КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 1, с. 58–71 **http://www.izdatgeo.ru**

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 511.311.21.(234.9) DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-1(58-71)

БЫСТРОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЛЕДНИКА КОЛКА (КАВКАЗ) ПОСЛЕ ГЛЯЦИАЛЬНОЙ КАТАСТРОФЫ 2002 ГОДА

Д.А. Петраков[1], К.А. Аристов[1], А.А. Алейников[2], Е.С. Бойко[3,4], В.Н. Дробышев[5], Н.В. Коваленко[1], О.В. Тутубалина[1], С.С. Черноморец[1]

[1] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; dpetrakov@gmail.com*
[2] *ГК "СКАНЭКС", 108811, Москва, Киевское ш., 1, Бизнес-парк "Румянцево", 8 подъезд, офис 732, Россия*
[3] *ЗАО "СевКавТИСИЗ", 350007, Краснодар, ул. Захарова, 35/1, Россия*
[4] *Кубанский государственный университет, 350040, Краснодар, ул. Ставропольская, 149, Россия*
[5] *Владикавказский научный центр РАН и Правительства Республики Северная Осетия–Алания, 362027, Владикавказ, ул. Маркуса, 22, Россия*

Проведен анализ изменений, произошедших в цирке ледника Колка и Кармадонской котловине после гляциальной катастрофы 20 сентября 2002 г. в Республике Северная Осетия–Алания (Россия). По результатам полевых наблюдений 2002–2016 гг., топографических съемок 2002–2004, 2009 и 2014 гг., анализа цифровых моделей рельефа, созданных по стереопарам космических снимков Terra ASTER 2002 и 2004 гг., SPOT-6 2014 г., оценены темпы восстановления ледника Колка и темпы разрушения ледяного завала в Кармадонской котловине. Комплекс из четырех методов, примененных в 2014 г. для съемки поверхности Колки, позволяет уточнить темпы восстановления ледника в прошлом и дает надежный задел на будущее. Установлена хорошая сходимость дистанционных и наземных методов. В 2002–2014 гг. в цирке Колки накопилось около (40 ± 11) млн м^3 льда, что составляет порядка 40 % от объема ледника перед катастрофой 2002 г. Спрогнозированного ранее сокращения темпов набора массы ледника пока не происходит, в 2009–2014 гг. в цирке накопилось столько же льда, сколько и в 2004–2009 гг. Восстановление Колки идет на фоне неблагоприятных для оледенения Кавказа погодных условий и резко контрастирует с поведением других кавказских ледников, испытывающих быстрое сокращение. Объем ледового завала в Кармадонской котловине в 2002–2014 гг. сократился на 75 %. Прогрессирующее уменьшение скорости таяния, отмечавшееся авторами ранее, продолжилось в 2009–2014 гг.: по сравнению с первым годом после катастрофы темпы таяния снизились почти в 50 раз. В ближайшие 10 лет повторение событий, сходных с катастрофой 2002 г., маловероятно, но к 2025 г. Колка может набрать 60–70 % от предкатастрофического объема. Необходимо продолжать наблюдения за восстановлением ледника и каждые 5–10 лет проводить съемки для измерения объема накопившегося льда.

Ледник Колка, гляциальная катастрофа, Кавказ, восстановление ледника, цифровые модели рельефа

RAPID REGENERATION OF THE KOLKA GLACIER (CAUCASUS) AFTER THE 2002 GLACIAL DISASTER

D.A. Petrakov[1], K.A. Aristov[1], A.A. Aleynikov[2], E.S. Boyko[3,4], V.N. Drobyshev[5], N.V. Kovalenko[1], O.V. Tutubalina[1], S.S. Chernomorets[1]

[1] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; dpetrakov@gmail.com*
[2] *Group of Companies "SCANEX", 1, Kiev highway, 8 entrance, office 732, Business Park "Rumyantsevo", Moscow, 108811, Russia*
[3] *CJSC "SevKavTISIZ", 35/1, Zakharov str., Krasnodar, 350007, Russia*
[4] *Kuban State University, 149, Stavropolskaya str., Krasnodar, 350040, Russia*
[5] *Vladikavkaz Scientific Center of the RAS and the Government of the Republic of North Ossetia–Alania, 22, Markus str., Vladikavkaz, 362027, Russia*

We have analysed changes in the Kolka glacier cirque and in the Karmadon depression after the glacial disaster of September 20, 2002 in the Republic of North Ossetia–Alania (Russia). We have estimated the rates of Kolka glacier regeneration and the rates of the ice dam decay in the Karmadon depression, on the basis of the field observations of 2002–2016, the topographical surveys of 2002–2004, 2009 and 2014, and analysis of digital elevation models generated from satellite image stereo pairs (Terra ASTER of 2002 and 2004; and SPOT-6 of 2014). The combination of four methods used in 2014 to survey the surface of Kolka Glacier has helped to clarify the rate of recovery of the glacier in the past and provides a reliable benchmark for the future. Remote and terrestrial survey methods have demonstrated good agreement. We established that in 2002–2014 about

(40 ± 11) million m^3 of ice accumulated in the Kolka Glacier cirque, which is about 40 % of the volume of this glacier before the collapse in 2002. The forecasted slowdown of the glacier mass recruitment is not yet happening: in 2009–2014 as much ice has accumulated in the cirque, as in 2004–2009. The regeneration of Kolka Glacier comes amid adverse weather conditions for glaciation of the Caucasus, and in sharp contrast with the behaviour of other Caucasian glaciers experiencing rapid decline. The volume of the ice dam in the Karmadon depression decreased by 75 % in 2002–2014. The progressive decrease in the melting rate, which we noted before, continued in 2009–2014. In comparison with the first year after the disaster, the rate of melting decreased by almost 50 times. In the following ten years, the repetition of events similar to the disaster in 2002 is unlikely, but by 2025 Kolka Glacier can accumulate 60–70 % of its pre-disaster volume. It is necessary to continue monitoring the recovery of the glacier and to measure the volume of accumulated ice every 5–10 years.

Kolka Glacier, glacial disaster, the Caucasus, glacier regeneration, digital elevation models

ВВЕДЕНИЕ

В сентябре 2002 г. в Северной Осетии произошла гляциальная катастрофа планетарного масштаба. Более 100 млн м^3 льда, воды и камней были сброшены из цирка ледника Колка в Кармадонскую котловину и преодолели почти 20 км со скоростью 50 м/с [*Evans et al., 2009*]. Теснина Скалистого хребта остановила ледяную массу, но порожденный ею дистальный селевой поток прошел еще 17 км и не дошел всего 2 км до селения Гизель с населением более 7000 чел. [*Поповнин и др., 2003*]. Это событие стало полной неожиданностью для населения и органов власти. По последним оценкам, погибли 135 человек, а экономический ущерб составил 1385 млн руб. [*Кортиев и др., 2009*]. За годы, прошедшие после катастрофы, было опубликовано множество работ, посвященных исследованиям ее причин и анализу роли различных факторов в ее формировании, сравнению с предшествующей катастрофой на том же леднике в 1902 г. и в другие годы [*Панов и др., 2002; Богатиков, Гурбанов, 2003; Запорожченко, 2003; Котляков, Рототаева, 2003; Осипова, Цветков, 2003; Васьков, 2004; Гурбанов и др., 2004; Десинов, 2004; Заалишвили и др., 2004; Петраков и др., 2004, 2013; Муравьев, 2005; Тутубалина и др., 2005; Болов и др., 2006; Бергер, 2007; Никитин и др., 2007; Познанин, 2009; Дробышев, 2012; Haeberli et al., 2004; Huggel et al., 2005; Lindsey et al., 2005; Chernomorets et al., 2007; Petrakov et al., 2008*], моделированию ледово-водокаменного потока [*Божинский, 2005; Черноморец, Михайлов, 2012; Evans et al., 2009*]. Значительная часть информации систематизирована в монографиях [*Котляков и др., 2014; Ледник Колка..., 2014*]. В результате установлена комплексная природа катастрофы, определенную роль в зарождении которой сыграли как эндогенные, так и экзогенные факторы; реалистично охарактеризована динамика ледово-каменного потока.

До сих пор актуален вопрос о возможности, сроках повторения и масштабе событий, схожих с катастрофами на леднике Колка в 2002 и 1902 гг. Вероятность реализации такого сценария зависит от восстановления ледника Колка до объема, близкого к предкатастрофическому [*Котляков и др., 2004; Познанин, 2009; Петраков и др., 2013*]. Несмотря на то что рядом исследователей было спрогнозировано медленное восстановление Колки из-за изменившегося теплового баланса в цирке [*Чернов, Рототаева, 2010; Котляков и др., 2014*], в 2004–2009 гг. ледник быстро набирал массу, притом предполагалось, что в будущем темпы набора массы должны уменьшиться [*Петраков и др., 2013*]. Целью настоящей статьи стала оценка изменений, произошедших в цирке ледника Колка и Кармадонской котловине после катастрофы. Для этого в августе 2014 г. авторы провели очередную, третью по счету, топографическую съемку цирка ледника Колка, повторную съемку ледового тела в Кармадонской котловине по трем профилям, построили цифровые модели рельефа на зону катастрофы по стереопарам космических снимков SPOT-6 (2014 г.) и Terra ASTER (2002 и 2004 гг.), проанализировали и обобщили результаты ежегодных наземных и дистанционных наблюдений, проводимых в верховьях р. Геналдон после 2002 г. Основной упор делался на изменения после 2009 г., поскольку более ранние изменения проанализированы в работе [*Петраков и др., 2013*].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Топографические съемки

Цирк ледника Колка. Для оценки темпов восстановления ледника Колка в его цирке после катастрофы 2002 г. были проведены три топографические съемки в масштабе 1:5 000 [*Петраков и др., 2013; Коваленко и др., 2015*]. Все съемки проводились одинаковым оборудованием – теодолитом 4Т15П и безотражательным лазерным дальномером ЛП-1. Опорные точки планово-высотного обоснования располагались на орографически левой береговой морене ледника Колка (рис. 1). Их координаты были определены в 2004 г. методом триангуляции с привязкой к трем пунктам государственной геодезической сети: Чижит-хох, Майли-раг и Реком-раг [*Петраков и др., 2013*], а в 2009 и 2014 гг. уточнены с помощью двухчастотных GPS/ГЛОНАСС-приемников JAVAD. В ходе работ 2004 г. определены координаты более 1000 съемочных точек в цирке ледника Колка. При проведении топографических съемок 2009 и 2014 гг. количество съемочных точек было закономерно

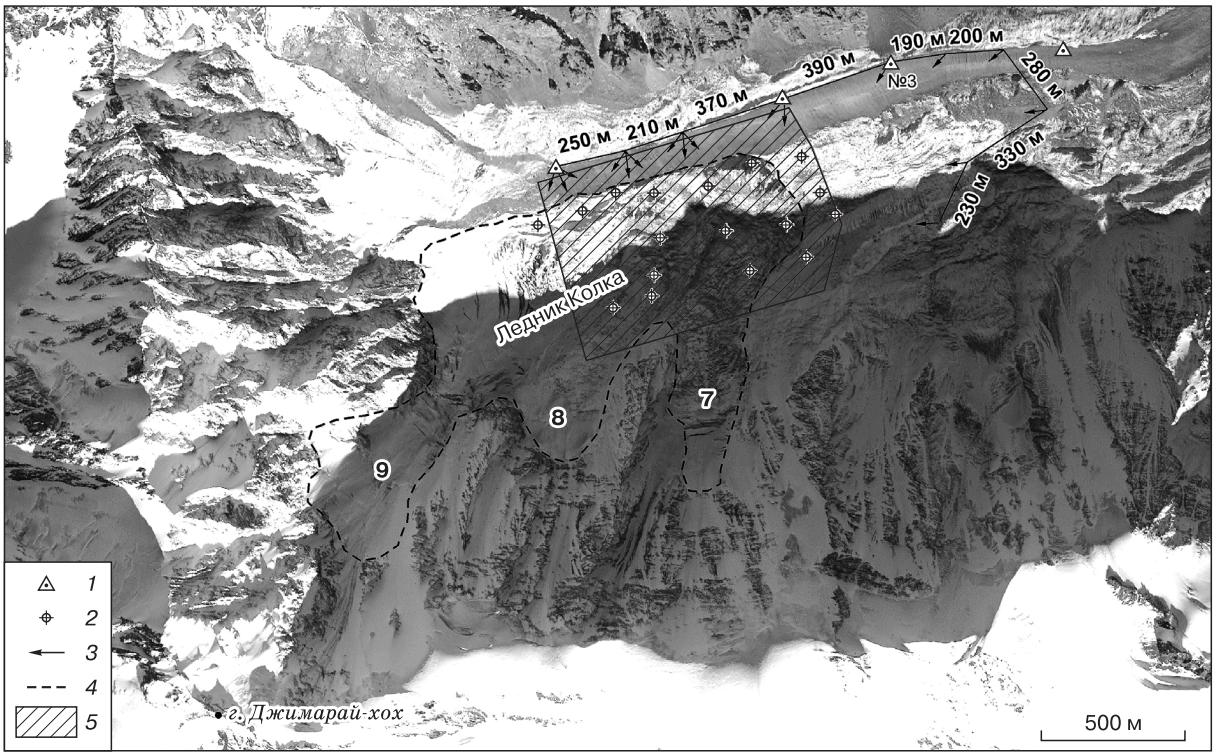

Рис. 1. Положение съемочных точек в цирке Колки в 2014 г.

1 – точки планово-высотного обоснования (ПВО), точки наземной топографической съемки; *2* – опознаки для съемки с борта БПЛА; *3* – направления съемки с точек повторного фотографирования; *4* – граница ледника Колка в 2016 г.; *5* – зона съемки с борта БПЛА в 2014 г. Фон – снимок SPOT-6 от 29.10.2014 г.

сокращено, поскольку измерения для относительно стабильных скальных поверхностей не повторялись. Погрешность определения плановых и вертикальных координат *x*, *y*, *z* при съемке не превышала 5 м. По результатам топографических съемок 2004, 2009, 2014 гг. В.Н. Дробышевым в программе Surfer составлены карты рельефа ледниковой поверхности и скального обрамления масштаба 1:10 000 в единой системе координат и высот, на основе тригонометрической интерполяции построены цифровые модели рельефа (ЦМР) местности и проведено их наложение. Погрешность интерполяции *x*, *y*, *z* также не превышает 5 м.

Кармадонская котловина. Для выявления темпов таяния ледового тела в Кармадонской котловине использовались данные площадной топографической съемки, проведенной В.Н. Дробышевым и В.В. Макликовым 28.09.2002 г., т. е. через 8 дней после катастрофы, а также данные шести разновременных съемок по поперечным профилям. Эти работы выполнялись на том же оборудовании, что и съемка цирка ледника Колка. На основе съемки 2002 г. составлена ЦМР поверхности ледового завала масштаба 1:10 000 и определен объем отложений в Кармадонской котловине [*Drobyshev, 2006*]. Съемки 2003 г. (три съемки), 2004 и 2009 гг. проводились по трем поперечным профилям [*Петраков и др., 2013*], съемка 2014 г. – по двум поперечным профилям, поскольку в области верхнего профиля ледовый завал растаял. Полученные данные экстраполировались на всю площадь ледового тела. Погрешность оценки значений объема ледового тела составляет около ±5 млн м^3.

2. Космический мониторинг

Цирк ледника Колка. Дистанционный мониторинг цирка ледника Колка и Кармадонской котловины традиционно проводился для оценки изменения площади восстанавливающегося ледника [*Петраков и др., 2013*]. Для этого использовались ежегодные съемки различными системами, выполненные в малоснежный период (см. таблицу). Часть работ проводилась по заказу авторского коллектива. Все снимки прошли ортокоррекцию с использованием базисной цифровой модели рельефа SRTM-90, основанной на интерферометрической обработке космических съемок февраля 2000 г.

Взаимная координатная привязка снимков выполнена в программах ESRI ArcGIS и ScanEx

Космические снимки, использованные для дистанционных оценок изменений в цирке ледника Колка после Кармадонской катастрофы 20 сентября 2002 г.

Тип сенсора	Дата съемки	Пространственное разрешение, м/пиксель	Наличие стереопары
Quick Bird	25.09.2002	0.7	Нет
Terra ASTER	06.10.2002	15/30*	Да
Terra ASTER	25.09.2004	15/30*	Да
IRS 1D	30.09.2004	5.8	Нет
IRS 1D	24.08.2005	5.8	Нет
IRS 1C	16.08.2006	5.8	Нет
SPOT 4	02.09.2007	10	Нет
SPOT 2	17.08.2008	10	Нет
SPOT 4	25.08.2009	10	Нет
Ikonos	29.08.2010	0.8	Нет
SPOT 5	15.10.2012	2.7	Нет
SPOT 5	23.08.2013	5.5	Нет
SPOT 6	29.10.2014	1.9	Да
EROS B	10.08.2015	0.7	Нет
SPOT 6	14.07.2016	2.2	Нет

* Показано разрешение самого снимка и сгенерированной ЦМР.

Image Processor. По космическим снимкам проведено дешифрирование границ восстанавливающегося ледника Колка в 2004–2016 гг. Погрешность определения контуров принималась равной 1 пиксель и изменялась от 0.7 до 10 м в разные годы в зависимости от разрешения снимков.

Стереопары космических снимков Terra ASTER 2002 и 2004 гг., а также стереопара космических снимков SPOT-6 2014 г. были использованы для построения ЦМР местности. Для создания ЦМР в абсолютных значениях высот также использовалась цифровая модель SRTM90. Сначала была построена цифровая модель местности по стереопаре снимков SPOT-6. Построение ЦМР проводилось в программе ScanEx ImageProcessor и включало следующие шаги: эпиполярное трансформирование, создание анаглифического 3D-изображения, построение ЦМР и ее редактирование. В ходе редактирования выполнялась фильтрация, сглаживание, корректировка “ошибочных” значений. Ортокоррекция полученной ЦМР и снимка стереопары, снятого под наименьшим углом отклонения от надира, проводилась по строгой модели, т. е. с восстановлением элементов внутреннего и внешнего ориентирования строк снимка. В качестве опорных точек выбирались объекты, положение которых за последние годы не изменилось: отдельные крупные камни, начала скальных выходов, выпуклые формы рельефа, расположенные за пределами ледников Колка и Майли.

Затем строились цифровые модели 2002 и 2004 гг. по снимкам ASTER. Чтобы ортотрансформировать эти ЦМР, в качестве базисной модели использовали снимки 3N, т. е. снимки из надира стереопар ASTER. Для трансформирования цифровых моделей ASTER было использовано 75 контрольных точек. Средняя ошибка горизонтальной привязки составила 1.8 м. По этим же точкам полученные цифровые модели взаимно увязывались как в плановых координатах, так и по абсолютной высоте.

В результате для каждой из стереопар были получены ортотрансформированный космический снимок и ЦМР местности, увязанные между собой. Вертикальная погрешность ЦМР по SPOT-6 составляет 5 м, по Terra ASTER – 12 м. В результате наложения ЦМР были получены величины накопления материала в цирке Колки в интервалах 2002–2004 и 2004–2014 гг. Это позволило провести независимый контроль наземной съемки. Для визуализации изменений в цирке ледника Колка были построены 3D-модели местности (рис. 2).

Кармадонская котловина. Поскольку после 2004 г. топографический мониторинг для уточнения темпов таяния ледового завала в котловине проводился только по системе профилей, было решено сопоставить ЦМР, полученную по снимкам SPOT-6, с картами поверхности завала 2002 и 2004 гг. Задача осложнялась тем, что топографические карты завалов были оформлены в графическом векторном редакторе CorelDraw в условной системе координат и высот, поэтому перед сопоставлением моделей требовалось выполнить пространственную привязку векторных данных и составить гидрологически корректную ЦМР на основе горизонталей, границ водоемов и водотоков, а затем добавить к данным получившейся модели постоянную величину, характеризующую разность между эллипсоидальными высотами (WGS-84), в которых составлена ЦМР по SPOT-6, и условны-

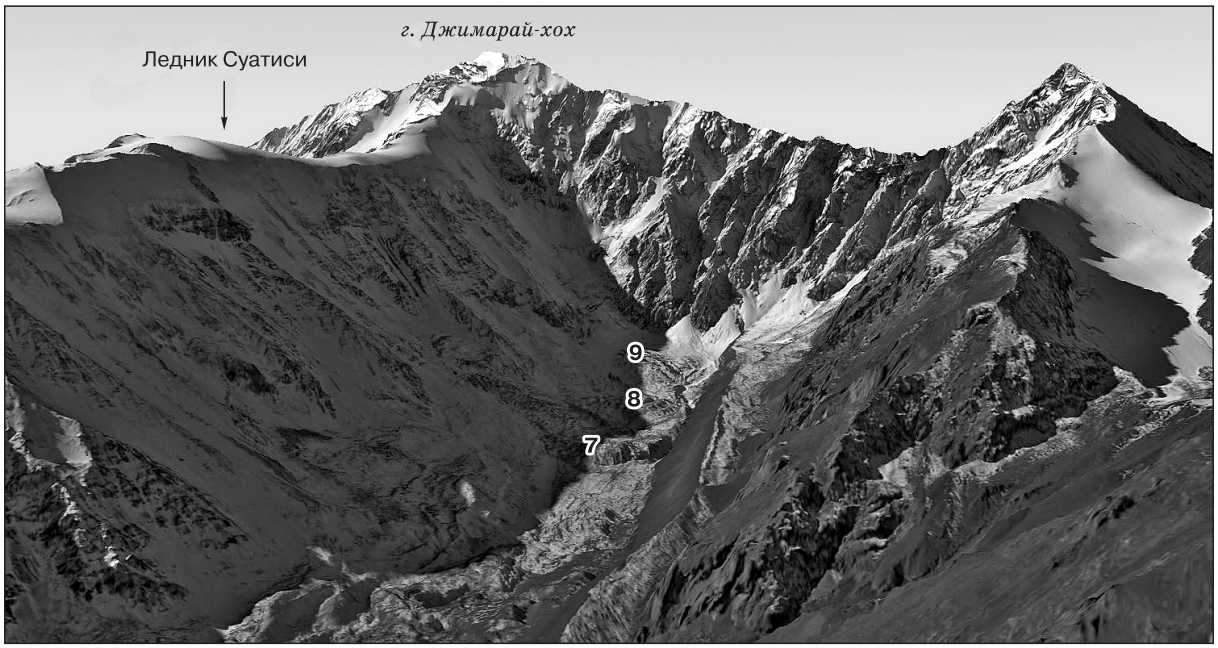

Рис. 2. 3D-модель цирка ледника Колка, составленная по стереопаре космических снимков SPOT-6 от 29.10.2014 г.

7, 8, 9 – номера ледников, ставших независимыми после Кармадонской катастрофы 2002 г. (к 2014 г. они соединились).

ми высотами. Пространственная привязка графических данных осуществлялась по опорным точкам съемки, обозначенным на картах, координаты которых были получены при полевых работах в 2014 г., а также по сходным точкам местности. Погрешность привязки топографических карт составила от 10 до 50 м. Для экспорта данных из CorelDraw в ArcGIS использовался формат AutoCAD DWG, который позволяет сохранить исходную информацию о слоях, что значительно облегчает работы по разделению объектов карты по типам (горизонтали, водотоки и т. д.). Составление моделей и вычисление объемов выполнялось в модуле ArcGIS SpatialAnalyst.

3. Съемка с борта беспилотного летательного аппарата

Количество исследований, в которых применяются съемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в последние годы растет быстрыми темпами [*Bhardwaj et al., 2016*]. Несомненным преимуществом этого метода является возможность создания ЦМР высокого разрешения на территории площадью до нескольких квадратных километров, что очень важно для исследований труднодоступных ледников [*Immerzeel et al., 2014*], к которым относится Колка. В августе 2014 г. авторами была проведена экспериментальная съемка нижней части ледника Колка с использованием БПЛА (см. рис. 1). Из-за технических проблем, вызванных неудачным приземлением БПЛА после одного из заходов, верхнюю часть цирка отснять не удалось. Детальное описание методики съемки приведено в [*Коваленко и др., 2015*]. Отметим, что пространственное разрешение стереоснимков составило 3.5 см/пиксель, что более чем на порядок выше по сравнению с высокодетальными космическими снимками. Погрешность полученной ЦМР по высоте относительно опознаков и точек ПВО (см. рис. 1) составила 0.22 м, плановые погрешности были еще ниже. Таким образом, для нижней, наиболее быстро меняющейся части ледника Колка получена высокоточная ЦМР, которая в будущем позволит существенно уменьшить погрешности оценки темпов восстановления ледника Колка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Цирк ледника Колка. Как и прогнозировалось ранее [*Петраков и др., 2013*], в цирке ледника Колка продолжилось быстрое накопление льда. Судя по результатам наложения составленных авторами топографических карт 2009 и 2014 гг. (рис. 3), объем ледника Колка за этот период увеличился на (17 ± 7) млн м^3. Это практически столько же, сколько накопилось за предшествующую пятилетку (2004–2009 гг.) [*Петраков и др., 2013*]. Следует отметить, что поле изменения высоты поверхности изменилось. В 2004–2009 гг.

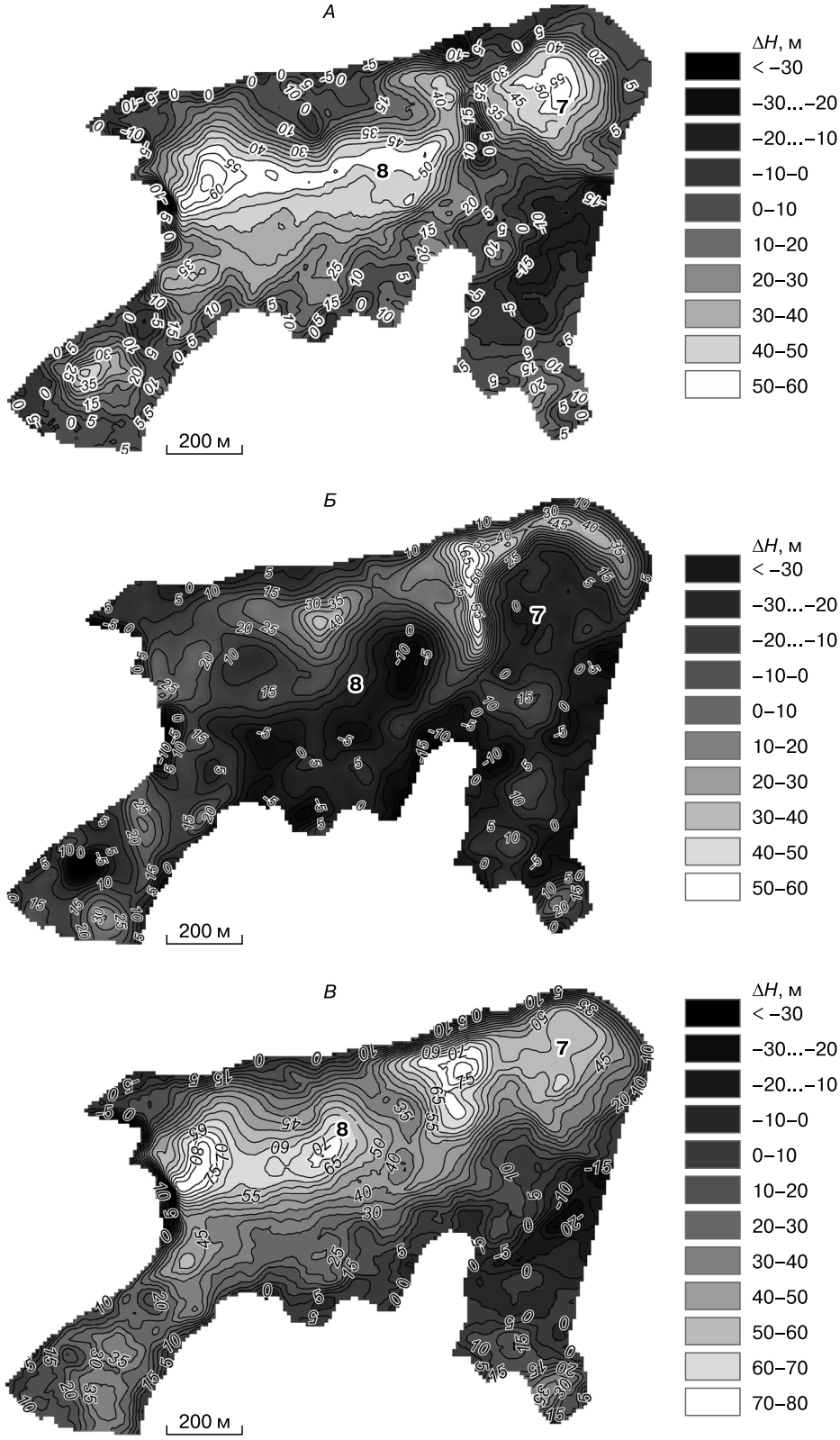

Рис. 3. Изменение высоты поверхности (ΔH) в цирке Колки по данным наземных топографических съемок:

А – 2004–2009 гг.; *Б* – 2009–2014 гг.; *В* – 2004–2014 гг.

наибольший рост высоты поверхности достигал 55 м и отмечался в средней части восстанавливающегося ледника (см. рис. 3, *А*). В 2009–2014 гг. зона максимального повышения поверхности была приурочена к узкому участку между ледником № 7 и слившимися ледниками № 8 и 9, а также к участку вдоль фронта ледника № 7 (см. рис. 1, 3, *Б*). Увеличение высоты поверхности достигало 65 м. В отличие от периода 2004–2009 гг. на поверхности Колки отмечаются небольшие участки понижения поверхности, вызванные, по-видимому, динамикой восстанавливающегося ледника. В целом за 2004–2014 гг. в цирке ледника Колка накопилось (33 ± 7) млн м^3. Максимальное увеличение высоты поверхности составило чуть более 80 м, один такой участок расположен у подножия стены в тыловой части Колки, второй – в зоне контакта ледников № 7 и 8 (см. рис. 3, *В*).

Несколько иные результаты дает сопоставление цифровых моделей рельефа, составленных на

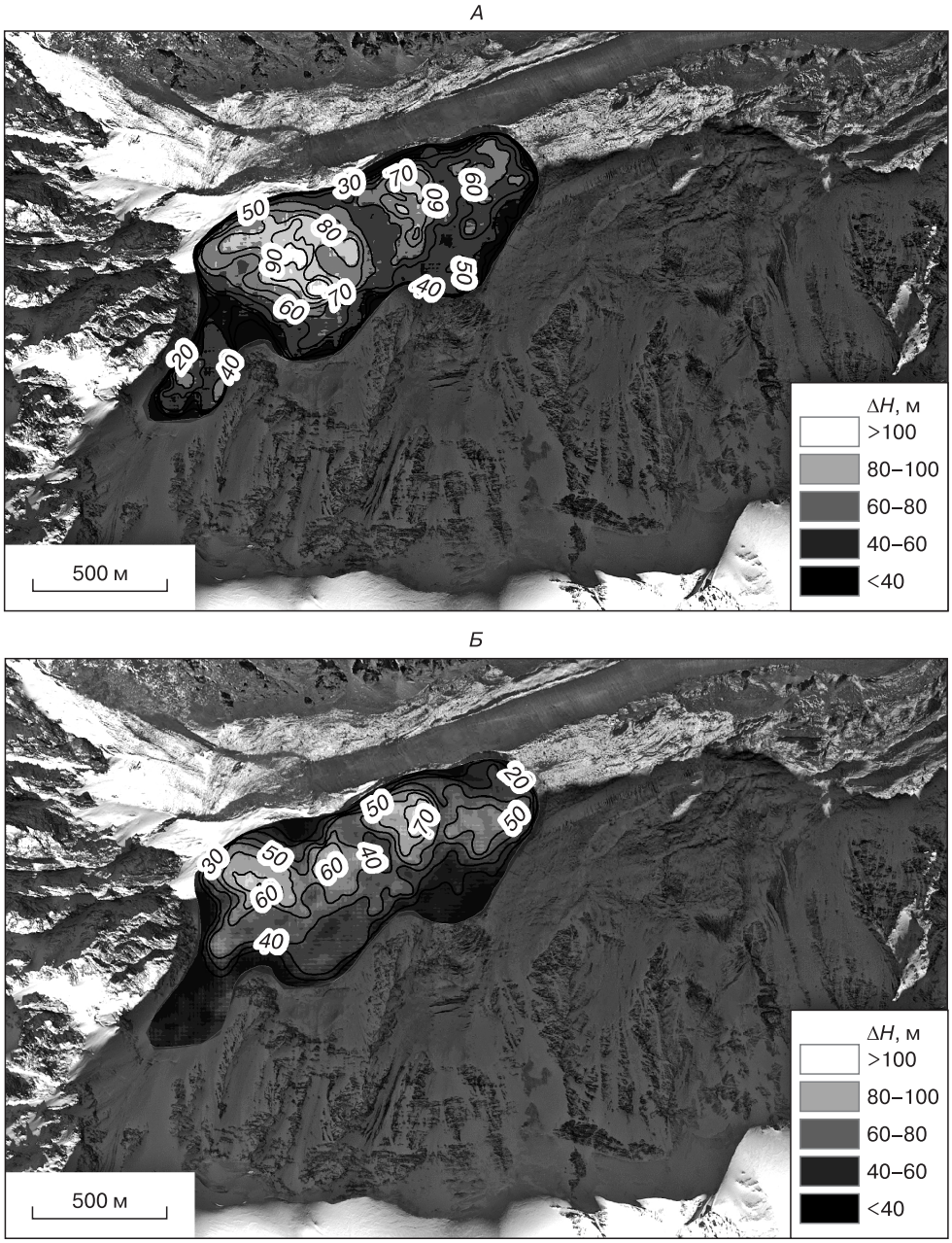

Рис. 4. Изменение высоты поверхности (Δ*H*) в цирке Колки на основе наложения ЦМР, полученных по стереопарам космических снимков Terra ASTER (2002, 2004 гг.) и SPOT-6 (2014 г.).

А – 2002–2014 гг.; *Б* – 2004–2014 гг. Фон – снимок SPOT-6 от 29.10.2014 г.

базе стереопар космических снимков. Судя по этим данным, в 2004–2014 гг. в цирке ледника Колка накопилось (27 ± 11) млн м^3 льда. Максимальное увеличение высоты поверхности составило около 70 м (рис. 4), а положение этих участков совпадает с максимумами на рис. 3. В 2002–2014 гг. в цирке Колки накопилось (40 ± 11) млн м^3 льда, максимальное увеличение высоты поверхности составило около 100 м (см. рис. 4). Следует отметить, что все данные хорошо согласуются между собой с учетом величины погрешности.

В монографии [*Котляков и др., 2014*] объем восстанавливающегося ледника Колка в 2014 г. оценивался минимум в 21 млн м^3, что существенно ниже оценки авторами посткатастрофического накопления – (40 ± 11) млн м^3 льда. При своей оценке В.М. Котляков с соавт. [*2014*] исходили из экстраполяции средних значений толщины льда, полученных при радиозондировании в июне 2014 г., на всю площадь ледника. К сожалению, радиолокационные данные были получены лишь на небольшом участке в нижней части Колки [*Котляков и др., 2014, рис. 97*], и экстраполяция этих данных на всю площадь ледника может привести к большим неточностям (поэтому данная величина была озвучена как минимально возможная). Максимальная толщина льда, по данным радиозондирования (50 м), отмечена в центральной части потока от ледника № 7. Это значение хорошо согласуется с авторскими оценками увеличения высоты поверхности ледника в 2002–2014 гг. в этом же месте, практически с нуля (чистое ложе) до 50–60 м (см. рис. 4). Средняя толщина льда на участке радиолокационного профиля по данным радиозондирования примерно на 25 % меньше, чем по данным авторов. С учетом погрешностей геофизические данные о толщине льда подтверждают оценки накопления вещества в цирке Колки в 2002–2014 гг., сделанные авторами путем сопоставления разновременных ЦМР.

Вместе с быстрым набором массы происходило нарастание площади ледника. Однако темпы нарастания площади в 2004–2009 и 2009–2016 гг. различаются: если к 2009 г. площадь ледника в ложе Колки составила 0.60 км^2 [*Петраков и др., 2013*], а с учетом склоновых участков оценивалась в (0.80 ± 0.02) км^2, то к 2014 г. она достигла (1.08 ± 0.02) км^2, а к 2016 г. составила около (1.12 ± 0.02) км^2 (рис. 5). Авторские оценки площади Колки в 2014 г. совпадают с оценками В.М. Котлякова с соавт. [*2014*] с точностью до 0.01 км^2.

Если на более ранних этапах увеличение площади ледника происходило за счет как продвижения фронта, так и активизации неподвижных массивов льда, то в последние годы влияние второго фактора отсутствует. Скорость продвижения фронта бывшего ледника № 7, ставшего фронтом собственно Колки, в 2011–2016 гг. была существенно ниже, чем в предшествующий период (рис. 6). Если в 2004–2011 гг. в отдельные годы

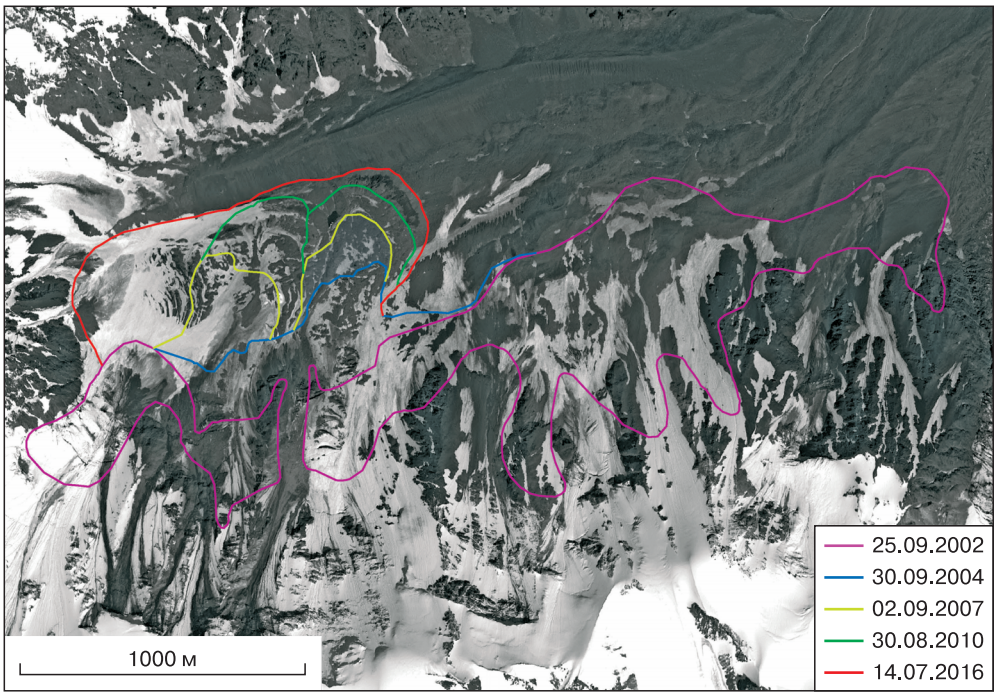

Рис. 5. Изменение границ восстанавливающегося ледника Колка в 2002–2016 гг.

Космические снимки, использованные для дешифрирования границ ледника, и даты съемки см. в таблице. Верхняя граница ледника показана по информации на 2002 г. Фон – снимок SPOT-6 от 14.07.2016 г.

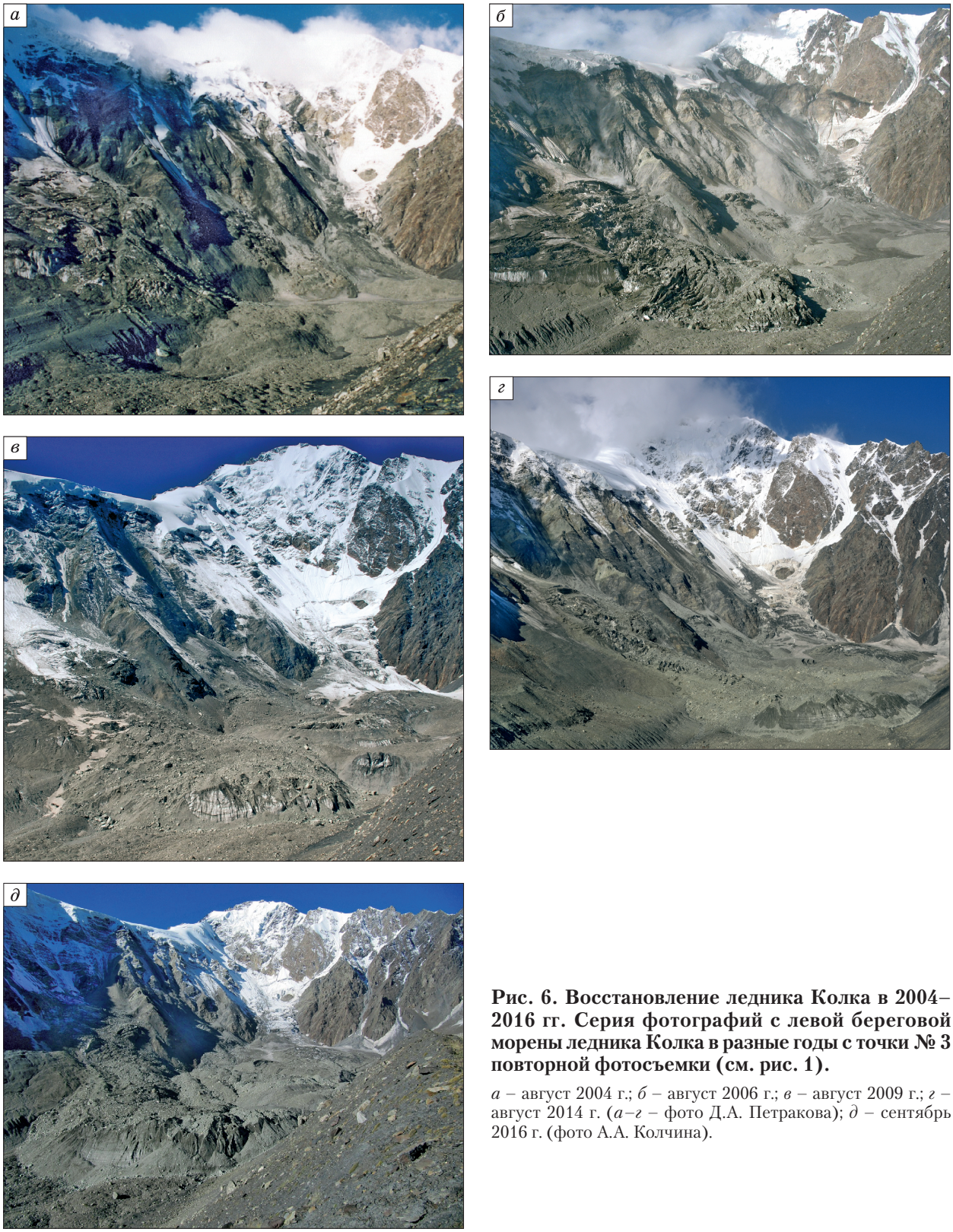

Рис. 6. Восстановление ледника Колка в 2004–2016 гг. Серия фотографий с левой береговой морены ледника Колка в разные годы с точки № 3 повторной фотосъемки (см. рис. 1).

а – август 2004 г.; *б* – август 2006 г.; *в* – август 2009 г.; *г* – август 2014 г. (*а–г* – фото Д.А. Петракова); *д* – сентябрь 2016 г. (фото А.А. Колчина).

фронт ледника продвигался вперед более чем на 100 м [*Петраков и др., 2013*], то в 2011–2016 гг. скорость продвижения фронта не превышала нескольких десятков метров в год, а в 2015–2016 гг. составила 5 м/год, т. е. находилась в пределах погрешности дешифрирования. При этом после катастрофы фронт ледника № 7 продвинулся вперед на 900 м. Это стало единственным для Кавказа случаем значительного наступания ледника в XXI в.

Вопрос о причинах столь быстрого восстановления Колки, происходящего на фоне сокращения ледников Кавказа [*Shahgedanova et al., 2014*] до сих пор не решен. Разительный контраст в балансе массы Колки и опорного для Кавказа ледника Джанкуат отмечался и раньше. В 1970–2002 гг. среднее значение баланса Колки составляло +1000 мм/год, или +2.5 млн т/год [*Петраков и др., 2013*], среднее значение баланса Джанкуата за тот же период равнялось –120 мм/год [*Поповнин, Петраков, 2005*]. В 2002–2014 гг. средний баланс Колки оценивался в +2.9 млн т/год, или +2600 мм/год (пересчет по площади Колки на 2014 г.), а баланс Джанкуата за тот же период был равен 560 мм/год (*устное сообщение В.В. Поповнина*) [*WGMS, 2013; WGMS, 2015*]. В 2009–2014 гг. контраст между балансами Колки и Джанкуата вырос по сравнению с 2002–2009 гг.: на фоне одинаковых средних значений баланса Колки баланс Джанкуата в 2009–2014 гг. стал на –400 мм/год более негативен.

Причины быстрого восстановления Колки после выбросов льда анализировались в ряде работ, например [*Рототаев и др., 1983; Петраков и др., 2013; Котляков и др., 2014*]. К.П. Рототаев с соавт. [*1983*] отмечали значительную роль метелевого переноса с ледника Суатиси в лавиносборы, питающие Колку, и оценивали долю лавинного питания Колки в 85 %. Судя по полевым наблюдениям после катастрофы 2002 г., роль лавин в питании Колки возросла за счет увеличения доли снега, сбрасываемого со склонов. В первые годы после катастрофы снег не сохранялся на дне цирка Колки. Вероятно, это происходило из-за повышенной температуры воздуха, связанной с отсутствием льда и понижением высоты поверхности [*Чернов, Рототаева, 2010*]. В последние годы в тыловой части Колки сохранялись лавинные снежники, приведшие к появлению на леднике небольшой фирновой области (см. рис. 6). Это могло произойти вследствие как понижения температуры воздуха под влиянием охлаждающего эффекта ледника и увеличения высоты поверхности на 50 м (см. рис. 3, 4), так и роста объемов лавин.

Ранее считалось, что баланс Колки после катастрофы 2002 г. определяется “почти исключительно условиями холодного периода” [*Петраков и др., 2013, с. 44*] или “зависит почти исключительно от количества лавинного снега” [*Котляков и др., 2014, с. 122*]. Летнее таяние экранировалось толстым слоем обломочного материала на поверхности ледника. Площадь участков открытого льда и фирна пока невелика, но разрастание этих участков будет способствовать увеличению летнего таяния и уменьшению темпов накопления льда.

По ситуации на 2014 г. в цирке Колки накопилось (40 ± 11) млн м^3 льда, т. е. около 40 % от предкатастрофического объема ледника. Ранее авторы прогнозировали возможность восстановления линейных размеров Колки к 2025 г. Судя по замедлению темпов продвижения фронта с 2011 г., вероятность такого развития событий низка. Вероятность реализации прогноза о накоплении 60–70 млн м^3 льда к 2025 г., напротив, достаточно высока.

Кармадонская котловина. Значения темпов таяния ледового тела в 2002–2009 гг. и анализ их изменений за этот период приведены в работе [*Петраков и др., 2013*]. По данным топографических съемок, в 2014 г. объем ледового тела составил (29 ± 5) млн м^3 (рис. 7), что на 5 млн м^3 (или на 15 %) меньше, чем в 2009 г. Для проверки точности оценок объема ледового тела и его изменений, полученных путем экстраполяции данных с поперечных профилей, авторы сопоставили карты завала 2002 г. с ЦМР, построенной по стереопаре снимков SPOT-6 за 2014 г. По этим данным, в 2002–2014 гг. объем ледового тела сократился на (84 ± 5) млн м^3, а в 2014 г. составил (26 ± 5) млн м^3 (см. рис. 7), что на 3 млн м^3 меньше по сравнению с оценками, основанными на экстраполяции. По-

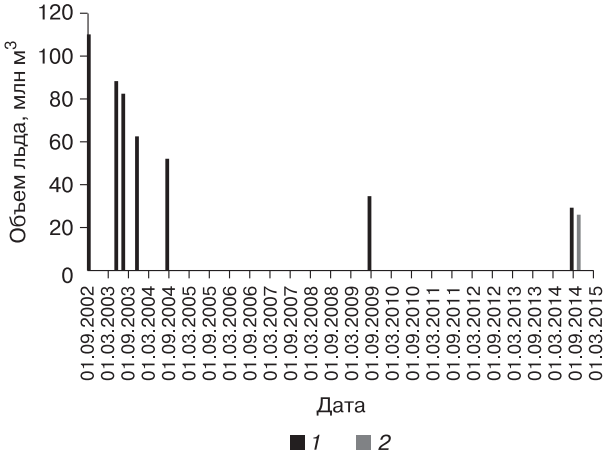

Рис. 7. Изменение объема ледового завала в Кармадонской котловине в 2002–2009 гг. по данным повторных тахеометрических измерений высоты поверхности ледового тела (*1*) и по данным сопоставления топографической карты завала 2002 г. масштаба 1:10 000 с ЦМР, построенной по стереопаре снимков SPOT-6 за 2014 г. (*2*).

лученные наземным и дистанционным путем оценки показали хорошую сходимость. Максимальное значение понижения высоты поверхности превысило 100 м (рис. 8). В осевой части котловины протягивается полоса, в которой поверхность завала понизилась более чем на 80 м.

Фактически изменения объема уже находятся в пределах погрешности оценок. Величина понижения поверхности завала в 2009–2014 гг. не превышала 15 м, а в среднем была существенно ниже. Как и прогнозировалось ранее [*Петраков и др., 2013*], темпы сокращения объема ледового тела асимптотически снижаются. Если в 2002–2003 гг. скорость уменьшения объема завала составляла 44 млн м^3 в год, в 2003–2004 гг. – 15 млн м^3 в год, то в 2004–2009 гг. она понизилась до 3.5 млн м^3 в год, а в 2009–2014 гг. – до 1 млн м^3 в год. Таким образом, за прошедшие после катастрофы годы

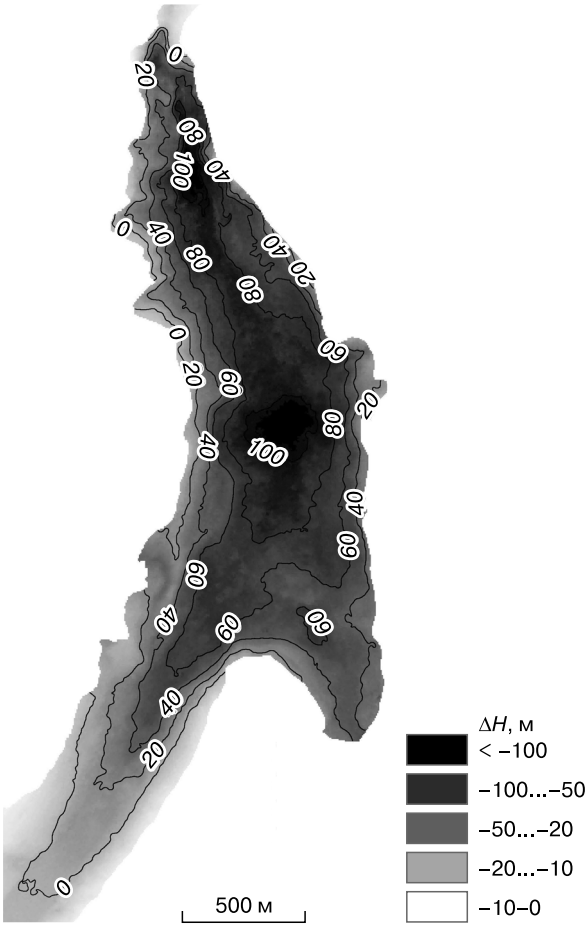

Рис. 8. Изменение высоты поверхности (Δ*H*) ледового завала в Кармадонской котловине за период 2002–2014 гг., оцененное по результатам наземной топографический съемки В.Н. Дробышева и В.В. Макликова 28.09.2002 г. и ЦМР, полученной по стереопаре космических снимков SPOT-6 от 29.10.2014 г.

темпы уменьшения объема ледового завала снизились почти в 50 раз.

По-видимому, это объясняется прогрессирующим увеличением толщины чехла грунтово-каменного материала на поверхности ледового завала. Кривая уменьшения объема ледового тела вполне сходна с кривыми понижения темпов таяния в зависимости от толщины моренного покрова на ледниках [*Nicholson, Benn, 2006*]. Основную массу завала составляет уже не лед, а принесенный во время событий 2002 г. обломочный материал, а также аллювиальные отложения. Так, по оценкам В.Н. Дробышева, в 2002–2004 гг. выше ледового завала накопилась десятиметровая толща речных наносов. Такой же процесс мог протекать внутри и под ледовым завалом, из-за уменьшения наклона русла и скорости течения р. Геналдон.

Роль таяния ледяного завала в питании р. Геналдон в 2002–2003 гг. оценивалась авторами в 50 %, в 2003–2004 гг. – 12 %, в 2004–2009 гг. – 4 % [*Петраков и др., 2013*], а в 2009–2014 гг. – только в 1 %. Можно считать, что на сегодняшний день таяние ледового тела не играет гидрологической роли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ледниковом цирке Колка продолжается быстрое накопление льда. В 2014 г. максимальная толщина возрожденного ледника достигла 90 м. За 2002–2014 гг. в цирке накопилось около (40 ± 11) млн м^3 льда, что составляет порядка 40 % от объема Колки перед катастрофой 2002 г. Данные авторов о толщине восстанавливающегося ледника подтверждаются результатами радиозондирования участка Колки в 2014 г. Сокращения темпов набора массы ледника не произошло: в 2009–2014 гг. накопилось столько же льда, сколько и в 2004–2009 гг. Положительный баланс массы привел к росту площади ледника Колка и продвижению его фронта, что стало единственным для Кавказа случаем значительного наступания ледника в XXI в. Темпы наступания фронта Колки замедлились в последние годы. Восстановление Колки происходит на фоне неблагоприятных для оледенения Кавказа погодных условий и резко контрастирует с поведением других кавказских ледников. Баланс массы восстанавливающегося ледника Колка, перекрытого значительной толщей обломочного материала, зависит главным образом от лавинного питания. Разрастание участков открытого льда и фирна может привести к увеличению роли абляции и замедлению темпов восстановления ледника.

Объем ледового завала в Кармадонской котловине в 2002–2014 гг. сократился на 75 %. Продолжилось прогрессирующее уменьшение темпов таяния, отмеченное нами ранее. В 2009–2014 гг. по

сравнению с первым годом после катастрофы темпы таяния уменьшились почти в 50 раз. Лед в котловине может сохраняться еще достаточно долго, а восстановления предкатастрофической поверхности не произойдет из-за аккумуляции в котловине большого количества обломочного материала и наносов р. Геналдон. Гидрологическая роль ледового тела в стоке р. Геналдон в последние годы пренебрежимо мала.

В ближайшие 10 лет повторение событий, сходных с катастрофой 2002 г., маловероятно. Не следует забывать, что к 2025 г. ледник Колка может набрать 60–70 % от предкатастрофического объема, что при определенном сочетании триггерных механизмов может привести к повторению событий 2002 г. Необходимо продолжать мониторинг восстановления ледника и каждые 5–10 лет проводить повторную съемку для измерения объема накопившегося льда. Кроме того, уже сейчас надо расширять исследования эндогенных процессов, протекающих в недрах Казбекско-Джимарайского массива и потенциально влияющих на вероятность повторения гляциальной катастрофы.

Авторы выражают благодарность директору ЗАО "СевКавТИСИЗ" И.А. Матвееву за предоставление оборудования для съемочных работ, К. Царахову, В.Г. Адцееву, В.А. Иванову, О.Н. Рыжанову за логистическую поддержку, М.Р. Мирзоеву, П.С. Штаничеву, Е.А. Савернюк, К.С. Висхаджиевой, Е.А. Белоусовой за помощь при проведении полевых работ, И.И. Лаврентьеву за геофизические данные о толщине льда на Колке.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 15-05-08694, 14-05-00768). Стереопара космических снимков SPOT-6 получена при помощи Геопортала МГУ имени М.В. Ломоносова.

Литература

Бергер М.Г. Три гляциодинамические подвижки и четыре газодинамических выброса ледника Колка. Малоизвестные страницы и дискуссионные вопросы истории развития пульсирующего ледника. М., КомКнига, 2007, 120 с.

Berger, M.G., 2007. Three glaciodynamic advances and four gasodynamic explosions of Kolka Glacier. Little-known Details and Disputable Issues of the Development History of the Surging Glacier. KomKniga, Moscow, 120 pp. (in Russian)

Богатиков О.А., Гурбанов А.Г. Комплексные исследования Эльбрусского и Казбекского вулканических центров: мониторинг и прогноз // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2003, т. 3, № 2, с. 15–28.

Bogatikov, O.A., Gurbanov, A.G., 2003. Complex studies of the Elbrus and Kazbek volcanic centers: monitoring and prediction. Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Tsentra 3 (2), 15–28.

Божинский А.Н. Математическое моделирование крупномасштабных селевых и ледниковых катастроф // Материалы гляциол. исслед., 2005, вып. 99, с. 13–17.

Bozhinsky, A.N., 2005. Mathematic modelling of large-scale debris flow and glacial disasters. Materialy glatsiologicheskikh issledovaniy 99, 13–17.

Болов В.Р., Мочалов В.П., Муратов Ш.С. Итоги работы, нерешенные проблемы и задачи Межведомственной экспедиции по сбору, анализу и обобщению данных об опасных природных процессах в горных районах Северного Кавказа // Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах: Докл. Междунар. конф. (Владикавказ–Москва). Владикавказ, Олимп, 2006, с. 56–70.

Bolov, V.R., Mochalov, V.P., Muratov, S.S., 2006. Work results, unsolved problems and objectives of the Interdepartmental Expedition for Collection, Analysis and Summarization of Data on hazardous Natural Processes in the mountainous regions of Northern Caucasus, in: Prevention of hazardous situations in the alpine regions: Proceedings of the international conference (Vladikavkaz–Moscow). Olimp, Vladikavkaz, pp. 56–70. (in Russian)

Васьков И.М. Возможный механизм обвала и динамика движения ледово-каменных масс в верховьях р. Геналдон (на Центральном Кавказе в сентябре 2002 года) // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2004, т. 4, № 2, с. 34–45.

Vas'kov, I.M., 2004. The possible collapse mechanism and dynamics of the movement of ice/rock masses in the upper reaches of the Genaldon River in Central Caucasus in September 2002. Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Tsentra 4 (2), 34–45.

Гурбанов А.Г., Кусраев А.Г., Чельдиев А.Х. Первые результаты исследования эндогенных процессов в Геналдонском и прилегающих ущельях // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2004, т. 4, № 3, с. 2–8.

Gurbanov, A.G., Kusraev, A.G., Cheldiev, A.H., 2004. First results of investigating endogenous processes in the Genaldon and adjacent gorges. Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Tsentra 4 (3), 2–8.

Десинов Л.В. Пульсация ледника Колка в 2002 году // Там же, с. 72–87.

Desinov, L.V., 2004. Surge of Kolka Glacier in 2002. Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Tsentra 4 (3), 72–87.

Дробышев В.Н. Гляциальная катастрофа в Северной Осетии 20 сентября 2002 года // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2012, т. 16, № 3, с. 20–36.

Drobyshev, V.N., 2012. A glacial disaster in North Ossetia on September 20, 2002. Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Tsentra 16 (3), 20–36.

Заалишвили В.Б., Невская Н.И., Харебов А.К. Анализ инструментальных записей схода ледника Колка по данным локальной сети сейсмических наблюдений // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2004, т. 4, № 3, с. 58–64.

Zaalishvili, V.B., Nevskaya, N.I., Kharebov, A.K., 2004. Analysis of instrumental records of the Kolka Glacier collapse on the basis of the data of a local seismic observation network. Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Tsentra 4 (3), 58–64.

Запорожченко Э.В. Ледник Колка и долина р. Геналдон: вчера, сегодня, завтра // Сб. науч. тр. Ин-та "Севкавгипроводхоз". Пятигорск, 2003, вып. 16, с. 15–35.

Zaporozhchenko, E.V., 2003. Kolka Glacier and the Genaldon River valley: yesterday, today, and tomorrow, in: Proceedings of Sevkazgiprovodkhoz Institute, iss. 16, Pyatigorsk, pp. 15–35.

Коваленко Н.В., Петраков Д.А., Алейников А.А., Аристов К.А., Бойко Е.С., Дробышев В.Н., Черноморец С.С. Гляциологический мониторинг ледника Колка в 2002–2014 гг. // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2015, т. 15, № 4, с. 43–50.

Kovalenko, N.V., Petrakov, D.A., Aleynikov, A.A., Aristov, K.A., Boiko, E.S., Drobyshev, V.N., Chernomorets, S.S., 2015. The glaciological monitoring of Kolka Glacier in 2002–2014. Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Tsentra 15 (4), 43–50.

Кортиев Л.И., Кортиева В.Л., Чочиев С.В. Анализ социального, экологического и экономического ущерба от разрушений ледника Колка // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2009, т. 9, № 3, с. 41–42.
Kortiev, L.I., Kortieva, V.L., Chochiev, S.V., 2009. Analysis of the social, environmental and economic damage inflicted by Kolka Glacier collapse. Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Tsentra 9 (3), 41–42.

Котляков В.М. Кармадонская катастрофа: что случилось и чего ждать дальше / В.М. Котляков, О.В. Рототаева, Г.А. Носенко, Л.В. Десинов, Н.И. Осокин, Р.А. Чернов. М., Изд. дом "Кодекс", 2014, 184 с.
Kotlyakov, V.M., Rototayeva, O.V., Nosenko, G.A., Desinov, L.V., Osokin, N.I., Chernov, R.A., 2014. The Karmadon Disaster: what Happened and what to Expect in the Future. Kodeks Publishing House, Moscow, 184 pp. (in Russian)

Котляков В.М., Рототаева О.В. Ледниковая катастрофа на Северном Кавказе // Природа, 2003, № 8, с. 15–23.
Kotlyakov, V.M., Rototayeva, O.V., 2003. The glacial disaster in North Caucasus. Priroda 8, 15–23.

Котляков В.М., Рототаева О.В., Осокин Н.И. Пульсирующие ледники и ледниковая катастрофа на Северном Кавказе // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2004, т. 4, № 3, с. 65–71.
Kotlyakov, V.M., Rototayeva, O.V., Osokin, N.I., 2004. Surging glaciers and the glacial disaster in North Caucasus. Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Tsentra 4 (3), 65–71.

Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра / Отв. ред. Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили. Владикавказ, Центр геофиз. исслед. Владикавказ. науч. центра РАН и РСО-А, 2014, 432 с.
Leonov, Y.G., Zaalishvili, V.B. (Eds.), 2014. Kolka Glacier: Yesterday, Today, and Tomorrow. Vladikavkaz, Center for Geophysical Studies of the Vladikavkaz Scientific Center of RAS and the Republic of North Ossetia–Alania, 432 pp. (in Russian)

Муравьев Я.Д. Газовое извержение в цирке – возможная причина развития подвижек ледника Колка по катастрофическому сценарию // Материалы гляциол. исслед., 2005, вып. 98, с. 44–55.
Muravyev, Ya.D., 2005. A gas emission in a cirque – the possible cause of the Kolka Glacier slide by a disaster scenario. Materialy Glatsiologicheskikh Issledovaniy 98, 44–55.

Никитин М.Ю., Гончаренко О.А., Галушкин И.В. Динамика и стадийность развития Геналдонского ледово-каменного потока на основе дистанционного анализа // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2007, т. 7, № 3, с. 2–15.
Nikitin, M.Yu., Goncharenko, O.A., Galushkin, I.V., 2007. Dynamics and stages in the development of the Genaldon ice-rock flow on the basis of remote sensing analysis. Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Tsentra 7 (3), 2–15.

Осипова Г.Б., Цветков Д.Г. Что дает мониторинг пульсирующих ледников? // Природа, 2003, № 4, с. 3–13.
Osipova, G.B., Tsvetkov, D.G., 2003. What does monitoring of surging glaciers yield? Priroda, No. 4, 3–13.

Панов В.Д., Ильичев Ю.Г., Лурье П.М. Ледниковый обвал в горах Северной Осетии в 2002 г. // Метеорология и гидрология, 2002, № 12, с. 94–98.
Panov, V.D., Ilyichev, Yu.G., Lurye, P.M., 2002. The glacier collapse in the mountains of North Ossetia in 2002. Meteorologia i Gidrologia 12, 94–98.

Петраков Д.А., Дробышев В.Н., Алейников А.А., Аристов К.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Изменения в зоне Геналдонской гляциальной катастрофы в период 2002–2010 гг. // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 1, с. 35–46.
Petrakov, D.A., Drobyshev, V.N., Aleinikov, A.A., Aristov, K.A., Tutubalina, O.V., Chernomorets, S.S., 2013. Changes in the area of Genaldon glacial disaster in 2002–2010. Earth's Cryosphere XVII (1), 35–46.

Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. По следам Геналдонской катастрофы: год спустя // Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 1, с. 29–39.
Petrakov, D.A., Tutubalina, O.V., Chernomorets, S.S., 2004. The 2002 Genaldon glacial catastrophe: one year later. Earth's Cryosphere VIII (1), 29–39.

Познанин В.Л. Механизмы селевых ледниковых катастроф: Колка 2002. М., ИМГРЭ, 2009, 180 с.
Poznanin, V.L., 2009. The mechanisms of debris flow glacial disaster: Kolka-2002. Institute of Mineralogy, Geochemistry, and Crystallochemistry of Rare Elements, Moscow, 180 pp. (in Russian)

Поповнин В.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Гляциальная катастрофа 2002 года в Северной Осетии // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 1, с. 3–17.
Popovnin, V.V., Petrakov, D.A., Tutubalina, O.V., Chernomorets, S.S., 2003. The glacial disaster of 2002 in North Ossetia. Earth's Cryosphere VII (1), 3–17.

Поповнин В.В., Петраков Д.А. Ледник Джанкуат за минувшие 34 года (1967/68–2000/01 гг.) //Материалы гляциол. исслед., 2005, вып. 98, с. 167–174.
Popovnin, V.V., Petrakov, D.A., 2005. Djankuat Glacier over the past 34 years (1967/68–2000/01). Materialy Glatsiologicheskikh Issledovaniy 98, 167–174.

Рототаев К.П. Исследование пульсирующего ледника Колка / К.П. Рототаев, В.Г. Ходаков, А.Н. Кренке. М., Наука, 1983, 169 с.
Rototayev, K.P., Khodakov, V.G., Krenke, A.N., 1983. A Study of the Surging Kolka Glacier. Nauka, Moscow, 169 pp. (in Russian)

Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Петраков Д.А. Ледник Колка перед катастрофой 2002 года: новые данные // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 4, с. 62–71.
Tutubalina, O.V., Chernomorets, S.S., Petrakov, D.A., 2005. Kolka glacier before the 2002 collapse: new data. Earth's Cryosphere IX (4), 62–71.

Чернов Р.А., Котляков В.М., Рототаева О.В. О развитии посткатастрофических процессов в цирке ледника Колка и долине р. Геналдон (северный склон Казбекского массива) // Лед и снег, 2010, № 4 (112), с. 25–29.
Chernov, R.A., Kotlyakov, V.M., Rototayeva, O.V., 2010. On development of post-catastrophic processes in the cirque of Kolka Glacier in the Genaldon River valley (northern slope of the Kazbek massif). Led i Sneg 4 (112), 25–29.

Черноморец С.С., Михайлов В.О. Численное моделирование катастрофических селей, обвалов и оползней с применением трехмерной дискретной модели // Геориск, 2012, № 1, с. 16–27.
Chernomorets, S.S., Mikhailov, V.O., 2012. Numerical modeling of catastrophic debris flows, collapses and landslides using a discrete 3-D model. Georisk, No. 1, 16–27.

Bhardwaj, A., Sam, L., Akanksha, Martin-Torres, F.J., Kumar, R. UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects // Remote Sensing of Environ., 2016, vol. 175, p. 196–204, DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.029.

Chernomorets, S.S., Tutubalina, O.V., Seinova, I.B., Petrakov, D.A., Nosov, K.N., Zaporozhchenko, E.V. Glacier and debris flow disasters around Mt. Kazbek, Russia/Georgia // Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment / Ed. by C.-L. Chen, J. Major. Rotterdam, Millpress, 2007, p. 691–702.

Drobyshev, V.N. Glacial Catastrophe of 20 September 2002 in North Osetia // Rus. J. Earth Science, 2006, vol. 8, p. ES4004, DOI: 10.2205/2006ES000207.

Evans, S.G., Tutubalina, O.V., Drobyshev, V.N., Chernomorets, S.S., McDougall, S., Petrakov, D.A., Hungr, O. Catastrophic detachment and high-velocity long-runout flow of Kolka Glacier, Caucasus Mountains, Russia in 2002 // Geomorphology, 2009, vol. 105, No. 3–4, p. 314–321, DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.10.008.

Haeberli, W., Huggel, C., Kääb, A., Oswald, S., Polkvoj, A., Zotikov, I., Osokin, N. The Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002 – an extraordinary event of historical dimensions in North Ossetia (Russian Caucasus) // J. Glaciol., 2004, vol. 50 (171), p. 533–546.

Huggel, C., Zgraggen-Oswald, S., Haeberli, W., Kääb, A., Polkvoj, A., Galushkin, I., Evans, S.G. The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery // Natural Hazards and Earth System Sci., 2005, No. 5, p. 173–187.

Immerzeel, W.W., Kraaijenbrink, P.D.A., Shea, J.M., Shrestha, A.B., Pellicciotti, F., Bierkens, M.F.P., de Jong, S.M. High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles // Remote Sensing of Environ., 2014, vol. 150, p. 93–103, DOI: 10.1016/j.rse.2014.04.025.

Lindsey, R., Tutubalina, O., Petrakov, D., Chernomorets, S. Case Study: Collapse of the Kolka Glacier // One Planet Many People: Atlas of Our Changing Environment. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya, 2005, p. 266–267.

Nicholson, L., Benn, D.I. Calculating ice melt beneath a debris layer using meteorological data // J. Glaciol., 2006, vol. 52, No. 178, p. 463–470.

Petrakov, D.A., Chernomorets, S.S., Evans, S.G., Tutubalina, O.V. Catastrophic glacial multi-phase mass movement; a special type of glacial hazard // Adv. Geosciences, 2008, vol. 14, p. 211–218.

Shahgedanova, M., Nosenko, G., Kutuzov, S., Rototaeva, O., Khromova, T. Deglaciation of the Caucasus Mountains, Russia/Georgia, in the 21st century observed with ASTER satellite imagery and aerial photography // The Cryosphere, 2014, vol. 8, p. 2367–2379, DOI: 10.5194/tc-8-2367-2014.

WGMS 2013. Glacier Mass Balance Bulletin No. 12 (2010–2011). Zemp M., Nussbaumer S.U., Naegeli K., Gärtner-Roer I., Paul F., Hoelzle M., Haeberli W. (eds.), ICSU(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/ UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 2013, 106 p., publ. based on database version: DOI: 10.5904/wgms-fog-2013-11.

WGMS 2015. Global Glacier Change Bulletin No. 1 (2012–2013). Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Hüsler F., Machguth H., Mölg N., Paul F., Hoelzle M. (eds.), ICSU(WDS)/IUGG(IACS)/ UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 2015, 230 p., publ. based on database version: DOI: 10.5904/wgms-fog-2015-11.

Поступила в редакцию
14 декабря 2016 г.