

Том XII | 2/2018
Vol. XII

GeoRisk

ISSN 1997-8669 (Print)
ISSN 2587-8220 (Online)

ГЕОРИСК



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:



ИГИИС

Самостоятельная организация



АИИС

Ассоциация
«Инженерные изыскания
в строительстве»

Методология построения нового комплекса карт общего сейсмического районирования территории Узбекистана ОСР-2017

Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А.

Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан

6

Оценка и картографирование опасности наводнений на Северном Кавказе: обзор и сопоставление существующих подходов

Мироненко А.А., Фролова Н.Л.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Рец Е.П.

Институт водных проблем РАН

26

Опыт моделирования прорыва Башкаринских озер

Кидяева В.М.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ

Петраков Д.А., Крыленко И.Н.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Алейников А.А.

Группа компаний «СКАНЭКС»

Штоффел М.

Университет Женевы

Граф К.

Швейцарский федеральный институт лесных, снежных и ландшафтных исследований

38

Применение ГИС-технологий для оценки загрязнения атмосферного воздуха автотранспортом на территории Новой Москвы

Переверзев П.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

48

Комплексная инженерная оценка рельефа для строительства газотранспортных систем в Европейской части России

Черноморец Л.С.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

54

ПРИЛОЖЕНИЯ

Работа в зоне бедствия (Ленинканский дневник). Часть 1

Самусь Н.А.

66

Обзор опасных природных явлений за апрель — июнь 2018 года

Шанина В.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

86

Когда взорвется Черное море?

Отрывок из книги А.М. Горюничко «Тайны и мифы науки. В поисках истины»

92



Фото на обложке: <https://www.pictavens.com/slideshows/42064503>

ГЕОРИСК

Международный научный журнал

Журнал включен в перечень научных журналов, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издается с декабря 2007 г.
Выходит 4 раза в год.

ISSN: 1997-8669 (Print), ISSN: 2587-8220 (Online)

В журнале публикуются статьи, в которых освещаются проблемы инженерно-геологического риска, анализируются природные геологические катастрофы, предлагаются методы их предупреждения и ликвидации последствий. Основные темы — опасные экзогенные и эндогенные геологические процессы, их механизмы, последствия, проблемы классификации и прогноза, методика оценки опасностей и рисков, методы предупреждения и ликвидации последствий опасных природных процессов и явлений.

УЧРЕДИТЕЛЬ

ООО «Геомаркетинг»,
105187, РФ, Москва, Окружной проезд, д. 18

ИЗДАТЕЛЬСТВО

ООО «Геомаркетинг»,
105187, РФ, Москва, Окружной проезд, д. 18

РЕДАКЦИЯ

Торбина Екатерина Андреевна
генеральный директор

Висхаджиева Карина Сайдовна
литературный редактор

Алешина Яна Сергеевна
отдел рекламы

Якимчик Ольга Леонидовна
отдел подписки

АДРЕС РЕДАКЦИИ

ООО «Геомаркетинг»
107076, РФ, Москва, ул. Электрозаводская, д. 60
Тел. +7 495 210-63-90, +7 495 210-63-06
E-mail: info@geomark.ru
http://geomark.ru

ИП Гилманов М.А.

допечатная подготовка, дизайн и верстка

ТИПОГРАФИЯ

ООО «Медиаколор», 107076, РФ, Москва, ул. Вольная, д. 28

Свидетельство о регистрации средства массовой информации:
ПИ № ФС77-48920 от 20 марта 2012 г.

Подписка может быть оформлена в редакции,
через Агентство «Роспечать», ГК «Урал-Пресс»,
ООО «Информнаука» (подписной индекс 71510).

Электронная версия: <http://geomark.ru/journals/georisk/>
https://elibrary.ru/title_about.asp?id=28492

Подписано в печать 29.06.2018.

Формат издания 50x70/8. Бумага глянцевая. Печать офсетная.

Тираж 1 000 экз.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Богданов Михаил Игоревич

Кандидат геолого-минералогических наук, генеральный директор ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве», президент Координационного совета СРО «Ассоциация инженерные изыскания в строительстве», председатель Правления «Союза изыскателей», член Общественного совета при «Роснедра», Международной Ассоциации инженер-геологов (МАИГ), Технического комитета ISO/TC 182 «Геотехника» Международной организации по стандартизации (ISO), действительный член Института минералов, материалов и горного дела (IOM³, Великобритания) (Москва, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Алабян Андрей Михайлович

Кандидат географических наук, доцент кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)

Городницкий Александр Моисеевич

Доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории геофизического поля Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, профессор, заслуженный деятель науки РФ, академик РАЕН (Москва, Россия)

Зеркаль Олег Владимирович

Кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией инженерной геодинамики и обоснования инженерной защиты территорий, ведущий научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, член Международного консорциума по оползням (Япония), Международной ассоциации инженер-геологов (МАИГ), Международного общества по механике грунтов (Австрия) (Москва, Россия)

Казаков Николай Александрович

Кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией лавинных и селевых процессов, директор Сахалинского филиала Дальневосточного геологического института ДВО РАН, доцент, член научно-экспертного совета при администрации Сахалинской области, член президиума Российской селевой ассоциации (Южно-Сахалинск, Россия)

Косинова Ирина Ивановна

Доктор геолого-минералогических наук, заведующая кафедрой экологической геологии геологического факультета Воронежского государственного университета, профессор, член экспертной комиссии по вопросам экологии при «Управлении экологии и природопользования по Воронежской области» (Воронеж, Россия)

Левин Борис Вульфвич

Доктор физико-математических наук, председатель Сахалинского научного центра ДВО РАН, председатель комиссии по цунами Отделения наук о Земле РАН, профессор, член-корреспондент РАН (Южно-Сахалинск, Россия)

Максимович Николай Георгиевич

Кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе Естественнонаучного института Пермского государственного национального исследовательского университета, доцент, заслуженный эколог РФ, член Международной ассоциации инженер-геологов (МАИГ) (Пермь, Россия)

Разумов Виктор Владимирович

Доктор географических наук, профессор кафедры картографии и геоинформатики Северо-Кавказского федерального университета, главный научный сотрудник АО «Российские космические системы» Роскосмоса, лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники (Москва, Россия)

Сасорова Елена Васильевна

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории цунами Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Москва, Россия)

Святенко Инна Юрьевна

Доктор технических наук, председатель Комиссии Московской городской Думы по безопасности (Москва, Россия)

Трофимов Виктор Титович

Доктор геолого-минералогических наук, советник ректората, заведующий кафедрой инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, профессор, академик РАЕН и МАН ВШ, заслуженный деятель науки РФ (Москва, Россия)

В статьях представлена точка зрения авторов, которая может не совпадать с мнением редакции журнала.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.

© ООО «Геомаркетинг», 2018

Methodology of developing the new complex of general seismic zoning maps of Uzbekistan territory OSR-2017

ARTIKOV T.U., IBRAGIMOV R.S., IBRAGIMOVA T.L., MIRZAEV M.A.

Mavlyanov Institute of Seismology, Academy of Science of the Republic of Uzbekistan

6

Flood hazard evaluation and mapping in the Northern Caucasus: review and comparison of existing approaches

MIRONENKO A.A., FROLOVA N.L.

Lomonosov Moscow State University

RETS E.P.

Institute of Water Problems, RAS

26

An experience of modelling the Bashkara lakes outburst

KIDYAEVA V.M.

Lomonosov Moscow State University, The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration

PETRAKOV D.A., KRYLENKO I.N.

Lomonosov Moscow State University

ALEJNIKOV A.A.

SCANEX R&D Centre

STOFFEL M.

University of Geneva

GRAF C.

Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL

38

Using the GIS technologies in air pollution assessment caused by traffic in New Moscow district

PEREVERZEV P.V.

Lomonosov Moscow State University

48

Integrated engineering relief assessment for the construction of gas transportation systems in the European Russia

CHERNOMORETS L.S.

Lomonosov Moscow State University

54

APPENDEXES

Work in the disaster zone (Leninakan diary). Part 1

SAMUS N.A.

66

Review of natural hazardous events for April – June of 2018

SHANINA V.V.

Lomonosov Moscow State University

86

When will the Black Sea explode?

A piece out of the book of "Mysteries and myths of the science. In search of the truth" by A.M. Gorodnitskiy

92



GEORISK

International scientific journal

The journal is included in the list of scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the publication of scientific results of dissertations for the academic degrees of a doctor and candidate of sciences.

Published since December 2007.

Issued 4 times a year.

ISSN: 1997-8669 (Print), ISSN: 2587-8220 (Online)

The journal publishes articles devoted to problems of engineering-geological risk, analysis of natural geological catastrophes and methods of their prevention and elimination of their consequences. The main topics are dangerous exogenous and endogenous geological processes, their mechanisms, consequences, classification and forecast problems, methods for assessing geohazards and georisks, methods for preventing and eliminating the consequences of geohazards.

FOUNDER

“Geomarketing” LLC, 105187, Russian Federation, Moscow, Okruzhnoy Proezd, 18

PUBLISHER

“Geomarketing” LLC, 105187, Russian Federation, Moscow, Okruzhnoy Proezd, 18

JOURNAL EDITORING

Ekaterina A. Torbina
general director

Karina S. Viskhadzhieva
literary editor

Yana S. Aleshina
advertising department

Olga L. Yakimchik
subscription department

CONTACTS

“Geomarketing” LLC
107076, Russian Federation, Moscow, Elektrozavodskaya St., 60
Tel. +7 495 210-63-90, +7 495 210-63-06
E-mail: info@geomark.ru
http://geomark.ru

Individual entrepreneur Gilmanov M.A.
prepress, design and layout

PRINTING HOUSE

“Mediacolor”, 105187, Russian Federation, Moscow, Volnaya St., 28

Certificate of registration of mass media: PI № ФГ77-48920 20.03.12.

Electronic version: <http://geomark.ru/journals/georisk/>

https://elibrary.ru/title_about.asp?id=28492

Signed in print 29.06.2018.

Edition format 50x70/8. Glossy paper. Offset printing.

Edition 1 000 psc.

EDITOR IN CHIEF

Mikhail I. Bogdanov

PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), general director of “Research Geotechnical Institute” LLC, President of the Coordination Council of the SRO “Association of Engineering Surveys in Construction”, Chairman of the Board “The Union of Prospectors”, member of the Public Council at “Rosnedra”, member of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), member of the Technical Committee ISO/TC 182 “Geotechnics” of the International Organization for Standardization (ISO), full member of The Institute of Materials, Minerals and Mining (IOM³, UK) (Moscow, Russia)

EDITORIAL BOARD

Andrei M. Alabyan

PhD (Candidate of Science in Geography), associate professor of the Department of Land Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

Alexander M. Gorodnitskiy

DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), chief research scientist of the Geophysical Fields Laboratory, Shirshov Institute of Oceanology of RAS, professor, Honored Scientist of the Russian Federation, academician of the Russian Academy of Natural Sciences (Moscow, Russia)

Oleg V. Zerkal

PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), head of the Laboratory of Engineering Geodynamics and Substantiation of Engineering Protection of Territories, leading research scientist of the Engineering and Ecological Geology Department, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, member of the International Consortium on Landslides (Japan), member of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), International Society for Rock Mechanics (ISRM, Austria) (Moscow, Russia)

Nikolay A. Kazakov

PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), head of the Laboratory of Avalanche and Mudflow Processes Research, director of the Sakhalin Branch of the Far East Geological Institute of Far East Branch of RAS, associate professor, member of the Scientific and Expert Council under the administration of the Sakhalin Oblast, member of the presidium of the Russian Debris Flow Association (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia)

Irina I. Kosinova

DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), head of the Department of Ecological Geology, Faculty of Geology, Voronezh State University, professor, member of the Expert Commission on Ecology under the Department of Ecology and Nature Management of the Voronezh Oblast (Voronezh, Russia)

Boris V. Levin

DSc (Doctor of Sciences in Physics and Mathematics), chairman of the Sakhalin Science Center of Far East Branch of RAS, chairman of the Tsunami Commission of the Department of Earth Sciences of RAS, professor, corresponding member of RAS (Yuzhno-Sakhalinsk, Russia)

Nickolai G. Maksimovich

PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), deputy director for Scientific Work of the Natural Sciences Institute of the Perm State National Research University, associate professor, Honored Ecologist of the Russian Federation, member of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) (Perm, Russia)

Viktor V. Razumov

DSc (Doctor of Science in Geography), professor of the Department of Cartography and Geoinformatics, North Caucasus Federal University, chief research scientist of the JSC “Russian Space Systems” of Roskosmos, laureate of the Russian Government Prize in science and technics (Moscow, Russia)

Elena V. Sasorova

DSc (Doctor of Sciences in Physics and Mathematics), chief research scientist of the Tsunami Laboratory, Shirshov Institute of Oceanology of RAS (Moscow, Russia)

Inna Yu. Svyatenko

DSc (Doctor of Science in Technics), chairman of the Moscow City Duma Security Commission (Moscow, Russia)

Viktor T. Trofimov

DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), councilor of the administration, head of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, professor, academician of the Russian Academy of Natural Sciences and International Higher Education Academy of Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation (Moscow, Russia)

The article presents the authors' point of view, which may not coincide with the opinion of the editorial board.

The editorial board is not responsible for the content of advertising materials.

© “Geomarketing” LLC, 2018

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОРЫВА БАШКАРИНСКИХ ОЗЕР

УДК 551.435.47



КИДЯЕВА В.М.*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, г. Москва, Россия, veramkid@gmail.com
Адреса: Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия; пр. Вернадского, д. 82, стр. 1, г. Москва, 119571, Россия

ПЕТРАКОВ Д.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, dpetrakov@gmail.com

КРЫЛЕНКО И.Н.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, krylenko_i@mail.ru

АЛЕЙНИКОВ А.А.

Группа компаний «СКАНЭКС», г. Москва, Россия, aleynikov@scanex.ru
Адрес: 22-ой км Киевского шоссе, д. 4, корп. А, офис 819А, поселение Московский, г. Москва, 108811, Россия

ШТОФФЕЛ М.

Университет Женевы, г. Женева, Швейцария, Markus.Stoffel@unige.ch
Адрес: ул. Генерала Дюфура, д. 24, г. Женева, 1211, Швейцария

ГРАФ К.

Швейцарский федеральный институт лесных, снежных и ландшафтных исследований, г. Бирменсдорф, Швейцария, christoph.graf@wsl.ch
Адрес: ул. Цюрхерштрассе, д. 111, г. Бирменсдорф, 8903, Швейцария

Аннотация: прорыв озера Башкара в долине р. Адыл-Су (Приэльбрусье, Центральный Кавказ) произошел 1 сентября 2017 г. Прорывной паводок трансформировался в катастрофический селевой поток, в результате схода которого была разрушена автомобильная дорога и некоторые строения в долине реки. Сель вышел далее в долину р. Баксан и разрушил часть федеральной трассы. Погибло три человека. Причиной прорыва озера стали интенсивные осадки в долине р. Адыл-Су, выпавшие на переувлажненный грунт, что привело к нестабильности в озерной системе. Прорывы оз. Башкара наблюдались и ранее, а озерная система у ледника Башкара считалась опасной последние 15 лет. За это время опубликован ряд работ, посвященных анализу опасности озера, оценена вероятность его прорыва, изучены характеристики озера и нижележащей долины, проведено моделирование прорывного потока, трансформирующегося в сель. Детальные данные о прорыве озера 1 сентября 2017 г. позволяют провести новое моделирование и калибровку модели. В представленной работе для двумерного математического моделирования была использована модель RAMMS: DEBRISFLOW для селевых потоков. В расчетах учтены параметры шероховатости, определенные в предыдущих исследованиях, а также получены новые параметры (скорость размыва грунтов, коэффициенты эрозии, свойства селевого потока). Была проведена серия экспериментальных расчетов, в результате которых установлены зависимости между параметрами потока и его шириной в разных створах. Полученные результаты имеют практическое значение для целей моделирования селевых потоков в горах при недостаточности наблюдений.

Ключевые слова: прорыв ледникового озера; прорывной паводок; селевой поток; двумерное математическое моделирование; RAMMS; STREAM_2D; FLO-2D

Ссылка для цитирования: Кидяева В.М., Петраков Д.А., Крыленко И.Н., Алейников А.А., Штоффел М., Граф К., 2018. Опыт моделирования прорыва Башкаринских озер. Геориск, Том XII, № 2, с. 38–46.

AN EXPERIENCE OF MODELLING THE BASHKARA LAKES OUTBURST

VERA M. KIDYAEVA*

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russia, veramkid@gmail.com
Addresses: Bld. 1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia; Bld. 82, Pde 1, Vernadsky Ave, 119571, Moscow, Russia

DMITRY A. PETRAKOV

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, dpetrakov@gmail.com

INNA N. KRYLENKO

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, krylenko_i@mail.ru

ALEXANDER A. ALEYNIKOV

SCANEX R&D Centre, Moscow, Russia, aleynikov@scanex.ru
Address: Bld. 4, Hse A, Office 819A, 22nd km of M3 highway, 108811, Moskovsky Settlement, Moscow, Russia

MARKUS STOFFEL

University of Geneva, Geneva, Switzerland, Markus.Stoffel@unige.ch
Address: Bld. 24, rue du Général-Dufour, 1211, Genève, Switzerland

CHRISTOPH GRAF

Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Birmensdorf, Switzerland, christoph.graf@wsl.ch
Address: Bld. 111, Zürcherstrasse, 8903, Birmensdorf, Switzerland

Abstract: Bashkara lakes outburst flood occurred on September 1, 2017 in the Adyl-Su river valley (Elbrus region, Central Caucasus). The outburst flood transformed into catastrophic debris flow, resulting in destruction of motor road and some buildings along the river valley. The debris flow spread to the Baksan river valley and also destroyed part of the federal highway. Three people were killed. The reason for the outburst was an intense rainfall that fell on the moistened soil in the Adyl-Su river valley, which led to an instability in the lake system. Bashkara lakes outbursts had occurred earlier, the lake system of the Bashkara glacier was considered dangerous for the last 15 years. During this period, a number of works devoted to the lake's hazard assessing have been published, the probability of its outburst has been estimated, the characteristics of the lake and the underlying valley have been studied, and a GLOF has been simulated. Detailed data on the GLOF on September 1, 2017 allowed us to perform a new simulation and make a calibration of the model. In our work, for the two-dimensional mathematical modeling, we used the RAMMS: DEBRISFLOW model. During the calculations, the roughness parameters obtained earlier were considered, and new parameters (soil erosion rate, erosion coefficients, debris flow properties) were analyzed. A series of experimental calculations was performed, as a result of which dependences between the flow parameters and the flow width in different sections were obtained. Results of conducted research have practical importance for the modeling debris flows in the mountains in the condition of lack of observations.

Key words: glacial lake outburst; glacial lake outburst flood (GLOF); debris flow; two-dimensional mathematical modelling; RAMMS; STREAM_2D; FLO-2D

For citation: Kidyayeva V.M., Petrakov D.A., Krylenko I.N., Aleynikov A.A., Stoffel M., Graf C., 2018. An experience of modelling the Bashkara lakes outburst. Georisk, Vol. XII, No. 2, pp. 38–46.

Введение

Прорыв озера Башкара в долине р. Адыл-Су (Приэльбрусье, Центральный Кавказ) произошел 1 сентября 2017 г. Прорывной паводок трансформировался в катастрофический селевой поток, вследствие схода которого была разрушена автомобильная дорога и некоторые строения в долине реки Адыл-Су. Далее сель вышел в долину р. Баксан и разрушил часть федеральной трассы А-158 Прохладный-Баксан-Эльбрус. Погибло три человека. Причиной прорыва озера стали интенсивные осадки, выпавшие на переувлажненный грунт, что привело к нестабильности в озерной системе [12, 16].

Прорывы оз. Башкара наблюдались и ранее, озерная система у ледника Башкара считалась опасной последние 15 лет. За это время опубликован ряд работ, посвященных оценке опасности озера, оценена вероятность его прорыва, изучены характеристики озера и ни-

жеležащей долины, проведено моделирование прорывного потока, трансформирующегося в сель [3, 4, 7, 10, 11, 15, 21 и др.].

Целью данной работы является проведение сценарного моделирования прорыва оз. Башкара на основе [3, 15, 21] и моделирование фактического прорыва. Как показали полевые обследования озера и долины после прорыва [12, 16] 1 сентября 2017 г., предполагаемые ранее сценарные варианты развития событий оказались неверны, однако основные параметры оценивались правильно — объем воды, характер течения, время добега, зоны максимального затопления. Сценарные расчеты базировались на предположении, что оз. Башкара будет прорываться через подледный туннель в леднике Башкара, из чего следует невысокий максимальный расход воды, большая продолжительность разлива и асимметричность гидрографа [3, 21]. Фактически — прорывной сброс воды из оз. Башкара по-

шел по поверхности ледника Башкара [16], набирая большую скорость и имея крутой подъем.

В задачи исследования входило проведение полевых исследований в долине ниже озера Башкара, разработка сценариев развития событий как прогнозного, так и фактического, подготовка цифровой модели рельефа для целей моделирования, выбор подходящих моделей, подбор необходимых параметров для моделирования, проведение экспериментальных расчетов. Авторы планируют продолжить свои исследования, предстоит построение цифровых моделей рельефа (ЦМР) после прохождения селевого потока для калибровки модели и проверки результатов моделирования, а также уточнение коэффициентов эрозии.

Объект исследования

Озеро Башкара (рис. 1, а) прорывалось четыре раза: в августе 1958 и 1959 гг., в октябре 1960 г. [13] и в сен-

тябре 2017 г. Абсолютные отметки зеркала озера в 1960-х гг. были гораздо выше современных вследствие большей толщины примыкающего ледника и надледникового расположения озера. Как перемычка, так и преобладающая часть ложа озера состояли из льда. Прорывы 1958, 1959 и 1960 гг. проходили через грот в месте понижения и примыкания ледовой плотины к правобережной морене [11, 15], поэтому возможный прорыв озера всеми исследовательскими группами ожидался в этом же месте. По данным [16], озеро Башкара — наиболее глубокое в Приэльбрусье, его глубина в 2008 г. достигала 37 м. Озеро относится к типу ледниково-запрудных. Его котловину частично ограничивает конечно-моренный вал, который возвышается над урезом озера в северной и северо-восточной частях на 40 м, а в наиболее низкой части, на юго-западном участке, на 12–15 м. Объем озера в 2008 г. превышал 1 000 тыс. м³, в 2012–2015 гг. был около 800 тыс. м³ [16].

Озеро Лапа (Ниже Башкаринское) (рис. 1, b) подпружено крупнообломочной конечной мореной ледника Башкара. Оно имеет поверхностный сток воды по глыбовому каскаду высотой до 10 м и ниже растекается по выположенному заандровому участку, где в середине лета образуется мелководный водоем. За период с 2001 по 2016 гг. объем оз. Лапа увеличился в более чем 10 раз (с 30 тыс. м³ до 350 тыс. м³). Больше половины береговой линии оз. Лапа проходит вдоль языка ледника Башкара. Обвалы льда, термокарстовые просадки на дне озера (глубина его достигает 14 м), наступание и отступление дельты впадающего в озеро ручья, склоновые процессы на берегах приводят к нестабильному состоянию озера.

Учитывая, что ледник Башкара на современной стадии развития интенсивно отступает, прогнозируется значительное увеличение объема оз. Лапа в будущем. Радиозондирование языка ледника Башкара, проведенное в июне 2010 г. И.И. Лаврентьевым, С.С. Кутузовым, Д.А. Петраковым и Н.Н. Коваленко, позволило исследовать подледный рельеф и, следовательно, оценить максимально возможный объем оз. Лапа. Согласно проведенному анализу, при уровне воды озера на отметке 2 485 м н.у.м. и объеме 200 тыс. м³ в 2010 г. объем озера может увеличиться в 2–3 раза и достичь 500 тыс. м³. На рис. 2 синей линией показано возможное положение уреза озера при отступании ледника.

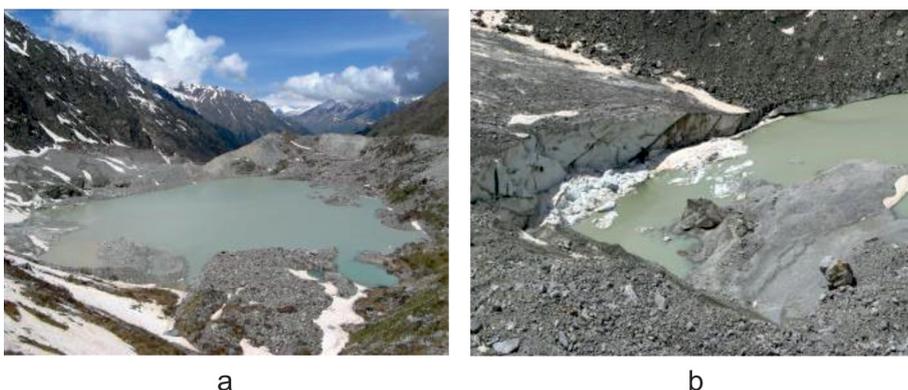


Рис. 1. Озеро Башкара (а), оз. Лапа (b). Фото В.М. Кидяевой, 2009 г.
Fig. 1. Bashkara Lake (a), Lapa Lake (b). Photo by V.M. Kidyayeva, 2009

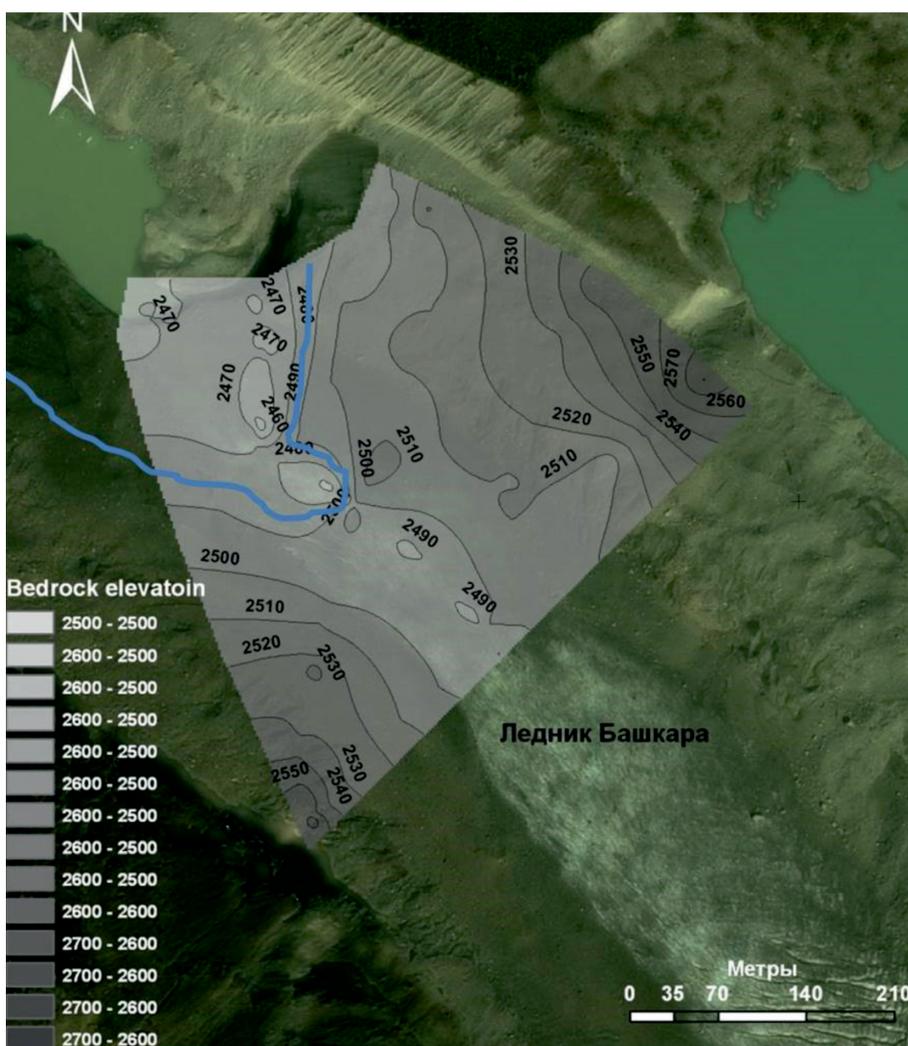


Рис. 2. Результаты геофизической съемки ледника Башкара в июне 2010 г. Синей линией показано возможное положение уреза оз. Лапа при отступании ледника
Fig. 2. Results of the geophysical survey of the Bashkara glacier in June 2010. The blue line shows the possible position of the Lapa Lake boundary after the retreat of the glacier

До событий 2017 г. наиболее вероятным сценарием прорыва оз. Башкара считалось его опорожнение через подледный канал стока [3]. При расчетах гидрографа прорыва подпруженного ледником озера по модели Виноградова Ю.Б. [2] был получен максимальный расход 123,5 м³/с, общий объем прорывного па-

водка — 764 тыс. м³ [3]. Гидрограф гипотетического прорыва характеризовался большой величиной отрицательной асимметрии, что характерно для прорыва озер по внутрiledниковому каналу, с добавлением пиков, образовавшихся в результате размыва нижних Башкаринских озер. Поток достигал максималь-

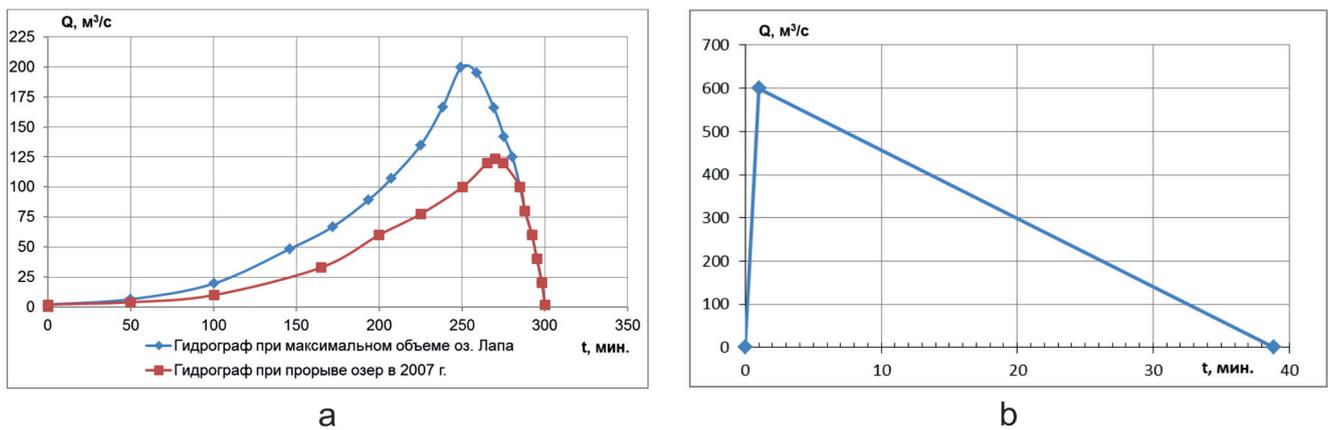


Рис. 3. Входной гидрограф для моделирования селевых потоков: а — при максимальном объеме оз. Лапа; б — при фактическом прорыве Башкаринских озер

Fig. 3. Input hydrograph for simulation of debris flows: a — taking into account the maximum volume of Lapa Lake; b — during the actual outburst of Bashkara lakes

ной величины расхода через 4,5 часа от начала прорыва. Предполагалось, что прорывной паводок преобразуется в селевой с плотностью около $1\ 127\ \text{кг/м}^3$, а максимальный расход достигнет $133\ \text{м}^3/\text{с}$ [3]. Моделирование данного сценария прохождения прорывного паводка по участку долины р. Адыл-Су протяженностью около 8 км было проведено в работах [10, 21].

Методика

Методика моделирования водных и селевых потоков

В данной работе для расчетов использовались двумерные модели STREAM_2D [1], FLO-2D [20] и RAMMS: DEBRIS FLOW [18].

Программные комплексы STREAM_2D и FLO-2D основаны на численном решении системы уравнений Сен-Венана в приближении «мелкой воды» [9 и др.]. При решении уравнения для расчета коэффициента Шези применяется формула Маннинга, в которой используется параметр n — коэффициент шероховатости.

Для численного решения системы уравнений должны быть заданы граничные и начальные условия. В качестве граничных условий в программе STREAM_2D задаются расходы воды на верхней и уровни воды на нижней границе расчетного участка как функции времени, в качестве начальных — уровни водной поверхности в пределах расчетного участка на начало расчета.

В отличие от программы STREAM_2D в программе FLO-2D можно рассчитывать движение селевого потока, основанного на решении уравнений неньютоновских жидкостей.

RAMMS (Rapid Mass Movements) — это программный пакет, который позволяет осуществлять моделирование снежных лавин, селевых потоков и камнепадов. Для моделирования селевых потоков RAMMS использует однофазный подход (аналогичный лавинам метод Фелми). В гидравлической модели, предложенной А. Фелми [23], скорость частиц осредняется по нормали к склону, поэтому распределение характеристик потока по его глубине не рассматривается. Модель не предполагает деформации сдвига. В модели учитываются два параметра: безразмерный коэффициент сухого трения μ и коэффициент турбулентного трения ξ , м/с^2 [17, 18].

Входными параметрами для модели RAMMS являются общий объем селевого потока, который может быть задан как гидрографом, так и зоной отрыва, имеющей площадь и глубину; и параметры сопротивления.

Для проведения моделирования с использованием двумерных моделей требуются следующие исходные данные: топографические карты, топографическая съемка участка долины, синтезированная в (ЦМР), данные о максимальных расходах воды и формах гидрографов. Результаты моделирования представлены в виде плановой картины распределения скоростей течения, уровней водной (селевой) поверхности и глубин воды или селевой массы в пределах расчетной области.

Подготовка данных и построение гидродинамических моделей

Сценарии и параметры модели

В статье рассмотрено два сценария: 1) предполагаемый прорыв оз. Башкара по подледному каналу стока с учетом

спуска максимально возможного объема оз. Лапа; 2) фактический прорыв оз. Башкара 1 сентября 2017 г.

Анализ динамики развития Башкаринских озер предполагает увеличение объема оз. Лапа до 500 тыс. м^3 . Далее триггером прорыва оз. Лапа стало опорожнение вышерасположенного озера Башкара. По оценке авторов, максимальный объем паводка мог составить более 1 млн м^3 . При моделировании прорыва по такому сценарию была задана асимметричная форма входного гидрографа с пологим подъемом паводка и резким спадом (рис. 3, а) [3]. Максимальный расход составлял $200\ \text{м}^3/\text{с}$, наступление максимального расхода происходило приблизительно через 4 ч после начала прорыва.

Фактический прорыв оз. Башкара 1 сентября 2017 г. происходил по другому сценарию. Уровень озера до 2017 г. колебался в районе отметки 2 596 м н.у.м., максимальная глубина озера достигала 37 м, максимальный объем — 1 млн м^3 в 2008 г. В 2008 г. началась фильтрация воды из озера сквозь стенку перемычки и образовался сток под язык ледника Башкара. Сток из озера был направлен в грот, образовавшийся в языке Башкаринского ледника, позже сформировался поверхностный перелив с хорошей отмосткой.

Причиной прорыва озера 1 сентября 2017 г. стал аномальный ливень на фоне сильного переувлажнения горных пород. Сумма жидких осадков по данным наблюдений на стационаре Джанкуат 1 сентября 2017 г. составила около 100 мм [16]. Часть переувлажненных моренных отложений сползла в озеро, перегородив естественный сток из него, начал расти уровень воды, грот в теле

ледника не пропустил возросший объем стока, и поток, перелившись через ледник, и пошел по нему в сторону оз. Лапа. Объем жидкой фазы потока составил порядка 1,1 млн м³, основная часть ее, 800 тыс. м³, была сброшена из озера, в селевой паводок было вовлечено 350–500 тыс. м³ твердого материала [12, 16].

В программе RAMMS для построения входного гидрографа прорыва используется оценка общего объема селевого потока и эмпирические зависимости между общим объемом и максимальным расходом воды [22]. Для построения гидрографа использовались следующие параметры (рис. 3, б):

- объем, $W = 700\ 000\ \text{м}^3$;
- максимальный расход воды, $Q_{\text{max}} = 600\ \text{м}^3/\text{с}$;
- время наступления пика, $t_1 = 60\ \text{с}$;
- время окончания излива, $t_2 = 2\ 333\ \text{с}$;
- максимальная скорость течения $V_{\text{max}} = 15\ \text{м/с}$.

Плотность селевого потока была задана в $1\ 100\ \text{кг/м}^3$, что соответствует водокаменному селю. Коэффициент сухого трения выбран в соответствии с рекомендациями разработчиков программы RAMMS [17] по тангенсу уклона склона в зоне аккумуляции выше альпинистского лагеря «Джантуган» $\mu = 0,107$. Был использован средний для селевых потоков коэффициент турбулентного трения $\xi = 1\ 000\ \text{м/с}^2$ [17].

Исходные данные для моделирования
Рельеф

В качестве исходных данных для расчетов по сценарию предполагаемого прорыва оз. Башкара и оз. Лапа использовалась цифровая модель рельефа, полученная на основе топографической карты 1:25 000 1957 г. и адаптированная для цели расчетов в работах [10, 21].

В качестве исходных данных для моделирования прорыва озера в 2017 г. использовалась цифровая модель местности, полученная по снимку со спутника Spot-6 с разрешением 3,2 м (дата съемки 1 августа 2017 г.). Для пойменных территорий была проведена корректировка рельефа с целью убрать растительность (лес и кустарники), которая завышала высотные отметки. Для этого использовался специальный алгоритм, представленный в программном обеспечении с открытым кодом ГИС Whitebox Geospatial Analysis Tools [19]. Алгоритм Remove Off-Terrain Objects разработан для создания поверхности земли в ЦМР для го-

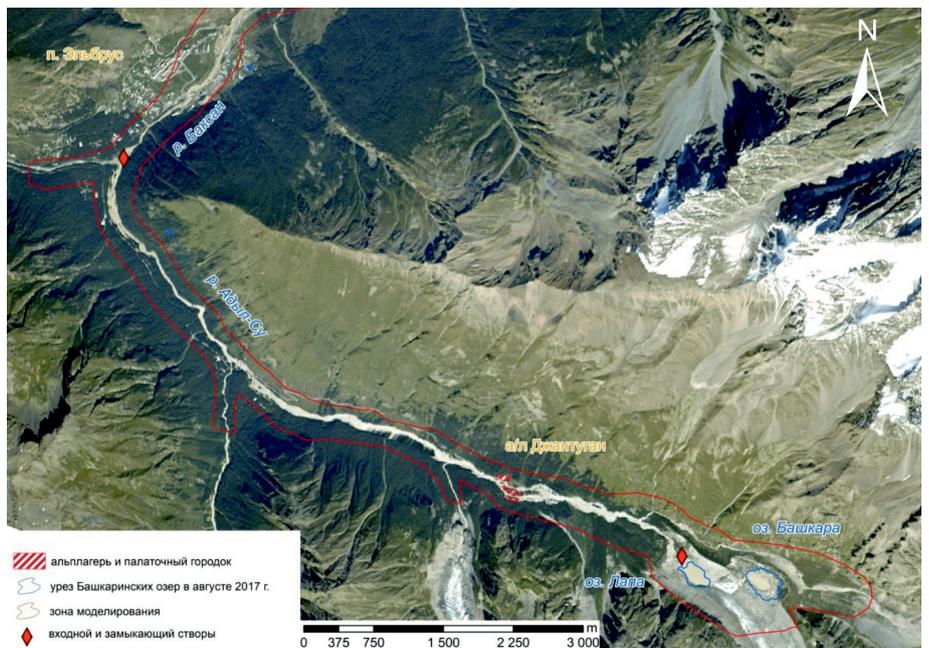


Рис. 4. Зона моделирования, р. Адыл-Су

Fig. 4. Modelling area, Adyl-Su River

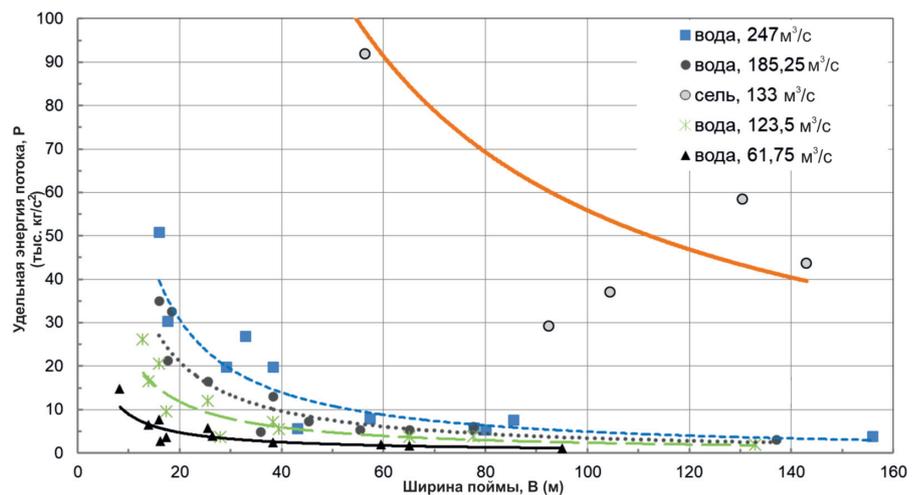


Рис. 5. Зависимость средней удельной энергии потока в створе от ширины поймы для водного и селевого потока

Fig. 5. Dependence between the average specific energy of the flow and the width of the floodplain for water and debris flow

родских и сельскохозяйственных ландшафтов, однако в зимних условиях при отсутствии листвы может применяться и для негустых лесов и кустарников.

Схематизация модельной области

Поскольку при прорыве оз. Башкара поток прошел по языку ледника Башкара, затем попал в оз. Лапа и пошел далее по долине, то входной створ для моделирования был расположен на задровой площадке ниже оз. Лапа. Замыкающий створ находился ниже впадения р. Адыл-Су в р. Баксан. Ниже этого места наблюдаемый водокамен-

ный поток продолжал свое разрушительное движение, но его свойства сильно изменились после впадения в большую реку (рис. 4), поэтому после слияния целесообразно проводить новый этап моделирования с новыми параметрами.

Экспериментальные расчеты

Экспериментальные расчеты на основе программного комплекса STREAM_2D для долины р. Адыл-Су проводились с использованием оптимальных параметров шероховатости для горных долин [10]. Была построена зависимость между параметрами потока, мор-

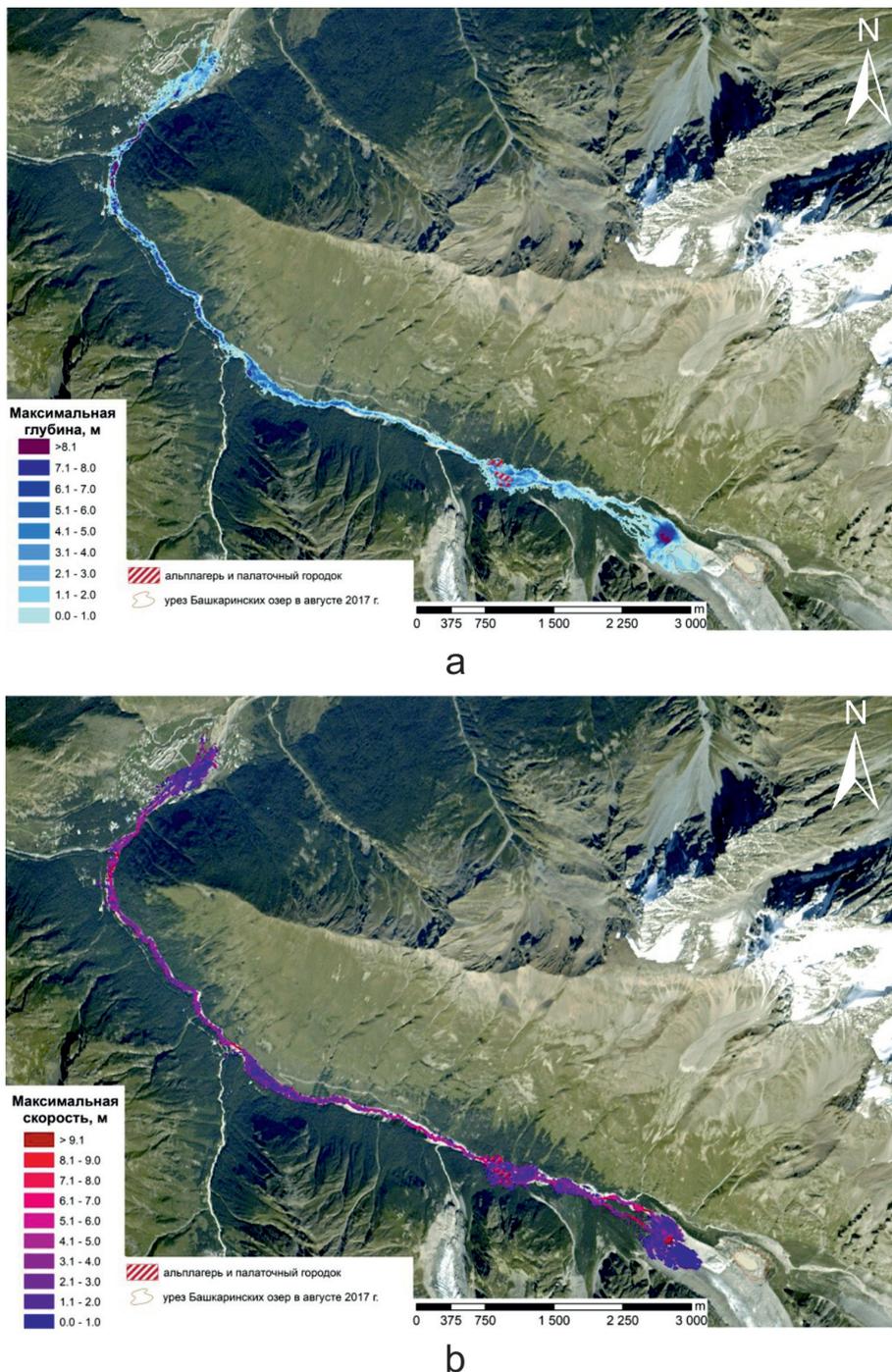


Рис. 6. Максимальная глубина потока (а) и скорость течения (б) при моделировании фактического прорыва оз. Башкара 1 сентября 2017 г. в программе RAMMS

Fig. 6. Maximum flow depth (a) and flow velocity (b) as the result of the 1st September, 2017 Bashkara lakes outburst modelling in RAMMS

фометрическими характеристиками долины и величиной потенциальной опасности.

Для этого было выбрано 11 контрольных репрезентативных створов-профилей долины. Серия расчетов проводилась для расходов 62; 123,5; 186; 247 м³/с. Для получения зависимостей для селевого потока с расходом 133 м³/с (паводок расходом 123,5 м³/с включением селевой составляющей) были использованы результаты [10].

Результаты

По результатам моделирования для каждого экспериментального створа были определены следующие параметры: площадь живого сечения потока, ширина поймы, средний расход воды, ширина затопления по профилю, средняя и максимальная скорости течения, средняя глубина, средняя удельная энергия потока.

Зависимости между параметрами потока и шириной потока в створе имеют

степенной вид (обратно пропорциональные зависимости), что следует из формул расхода воды, площади поперечного сечения и удельной энергии потока [8, 14]. Средняя удельная энергия потока связана с шириной поймы (рис. 5): $R = 0,72$ для селя и $R = 0,79-0,94$ для водного потока. Как видно из рис. 5, средняя удельная энергия селевого потока при ширине поймы около 100 м и меньше достигает уровня катастрофических разрушений $P > 171\,500$ кг/с² [7].

При прорыве Башкаринских озер с включением части объема оз. Лапа, рассчитанное максимальное значение расхода, равное 200 м³/с, будет наблюдаться через 250 мин после начала прорыва. От верхнего створа до альплагеря «Джантуган» фронт волны паводка добежит за 15–20 мин, что соответствует скорости 2–2,5 м/с. Среднее время добегания от места прорыва до устья р. Адыл-Су составляет менее 1 часа. Гидрограф паводка не трансформируется.

Рассчитанная максимальная глубина селевого потока в районе альплагеря «Джантуган» достигает 8 м, максимальная скорость — 9 м/с. Такие характеристики потока у альплагеря соответствуют сильным и катастрофическим разрушениям, особенно на участках врезанного русла, где располагаются мосты, грунтовые дороги, переходы коммуникаций. Все эти объекты инфраструктуры могут быть разрушены.

По результатам моделирования, при прорыве оз. Башкара 1 сентября 2017 г. время добегания максимального расхода воды до альплагеря «Джантуган» составило 30 мин, до устья р. Адыл-Су — 1 ч 15 мин.

Рассчитанная максимальная глубина затопления у альплагеря достигает 6 м, максимальная скорость течения — 6 м/с. Площади затопления в районе альплагеря по двум сценариям значительно не отличаются благодаря крутым склонам долины (рис. 6).

Дискуссия

Методом численного моделирования получена наглядная схема прохождения селевого потока по долине р. Адыл-Су в результате прорыва оз. Башкара 1 сентября 2017 г. Используемые при моделировании селевого потока параметры и входной гидрограф позволили получить предварительное представление о селевом потоке. Можно полагать, что селевой поток был водокаменного типа, имел скорости в среднем до 6 м/с, плотность около 1 100 кг/м³. Однако использован-

ные параметры требуют дополнительной калибровки и проверки в ходе полевых исследований. Например, заданная треугольная форма гидрографа несколько завышает результаты моделирования, а коэффициент турбулентного трения необходимо менять в зависимости от условий подстилающей поверхности и преобладающего типа транспорта наносов. Сравнение результатов моделирования прогнозного и фактического сценариев прорыва показали, что площадь затопления различается незначительно, однако скорости течения при моделировании фактического сценария ниже, что кажется более вероятным. Также различия в результатах моделирования заложены в свойствах самих моделей. На взгляд авторов, моделирование селевого потока в

программе RAMMS больше подходит для условий горных территорий, поскольку учитывает крутизну склонов, турбулентность и вязкость потока в горах. Другие модели, разработанные изначально для водных потоков на равнинных территориях, требуют более тщательной калибровки и не могут полностью учитывать горные условия.

Важным этапом будущих работ с программой RAMMS станет моделирование эрозионных процессов при прохождении селевого потока. Для этой цели необходимо четкое представление об эрозионных процессах в долине, которое можно получить только в результате сравнения двух цифровых моделей рельефа — до и после события — при условии наличия полевых наблюдений. Результатом дан-

ной работы станет представление о свойствах эрозионных процессов, типичных для данного бассейна или даже региона.

Полученные результаты экспериментальных расчетов имеют практическое значение для целей моделирования селевых потоков в горах при недостаточности наблюдений. 

Авторы благодарят за помощь и советы в проведении данного исследования старшего научного сотрудника научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.н., доцента Сергея Семеновича Черноморца.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект 18-05-00520.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беликов В.В., Милитеев А.Н., 1992. Двуслойная математическая модель катастрофических паводков. В сб. «Вычислительные технологии», Том 1, № 3, с. 167–174.
2. Виноградов Ю.Б., 1977. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Гидрометеоздат, Ленинград.
3. Гнездилов Ю.А., Иващенко Е.Н., Красных Н.Ю., 2007. Оценка гипотетического прорыва озера Башкара. Сборник научных трудов Северо-Кавказского института по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства (ОАО «Севкавгипроводхоз»), Вып. 17, Пятигорск, 2007, с. 122–145.
4. Залиханов М.Ч., Анахаев К.Н., Недугов А.Н., 2009. О селеопасном озере Башкара. Метеорология и гидрология, № 2, с. 89–92.
5. Золотарев Е.А., Сейнова И.Б., 1997. Катастрофические сели Приэльбрусья за два последних тысячелетия. Материалы гляциологических исследований, № 82, с. 184–189.
6. Кидяева В.М., Крыленко И.Н., Крыленко И.В., Петраков Д.А., Черноморец С.С., 2013. Колебания уровня воды горных ледниковых озер Приэльбрусья. Геориск, № 3, с. 20–27.
7. Кидяева В.М., 2013. Зонирование опасности в речных долинах при прорыве горных озер. Материалы XX Международной молодежной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, 2013, URL: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2013/structure_5_2100.htm.
8. Крыленко И.Н., Головлев П.П., Корнилова Е.Д., Сазонов А.А., Фингерт Е.А., 2018. Оценка чувствительности характеристик затопления к изменениям природных и антропогенных факторов на основе двумерной гидродинамической модели. Международная научно-практическая конференция «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии», Санкт-Петербург, 2018, с. 908–912.
9. Кюнж Ж., Холли Ф., Вервей А., 1985. Численные методы в задачах речной гидравлики. Энергоатомиздат, Москва.
10. Норин С.В., Крыленко И.Н., 2008. Моделирование возможного паводка при прорыве горных озер в долине реки Адыл-Су (Приэльбрусье). Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность, Сборник трудов Института водных проблем РАН, с. 99–104.
11. Петраков Д.А., Алейников А.А., Кидяева В.М., Крыленко И.Н., Норин С.В., Сейнова И.Б., Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Шахмина М.С., 2009. Современная эволюция приледниковых озер в Приэльбрусье (Центральный Кавказ, Россия). Снижение риска природных катастроф в горах, Материалы Международной конференции, Бишкек, 2009, с. 69–74.
12. Петраков Д.А., Черноморец С.С., Докукин М.Д., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Запорожченко Э.В., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Савернюк Е.А., Смирнов А.М., Рец Е.П., Хаджиев М.М., 2017. Прорыв озера Башкара и катастрофический сели в Приэльбрусье 1 сентября 2017 г. Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций», Москва, 2017, с. 95–97.
13. Сейнова И.Б., 1997. Селевые процессы бассейна р. Баксан в последнем тысячелетии (Центральный Кавказ). ВИНТИ РАН, Москва.
14. Сурков В.В., 2010. Ландшафтообразующая роль русловых и гидрологических процессов в речных долинах. Эрозия почв и русловые процессы, № 17, с. 154–192.
15. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.Н., Тутубалина О.В., Алейников А.А., Крыленко И.В., Тарбеева А.М., 2007. Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-Су. Криосфера Земли, Том XI, № 1, с. 72–84.

16. 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., Ретц Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М., 2018. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года. Криосфера Земли, Том 22, № 2, с. 70–80.
17. Christen M., Bartelt P., Kowalski J., Stoffel L., 2008. Calculation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain with the numerical simulation program RAMMS. Proceedings Whistler 2008 International Snow Science Workshop, p. 709.
18. Christen M., Kowalski J., Bartelt P., 2010. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. Cold Regions Science and Technology, Vol. 63, No. 1–2, pp. 1–14.
19. Lindsay J.B., 2014. The Whitebox geospatial analysis tools project and open-access GIS. Proceedings of the GIS Research UK 22nd Annual Conference, University of Glasgow, Glasgow, 2014, pp. 16–18.
20. O'Brien J., Julien P., Fullerton W., 1993. Two-dimensional water flood, mudflow simulation. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 119 (2), pp. 244–259.
21. 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, Vol. 61 (3), pp. 1293–1316.
22. Rickenmann D., 1999. Empirical relationships for debris flows. Natural hazards, Vol. 19, No. 1, pp. 47–77.
23. Voellmy A., 1955. Über die Zerstörungskraft von Lawinen, Schweiz, Bauzeitung. Vol. 73, No. 12, pp. 159–162.

REFERENCES

1. Belikov V.V., Militeev A.N., 1992. Two-dimensional mathematical model of catastrophic floods. In collection of papers “Computational technologies”, Vol. 1, No. 3, pp. 167–174. (in Russian)
2. Vinogradov Yu.B., 1977. Glacial outburst floods and debris flows. Gidrometeoizdat, Leningrad. (in Russian)
3. Gnezdilov Yu.A., Ivaschenko E.N., Krasnykh N.Yu., 2007. Assessment of the hypothetical breakthrough of Lake Bashkara. Collection of scientific works of the North Caucasian Institute for Design of Water Management and Reclamation, Issue 17, Pyatigorsk, 2007, pp. 122–145. (in Russian)
4. Zalikhanov M.Ch., Anakhaev K.N., Nedugov A.N., 2009. About hazardous Bashkara Lake. Meteorology and Hydrology, No. 2, pp. 125–127. (in Russian)
5. Zolotarev E.A., Seynova I.B., 1997. Catastrophic debris flows of the Elbrus region for the last two millennia. Materials of Glaciological Researches, No. 82, pp. 184–189. (in Russian)
6. Kidyayeva V.M., Krylenko I.N., Krylenko I.V., Petrakov D.A., Chernomorets S.S., 2013. Water level fluctuations in mountain glacier lakes of the Elbrus region. Georisk, No. 3, pp. 20–27. (in Russian)
7. Kidyayeva V.M., 2013. Hazardous zoning in river valleys during the mountain lakes outbursts. Materials of the XX International Youth Scientific Conference of students, graduate students and young scientists “Lomonosov”, Moscow, 2013, URL: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2013/structure_5_2100.htm. (in Russian)
8. Krylenko I.N., Golovlev P.P., Kornilova E.D., Sazonov A.A., Fingert E.A., 2018. Assessment of sensitivity of flooding characteristics to changes in natural and anthropogenic factors on the basis of a two-dimensional hydrodynamic model. International Scientific and Practical Conference “The Third Vinogradovsky Readings: Facets of Hydrology”, St. Petersburg, 2018, pp. 908–912. (in Russian)
9. Künzh J., Holly F., Verwey A., 1985. Numerical methods in the problems of river hydraulics. Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)
10. Norin S.V., Krylenko I.N., 2008. Modeling of possible high water during outburst of mountain lakes in the Adyl-Su river valley (Elbrus region). Water resources, ecology and hydrological safety, Collection of papers of Water Problem Institute of RAS, pp. 99–104. (in Russian)
11. Petrakov D.A., Aleinikov A.A., Kidyayeva V.M., Krylenko I.N., Norin S.V., Seynova I.B., Tutubalina O.V., Chernomorets S.S., Shakhmina M.S., 2009. Recent evolution of proglacial lakes near Mount Elbrus. Mitigation of natural hazards in mountain areas, Materials of International Conference, Bishkek, 2009, pp. 64–69. (in Russian)
12. Petrakov D.A., Chernomorets S.S., Dokukin M.D., Aleinikov A.A., Bekkiev M.Yu., Viskhadzhieva K.S., Zaporozhchenko E.V., Kalov R.Kh., Kidyayeva V.M., Krylenko V.V., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Savernyuk E.A., Smirnov A.M., Rets E.P., Khadzhiev M.M., 2017. The outburst of Lake Bashkara and the catastrophic debris flow in the Elbrus region on September 1, 2017. Materials of the 16th All-Russian Scientific and Practical Conference “Problems of forecasting emergencies”, Moscow, 2017, pp. 95–97. (in Russian)
13. Seynova I.B., 1997. Debris flow processes in the Baksan River basin in the last millennium (Central Caucasus). All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of RAS, Moscow. (in Russian)
14. Surkov V.V., 2010. Landscape-forming role of channel and hydrological processes in river valleys. Soil erosion and channel processes, No. 17, pp. 154–192. (in Russian)
15. Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Krylenko I.N., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A., Krylenko I.V., Tarbeeva A.M., 2007. Dynamics of the glacial-lake complex Bashkara and assessment of debris flow hazard in the Adyl-Su river valley. Earth's Cryosphere, Vol. XI, No. 1, pp. 72–84. (in Russian)
16. Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Aleinikov A.A., Bekkiev M.Yu., Viskhadzhieva K.S., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Kidyayeva V.M., Krylenko V.V., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Rets E.P., Savernyuk E.A., Smirnov A.M., 2018. Outburst of Lake Bashkara (Central Caucasus, Russia) September 1, 2017. Earth's Cryosphere, Vol. 22, No. 2, pp. 70–80, [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2\(70-80\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2(70-80)). (in Russian)

17. Christen M., Bartelt P., Kowalski J., Stoffel L., 2008. Calculation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain with the numerical simulation program RAMMS. Proceedings Whistler 2008 International Snow Science Workshop, p. 709.
18. Christen M., Kowalski J., Bartelt P., 2010. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. Cold Regions Science and Technology, Vol. 63, No. 1–2, pp. 1–14.
19. Lindsay J.B., 2014. The Whitebox geospatial analysis tools project and open-access GIS. Proceedings of the GIS Research UK 22nd Annual Conference, University of Glasgow, Glasgow, 2014, pp. 16–18.
20. O'Brien J., Julien P., Fullerton W., 1993. Two-dimensional water flood, mudflow simulation. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 119 (2), pp. 244–259.
21. 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, Vol. 61 (3), pp. 1293–1316.
22. Rickenmann D., 1999. Empirical relationships for debris flows. Natural hazards, Vol. 19, No. 1, pp. 47–77.
23. Voellmy A., 1955. Über die Zerstörungskraft von Lawinen, Schweiz, Bauzeitung. Vol. 73, No. 12, pp. 159–162.

Информация об авторах

КИДЯЕВА ВЕРА МИХАЙЛОВНА

Инженер I категории научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова; научный сотрудник Центра стратегий регионального развития института прикладных экономических исследований Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, к.г.н., г. Москва, Россия

ПЕТРАКОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

Ведущий научный сотрудник кафедры криолитологии и гляциологии географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.н., г. Москва, Россия

КРЫЛЕНКО ИННА НИКОЛАЕВНА

Старший научный сотрудник кафедры гидрологии суши географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.н., г. Москва, Россия

АЛЕЙНИКОВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ

Ведущий специалист группы компаний «СКАНЭКС», к.г.н., г. Москва, Россия

ШТОФФЕЛ МАРКУС

Глава департамента по Воздействию изменения климата и рискам в антропоцене Института экологических наук Университета Женевы, к.г.н., профессор, г. Женева, Швейцария

ГРАФ КРИСТОФ

Технический сотрудник Швейцарского федерального института лесных, снежных и ландшафтных исследований, г. Бирменсдорф, Швейцария

Information about the authors

VERA M. KIDYAEVA

Engineer of the Research laboratory of snow avalanches and debris flows, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University; research scientist of the Center for Regional Development Strategies, Institute of applied economic research, the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, PhD (Candidate of Science in Geography), Moscow, Russia

DMITRY A. PETRAKOV

Leading research scientist of the Department of Cryolithology and Glaciology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geography), Moscow, Russia

INNA N. KRYLENKO

Senior research scientist of the Department of Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geography), Moscow, Russia

ALEXANDER A. ALEYNIKOV

Leading specialist at SCANEX R&D Centre, PhD (Candidate of Science in Geography), Moscow, Russia

MARKUS STOFFEL

Head of the Climate Change Impacts and Risks in the Anthropocene Department, Institute for Environmental Sciences, University of Geneva, PhD (Candidate of Science in Geography), professor, Geneva, Switzerland

CHRISTOPH GRAF

Technical researcher of the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Birmensdorf, Switzerland

