green values represent zero displacement. On the other hand, the coherence image represents the degree of decorrelation between acquisitions. Decorrelation results from strong movements within a resolution cell between two acquisitions (e.g. due to

debris, vegetation cover or differential displacements). Highly correlated acquisitions show values close to 1.0 (white) whereas decorrelated observations will be expressed by drop in coherence value below 1.0 that will trend to zero depending on the degree of disturbance that occurred in the surface (dark grey color).

The central area of the landslide main body (zone A) form an elongated decorrelation pattern that correlates with the active debris flow channel and showed low coherence and phase wrapping ($\Delta d > \lambda/4$). Because of this, the apparent negative deformation measurements (away the radar) were considered as untruthful and disregarded during this first period. The area B (above the zone A), showed a consistent deformation pattern (also with a higher coherence) that was interpreted as a true deformation process (later this area developed a progressive trend and shaped a new main scarp). The area C also showed a consistent deformation pattern that was interpreted as the walls of the debris flow channel. Above the zone B, some data gaps occur in grassy areas due to decorrelation and shadowing but there was no evidence of other significative deformation processes.

Observation toward the deformation behavior give insight about the risk level and permits at some extent to predict failures in the future. There are 3 types of slope deformation trends: Transitional deformation occurs when an accumulated deformation vs time plot reveals constant velocity, regressive deformation occurs when the plot shows decreasing velocity and progressive deformation exists when the plot reveals increasing velocity over a time span (Zavodni & Broadbent 1980). The Fig. 19 shows the accumulated deformation plots that were generated for the aforementioned areas (A, B and C).

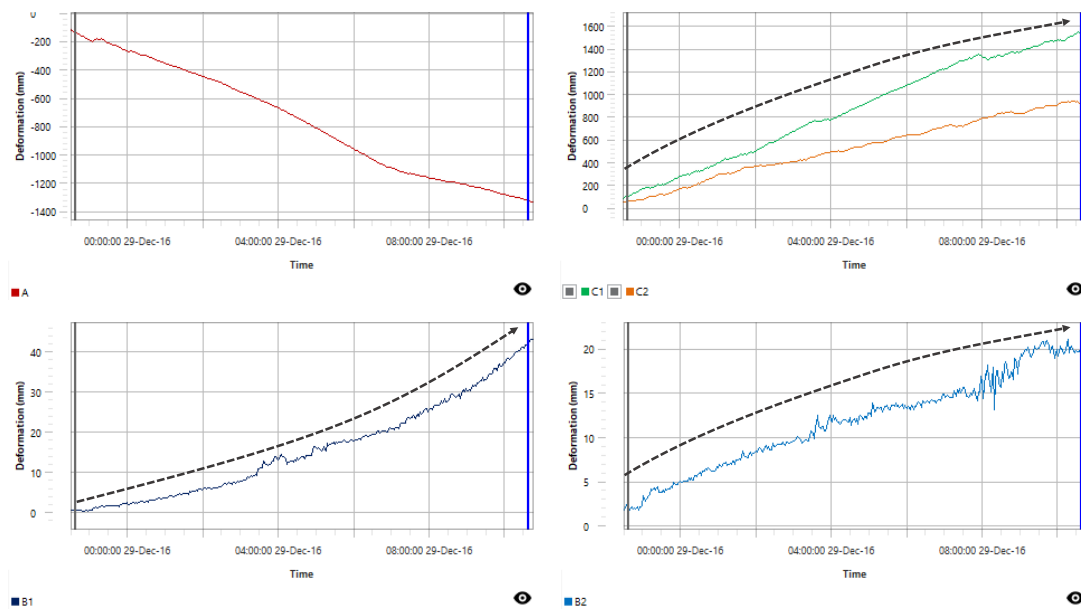


Fig. 19. Accumulated deformation vs time plots for the areas of interest

As stated, the area A showed an apparent negative deformation trend (away the radar) that was disregarded during this first period due to the low coherence and phase wrapping effect related with the active debris in this area. The area B showed a consistent progressive deformation trend that was a precursor of a future slide that occurred later in this area and shaped a new scarp. The area C showed a consistent regressive deformation trend with a lower deformation rate.

Predicting slides and falls of ground

Several authors have shown that linearly extrapolating the theoretical time of singularity in an inverse velocity versus time plot can be used to predict the time of slope failure. For this reason, monitoring activities are mostly focused on measuring the movement of the ground surface [Fukuzono, 1985]. Such relation is linked to the theory of damage accumulation, and to

mechanisms of creep fracture by stress corrosion and power law lattice deformation [Voight, 1989].

As shown before, on December 29 the presented datasets revealed an accelerating trend of displacement in the area B. Expected failure-time was then derived by applying the inverse velocity method for highly coherent targets showing relevant precursors. The inverse velocity plot in the Fig. 20 was generated on December 29 around 15:00h and it shows the result of the prediction that was performed at that time. According to the forecast, the slide would happen the same day at 18:02 h. Hours later it was confirmed by field observations that the slide effectively occurred around 17:30 h (see Fig. 20).

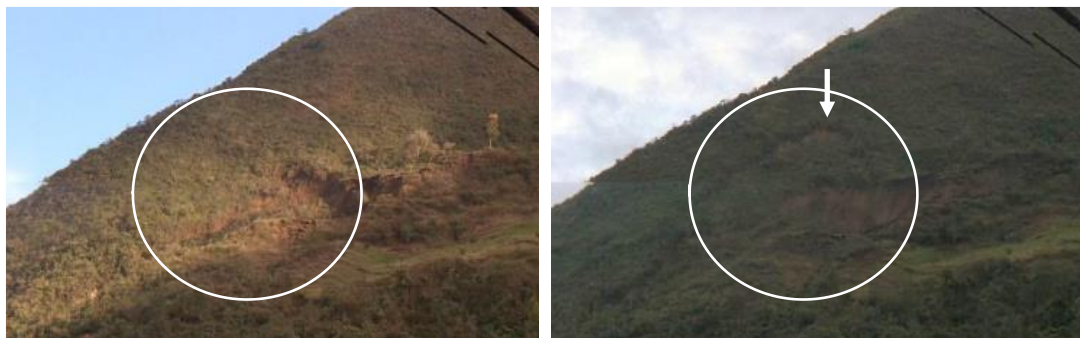
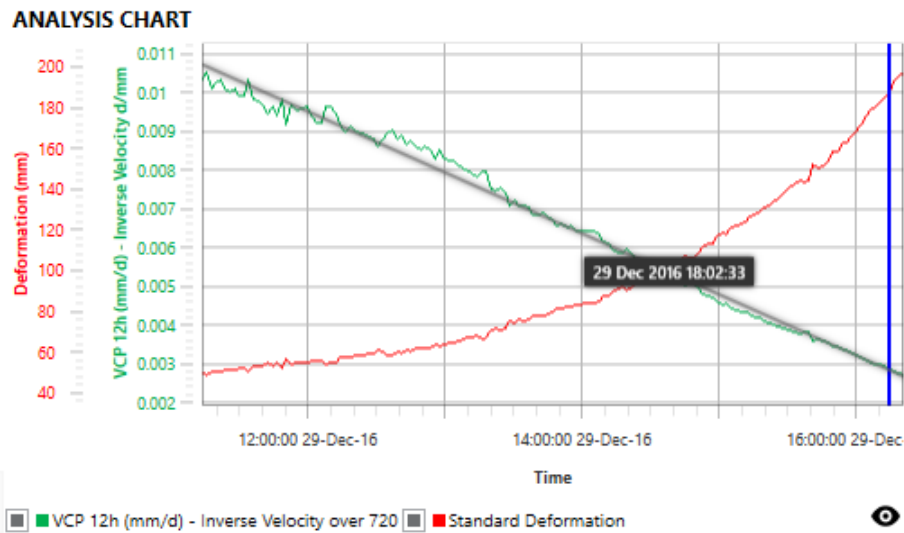


Fig. 20. Inverse velocity plot for slide prediction. Location of the predicted landslide

Unstable mass blasting

Since the area continued showing evidence of further instability during the following days and a series of transitional and progressive deformation processes and falls of ground we observed, the highway remained closed to the traffic. On January 1, the management and the local authorities try to induce a landslide by performing a blast (see Fig. 21). The set up and configuration of the blast is unknown and there was no monitoring of the vibrations in place.

Blasting is in many cases a triggering factor that effectively increases the deformation rates of both stable and unstable slopes, so it was expected this blast to lead both a generalized progressive deformation trend and a final collapse of the unstable material.

The ground-base radar information showed that the blast did not have any effect on the ongoing deformation processes, and these continued with the same deformation trends that were present before the blast.

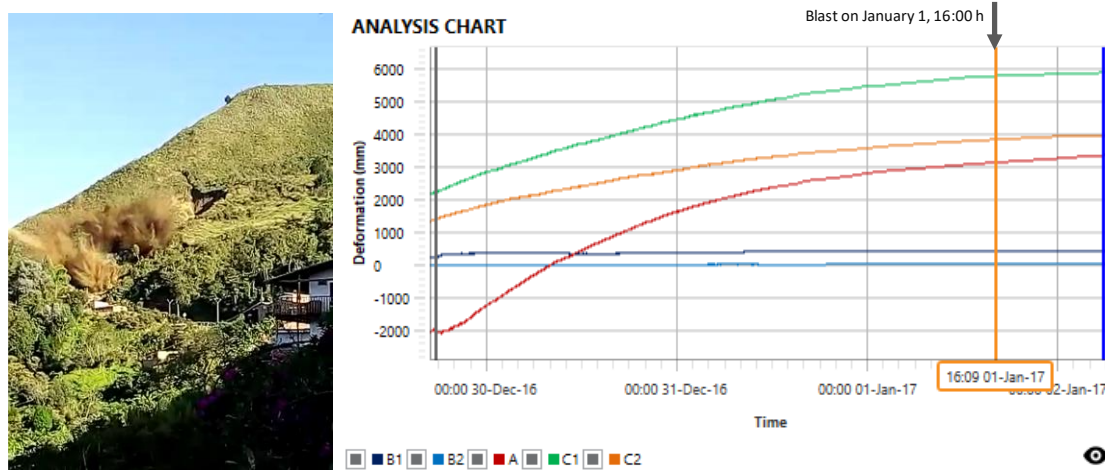


Fig. 21. Displacement analysis for the blast performed on January 1, 2017

Rainfall-induced instability processes and falls of ground

Rainfall-induced landslides can be triggered by two main mechanisms: shear failure due to build-up of pore water pressure and erosion by surface water runoff when flow velocity exceeds a critical value. Prediction of rainfall-induced landslides has relied on maps of landslide susceptibility and catalogs of landslide occurrence and corresponding rainfall amounts (rainfall thresholds). Due to their incomplete description of conditions needed to induce landslides, conventional rainfall thresholds have considerable uncertainty. Numerical modeling efforts also could provide additional insight and are expected to help extend landslide warning tools to areas where detailed historical landslide information is unavailable.

The GB-RAR collects weather information that allowed to correlate in real time the displacement information with the precipitation events. It was found that the area of concern had different responses to the same precipitation events. The main body of the slide (zone A) show no evidence of any change either on its deformation trend or in its deformation rates as consequence of the precipitation events that occurred during the period (see Fig. 22). On the other hand, the main scarp and the crown area (Zone B) showed acceleration processes that could be directly correlated with some of the precipitation events (see Fig. 22). Both the long-duration and short-duration precipitation are significant in the triggering the landslides. In the zone B it is clear that the first landslide that occurred on December 29 was correlated with the rainy period, after this first slide the area remained relatively stable during the following days (no significant or persistent deformation trends were observed) and a second rainy period (on December 31) triggered a second slide in the very same area. This seems to confirm slope stability models that indicate that, in the initial phase, the slip surface of a landslide often occurs along the top of a relatively impermeable layer located at some depth within the soil profile. The shear strength along this surface is governed by the pore water pressure. The pore pressure is in turn controlled by water seepage through the slope from infiltrated rain. The two consecutive events may be a consequence of the infiltration processes that occurred during the precipitations that occurred in the period.

Reports of slides and falls of ground during the monitoring campaign

The monitoring campaign lasted from December 28, 2016 up to August 23, 2017. During this period a total of 18 collapses and falls of ground were reported. Most of these events were correlated with precipitation events (which seems to be more frequent during the periods of December-January and March-May) and the remedial works that were undertaken in the area as an attempt to stabilize the slope. During the period June-August 2017 the number of instability events decreased and the monitoring campaign with the ground-based slope stability radar was finished. The Fig. 23 shows a summary of the events that were reported during the

monitoring campaign and the camera image of the area of study on March 2017 when the remediation works were almost completed.

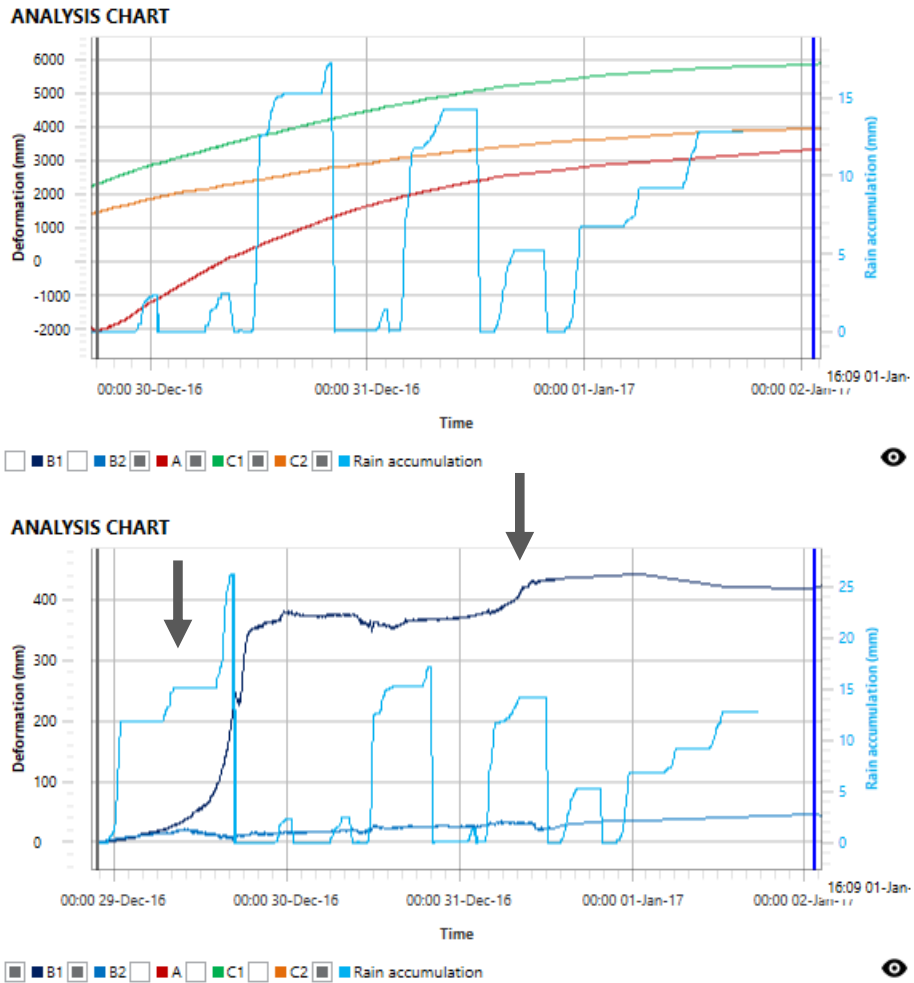


Fig. 22. Displacement analysis for the precipitation events (December 2016 to January 2017)

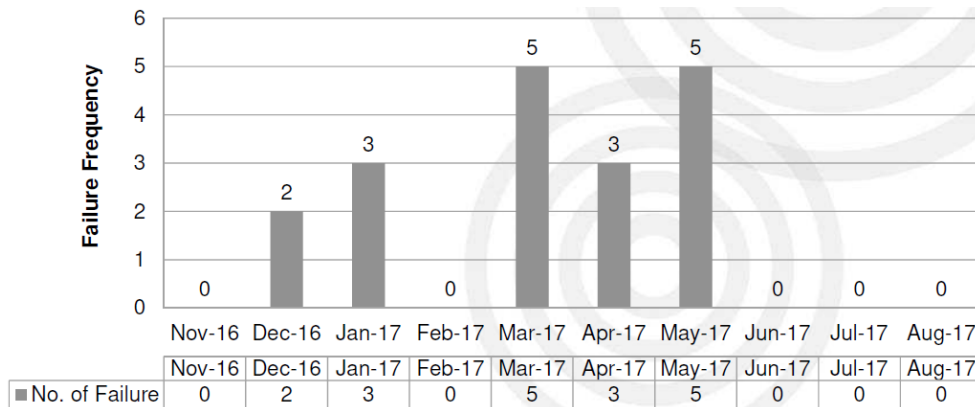


Fig. 23. Reported slide and fall of ground events during the monitoring period

Discussion

The ground-based slope stability radar monitoring campaign undertaken has been proved effective for risk identification and management in civil applications. Accuracy in displacement measures, achievable resolution, and high acquisition rate, lead to a detailed and real-time investigation of instability behavior and its relationship with triggering factors such as

precipitation, blast and remediation works. The coherence also demonstrates to be an effective parameter for discerning different dynamics in the study area.

On the other hand, some limitations related to the nature itself of the employed radar technology have to be considered during the planning phase of the monitoring campaign: 1) measured displacement refers only to the surface of the observed object that can be seen from the sensor; 2) only movements with direction parallel to the LOS of the instrument can be detected; 3) displacement trends, magnitudes and rates could be misinterpreted by the instrument due to phase wrapping; 4) the radar data interpreter need to attained full knowledge about radar parameters and images interpretation and about the slope conditions and other factors (weather, operations) which will potentially have an effect in the information. In addition, the definition of an efficient and fine-tuned monitoring procedure is essential to guarantee an effective early warning activity resulting in safety for people and prompt security measures for infrastructure.



Fig. 24. Remediation works on March 2017

Conclusion

This paper describes the effectiveness of ground-based slope stability radar as a geotechnical monitoring that allows to identify and characterize slope stability hazards regarding to civil applications. The use of accurate and real-time displacement calculation and coherence measures allowed us to identify different dynamics in a challenging area (active debris, dense vegetation cover, precipitation events, remediation works) and provide opportune information to make sound decisions during the recovery works.

Results of the proposed monitoring and the early warning that was provided in most of the instability events that occurred during the period demonstrate that it is possible an extensive application to civil engineering applications. The use of technologies and methods described in this paper results in safety for citizens and in substantial advantages for risk identification and management regarding unstable slopes.

Acknowledgements

Ground-based slope stability radar survey was performed by GroundProbe (Brisbane, Australia) using the SSRXT system and the SSRViewer software; real-time monitoring, data interpretation and warning escalation was done by the GroundProbe Geotechnical Support Services team. This monitoring campaign was funded by DEVIMED S.A. (Medellín, Colombia). All data used in this document belongs to DEVIMED S.A. and was disclosed under written approbation.

References

- Bellett, P.A. (2013). Real Aperture Radar for Safety-Critical Slope Monitoring. GroundProbe Pty Ltd Public Green Paper.
- Carlà, T. (2019). Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR. Scientific Reports NatureSearch.
- Fukuzono, T. (1985). New method for predicting the failure time of a slope. Fourth international conference and field workshop on landslides, (p. 145–150). Tokio.
- Gischig, V. (2009). Identification of active release planes using ground-based differential InSAR at the Randa rock slope instability, Switzerland. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2007-2019.
- Kilburn, C. R. (2003). Forecasting giant, catastrophic slope collapse: lessons from Vajont, Northern Italy. Geomorphology, 21–32.
- Mazzanti P., P. G. (2013). Traditional and Innovative Techniques for Landslide Monitoring. Tagung für Ingenieurgeologie mit Forum für junge Ingenieurgeologen, (p. 191-197). München.
- Noon, D. (2015). 3D and 2D radars for open-pit slope monitoring. Slope Stability 2015. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- Voight, B. (1989). A relation to describe rate-dependent material failure. Science, New Series, Vol. 243, No. 4888, 200–203.



Аномальная ледовая обстановка на горных реках Юго-Восточного Казахстана – причина формирования водоледяных селей

В.В. Жданов

*АО «Институт географии и водной безопасности» МОН РК, Алматы, Казахстан,
Zhdanovvitaliy@yandex.ru*

Аннотация. Были проанализированы архивные данные о ледовых явлениях в 20 веке. В условиях мягкого предгорного климата периоды сильного мороза явление редкое. За зиму может отмечаться 1-2 периода со среднесуточной температурой воздуха ниже 15 градусов мороза, сохраняющихся в течении 5-15 дней. В этот период повсеместно на горных реках отмечается аномальная ледовая обстановка. Наблюдатели на гидрологических постах регистрируют подъем уровня воды и скопления внутриводного и донного льда. Рост уровня может достигать 100-120 см. Во время потепления ледостав может потерять устойчивость и стать причиной формирования водоледяных селей. Из-за слабой изученности водоледяных селей их невозможно прогнозировать. В настоящее время возможно только спрогнозировать аномальную ледовую обстановку по сумме отрицательных температур воздуха. Предложенный метод прогноза необходим для предупреждения населения об опасной обстановке на горных реках.

Ключевые слова: водоледяной сели, горные реки, ледостав, ущерб, резкое похолодание

Ссылка для цитирования: Жданов В.В. Аномальная ледовая обстановка на горных реках Юго-Восточного Казахстана – причина формирования водоледяных селей. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 565–570.

Abnormal ice situation on the mountain rivers of South-East Kazakhstan as a sign of formation of ice-water flows

V.V. Zhdanov

*JSC “Institute of Geography and Water Safety” MES RK, Almaty, Kazakhstan,
Zhdanovvitaliy@yandex.ru*

Abstract. The archival data on ice phenomena in the 20th century were analyzed. In the conditions of a mild foothill climate, periods of severe frosts are a rare occurrence. During the winter, there may be 1-2 periods with an average daily air temperature below 15 degrees below zero, lasting for 5-15 days. During this period, abnormal ice conditions were observed everywhere on mountain rivers. Observers at hydrological posts record water level rising and accumulations of intra-water and bottom ice. Level growth can reach 100-120 cm. During the warming, ice formation can become unstable and cause the formation of ice-water flows. Due to the poor knowledge of the ice-water flows, it is impossible to predict them. At present, it is only possible to predict abnormal ice conditions by the sum of negative air temperatures. The proposed forecast method is necessary to warn the population about the dangerous situation on the mountain rivers.

Key words: ice-water flows, mountain rivers, freezing, damage, sudden temperature drop

Cite this article: Zhdanov V.V. Abnormal ice situation on the mountain rivers of South-East Kazakhstan as a sign of formation of ice-water flows. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: “Promotion” LLC, 2020, p. 565–570.

Введение

На реках Алматинской области после периодов сильных похолоданий отмечалось прохождение водолеяных потоков. Эти потоки отличались от заторов и зажоров на равнинных реках, и обладали селеподобным характером движения [Степанов, 1985]. Они наносили незначительный ущерб водохозяйственным объектам в руслах рек [Назаров, 1968]. Катастрофических размеров явление достигало два раза, когда были отмечены жертвы и ущерб [Яфязова, 2007].

Цели и задачи исследований

Водолеяные зимние потоки привлекли к себе внимание после трагической гибели людей в январе 2006 г. Изучением этого опасного явления начали заниматься специалисты РГП «Казгидромет» и Института географии. Целью работы было изучение этого опасного явления на реках Юго-Восточного Казахстана (Алматинская область). Внимание уделялось исследованию условий формирования аномальной ледовой обстановки на горных реках. Необходимо было выявить основные метеорологические и гидрологические характеристики, приводящие к накоплению внутриводного и донного льда. Для разработки научного обоснования методов борьбы с этим явлением сначала необходимо собрать и систематизировать архивные сведения о водолеяных потоках.

Изученность вопроса

Водолеяные потоки – один из видов селевых потоков, в которых твердая составляющая представлена обломками льда с участием снега и обломков горных пород. Водолеяные сели бывают ледникового и речного генезиса. Водолеяные сели речного генезиса образуются в период зимних оттепелей вследствие срыва ледяных порогов из донного льда или прорывов снежных завалов, созданных лавинами. Твердая составляющая потока формируется из тел ледяных порогов, снежных завалов, наледей, шуги и русловых отложений. В настоящее время эти потоки относят к параселевым (селеподобным) явлениям. В литературе используются синонимы: водолеяный поток [Гляциологический словарь, 1984] или водолеяной сел [Перов, 2012].

Изучением этого явления на горных реках Казахстана занимался Н.А. Назаров [Назаров, 1968]. По его данным в 60-е годы водолеяные сели отмечались на реках Алматинской и Восточно-Казахстанской областей. Потоки затрудняли работу водохозяйственных систем в зимнее время. В 2000-х годах изучением этого вопроса занимался отдел селевых проблем РГП «Казгидромет» [Степанов, 2009]. Большая работа по систематизации данных о зимних селях была проведена Киренской Т.Л. [Селевые явления юго-восточного Казахстана, 2016]. Информация собиралась из различных источников, в том числе и из архивов «Казгидромета» и «Казселезащиты».

Результаты исследований

Ледяные образования в руслах, приводящие к формированию водолеяных селей на горных реках Алматинской области, возникают при среднесуточной температуре воздуха ниже минус 13-15 °С. В ходе похолоданий образуется внутриводный и донный лед. Условия, благоприятствующие этим процессам, создаются при резком понижении температуры воздуха, когда ледяной покров на реках еще не успел сформироваться. Теплообмен воды с воздушными массами происходит на больших площадях при малой глубине водного потока и интенсивном его перемешивании [Чижев, 1972].

На сети наблюдательных пунктов РГП «Казгидромет» в этом случае регистрировались следующие гидрологические явления: внутриводный и донный лед, забереги, резкий подъем уровня воды и отмечались заторно-зajorные явления.

При уровне воды в сезон осенне-зимней межени в 20 см, высота ледяных ступеней может достигать 2,5-3,0 м. По данным гидрологического поста Алматы-Дамба в период прохождения водоледяных селей уровень воды с учетом внутриводного льда составлял более 80-90 см. Средний расход воды в зимний период составляет 1,0-1,5 м³/с. В период накопления внутриводного льда расход не измерялся.

Были изучены метеорологические условия формирования больших скоплений внутриводного и донного льда на р. Киши Алматы. Установлено, что аномальная ледовая обстановка существует, когда метеорологические характеристики резко отличаются от средних климатических значений (отрицательная аномалия суточных температур воздуха достигала 10°C) [Климат Алма-Аты, 1985]. В среднем похолодания продолжаются 5-7 дней со среднесуточной температурой воздуха ниже минус 13-15°C. Водоледаемые сели наблюдались в период резкого потепления воздуха (суточный градиент более 5 °C). Эти данные очень важны, для дальнейшей разработки методов прогноза водоледаемых селей. Так же отмечалось сильное охлаждение воды в р. Киши Алматы до 0,2°C. Для анализа метеорологической обстановки использовались данные реперной метеорологической станции Алматы, имеющей длинный ряд наблюдений. Информация приведена в таблице 1.

Таблица 1. Метеорологические условия образования аномальной ледовой обстановки на горных реках за период 1970-2018 гг.

Table 1. Meteorological conditions for the formation of abnormal ice conditions on mountain rivers in period 1970-2018

Метеорологические условия по данным МС «Алматы»	Количество случаев	Продолжительность периода похолодания,	Средняя суточная температура воздуха, °C	Минимальная температура воздуха, °C	Сумма среднесуточных температур воздуха за период похолодания, °C	Суточный градиент потепления, °C/сут	Отклонение температур воздуха от многолетних значений, °C
Сильные похолодания, которые вызвали прохождение водоледаемого селя	15	6	-8,8	-16,6	-64,0	4,6	-3,0
Сильные похолодания, вызвавшие рост уровня воды	28	6	-8,2	-16,6	-64,1	5,5	-2,4
Водоледаемой сель без значительного похолодания	8	5	-2,5	-9,2	-25,6	3,6	2,8
Незначительное похолодание и рост уровня воды	11	4	-4,6	-10,8	-36,6	4,0	-0,7

Из таблицы 1 видно, что аномальная ледовая обстановка на горных реках отмечается при различных метеорологических условиях на метеостанции Алматы. Чаще всего она совпадает с резкими похолоданиями на юго-востоке Казахстана. Но есть случаи аномальной ледовой обстановки на отдаленных реках, когда на метеостанции не регистрировалось понижение температуры. Вероятно, что для большой территории Алматинской области эта метеостанция не является показательной.

Расчитанные в таблице 1 средние значения метеорологических характеристик во время прохождения водоледаемых селей могут быть использованы как прогностические признаки для составления фонового прогноза сильных скоплений внутриводного и донного льда. Спрогнозировать разрушение ледяных ступеней в русле реки и прохождение потока пока невозможно. Для этого необходимо детально изучить физико-механические свойства льда и его реологические свойства при изменении температуры

воздуха. В настоящее время возможно только составить фоновый прогноз аномальной ледовой обстановки на горных реках.

Особый интерес представляют критические значения метеовеличин за день до прохождения потока. С учетом изменения температуры воздуха возможно рассчитать опасный период [*Наставление по службе прогнозов, 2005*]. Если учитывать критические значения метеопараметров в день прохождения водолеяного потока, то заблаговременность прогноза будет нулевой. Для увеличения заблаговременности прогнозов необходимо использовать данные численных моделей прогноза погоды.

Характеристики метеовеличин на метеостанции Алматы могут быть использованы как прогностические признаки для составления фоновых прогнозов аномальной ледовой обстановки на горных реках (таблица 2).

Таблица 2. Прогностические признаки водолеяных селей

Table 2. Prognostic signs of ice-water flows

Прогностический признак	Значение
Сумма отрицательных среднесуточных температур воздуха в предыдущие 5 дней	$\leq -64,0^{\circ}\text{C}$
Сохранение среднесуточной температуры воздуха в течение 6 дней	$\leq -13,0^{\circ}\text{C}$
Отклонение среднесуточных температур воздуха от среднеголетних значений	$\geq 5^{\circ}\text{C}$
Суточные градиенты температуры воздуха при похолодании	$\geq -5^{\circ}\text{C}/\text{сут}$
Прогнозируется резкое потепление температуры воздуха	$\geq 5^{\circ}\text{C}/\text{сут}$

Возможность прогноза водолеяных селей

Дать точный прогноз катастрофического водолеяного потока пока невозможно. Но известно, что такие потоки напрямую связаны с аномальной ледовой обстановкой на горных реках. Причиной больших скоплений внутриводного и донного льда являются резкие похолодания на Юго-Востоке Казахстана, вызванные вторжениями холодного арктического воздуха. Было решено для прогнозирования возможности возникновения водолеяного потока сначала разработать метод прогноза аномальной ледовой обстановки. Тем более, что для предгорий Иле Алатау не было метода прогноза заторно-зajorных явлений.

Для выявления метеорологических условий перед прохождением катастрофических зимних селей были проанализированы архивные данные на метеорологической станции Алматы и гидрологическом посту Алматы-Дамба за период 1970-2005 гг. Стандартный период 25 лет обычно используется для разработки гидрологических и селевых прогнозов [*Наставление по службе прогнозов, 2005*]. Информация обрабатывалась в программе «Statistica 6.0». В результате была найдена статистическая зависимость между приростом уровня воды в р. Киши Алматы и суммой отрицательных среднесуточных температур воздуха в Алматы за весь период похолодания. Коэффициент корреляции между этими параметрами составил 0,84 при 5% уровне значимости [*Жданов, 2010*]. Так же было обнаружено, что в случаях сильного роста уровня воды в р. Киши Алматы отмечалось ее охлаждение ниже $0,2^{\circ}\text{C}$.

Для построения зависимости была выбрана модель линейной регрессии Гаусса. Формула приведена ниже:

$$\Delta H = 16 - 0,8 \Sigma t_b, \quad (1)$$

где Σt_b – сумма среднесуточных температур воздуха на метеостанции «Алматы» за весь период похолодания, ΔH – прирост уровня воды в сантиметрах в р. Киши Алматы на гидрологическом посту Алматы-Дамба.

С помощью этой формулы был построен прогностический график, приведенный на рисунке. Дополнительным фактором, благоприятным для образования внутриводного льда является охлаждение воды равное или ниже $0,2^{\circ}\text{C}$. [Чижов, 1972].

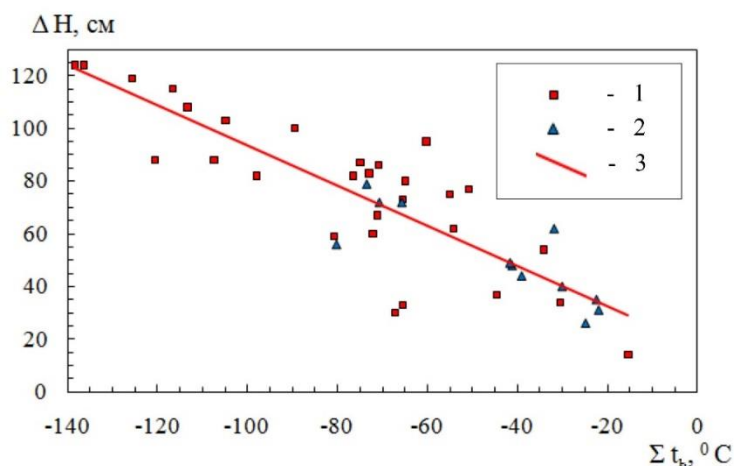


Рис. Зависимость роста уровня воды на гидрологическом посту Алматы-Дамба от суммы отрицательных температур воздуха на метеостанции Алматы. 1 – уровень воды при температуре воды $< 0,2^{\circ}\text{C}$; 2 – уровня воды при температуре воды $> 0,2^{\circ}\text{C}$; 3 – уравнение линейной регрессии

Fig. The dependence of water level growth at the hydrological station Almaty-Dam on the sum of negative air temperatures at the Almaty weather station. 1 - water level at water temperature $< 0,2^{\circ}\text{C}$; 2 - water level at water temperature $> 0,2^{\circ}\text{C}$; 3 - linear regression equation

Выводы

В настоящее время о водоледяных селях известно очень мало. Данных не хватает для разработок полноценных методов прогноза. Известно только то, что катастрофические потоки возникают при резком разрушении скоплений льда в руслах рек. Так же возникает трудность отделить водоледяной сель от заторно-зажорных явлений. Предложенный метод позволяет рассчитывать критический рост уровня воды в реках по сумме отрицательных температур воздуха. В свою очередь большие скопления льда в руслах рек и ожидаемое резкое потепление воздуха является предвестником катастрофических водоледяных селей.

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам РГП «Казгидромет»: Степанову Борису Сергеевичу, Яфязовой Розе Кайюмовне, Никифоровой Лидии Николаевне, Хайдарову Алимун Хакимовичу.

Статья написана по результатам исследований по программе грантового финансирования Комитета науки МОН РК «Селебезопасность Республики Казахстан» № AP05132214.

Список литературы

- Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.
Жданов В.В. Прогноз водоледяных селей и пути их предотвращения. Автореферат на соискание ученой степени кандидата наук. Алматы, 2010 г.
Климат Алма-Аты / Под ред. Х.А. Ахмеджанова, Ц.А. Швер. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 226 с.
Назаров Ц.А. Водоселевые потоки на горных реках Казахстана / Труды координационных совещаний по гидротехнике. Вып.42. Л.: Энергия, 1968. С. 110–115.
Наставление по службе прогнозов. Изд-во «Казгидромет», Алматы, 2005. 26 с.

- Перов В.Ф. Селеведение. Учебное пособие. М., Географический факультет МГУ, 2012. 272 с.
- Селевые явления Юго-Восточного Казахстана: Антология селевых явлений и их исследования / Медеу А.Р., Баймолдаев Т.А., Киренская Т.Л. Т.4, Ч.1. Алматы. 2016. 576 с.
- Степанов Б.С. Транспортно-сдвиговый и сдвигово-эрозионный селевые процессы // Селевые потоки. М.: Гидрометеоиздат, 1985. № 9. С. 3–16.
- Степанов Б.С., Яфязова Р.К., Жданов В.В. Водолеяные сели. К механизму формирования водолеяных конструкций // Гидрометеорология и экология. 2009. №3. С. 143–152.
- Чижов А.Н. Особенности зажорообразования на горных реках // Труды ГГИ. 1972. Вып. 192. С. 44-52.
- Яфязова Р.К. Природа селей Заилийского Алатау: Проблемы адаптации. Алматы, 2007. 158 с.



Remarks on Mariana and Brumadinho tailings dams' disasters (Minas Gerais, Brazil)

D.V. Znamensky

*CBDB-CT 11 Head, and Independent Consulting Engineer, Brasília, Brazil,
dvzname@gmail.com*

Abstract. Inadequate layout and drainages galleries failures resulted in very poor tailings drainage in Mariana case. Seismic chocs of moderate magnitude occurred shortly before the reservoir rupture. Failure occurred at noon hours what allowed reasonable large escape of Bento Rodrigues village inhabitants and relatively small number of victims. At Brumadinho site a delayed and interrupted fill drainage process created a critical saturation state and sudden rupture by retaining water of the Feijao creek. A dangerously close location of the office and personal facilities provoked a large number of fatalities in this case. Heightening of the fill was interrupted at close to 80 meters.

Key words: *inadequate lay-outs in both cases, seismic shocks at Mariana site, deficient and poor drainage of erected fills in both cases*

Cite this article: Znamensky D.V. Remarks on Mariana and Brumadinho tailings dams' disasters (Minas Gerais, Brazil). In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: "Promotion" LLC, 2020, p. 571–580.

Краткий обзор катастроф, произошедших на намывных дамбах Мариана и Брумадиньо (штат Минас-Жерайс, Бразилия)

Д.В. Знаменский

*Независимый консультант, CBDB – CT-11, Бразилиа, Бразилия,
dvzname@gmail.com*

Аннотация. Неадекватная планировка и отказы дренажных галерей привели к очень плохому дренажу хвостохранилищ в случае Марианы. Сейсмические удары средней магнитуды произошли незадолго до разрыва коллектора. Авария произошла в полдень, что позволило значительному количеству жителей деревни Бенту-Родригес спастись бегством, поэтому количество жертв было относительно небольшим. На участке Брумадиньо отложенный и прерванный процесс дренажа при заполнении хвостохранилища создал критическое состояние насыщения и внезапный разрыв ввиду скопления воды из ручья Фейжау. Опасно близкое расположение офиса и частных домов спровоцировало при этом большое количество погибших. Глубина врезания в насыпь составила почти 80 метров.

Ключевые слова: *неадекватная планировка в обоих случаях, сейсмическое воздействие на дамбе Мариана, недостаточный дренаж на возведенных насыпях*

Ссылка для цитирования: Знаменский Д.В. Краткий обзор катастроф, произошедших на намывных дамбах Мариана и Брумадиньо (штат Минас-Жерайс, Бразилия). В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 571–580.

Preliminary considerations

The Mariana dam disaster, also known as the Bento Rodrigues or Samarco dam disaster, occurred on 5 November 2015, when the Fundão tailings dam at an iron ore mine near Mariana, Minas Gerais, Brazil, suffered a catastrophic failure, resulting in flooding that devastated the downstream villages of Bento Rodrigues and Paracatú de Baixo, killing 19 people.

Three years after the Mariana dam disaster, on 25 January 2019, the tailings dam at the Córrego do Feijão iron ore mine, 9 kilometers of Brumadinho, Minas Gerais, Brazil, also suffered a catastrophic failure. The dam released a mudflow that advanced through the mine's offices, including a cafeteria during lunchtime, along with houses and farms downstream, resulting in 256 confirmed fatalities and 14 people missing.

The Fundão tailings dam, 110 meters high, was still in the process of rising, while the 81-meter-high Córrego do Feijão dam was already completed and in the process of maintenance and decommissioning with some complementary drainage services in progress.

Both tailings dams are located on rugged, mountainous terrain containing small but perennial watercourses that form the respective valley basins that were closed by the corresponding starter dams to accommodate the tailings reservoirs.

In the case of Fundão tailings dam, the starting dam was executed about 23 meters high [Morgenstern et al., 2016], and in the case of the Córrego do Feijão dam, the starting dam was approximately 18 meters high [CBDB Publication and J.P. de Ávila, 2012].

In both mines the iron ore was excavated by blasting and then transported for beneficiation.

The economically valuable ore was then concentrated by froth flotation, separating the inert and valueless waste, which was stored in reservoirs.

Water from the tailings portion used during transport evaporates into the atmosphere, seeps into the subsoil, and the remainder is drained superficially by system of horizontal and sloping drains and drainage channels built along the starting dam and usually repeated at the following elevations.

Otherwise, all the pulp is transported (drained or pumped) integrally to the reservoir tank where it initially experiences a coarse particle size separation between the weighted coarse solid phase (sand) or the underflow and the thin solid phase (clay) or the overflow.

The large portion or underflow is deposited in the reservoir near the crest, and the fine portion or overflow is freely drained over a low slope (beach) where selective deposition of the heavier grains occurs.

The remaining water evaporates, infiltrates or is drained out of the reservoir through an increased and effective surface drainage system.

Mixing of underflow and overflow material should be strictly avoided in these cases:

The first is a coarse, frictional and draining granular material ($u = 0$), which is fluffy or medium in size.

The second is a thin, cohesive, waterproof ($u > 0$) micro-granular material, plastic and yielding.

The mixture of these materials, if it occurs, makes the tailings mass mechanically heterogeneous, which favors the formation of shearbands, i.e., horizons of low shear strength, whose presence is detrimental to the stability of the tailings' regolithical mass.

Tailings dams have a dual function of retaining and waterproofing stored material, whether it is solid or liquid, or a mixture of both.

The structures which form the reservoir deposits of waste tailings from mining must integrate into their original environment in a stable, safe and durable manner.

The open pits that result from the dismantling of rock or ground masses by blasting are, in principle, the best place for the deposition of these tailings and residues of the beneficiation processes of ore extraction.

But existing availability and logistical interference often preclude doing so, resulting in the alternative choice of using existing natural depressions of the landscape for tailings disposal, or in the selection of new sites suitable for the establishment of these tailings deposits.

According to Jamialkowski [2012], flat areas, with large perimeter and surface, and located on layers of easily infiltrated and permeable soils, without natural watercourses, would be such an option.

But this solution is not always possible due to geographic, climatic, geotechnical and economic-financial reasons that cannot be ignored.

Thus, the implantation of tailings reservoirs in small valleys becomes an alternative to be considered.

In these cases, it should be noted that such sites considered for the implantation of the reservoirs generate a new geomorphological interference that is introduced in the environment and consists of:

- (a) new configuration of the natural relief surface;
- (b) new geostatic overload on the ground as a function of the stocked material height;
- (c) adaptation of the drainage of the surface outflow of the inserted reservoir in the selected area;
- (d) formation of the new water table and its regime by the insertion of the reservoir deposit in the chosen area.

Items (a) and (b) are quantities determined by the design of the dam itself and the reservoir that is intended to be implemented.

Item (c) is a semi-deterministic quantity due to the presence of the random factor of rainfall, and item (d) is a difficult, time-consuming and very expensive determination, which in practice almost always remains undefined and undetermined.

If any river basin has its surface and perimeter determined by the dividing points, the groundwater basin attached to it has the magnitude of its corresponding undetermined groundwater in terms of its extent and physical limits and magnitude, duration, and type of percolation regime.

Thus, in small, relatively enclosed valleys that are used to receive the tailings reservoir, it is convenient to decouple the influence of the surface drainage and the subsurface groundwater from the tailings exclusively for the receipt of slurry or slurry drainage of these tailings introduced into it.

When there is a possibility of significant groundwater flow, it is a prudent solution to isolate the reservoir from possible saturation by this negative component of the water table.

The efficiency of the reservoir drainage system is greatly influenced by the tailings deposition method.

The possible processes cited in this case are as follows:

- (1) - Introduction of the integral mixture (tailings and water) deposited by flow into the gutter or pumped under pressure from the dam crest;
- (2) - Release of the integral mixture (tailings and water) into the reservoir by a spigot or from the dam crest;
- (3) - Deposit of the obtained large tailings (semi-dry solid phase), next to the initial platform and later raised, throwing the fine tailings separately, pumping them to the reservoir of decantation, evaporation and infiltration upstream separated by a dam from the main retention dam.
- (4) - Granulometric separation of the mixture by on-site centrifugation in two plots: the large, weighted and incohesive (“underflow”) and the fine, weightless and viscous (“overflow”).

These two plots are released: (a) underflow near the retention structure, and (b) overflow at the beginning of the selective deposition beach formed by the runoff.

Dimensioning the drainage system under these conditions becomes a tricky task, as a particular solution may be oversized to the tailings underflow but undersized to the overflow, or vice versa.

However, the participation of drainage in the process that ensures stability in the case of wet tailings deposition is undeniable and very important not only from the point of view of stability, but also from the point of view of ecology.

This can be seen by examining the balance between discrete and continuous temporal net discharges and the volumes stored in the reservoir by the initial saturation of interstitial

voids and the supersaturation of virtual volumes that may occur above or below natural ground level.

The following inequality is written, which is valid for the entire period T of the reservoir existence and which, in certain cases, makes the condition of preliminary execution of the reservoir drainage imperative.

$$\left[\sum_0^T q_{rej} \Delta t + \left(\int_0^T q_{afl} dt - \int_0^T q_{efl} dt \right) \right] > [V_{res}(1-n) + V_{res}G_{Sat}(n)]. \quad (01)$$

By manipulating inequality, we obtain the necessary condition of the dam and tailings reservoir stability, which appears in (05), as a function:

- (a) discreet deposition rate of tailings (q_{rej})
- (b) - continuous total water balance of the reservoir determined by drainage ($q_{afl} - q_{efl}$),
- (c) - porosity of the tailings (n), and
- (d) - degree of saturation (G_{Sat}).

$$V_{res} < \frac{\left[\sum_0^T \Delta t + \left(\int_0^T q_{afl} dt - \int_0^T q_{efl} dt \right) \right]}{[(1-n)+G_{Sat}(n)]} \leq 1, \quad (02)$$

where V_{res} is the final reservoir volume (m^3) and T is the total reservoir lifetime (years).

The portion ($q_{rej}\Delta t$) of the numerator sum represents the solid volume of discreetly deposited tailings (Δt) over the entire period T of the reservoir life.

The difference between the two integrals in parentheses represents the balance of the tributary and total effluent flows of all water entering or leaving the reservoir, considered continuous processes (dt).

Obviously, it is the water balance parameter, which appears in the numerator of eq. (06), which defines the degree of saturation and mass balance of the tailings deposited in the reservoir.

A short period of indifferent equilibrium (metastability) is verified if $\left(\int_0^{\Delta T} q_{afl} dt - \int_0^{\Delta T} q_{efl} dt \right) = 0$, which corresponds to the saturation degree $G_{Sat} = 1$ (liquefied saturated material) and occurs during the rapid release (Δt) of the liquid tailings pulp into the reservoir with the immediate onset of drainage which increases the stability of the massif.

The procedure reduces the degree of tailings saturation to $G_{Sat} < 1$ (nearly saturated liquefied material) and increases the stability of the tailings mass, $\left(\int_0^{\Delta T} q_{afl} dt - \int_0^{\Delta T} q_{efl} dt \right) < 0$, this negative water balance remaining until the next programmed elevation.

In the absence of drainage, the water balance becomes positive $\left(\int_0^{\Delta T} q_{afl} dt - \int_0^{\Delta T} q_{efl} dt \right) > 0$, which takes the degree of saturation of the tailings. to $G_{Sat} > 1$, (supersaturated liquefied material) and brings the tailings mass closer to a structural collapse or rupture.

When there is an equality between the inflow and the effluent of the percolation flows, this time period represents a uniform and constant flow regime and corresponds to a stabilization and zero variation of the groundwater level.

When the inequality between the inflow and effluent flow occurs, these periods represent the transient percolation flow regimes, with the preponderance of the inflow over effluent or vice versa.

The rise (\uparrow) of the water table corresponds to the increase in saturation level $G_{Sat} > 1$, and the decrease (\downarrow) of the safety factor F_s , which are both negative factors in relation to the stability of the massif.

If effluence predominates, a depletion of the water table occurs (\downarrow) and the variation of the above parameters is in the opposite direction and represents an increase in stability (positive factors).

Given the above it is noted the positive influence of maintaining the predominance of effluent flows over the tributaries, where the mass of tailings is unsaturated $G_{Insat} < 1$, with the maximum moisture content near the viscosity limit $LV < (LL = 1)$, according to the previously mentioned suggestion by Komamura and Huang [1974].

During successive elevations of the dam, both the volume of the reservoir and its height increases over time.

If at the release of the "underflow" the deposited sandy material is fluffy, when decanted and sedimented it usually becomes thickened under the additional weight of the following heights, and over time it becomes thickened material.

The sandy material becomes more compact and approaches the state line corresponding to zero volumetric variation.

Following are various elements related to the ruptures of the dams and reservoirs of Mariana and Brumadinho dams, which have certain similarities, but also present some important differences.

The relationship between the height of the reservoir at rupture and the starting dam height presents an intriguing similarity, despite the differences in geographical locations, dams final heights, and employed heightening processes.

Obviously, this is an indication of the existence of a critical height ratio, and it indicates the necessity of restricting the heights of the dams constructed by the upstream progressive elevation method, as used in both Mariana and Brumadinho dams.

Sequentially raised tailings dams can be classified as upstream, downstream or centerline, according to the placement of the sequential raisings relative to the initial dam. Central and downstream raised dams are typically seen in traditional dams, designed for hydroelectric power plants or the like.

Dams raised by these processes can withstand the combined action of hydrostatic and ground pushes due to their robustness and the larger volume of material employed in their execution.

On the other hand, upstream raised dams that are constructed by hydraulic landfill processes rely on previously laid tailings as a foundation for the subsequent raisings.

In this method, the waste is drained and ideally its mass, initially metastable, becomes progressively more stable with the dissociation of the liquid phase.

In this case, where the dams have a higher height, say (± 100 meters), the construction of a drainage system before the reservoirs become operational is recommended.

Break of the Fundão dam (Mariana) and reservoir

The site chosen for the Fundão dam and reservoir form of a large amphitheater with an appreciable longitudinal slope along its inland waterways.

The drainage basin of the Fundão Stream and its four small tributaries develops parallel to the Germano Stream basin where a larger reservoir was built, described in the publication Tailings Dams in Brazil published by the Brazilian Committee of Dams and Pimenta de Ávila Consultoria Ltda. in 2012.

The Germano Stream reservoir was successfully constructed using the so-called drained stacking process of coarse sandy material placed in a semi-dry or semi-dry reservoir.

The silty-argyulous fine material is pumped like a slurry and is discharged into the fines material reservoir where water is mainly eliminated by evaporation to atmosphere.

The process originally referred to as "dry stacking" has been successfully employed in bauxite mining, in tropical regions of the country and in smaller dams.

Apparently, in the case of iron mining, the fine material deposited at the Germano Dam would require a smaller volumetric concentration for pumping and launching in the reservoir, which is cited as 30 to 35% by volume, which would constitute dry stacking variant, but applied to iron ore and in this case is known as the evaporative drying disposal process.

The construction of the Germano dam and reservoir were the initial model of the Fundão stream dam and reservoir, but received downstream a drained stacking as a structural reinforcement suggested by Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.

Table 1. Similarities and differences between Mariana and Brumadinho dam failures

Mariana Dam	Brumadinho Dam
Total dam failure and complete reservoir emptying. Break time: 15:45	Total dam failure and complete reservoir emptying. Break time: 12:30 hours..
Heightening of the dam at a fast pace.	Heightening completed. Dam and reservoir in process of decommissioning.
Dam construction performed by draining coarse piles of tailings and by the dry stacking variant of the fines or drying method.	Dam construction performed by simultaneously releasing coarse weighted underflow mud and fine weightless overflow mud.
Drainage built from five watercourses by two outlying galleries, but proved ineffective.	Drainage diverted from the three small watercourses to the Dam VI reservoir but was interrupted after beginning of decommissioning.
Instrumentation: Not described in the publication; CPT and Piezometers Stand pipes (?).	Instrumentation: Inclinerometers, Standby Piezometers and Surface Markers.
Seismic shocks from rock excavation blasts followed by natural seismic shocks of almost the same intensity	Rock excavation blasts, but no natural earthquake
Relationship between reservoir height and initial dam height: $(110/24) = 4,58$	Relationship between reservoir height and initial dam height: $(81/17) = 4,76$
Very large environmental damage from the inclusion of water from the Santarém reservoir downstream of the Fundão dam and its mixture with the mud. The Doce River was reached to its full extent.	Minor environmental damage that struck the Paraopeba River to its confluence with the Três Marias Reservoir (São Francisco River).
Animals and fish perished in large quantities	Animals and fish perished in smaller quantities
19 fatalities, most of them occurred at the dam's work site.	256 confirmed fatalities. 14 still missing and presumed dead.

The CBDB publication does not describe the dam and reservoir of Fundão Stream that had the participation of other consultants in its project.

The rupture of the Fundão dam and reservoir was the subject of a detailed analysis by the collegiate of consultants chaired by Professor. N. Morgenstern [2016], and composed by S. G. Vick, C. B. Viotti and B. D. Watts, with the collaboration of G. Atkinson [2016] in the seismology sector.

This report confines itself to pointing only to the probable causes of the rupture and determining to them the trigger(s) that initiated the process, without going into any other details except the purely technical ones.

The report considered the proposal by Pimenta de Ávila Consultoria Ltda. for the creation of a separate reservoir for the containment of the slender clay-like slime intended for stocking of the drained stacking of coarse sandy weighted deposits deposited in the semi-dry or semi-wet state, as valid and robust proposal.

But the following points should be noted:

(a) the process of concurrent release of coarse semi-dry / semi-dry material and fines slurry; (b) the process of phasic dissociation or water withdrawal only by evaporation which is a natural, inexpensive and uncontrollable process;

(c) previous experience with fine bauxite and non-hematite tailings;

(d) the positive previous experience was obtained with structures of height approximately three times lower than the Fundão dam.

The report is extremely parsimonious in information about the construction of the two peripheral drainage galleries that were apparently designed to drain the flows of the three small natural watercourses on the right bank and two, somewhat larger and located on the left bank of the Fundão reservoir.

No information is provided and obtained on the geometry, construction joints, extent, flow and discharge of these two drainage devices.

Its frustrated operation is the first cause of the other failures of this project, as it compromised the control and management of both the liquid phase of the mud and the natural flow of the basin streams.

Thus, due to lack of drainage, the deepest part of the reservoir was initially saturated.

The embankment of the starting dam was deformed but was restrained by the rockfill against the embankment.

Drainage of the massif is now carried out at a higher level by means of a draining mat and the kananets-type horizontal plastic drain, which seems not to have been a very suitable solution except for better judgment.

From this situation, the industrial water demand increased and a process of loss of control of the dam and reservoir elevation that was not interrupted but accelerated began.

At this time, the opportunity to build a two-stage retention dam (liquid and solid) of the tailings has been missed as the proposed initial drainage of the massif proved to be inoperative.

An indentation level was created for the deposition of the drained piling to perform the unsuccessful gallery restoration works in the left bank that resulted in its injection-molded filling.

Drainage of the deposited massif worsened and the level of saturation increased, which led to the use of spot drainage solutions where there was evidence of instability.

Even so, the monthly rate of rise of the drained stacking deposit continued to increase, as did the area flooded by mud, which favored the emergence of supersaturation by the rise of the water table.

In this critical phase an interpenetration of the two phases of the tailings, which should not happen, occurred.

The left bank massif in the reservoir became heterogeneous with layers of saturated plastic mud interspersed with the wet sandy layers, all of which were subjected to a rising geostatic gradient with the slope unconfined by the downstream side recess. Morgenstern's report points to the collapse trigger as either a side mud extrusion or a "squeezing effect" of the "slimes" material.

But the rupture of the Fundão reservoir dam also has the presence of a factor that cannot be ignored and which is presented in the same report and transcribed here.

These are the seismic aftershocks that occurred on November 5, 2015, due to the excavation blasts carried out at the Vale mine in the left bank (13:02) and followed shortly after (14:12) by natural seismic disturbances.

Both of these events occurred shortly before the dam rupture started on his left abutment.

The big question surrounding the rupture of the Fundão dam, which probably will never be answered, is: Was it the drainage stack overload and the mud-shearbands, or the natural seismic shocks what ultimately triggered the initial rupture?

Obviously, the lack of natural drainage of from the streams forming the basin, the negative effect of the mixture of saturated fine clay with squeezing effect, the very rapid raising and resulting saturation, all these conditions contributed to the eventual collapse of the dam. Nonetheless, the emergence of the latent instabilities ("shearbands") also contributed, as pointed out by Nova [2002].

Critical combinations of load and deformation were created, which even for infinitesimal load variation generate infinitely large displacements, that is, the collapse that occurs even in the region considered stable by applying the Mohr-Coulomb criteria.

Table 2. Natural Seismic Shakes and Digging Blasts prior to the Fundão Dam rupture. Apud Atkinson [2006] in Morgenstern et. al. report [2016]

Local time	Shake Magnitude (Mw)	Distance from the Reservoir (km)	Nature
13:01:49	2,1	2,6	Digging Blast
13:06:06	2,3	2,6	Digging Blast
14:12:15	2,2	< 2	Seismic (pre-shake)
14:13:51	2,6	< 2	Seismic (main)
14:16:03	1,8	< 2	Seismic (after-shake)
15:45			Beginning of dam rupture

The stockpile rupture occurred in two stages: at the left bank and at the abutment near Vale's exploration pit, and at the dam where the initial rupture gradually spread throughout the supersaturated reservoir.

The consequent damage to the rupture was a destruction of much of Bento Rodrigues village and other nearby sites that were hit by the tailings wave diluted in the water of the Santarém reservoir, unfortunately deployed in an inappropriate location downstream of the Fundão reservoir. upstream of urban agglomeration.

A large amount of the diluted mud filled the reservoir of the Risoleta Neves Hydroelectric Power Plant and then merged into the Rio Gualaxo, a tributary of the Rio Doce where it traveled all the way to the ocean.

Breaking dams and catastrophic runoff from reservoirs are events of disastrous consequences and great damage.

Human lives and the lives of other living beings are obviously not recoverable. However, these tragic events are not completely irreversible, but they take a long time to recover almost fully.

The toxicity of tailings is very relative, since the natural components of the earth's crust where everyone lives, such elements are not toxic at first. Its high concentration may even be toxic, but being diluted in large volume of liquid, it is no longer. The river system at the mud's path is the most affected, of course.

But its tributaries are hardly affected by the catastrophe that hits the mainstream and promote a slow recovery process that can take decades, according to the proper pace set by the natural environmental system. So, talking about the destruction and death of the entire Rio Doce river is a very pessimistic and dramatically exaggerated attitude.

Failure of the Brumadinho dam and reservoir

The Brumadinho dam and reservoir are described in detail in the previously mentioned publication of the Brazilian Dam Committee. The construction and elevation of this dam and reservoir was completed approximately 4 years ago.

The construction and elevation process used was the upstream raising method with the release of tailings mud from the crest of the starting dam and the subsequent raisings.

The natural flow of the Feijão creek was diverted and used in industrial flotation processes and in the transport and release of pulp into the reservoir by hydraulic means.

Dissociated water from the mixture was discharged as sludge that was apparently collected and drained into the auxiliary reservoir, conveniently located on the right bank, where it was stored by dam VI and used to concentrate and transport the pulp or pour downstream. This structure remained intact after the ruptured main dam.

Main dam I was instrumented and monitored as described in the above publication. The site chosen for the implementation of dam I and its reservoir structures is an area shaped like a small geological amphitheater of approximately triangular configuration, set on a slope and located in very hilly terrain crossed by the Feijão creek and its small tributaries.



Fig. 1. Fundão Dam and Reservoir; (a) during construction and before rupture, and (b) after rupture and upon emptying of the reservoir

The length indicated in the dam crest project was 610 meters and the reservoir area 0.24 km². By roughly assessing the extent of the reservoir perimeter in contact with the natural slope terrain, we obtain approximately 1600 meters of indirect runoff contribution, eventually concentrated in three gutters and an undetermined contribution from the groundwater to approximately this same extent.

The surface affluent flow during the construction and elevation period was compensated by the effluent drainage of the slopes (construction) and mainly by the deviation of the main effluent flow to dam dam VI (industrial operational and water transport use).

Thus, during the elevation of dam I and its reservoir, the water balance was negative, which favored the effluent flows mentioned, maintaining the saturation degree $G_{Sat} < 1$ and maintaining the unsaturated and non-liquefied massif.

At the end of the construction of the dam, all the affluent flow was either sent to the dam VI reservoir and transferred downstream, or in the event that this transfer does not start to be absorbed by reservoir I, which reversed the water balance making it positive, which can be verified in photographs by the presence of the stagnant pools of water on the surface of the reservoir.

But in this scenario during all time the transient influence of the new water table affluent or effluent flow was not considered in the construction of the unsaturated reservoir I. As the dam is raised, new groundwater percolated after each raise in reservoir level I, but with the completion of construction of this reservoir the new groundwater stabilized and became a static water table without percolation.

After a reasonable period of time (say three years), its flow reversed and it ceased being effluent, and became affluent relative to dam reservoir I.

At this moment, a growing process of dam I reservoir saturation began, which shortly before the rupture, reached a $G_{SSat} > 1$ supersaturation level.

Evidently all these conjectures, although logical, need to be confirmed by observations of the percolation regime of the new groundwater and its interaction with the created groundwater of the reservoir I.

The Rain, Fluvial and Lysimetric Observation Protocols as well as their conjunction, take years to define the regime and hydrodynamic nature of groundwater percolation and are very costly. This kind of analysis was not done in this case, in our knowledge.

The artificial debris flow runoff that resulted from the rupture was the flow of a non-Newtonian fluid with some natural or apparent viscosity.

Photographs that record the dam rupture clearly indicate that the breach occurred in two stages involving:

(1) a less viscous and more mobile material that searched the Feijão creek stream bed, and

(2) a more viscous and less mobile material contained by the starter dam and which has ruptured last.

This differential of rheological behavior is explained by the greater presence of water in rupture (1) and its lower presence in rupture (2).

In fact, the mobility coefficient (m) is the inverse of the viscosity coefficient (η), that is, the fluid that initiated the flow was less viscous, more mobile and therefore richer in water content.

It was concluded that:

(1) the non-Newtonian fluid was supersaturated and with the supersaturation degree $G_{ssat} > 1$ and in

(2) the liquified fluid with the saturation degree $G_{sat} = 1$.

Therefore, the rupture occurred due to the supersaturation ($G_{ssat} > 1$) of the tailings due to the lack of adequate drainage of the stocked mass, which apparently failed to be done.



Fig. 2. Brumadinho Dam and Reservoir before rupture with the undrained water puddles on its surface

References

- Brazilian Dam Committee (2012). Tailings Dams in Brazil. Eds. CBDB and Pimenta de Ávila Consultoria Ltda (2012). 306
- Jamialkowski, M. (2012). Role of Geophysical Testing in Geotechnical Site Characterization. Special Lecture: "3rd de Mello Lecture", delivered at COBRAMSEG 2012, Porto de Galinhas PE, Eds. ABMS.
- Komamura, F. and Huang, R. H. (1974). New Rheological Model for Soil Behavior. In Jr. of the Geotech. Eng. Division, ASCE Vol. 100, No. GT7, JULY, 1974. 807-824.
- Lade, P. V. and Pradel, D. (1990). Instability and plastic flow of soils I: Experimental observations. In Jr. Engrg Mech., ASCE 116 (11), 2532-2550.
- Lade, P. V., Nelson, R. B. and Ito, Y. M. (1987). Non associated flow and stability of granular materials. In Jr. Engrg Mech., ASCE 114 (12), 2173-2191.
- Morgenstern, N. R., Vick, S. G., Viotti, C. B. and Watts, B. D. (2016). Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam. 1-88.
- Nova, R. (2003). The failure concept in Soil Mechanics revisited. In Proceedings of the International Workshop on Bifurcations & Instabilities in Geomechanics (2002), Minneapolis MN, 3-16.
- Nova, R. (2010). Soil Mechanics. Ed. ISTE Ltd. London EU 2010, 400.



Author's Index

Adzhiev A.Kh.	451
Akhmedov F.S.	351
Ali A.	234
Alidodov B.A.	161
Alizoda U.A.	246
Amin G.	122, 221
Aminov J.H.	135
Anjum M.	272, 282
Anwar W.	146, 208, 221, 234
Arnhardt R.	157
Azimshoev M.M.	161
Bano D.	122, 170, 208
Baryshnikov G.Ya.	355
Bekkiev M.Yu.	371, 388
Blagovechshenskiy V.P.	39
Bobov R.A.	1, 161, 251, 303
Bogachenko E.M.	388
Bogdanov I.S.	363
Boon D.	157
Botavin D.V.	438
Bulanov S.A.	446
Cherkesov A.A.	482
Chernomorets S.S.	1, 251, 303, 371, 388
Din K.	146
Dokukin M.D.	25, 371, 388
Dorgaev A.A.	246
Dorzhiyev A.D.	470
Dzaganiia L.M.	405
Dzaganiia E. V.	517
Erokhin S.A.	157, 183, 194
Fazilov A.R.	135, 313
Fedin A.V.	446
Frolov D.M.	418
Fuchs S.	422
Gavardashvili G.V.	88
Gavardashvili N.G.	88
Genevois R.	74
Gensiorovskiy Yu.V.	430, 477, 491
Golosov V.N.	438, 530
Gulomaydarov A.G.	303
Gurung D.R.	146, 221, 234
Hussain A.	170, 208
Hussain K.	208
Imanov F.A.	351
Imomnazarov F.S.	342
Ivanov M.M.	438
Ivanova N.N.	438
Javadzade E. V.	351
Kalov R.Kh.	351

Kanaev E.	553
Karavaev V.A.	446
Karim D.	146, 208, 221, 234
Karim I.	234
Kasatkin N.E.	39
Kasenov M.K.	39
Keiler M.	422
Kharchenko S.V.	530
Khismatullin T.I.	49, 60
Kidyaeva V.M.	1, 303
Kobuliev M.Z.	135
Kodirov A.S.	246
Kondratyeva N.V.	451
Kotenko L.V.	97
Kotenko T.A.	97
Krabbendam M.	157
Krylenko I.N.	303
Krylenko I.V.	1, 303
Kukhalashvili E.G.	88
Kupreishvili Sh.G.	88
Kurovskaia V.A.	251, 303
Kuznetsova Yu.S.	438
Lalbekov Y.S.	161
Lappo E.G.	446
Lawrie K.	157
Lebedeva E.V.	460
Lekhatinov A.M.	256, 470
Lekhatinova E.B.	470
Lobkina V.A.	430, 477
Malneva I.V.	482
Mamadjanov Y.	135
Marodaseinov F.O.	1, 303
Mavlonazarov O.N.	251
Medeu A.R.	39
Mikhalev M.V.	430, 477
Muzychenko A.A.	430, 491, 499
Muzychenko L.E.	430, 491, 499
Nasab N.	208
Niyazov J.B.	135
Olzoev B.N.	541
Papathoma-Köhle M.	422
Petrova E.G.	509
Pirmamadov U.R.	1, 290, 303
Plastinin L.A.	541
Rahim Q.	221
Raimbekov Yu.Kh.	1, 303
Ranova S.U.	39
Raymbekova Zh.T.	39
Razumov V.V.	451
Safarov M.S.	313
Savernyuk E.A.	1, 303, 371, 388
Scarso G.	74
Seminozhenko S.S.	446
Shafiev G.V.	323
Shah S.	122, 170

Shah N.U.	272
Shnyparkov A.L.	49, 60
Shvarev S.V.	530
Simister A.	157
Smith N.	157
Sokratov S.A.	49, 60
Stepnova Y.A.	430
Strom A.L.	111
Stupin V.P.	541
Taghoybekov A.S.	342
Tecca P.R.	74
Torres A.	553
Tsyplenkov A.S.	438
Turchaninova A.S.	49, 60
Uddin K.	234
Uddin N.	208, 282
Uddin S.	272, 282
Uddin Z.	272, 282
Uspensky M.I.	530
Uzdenova A.B.	451
Valiev Sh.F.	161
Vinogradova T.A.	251
Viskhadzhieva K.S.	1, 251, 303
Voskova A.V.	446
Wahab U.	146
Wali S.	122, 170
Yusupov S.Y.	335
Zaginaev V.V.	157, 183, 194
Zaman T.	282
Zaporozhchenko E.V.	25
Zaripov R.G.	342
Zhdanov V.V.	565
Zikillobekov I.I.	1, 303
Znamensky D.V.	25, 571



Авторский указатель

Аджиев А.Х.	451
Азимшоев М.М.	161
Али А.	234
Алидодов Б.А.	161
Ализода У.А.	246
Амин Г.	122, 221
Аминов Дж.Х.	134
Анвар В.	146, 208, 221, 234
Анджум М.	272, 282
Арнхардт Р.	157
Ахмедов Ф.Ш.	351
Банно Д.	122, 170, 208
Барышников Г.Я.	355
Беккиев М.Ю.	371, 388
Благовещенский В.П.	39
Бобов Р.А.	1, 161, 251, 303
Богаченко Е.М.	388
Богданов И.С.	363
Ботавин Д.В.	438
Буланов С.А.	446
Бун Д.	157
Вали С.	170
Вали Ш.	122
Валиев Ш.Ф.	161
Вахаб У.	146
Виноградова Т.А.	251
Висхаджиева К.С.	1, 251, 303
Воскова А.В.	446
Гавардашвили Г.В.	88
Гавардашвили Н.Г.	88
Генсиоровский Ю.В.	430, 477, 491
Голосов В.Н.	438, 529
Гуломайдаров А.Г.	303
Гурунг Д.Р.	146, 221, 234
Джавадзаде Е.В.	351
Дзагания Е.В.	517
Дзагания Л.М.	405
Дин К.	146
Докукин М.Д.	25, 371, 388
Доргаев А.А.	246
Доржиев А.Д.	470
Ерохин С.А.	157, 183, 194
Жданов В.В.	565
Женева Р.	74
Загинаев В.В.	157, 183, 194
Заман Т.	282
Запорожченко Э.В.	25
Зарипов Р.Г.	342
Зикиллобеков И.И.	1, 303

Знаменский Д.В.	25, 571
Иванов М.М.	438
Иванова Н.Н.	438
Иманов Ф.А.	351
Имомназаров Ф.С.	351
Калов Р.Х.	371, 388
Канаев Е.	553
Караваев В.А.	446
Карим Д.	146, 208, 221, 234
Карим И.	234
Касаткин Н.Е.	39
Касенов М.К.	39
Кейлер М.	422
Кидяева В.М.	1, 303
Кобулиев М.З.	134
Кодиров А.С.	246
Кондратьева Н.В.	451
Котенко Л.В.	97
Котенко Т.А.	97
Краббендам М.	157
Крыленко И.В.	1, 303
Крыленко И.Н.	1, 303
Кузнецова Ю.С.	438
Купрейшвили Ш.Г.	88
Куровская В.А.	251, 303
Кухалашвили Э.Г.	88
Лори К.	157
Лалбеков Ё.С.	161
Лаппо Е.Г.	446
Лебедева Е.В.	460
Лехатинов А.М.	265, 470
Лехатинова Э.Б.	470
Лобкина В.А.	430, 477
Мавлоназаров О.Н.	251
Мальнева И.В.	482
Мамаджанов Ю.	134
Мародасейнов Ф.О.	1, 303
Медеу А.Р.	39
Михалев М.В.	430, 477
Музыченко А.А.	430, 491, 499
Музыченко Л.Е.	430, 491, 499
Насаб Н.	208
Ниязов Дж.Б.	134
Олзоев Б.Н.	541
Папатхома-Кёле М.	422
Петрова Е.Г.	509
Пирмамадов У.Р.	1, 290, 300
Пластинин Л.А.	541
Разумов В.В.	451
Раимбеков Ю.Х.	1, 303
Раймбекова Ж.Т.	39
Ранова С.У.	39
Рахим К.	221
Савернюк Е.А.	1, 303, 371, 388
Сафаров М.С.	313

Семиноженко С.С.	446
Симистер А.	157
Скарсо Дж.	74
Смит Н.	157
Сократов С.А.	49, 60
Степнова Ю.А.	430
Стром А.Л.	111
Ступин В.П.	541
Тагойбеков А.С.	342
Текка П.Р.	74
Торрес А.	553
Турчанинова А.С.	49, 60
Уддин З.	272, 282
Уддин К.	234
Уддин Н.	208, 282
Уддин С.	272, 282
Узденова А.Б.	451
Успенский М.И.	529
Фазылов А.Р.	134, 313
Федин А.В.	446
Фролов Д.М.	418
Фукс С.	422
Харченко С.В.	529
Хисматуллин Т.И.	49, 60
Хуссаин А.	170, 208
Хуссаин К.	208
Цыпленков А.С.	438
Черкесов А.А.	482
Черноморец С.С.	1, 251, 303, 371, 388
Шафиев Г.В.	323
Шах С. 122,	170
Шах Н.У.	272
Шварев С.В.	529
Шныпарков А.Л.	49, 60
Юсупов С.Ю.	335



Contents

Preface	vii
Risk and consequences of high-mountain lake outbursts in Tajikistan	1
<i>U.R. Pirmamadov, R.A. Bobov, Yu.Kh. Raimbekov, F.O. Marodaseinov, I.I. Zikilobekov, S.S. Chernomorets, E.A. Savernyuk, V.M. Kidyayeva, I.V. Krylenko, I.N. Krylenko, K.S. Viskhadzhieva</i>	
Tailings dams - facilities of increased debris-flow hazard	25
<i>M.D. Dokukin, E.V. Zaporozhchenko, D.V. Znamensky</i>	
System of the debris flow protection in the Zailiyskiy Alatau range	39
<i>A.R. Medeu, V.P. Blagovechshenskiy, S.U. Ranova, N.E. Kasatkin, M.K. Kasenov, Zh.T. Raymbekova</i>	
Debris flow hazard for the transportation network in the Eastern Siberia and the Russian Far East	49
<i>A.L. Shnyparkov, A.S. Turchaninova, T.I. Khismatullin, S.A. Sokratov</i>	
Debris flow risk for transportation network in the Eastern Siberia and the Russian Far East in the middle of the XXI century	60
<i>A.L. Shnyparkov, A.S. Turchaninova, T.I. Khismatullin, S.A. Sokratov</i>	
Assessments on debris flow distribution, triggering and evolution in the Dolomites area (North-Eastern Italy)	74
<i>P.R. Tecca, R. Genevois, G. Scarso</i>	
Elastic mudflow regulating barrage and methodology for its calculation	88
<i>G.V. Gavardashvili, E.G. Kukhalashvili, Sh.G. Kupreishvili, N.G. Gavardashvili</i>	
Debris flows on September 4, 2017 on the Okhotsk coast of Paramushir Island, Kuril Islands	97
<i>T.A. Kotenko, L.V. Kotenko</i>	
Rockslide dams and catastrophic outburst floods in the river valleys of the Pamir mountains	111
<i>A.L. Strom</i>	
Comprehensive analysis of surface characteristics of debris flow fans in Gilgit-Baltistan and Chitral regions of Pakistan using remote sensing	122
<i>G. Amin, D. Bano, S. Wali, S. Shah</i>	
Litho-structural mapping of debris flow hazard zones of Western Darvaz (Tajikistan and Afghanistan) from Sentinel data using remote sensing techniques	135
<i>J.H. Aminov, A.R. Fazilov, J.H. Aminov, Y. Mamadjanov, M.Z. Kobuliev, J.B. Niyazov</i>	
Badswat glacial lake outburst flood and debris dammed lake: a case study	146
<i>W. Anwar, D. Karim, U. Wahab, K. Din, D.R. Gurung</i>	

Centralized national landslide database for the Kyrgyz Republic: initial steps	157
<i>R. Arnhardt, D. Boon, S. Erokhin, V. Zaginaev, N. Smith, A. Simister, K. Lawrie, M. Krabbendam</i>	
Outcomes of engineering-geological assessment of the debris flow hazard of Surkhudara sub-catchment and adjacent area (Ilyak River valley, Tajikistan)	161
<i>M.M. Azimshoev, R.A. Bobov, Y.S. Lalbekov, Sh.F. Valiev, B.A. Alidodov</i>	
Mapping and modelling of glacial lake outburst flood (GLOF) of Deran glacial lake, Ishkoman Valley, Ghizer District, Pakistan using GIS and remote sensing	170
<i>D. Bano, S. Wali, S. Shah, A. Hussain</i>	
The outburst hazard of the landslide-dammed lakes of the Tien Shan	183
<i>S.A. Erokhin, V.V. Zaginaev</i>	
Trends of outburst hazard for the dynamics of mountain lakes in Kyrgyzstan	194
<i>S.A. Erokhin, V.V. Zaginaev</i>	
Glacier lake outburst flood modeling of Khurdopin glacier lake using HEC-RAS and GIS	208
<i>A. Hussain, N. Nasab, D. Bano, D. Karim, W. Anwar, K. Hussain, N. Uddin</i>	
Debris Flow Pilot Risk Management – a case from Sherqilla in Hindukush Region of Gilgit-Baltistan, Pakistan	221
<i>D. Karim, W. Anwar, G. Amin, Q. Rahim, D.R. Gurung</i>	
Glacier hazard associated with surging glaciers – story of the Shishper Glacier from Hunza, Pakistan	234
<i>D. Karim, I. Karim, W. Anwar, K. Uddin, A. Ali, D.R. Gurung</i>	
Climatic risks and food security in the Khatlon Region of Tajikistan	246
<i>A.S. Kodirov, U.A. Alizoda, A.A. Dorgaev</i>	
Assessment of debris-flow parameters for the 2015 debris flow event in Barsemdara stream valley (Tajikistan)	252
<i>V.A. Kurovskaia, S.S. Chernomorets, T.A. Vinogradova, K.S. Viskhadzhieva, O.N. Mavlonazarov, R.A. Bobov</i>	
Debris flow hazard in case of the outbursts of dammed lakes and reservoirs in Pamir and other mountain regions	265
<i>A.M. Lekhatinov</i>	
Debris flow hazard of glacial lake in Chitral, Pakistan	272
<i>N.U. Shah, M. Anjum, S. Uddin, Z. Uddin</i>	
Debris flow mitigation in Chitral Region, Pakistan	282
<i>Z. Uddin, T. Zaman, M. Anjum, S. Uddin, N. Uddin</i>	
Integrated assessment and planning of watershed management in the Rasht valley of the Republic of Tajikistan	290
<i>U.R. Pirmamadov</i>	

Assessment of a potential outburst for Lower Varshedzkul Lake (Pamir, Tajikistan) using bathymetric survey and modeling	303
<i>Y.K. Raimbekov, U.R. Pirmamadov, F.O. Marodaseinov, I.I. Zikillobekov, A.G. Gulomaydarov, S.S. Chernomorets, E.A. Savernyuk, I.V. Krylenko, I.N. Krylenko, V.M. Kidyayeva, V.A. Kurovskaiia, K.S. Viskhadzhieva, R.A. Bobov</i>	
Remote sensing and monitoring of debris flow areas in the conditions of climate change (Kamarob, Tajikistan)	313
<i>M.S. Safarov, A.R. Fazilov</i>	
Debris flow risk and vulnerability assessment for the territory of the Khorog town	323
<i>G.V. Shafiev</i>	
Role of vegetation cover for the landscape stabilization in Shashvalon catchment, Nurabad District, Republic of Tajikistan	335
<i>S.Y. Yusupov</i>	
Assessment of debris flows in the Shuraki Kapali River basin (left tributary of the Surkhob River, Tajikistan) and development of risk reduction measures	342
<i>R.G. Zaripov, F.S. Imomnazarov, A.S. Taghoybekov</i>	
Calculation of non-eroding velocities in mountain rivers of Azerbaijan	351
<i>F.S. Akhmedov, F.A. Imanov, E.V. Javadzade</i>	
Neopleistocene debris flows in Gorny Altai	355
<i>G.Ya. Baryshnikov</i>	
Debris flow protection constructions design experience at the transport infrastructure facilities in dumped conditions	363
<i>I.S. Bogdanov</i>	
Underground outbursts of lakes and other debris flow manifestations in rock glaciers	371
<i>M.D. Dokukin, M.Yu. Bekkiev, R.Kh. Kalov, E.A. Savernyuk, S.S. Chernomorets</i>	
Glaciogeomorphological conditions for the Gerkhoshan-Su River debris flow formation (Central Caucasus)	388
<i>M.D. Dokukin, M.Yu. Bekkiev, R.Kh. Kalov, E.A. Savernyuk, S.S. Chernomorets, E.M. Bogachenko</i>	
Application of forestry to protect against debris flows on the Black Sea coast of the West Caucasus	405
<i>L.M. Dzaganiia</i>	
Estimation of ground freezing depth as deterrent factor of debris flow process	418
<i>D.M. Frolov</i>	
Vulnerability of buildings exposed to dynamic flooding	422
<i>S. Fuchs, M. Papathoma-Köhle, M. Keiler</i>	
Debris flow in the North-East of Russia	430
<i>Yu.V. Gensiorovskiy, L.E. Muzychenko, V.A. Lobkina, A.A. Muzychenko, M.V. Mikhalev, Y.A. Stepnova</i>	

Geomorphological consequences and hydrometeorological conditions of extreme flood in the Tsanyk River basin, Sochi region	438
<i>V.N. Golosov, Yu.S. Kuznetsova, N.N. Ivanova, A.S. Tsyplenkov, D.V. Botavin, M.M. Ivanov</i>	
Role of debris flows in the cycle of extremal exogenic processes in the mountains of the Central Caucasus (case study of the Cherek Balkarsky river basin)	446
<i>V.A. Karavaev, A.V. Voskova², S.S. Seminozhenko³, A.V. Fedin, E.G. Lappo, S.A. Bulanov</i>	
Temporary analysis of change of debris flow activity on the northern slope of the Great Caucasus	451
<i>N.V. Kondratyeva, A.Kh. Adzhiev, V.V. Razumov, A.B. Uzdenova</i>	
Features of debris flow formation in volcanic regions	460
<i>E.V. Lebedeva</i>	
Influence of debris flows on the ecosystem and ecology of Tunkinsky National Park	470
<i>A.M. Lekhatinov, E.B. Lekhatinova, A.D. Dorzhiyev</i>	
Characteristics of debris flows forming in permafrost areas	477
<i>V.A. Lobkina, Yu.V. Gensiorovskiy, M.V. Mikhalev</i>	
Assessment of the influence of space weather on the development of the debris flow process in the Elbrus region to clarify the operational forecasts of debris flows	482
<i>I.V. Malneva, A.A. Cherkesov</i>	
Debris flow distribution within Khabarovsk Krai territory	491
<i>A.A. Muzychenko, Yu.V. Gensiorovskiy, L.E. Muzychenko</i>	
Distribution of natural and man-made debris flows on Sakhalin Island	499
<i>L.E. Muzychenko, A.A. Muzychenko</i>	
Impacts of debris flows on the technosphere according to the database analysis	509
<i>E.G. Petrova</i>	
Effectiveness of debris flow protection measures within the mountain ski cluster of Krasnaya Polyana of Sochi (West Caucasus)	517
<i>K.G. Samarkin-Dzharskiy, E.V. Dzaganiia</i>	
Quantitative assessment of anthropogenic impact for debris flow activation in small catchments of the Aibga Ridge (Krasnaya Polyana village area)	530
<i>S.V. Shvarev, S.V. Kharchenko, V.N. Golosov, M.I. Uspensky</i>	
Use of remote sensing data for medium-scale geoinformation mapping of debris-flow hazard in the Baikal mountain country	541
<i>V.P. Stupin, L.A. Plastinin, B.N. Olzoev</i>	
Ground-based slope stability radar for the discrimination of superficial deformation process and their correlation with environmental triggering factors	553
<i>A. Torres, E. Kanaev</i>	

Abnormal ice situation on the mountain rivers of South-East Kazakhstan as a sign of formation of ice-water flows	565
<i>V.V. Zhdanov</i>	
Remarks on Mariana and Brumadinho tailings dams' disasters (Minas Gerais, Brazil)	571
<i>D.V. Znamensky</i>	
Author's Index	581
Contents	587



Содержание

Предисловие	ix
Риск и последствия прорывов высокогорных озёр Таджикистана	1
<i>У.Р. Пирмамадов, Р.А. Бобов, Ю.Х. Раимбеков, Ф.О. Мародасейнов, И.И. Зикиллобеков, С.С. Черноморец, Е.А. Савернюк, В.М. Кидяева, И.В. Крыленко, И.Н. Крыленко, К.С. Висхаджиева</i>	
Хвостохранилища – объекты повышенной селевой опасности	25
<i>М.Д. Докукин, Э.В. Запорожченко, Д.В. Знаменский</i>	
Система противоселевых мероприятий в Заилийском Алатау	39
<i>А.Р. Медеу, В.П. Благовещенский, С.У. Ранова, Н.Е. Касаткин, М.К. Касенов, Ж.Т. Раймбекова</i>	
Селевая опасность для транспортных коммуникаций территории Восточной Сибири и Дальнего Востока	49
<i>А.Л. Шныпарков, А.С. Турчанинова, Т.И. Хисматуллин, С.А. Сократов</i>	
Селевой риск для транспортных коммуникаций территории Восточной Сибири и Дальнего Востока в середине XXI века	60
<i>А.Л. Шныпарков, А.С. Турчанинова, Т.И. Хисматуллин, С.А. Сократов</i>	
Оценка масштабов распространения, механизмов возникновения и эволюции селевых потоков в районе Доломитовых Альп (Северо-Восточная Италия)	74
<i>П.Р. Текка, Р. Женевуа, Дж. Скарсо</i>	
Селерегулирующий эластичный барраж и методология его расчета	88
<i>Г.В. Гавардашвили, Э.Г. Кухалашвили, Ш.Г. Купреишвили, Н.Г. Гавардашвили</i>	
Сели 4 сентября 2017 г. на Охотоморском побережье о. Парамушир, Курильские острова	97
<i>Т.А. Котенко, Л.В. Котенко</i>	
Завальные плотины и катастрофические прорывные паводки в долинах рек Памира	111
<i>А.Л. Стром</i>	
Комплексный анализ геоморфологических характеристик селевых конусов выноса в Гилгит-Балтистане и Читрале (Пакистан) с использованием данных дистанционного зондирования	122
<i>Г. Амин, Д. Бано, Ш. Вали, С. Шах</i>	
Лито-структурное картирование селеопасных зон западного Дарваза (Таджикистан и Афганистан) по данным Sentinel и с использованием методов дистанционного зондирования	134
<i>Дж.Х. Аминов, А.Р. Фазылов, Дж.Х. Аминов, Ю. Мамаджанов, М.З. Кобулиев, Дж.Б. Ниязов</i>	
Прорыв ледникового озера Бадсват и сформированного в результате подпрудного озера	146

В. Анвар, Д. Карим, У. Вахаб, К. Дин, Д.Р. Гурунг

Создание централизованной национальной базы данных по оползням Кыргызской Республики: первые шаги 157

Р. Арнхардт, Д. Бун, С. Ерохин, В. Загинаев, Н. Смит, А. Симистер, К. Лори, М. Краббендам

Результаты инженерно-геологической оценки селевых потоков суб-водосборного бассейна Сурхдара и прилегающих территорий (долина реки Иляк, Таджикистан)

М.М. Азимшоев, Р.А. Бобов, Ё.С. Лалбеков, Ш.Ф. Валиев, Б.А. Алидодов 161

Картографирование и моделирование прорыва ледникового озера Деран (долина Ишкоман, округ Гхизер, Пакистан) с использованием ГИС и данных дистанционного зондирования 170

Д. Бано, С. Вали, С. Шах, А. Хуссаин

Прорывоопасность завально-оползневых озер Тянь-Шаня 183

С.А. Ерохин, В.В. Загинаев

Тенденции прорывоопасности в развитии горных озер Кыргызстана 194

С.А. Ерохин, В.В. Загинаев

Моделирование паводка, сформировавшегося в результате прорыва ледникового озера Хурдопин, с использованием программы HEC-RAS и ГИС-технологий 208

А. Хуссаин, Н. Насаб, Д. Бано, Д. Карим, В. Анвар, К. Хуссаин, Н. Уддин

Пилотный проект по управлению рисками селевых потоков на примере селения Шеркилла в горах Гиндукуша (Гилгит-Балтистан, Пакистан) 221

Д. Карим, В. Анвар, Г. Амин, К. Рахим, Д.Р. Гурунг

Гляциальные опасности, связанные с пульсирующими ледниками, – история ледника Шишпер (долина р. Хунза, Пакистан) 234

Д. Карим, И. Карим, В. Анвар, К. Уддин, А. Али, Д.Р. Гурунг

Климатические риски и продовольственная безопасность в Хатлонской области Таджикистана 246

А.С. Кодиров, У.А. Ализода, А.А. Доргаев

Оценка характеристик селевого потока 2015 года в долине ручья Барсемдара (Таджикистан) 251

В.А. Куровская, С.С. Черноморец, Т.А. Виноградова, К.С. Висхаджиева, О.Н. Мавлоназаров, Р.А. Бобов

Селеформирующая опасность завальных озер и водохранилищ Памира и других горных регионов 265

А.М. Лехатинов

Селевая опасность ледникового озера в Читрале, Пакистан 272

Н.У. Шах, М. Анджум, С. Уддин, З. Уддин

Мероприятия по смягчению последствий селевых потоков в округе Читрал (Пакистан) 282

З. Уддин, Т. Заман, М. Анджум, С. Уддин, Н. Уддин

Комплексная оценка и планирование управления водосборными бассейнами в Раштской долине Республики Таджикистан	290
<i>У.Р. Пирмамадов</i>	
Оценка потенциального прорыва озера Варшезкуль Нижнее (Памир, Таджикистан) по результатам батиметрической съемки и моделирования	303
<i>Ю.Х. Раимбеков, У.Р. Пирмамадов, Ф.О. Мародасейнов, И.И. Зикиллобеков, А.Г. Гуломайдоров, С.С. Черноморец, Е.А. Савернюк, И.В. Крыленко, И.Н. Крыленко, В.М. Кидяева, В.А. Куровская, К.С. Висхаджиева, Р.А. Бобов</i>	
Дистанционное зондирование и мониторинг селеопасных территорий в условиях изменения климата (Камароб, Таджикистан)	313
<i>М.С. Сафаров, А.Р. Фазылов</i>	
Оценка риска и уязвимости территории города Хорог от селевых явлений	323
<i>Г.В. Шафиев</i>	
Роль растительного покрова в укреплении ландшафтов водосборного бассейна Шашвалон Нурабадского района Республики Таджикистан	335
<i>С.Ю. Юсупов</i>	
Оценка селевых потоков бассейна реки Шураки Капали (левый приток реки Сурхоб, Таджикистан) и разработка мер по снижению риска	342
<i>Р.Г. Зарипов, Ф.С. Имомназаров, А.С. Тагойбеков</i>	
Расчет неразмывающих скоростей в горных реках Азербайджана	351
<i>Ф.Ш. Ахмедов, Ф.А. Иманов, Е.В. Джавадзаде</i>	
Водокаменные сели Горного Алтая в неоплейстоцене	355
<i>Г.Я. Барышников</i>	
Опыт проектирования селезащитных сооружений на объектах транспортной инфраструктуры в стесненных условиях	363
<i>И.С. Богданов</i>	
Подземные прорывы озёр и другие проявления селей в каменных глетчерах	371
<i>М.Д. Докукин, М.Ю. Беккиев, Р.Х. Калов, Е.А. Савернюк, С.С. Черноморец</i>	
Гляциогеоморфологические условия формирования селей р. Герхожан-Су (Центральный Кавказ)	388
<i>М.Д. Докукин, М.Ю. Беккиев, Р.Х. Калов, Е.А. Савернюк, С.С. Черноморец, Е.М. Богаченко</i>	
Применение лесомелиорации для селезащиты на Черноморском побережье Западного Кавказа	405
<i>Л.М. Дзаганя</i>	
Оценка глубины промерзания грунта как сдерживающего фактора селевого процесса	418
<i>Д.М. Фролов</i>	
Уязвимость зданий, подверженных динамическим наводнениям	422
<i>С. Фукс, М. Папатхома-Кёле, М. Кейлер</i>	

Селевые процессы на Северо-Востоке России	430
<i>Ю.В. Генсиоровский, Л.Е. Музыченко, В.А. Лобкина, А.А. Музыченко, М.В. Михалев, Ю.А. Степнова</i>	
Геоморфологические последствия и гидрометеорологические предпосылки экстремального паводка в бассейне р. Цаньк, район Большого Сочи	438
<i>В.Н. Голосов, Ю.С. Кузнецова, Н.Н. Иванова, А.С. Цыпленков, Д.В. Ботавин, М.М. Иванов</i>	
Роль селей в цикле экстремальных экзогенных процессов в горах Центрального Кавказа (на примере бассейна реки Черек Балкарский)	446
<i>В.А. Караваев, А.В. Воскова, С.С. Семиноженко, А.В. Федин, Е.Г. Лаппо, С.А. Буланов</i>	
Временной анализ изменения селевой активности на северном склоне Большого Кавказа	451
<i>Н.В. Кондратьева, А.Х. Аджиев, В.В. Разумов, А.Б. Узденова</i>	
Особенности селеформирования в вулканических регионах	460
<i>Е.В. Лебедева</i>	
Влияние селевых потоков на биогеоценоз и экологию национального парка «Тункинский»	470
<i>А.М. Лехатинов, Э.Б. Лехатинова, А.Д. Доржиев</i>	
Характеристики селей, формирующихся в районах распространения многолетнемерзлых пород	477
<i>В.А. Лобкина, Ю.В. Генсиоровский, М.В. Михалев</i>	
Оценка влияния космической погоды на развитие селевого процесса в Приэльбрусье для уточнения оперативных прогнозов селей	482
<i>И.В. Мальнева, А.А. Черкесов</i>	
Распространение селевых процессов на территории Хабаровского края	491
<i>А.А. Музыченко, Ю.В. Генсиоровский, Л.Е. Музыченко</i>	
Распространение природных и антропогенных селей на острове Сахалин	499
<i>Л.Е. Музыченко, А.А. Музыченко</i>	
Воздействие селевых потоков на техносферу по результатам анализа базы данных	509
<i>Е.Г. Петрова</i>	
Эффективность селезащитных мероприятий в пределах Краснополянского горнолыжного кластера города Сочи (Западный Кавказ)	517
<i>К.Г. Самаркин-Джарский, Е.В. Дзаганя</i>	
Количественная оценка антропогенного воздействия на активизацию селевых процессов в малых водосборах хр. Аибга (район пос. Красная Поляна)	529
<i>С.В. Шварев, С.В. Харченко, В.Н. Голосов, М.И. Успенский</i>	
Использование данных дистанционного зондирования Земли при среднемасштабном геоинформационном картографировании селевой опасности Байкальской горной страны	541
<i>В.П. Ступин, Л.А. Пластинин, Б.Н. Олзоев</i>	

Наземный радар для определения устойчивости склонов при распознавании поверхностных деформационных процессов и их корреляции с внешними триггерными факторами	553
<i>А. Торрес, Е. Канаев</i>	
Аномальная ледовая обстановка на горных реках Юго-Восточного Казахстана – причина формирования водоледяных селей	565
<i>В.В. Жданов</i>	
Краткий обзор катастроф, произошедших на намывных дамбах Мариана и Брумадиньо (штат Минас-Жерайс, Бразилия)	571
<i>Д.В. Знаменский</i>	
Авторский указатель	584
Содержание	592



Conference organizers

Financial support

