

ПРОРЫВ ОЗЕРА БАШКАРА (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КАВКАЗ, РОССИЯ) 1 СЕНТЯБРЯ 2017 ГОДА

**С.С. Черноморец¹, Д.А. Петраков¹, А.А. Алейников², М.Ю. Беккиев³, К.С. Висхаджиева¹,
М.Д. Докукин³, Р.Х. Калов³, В.М. Кидяева¹, В.В. Крыленко⁴, И.В. Крыленко¹,
И.Н. Крыленко¹, Е.П. Рец⁵, Е.А. Савернюк¹, А.М. Смирнов¹**

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; devdorak@gmail.com*

² *ИТЦ “СКАНЭКС”, 108811, Москва, Киевское ш., стр. 1, Бизнес-парк “Румянцево”, 8 под., оф. 732, Россия*

³ *Высокогорный геофизический институт, 360030, Нальчик, пр. Ленина, 2, Кабардино-Балкарская Республика, Россия*

⁴ *Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский просп., 36, Россия*

⁵ *Институт водных проблем РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, 3, Россия*

Прорыв озера Башкара 1 сентября 2017 г. является отражением современного этапа деградации ледников, когда нарушается стабильный режим озер, моренных массивов, ледников. Оценка параметров прорыва озера и условий его формирования проводилась посредством маршрутных наземных и аэровизуальных наблюдений, инструментальных измерений с применением различных технических средств (квадрокоптер, эхолот, автоматическая метеостанция, датчик уровня воды), материалов космических съемок. Триггерным импульсом прорыва озера стал аномальный ливень (около 100 мм) в ночь с 31 августа на 1 сентября на фоне выпавших накануне (30–31 августа) осадков (45 мм). Объем жидкой фазы потока составил порядка 1.1 млн м³, основная его часть (800 тыс. м³) была сброшена из озера. В долине реки Адыл-Су в селевой паводок было вовлечено 350–500 тыс. м³ твердого материала. По результатам исследований даны рекомендации по проведению мероприятий для предупреждения чрезвычайных ситуаций, опасность возникновения которых сохраняется.

Прорыв ледникового озера, селевой паводок, Кавказ

THE OUTBURST OF BASHKARA GLACIER LAKE (CENTRAL CAUCASUS, RUSSIA) ON SEPTEMBER 1, 2017

**S.S. Chernomorets¹, D.A. Petrakov¹, A.A. Aleynikov², M.Y. Bekkiev³, K.S. Viskhadzhieva¹,
M.D. Dokukin³, R.K. Kalov³, V.M. Kidyayeva¹, V.V. Krylenko⁴, I.V. Krylenko¹, I.N. Krylenko¹,
E.P. Rets⁵, E.A. Savernyuk¹, A.M. Smirnov¹**

¹ *Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; devdorak@gmail.com*

² *SCANEX R&D Centre, 1, Kiev highway, Business Park “Rumyantsevo”, 8 entrance, office 732, Moscow, 108811, Russia*

³ *High-Mountain Geophysical Institute, 2, prosp. Lenina, Nalchik, Kabardino-Balkaria Republic, 360030, Russia*

⁴ *Shirshov Institute of Oceanology, RAS, 36, Nahimovskiy prosp., Moscow, 117997, Russia*

⁵ *Institute of Water Problems, RAS, 3, Gubkina str., Moscow, 119333, Russia*

The outburst of Bashkara Lake on September 1, 2017 reflects the current stage of glacier downwasting when the stable regime of lakes, debris complexes and glaciers is disturbed. We have estimated the parameters of the lake outburst as well as threshold and trigger conditions using ground-based and aerial observations, satellite imagery analysis, and instrumental data obtained from a drone, an echo-sounder, an automatic weather station, and a water level datalogger. An abnormal shower with 100 mm of precipitation happened during a night from August, 31 to September, 1 following the previous (August, 30–31) 45 mm rainfall, has been recognized as trigger of the lake outburst. The volume of the liquid phase of the debris flood was about 1.1 mln m³, including water released during the lake outburst (0.8 mln m³). In the valley of the Adylsu River, 0.35–0.50 mln m³ of debris was entrained into the flow. Based on this research we propose recommendations on measures how to prevent emergencies which still could take place in the area.

Glacial lake outburst flood (GLOF), debris flood, Caucasus

ВВЕДЕНИЕ

Ночью 1 сентября 2017 г. в долинах рек Адыл-Су и Баксан в Приэльбрусье (Кабардино-Балкарская Республика, Россия) прошел катастрофический селевой паводок. Погибли три человека. Полностью разрушено или существенно повреждено более 3.3 км федеральной автодороги А-158

“Проходный–Баксан–Эльбрус” и около 500 м автодороги в долине р. Адыл-Су. Почти 7750 местных жителей и отдыхающих оказались заблокированы в Приэльбрусье без транспортного сообщения с остальной частью страны, вывоз туристов и доставка жизненно необходимых продуктов осу-

ществлялись вертолетами. Было нарушено газоснабжение шести населенных пунктов – Терскол, Тегенекли, Эльбрус, Нейтрино, Байдаевка и Верхний Баксан. Отсутствовали энергоснабжение, телефонная (стационарная и мобильная) связь. Судя по предварительным официальным данным, опубликованным в “Российской газете” 8 сентября 2017 г., затраты на аварийно-спасательные работы составили 160 млн руб., на работы по восстановлению жизнедеятельности пострадавших районов – 650 млн руб. [Мысливская, 2017].

Причиной селевого паводка стал прорыв ледникового озера Башкара (рис. 1). Координаты места прорыва $43^{\circ}12'35''$ с.ш. и $42^{\circ}43'28''$ в.д. В конце 1950-х гг. прорывы оз. Башкара приводили к разрушительным селевым потокам по долине р. Адыл-Су [Ковалев, 1961; Сейнова, Золотарев, 2001]. В те годы плотиной озера было тело ледника Башкара, и прорывы проходили по подледным каналам. После формирования устойчивого подледного канала прорывы озера прекратились. Режим озера был стабильным около 40 лет.

Колебания ледников Приэльбрусья, в том числе ледника Башкара, в 1980–1990-х гг. привели к изменению моренного рельефа, деформации существующих и формированию новых стадияльных морен [Докукин, Севернюк, 2012]. В 1990-е гг. поверхностный сток из оз. Башкара оказался блокирован новым валом боковой морены высотой до 7–8 м, через который вода стала стекать по фильтрационным каналам [Докукин, Шагин, 2014]. Это во многом определило особенности режима озера в последующие годы. В начале XXI в. на месте отступающего языка ледника Башкара началось быстрое формирование новых озер, названных Лапа и Мизинчик [Черноморец и др., 2003]. Объем и площадь оз. Башкара в это время зависели от колебаний уровня, но рост объема озер ниже ледника на фоне эпизодических повышений уровня Башкары свидетельствовали о нарастании селевой угрозы [Черноморец и др., 2007а]. О росте вероятности прорыва оз. Башкара также говорилось неоднократно, например в [Залиханов и др., 2009; Petrakov et al., 2012].

В 2008 г. впервые был зафиксирован перелив воды из озера через моренную дамбу в грот ледника Башкара [Кидяева и др., 2013], вероятность прорыва озера оценивалась как высокая [Петраков, 2008]. Прорыва не произошло, в месте перелива сформировалась отмостка, препятствовавшая дальнейшему размыву русла. Силами Главного управления МЧС по Кабардино-Балкарии был проведен ряд профилактических мероприятий, направленных на информирование населения и слежение за озером. В частности, в месте перелива на оз. Башкара в 2009 г. был сделан прокоп глубиной 1.8 м, что привело к понижению максимального объема озера примерно на 100 тыс. м³. На осно-



Рис. 1. Озера Башкара и Лапа на Центральном Кавказе после прорыва, произошедшего 1 сентября 2017 г.

Фото с квадрокоптера Е.А. Севернюк, 08.10.2017 г.

ве расчетного гидрографа, полученного специалистами ОАО “Севкавгипроводхоз” [Гнездилов и др., 2007], был смоделирован вероятный прорывной паводок из оз. Башкара [Petrakov et al., 2012].

В период 2009–2014 гг. уровень оз. Башкара был невысок и перелива воды через моренную дамбу не происходило, но в 2015–2017 гг. уровень резко повысился, перелив отмечался ежегодно и продолжительность его увеличилась с 1 недели в 2015 г. до 2 месяцев в 2017 г. При полевых и аэровизуальных обследованиях отмечалась фильтрация воды через моренную дамбу. Таким образом, после относительно стабильного периода 2009–2014 гг. вероятность прорыва озера снова возросла.

Целью данной работы стал анализ причин прорыва озера Башкара и предварительная оценка объемов селевого паводка.

МОНИТОРИНГ БАШКАРИНСКИХ ОЗЕР ДО ПРОРЫВА

Методы мониторинга группы Башкаринских озер детально описаны в работе [Petrakov et al., 2012]. Дно озера Башкара, подпруженного береговой мореной и ледником, было стабильным, что в результате серии батиметрических съемок (2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2008, 2009, 2012 гг.) позволило получить зависимости объема воды от уровня озера. Батиметрические кривые были использованы для оценки объема воды в озере до его прорыва.

С 2013 г. для наблюдений за уровнем на оз. Башкара использовали автоматические регистраторы Keller DCX (Швейцария), которые измеряют уровни воды пьезометрическим способом. Один из датчиков размещался под водой и регистрировал временной ход суммарного давления атмосферы и столба воды над датчиком, второй устанавливался на берегу и измерял атмосферное

давление для введения поправки на его величину при расчете уровня воды, а также температуру воздуха. Считывание данных производили одновременно в конце сезона. В результате работы регистраторов получали детальный (частота сохранения данных в памяти устройства 1 раз в час) ход уровней воды и температур воды и воздуха за селеопасный период. Эти данные об уровнях воды с помощью регистраторов Keller DCX хорошо соотносятся с данными измерений по футштоку и результатами предшествующих измерений с помощью уровнемера АДУ.

Таким образом, с той же степенью детализации был определен ход уровней воды и температур воды и воздуха за селеопасные периоды 2013–2017 гг. Погрешность измерений уровня при помощи прибора составляет первые сантиметры.

Метеоданные за период, предшествовавший прорыву озера, получены при помощи автоматической станции Davis Vantage Pro 2. Метеостанция была установлена на субгоризонтальной площадке на высоте 2650 м в 500 м от оз. Башкара, на ледниковом стационаре Джанкуат. Температурный датчик находился на высоте 1.8 м над поверхностью. Погрешность измерений температуры составила 0.5 °С, осадков – 0.5 мм. Все измерения проводились 1 раз в 15 минут.

ОБСЛЕДОВАНИЕ ОЗЕР И ПУТИ СЕЛЕВОГО ПАВОДКА

Для оценки ситуации перед прорывом использованы материалы маршрутных обследований М.Д. Докукина, Р.Х. Калова в июне, июле и В.В. Крыленко, А.А. Алейникова во второй половине августа 2017 г. Аэровизуальные обследования и анализ текущей ситуации проводились с вертолета ГУ МЧС по КБР с участием М.Д. Докукина, Р.Х. Калова, М.Ю. Беккиева и М.М. Хаджиева (1 и 10 сентября 2017 г.). Наземные обследования котловин озер Башкара и Лапа, включавшие обход контуров, фиксацию береговой линии до и после события, а также склоновых процессов в котловине оз. Башкара, первичную и повторную фотосъемки местности с закрепленных точек выполняли А.М. Смирнов, В.М. Кидяева, И.В. Крыленко 1–8 сентября. Это позволило выявить изменения на склонах и в русле реки, а также сопоставить ситуацию после прорыва с предыдущими годами. Также этой группой в выбранных условно устойчивых характерных створах вдоль русла реки была получена информация о расходах прорывного паводка и объеме вовлечения твердой составляющей. Максимальные уровни потока и величина падения уровня оз. Башкара оценены по меткам высоких вод лазерным дальномером Bushnell. Измерены ширина и глубина вреза, определены площади поперечных сечений потока. Оценки параметров потока в нижней части доли-

ны р. Адыл-Су и работы берегоукрепительных сооружений выполнялись М.Д. Докукиным и Р.Х. Каловым 15 сентября. Съемка котловин озер и приледниковой области с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) Phantom 4, батиметрическая съемка озер Башкара и Лапа, обходы их по внешним контурам, а также обследование вдоль тракта селевого паводка проведены С.С. Черноморцем, Е.А. Савернюк, М.Д. Докукиным, А.В. Хаткутовым 7–9 октября 2017 г.

Кроме того, для анализа изменений в зоне прорывного паводка были использованы космические снимки: со спутника Канопус В1 – 22.08.2017, 19.09.2017; со спутника Sentinel 2А – 26.08.2017, 28.08.2017, 02.09.2017, 05.09.2017, 10.09.2017, 07.10.2017; снимки С.Н. Рязанского с Международной космической станции – 03.09.2017.

ОБСУЖДЕНИЕ ПРИЧИН ПРОРЫВА ОЗЕРА

Высокий уровень воды в конце лета. Средне-многолетняя отметка уровня воды в озере в летний период составляла около 2588 м. Как правило, пиковые значения уровней отмечались в первой половине лета [Кидяева и др., 2013], а к концу августа уровень воды, по показаниям уровнемера, а также данным сравнения маршрутных и аэровизуальных наблюдений, снижался (рис. 2). В целом в предпрорывный период уровень воды в озере держался на не характерных для конца лета высоких отметках (около 2591 м), на протяжении 2.5 месяцев наблюдался поверхностный перелив через перемычку, однако уровни воды в озере, вплоть до середины дня 31 августа, не превышали наблюдавшихся в предшествующие дни. Перелив воды, подтверждающий показания уровнемера, зафиксирован и при маршрутных обследованиях 29 июня, 28 июля и 18 августа.

Интенсивные и продолжительные осадки. За первую половину дня 31 августа выпало 45 мм жидких осадков за 15 ч (с 23:00 30 августа до 14:00 31 августа). Это привело к подъему уровня в озере на 33 см, прекращение осадков во второй половине дня обусловило стабилизацию и даже некоторый спад уровня в озере. В 20 часов 31 августа начался дождь аномальной интенсивности, крайне редко встречающийся в этом районе, по данным наблюдений на ледниковом стационаре Джанкуат. Всего за 5 ч (с 20:00 31 августа до 01:00 1 сентября) сумма жидких осадков по осадкомеру составила около 98 мм, три локальных пика с интенсивностью осадков порядка 40 мм/ч отмечались в районе 20:45, 22:00 и 24:00.

Следствием аномального ливня был сход склоновых селей в долинах рек Джанкуат и Шхельда, который выявлен при сравнении космоснимков Sentinel 2А от 26 августа и 2 сентября и зафиксирован при облете 1 сентября. На склоне

в коллювиально-пролювиальных отложениях образовался врез длиной около 800 м и шириной 20–40 м. Площадь отложений склонового селя в кармане правой береговой морены ледника Шхельда составила более 32 тыс. м². Отложения селя шириной до 100 м отмечены на участках предполя ледника.

Быстрый рост уровня воды перед прорывом.

Как показало последующее считывание данных с автоматического регистратора, уже за первый час аномального ливня (с 20 до 21 часа) отметка уровня в озере выросла на 12 см, далее, вплоть до прорыва, рост уровня в озере не прекращался. В озере 1 сентября в 01:00 уровень воды был на 55 см выше, чем 31 августа в 20:00, и составлял 578 см над уровнем моря. Столь быстрого роста уровня озера за период прямых наблюдений также не отмечалось. К следующему сроку наблюдений в 2 часа ночи уровнемер уже находился выше уреза воды, т. е. спуск озера как минимум на 6 м уже осуществился (см. рис. 2).

Оценка объема селевого паводка. В результате прорыва перемычка была размыва, к утру 1 сентября уровень воды упал на 16.5 м относительно предпрорывного (рис. 3), объем воды в озере уменьшился на 3/4 (с 1 млн м³ до 200 тыс. м³). Вниз на ледник Башкара и далее по долине

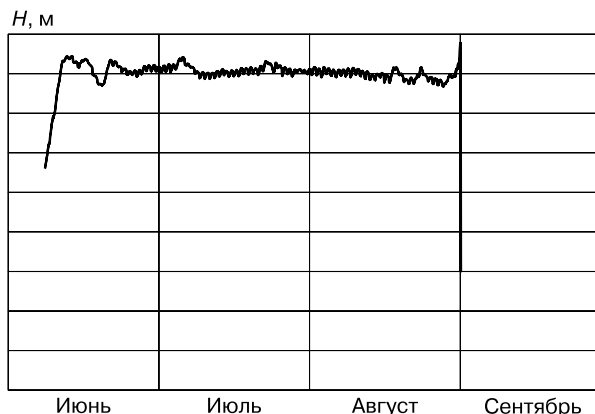


Рис. 2. Колебания уровня воды в оз. Башкара летом 2017 г.

Горизонтальные линии проведены через 1 м. После прорыва 01.09.2017 г. уровень опустился на 16.5 м, но уровнемер фиксировал показания только до того, как оказался на поверхности.

р. Адыл-Су пошел катастрофический паводок, на отдельных участках переходящий в водокаменный селевой поток. Приток воды в озеро в период аномального ливня (площадь водосбора озера около 3.8 км², суммарный слой осадков 100 мм, ко-

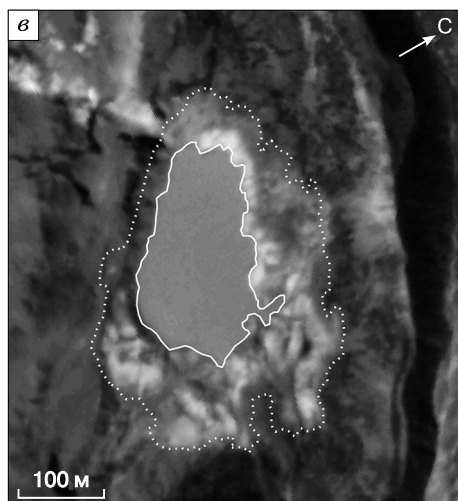
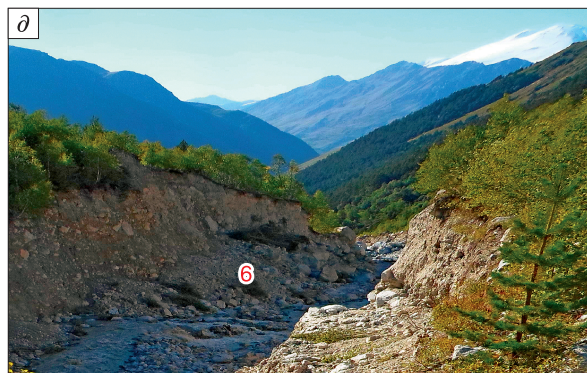


Рис. 3. Озеро Башкара до и после прорыва.

а – фото В.В. Крыленко, 19.08.2017; *б* – фото А.М. Смирнова, 01.09.2017; *в* – космический снимок Канопус В1, 17.09.2017 (сплошной контур – береговая линия на 17.09.2017 г., пунктир – на 22.08.2017 г.).



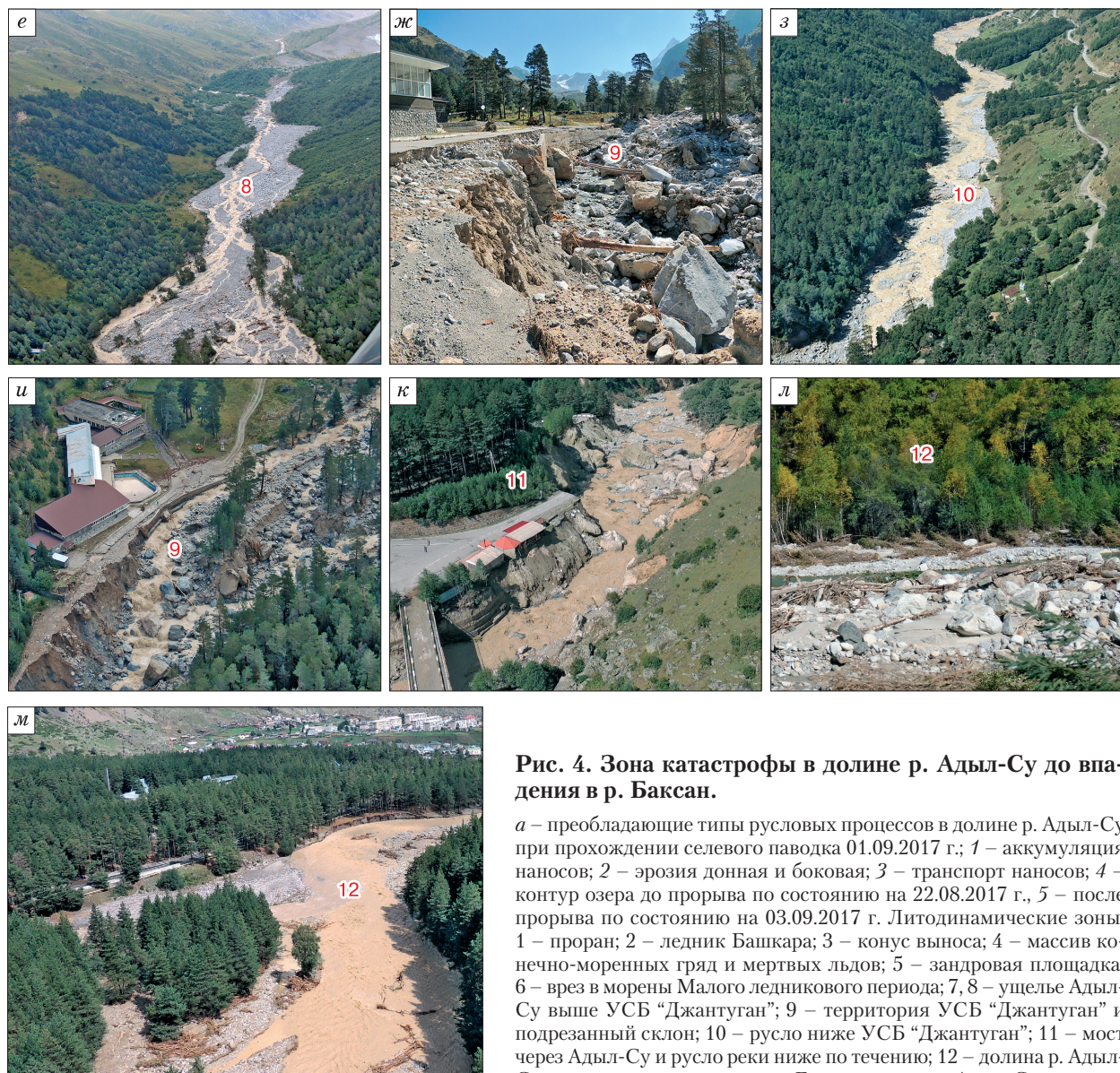


Рис. 4. Зона катастрофы в долине р. Адыл-Су до впадения в р. Баксан.

а – преобладающие типы русловых процессов в долине р. Адыл-Су при прохождении селевого паводка 01.09.2017 г.; 1 – аккумуляция наносов; 2 – эрозия донная и боковая; 3 – транспорт наносов; 4 – контур озера до прорыва по состоянию на 22.08.2017 г., 5 – после прорыва по состоянию на 03.09.2017 г. Литодинамические зоны: 1 – проран; 2 – ледник Башкара; 3 – конус выноса; 4 – массив конечно-моренных гряд и мертвых льдов; 5 – задровая площадка; 6 – врез в морены Малого ледникового периода; 7, 8 – ущелье Адыл-Су выше УСБ “Джантуган”; 9 – территория УСБ “Джантуган” и подрезанный склон; 10 – русло ниже УСБ “Джантуган”; 11 – мост через Адыл-Су и русло реки ниже по течению; 12 – долина р. Адыл-Су перед выходом в ущелье р. Баксан и устье р. Адыл-Су.

Автор схемы В.М. Кидяева. Подложка – снимок с Международной космической станции (автор С.Н. Рязанский, 03.09.2017). б–м – фотоиллюстрации к схеме (номера литодинамических зон приведены на снимках красным цветом). Авторы снимков: б – И.В. Крыленко, 03.09.2017; в – В.М. Кидяева, 03.09.2017; з–к, м – М.Д. Докукин, 01.09.2017; л – С.С. Черноморец, 07.10.2017.

эффицент стока 0.6) в грубом приближении мог составить до 200 тыс. м³. Не менее 50 тыс. м³ воды было вовлечено в поток при выплеске из расположенного у нижнего края ледника Башкара озера Лапа (площадь зеркала которого до паводка составляла порядка 60 тыс. м²) в результате прошедшего через него катастрофического паводка. На это указывает наблюдаемое после прорывного паводка понижение уровня воды в оз. Лапа примерно на 80–100 см ниже длительно стоявшего предпаводочного. В долине р. Адыл-Су добавочный

объем воды, вовлеченный в прорывной паводок, состоял из русловых запасов в реке и боковой приточности. В период дождевого паводка, но до прохождения прорывного, гидроморфологические характеристики русла Адыл-Су в первом приближении приняты следующими: средняя ширина 8–10 м, средняя глубина 1 м, средняя скорость 2 м/с. С учетом скорости течения в реке и скорости продвижения лобовой волны прорывного паводка за счет русловых запасов в прорывной паводок было вовлечено не менее 50 тыс. м³ воды.

С учетом кратковременности прохождения прорывного паводка авторы предположили, что компенсация вклада боковой приточности происходит за счет потерь стока на растекание по пойме и заплески. По предварительной оценке, объем водной составляющей селевого паводка составил около 1.1 млн м³.

Оценка объема твердой составляющей проводилась на основании профилей, построенных в ходе обследования, анализа фотографий с борта вертолета, полученных в результате облета сразу после прорыва, и космических снимков с борта МКС. Выделенные литодинамические зоны приведены на рис. 4.

Согласно предварительным оценкам, объем твердого материала, вовлеченного в селевой паводок, составил 350–500 тыс. м³. Основная масса твердого материала поступила в поток за счет боковой эрозии на участке 11 ниже моста через р. Адыл-Су (200–300 тыс. м³, см. рис. 4, *к*) и на участке 9 ниже учебно-спортивной базы (УСБ) “Джантуган” (100–150 тыс. м³, см. рис. 4, *ж, и*). Незначительные по протяженности участки вовлечения твердого материала с преобладанием донной эрозии 1 (проран, 20 тыс. м³, см. рис. 4, *б, в*), 4 (фронтальный уступ морены ниже озера Лапа, 20 тыс. м³, см. рис. 4, *з*) и 6 (каньон в моренах Малого ледникового периода, 20 тыс. м³, см. рис. 4, *д*) расположены в верхней части долины. После участков эрозии следуют участки аккумуляции наносов или их транспорта и последующей аккумуляции (см. рис. 4, *е, з, л, м*).

ОЦЕНКА СКОРОСТИ И РАСХОДОВ СЕЛЕВОГО ПАВОДКА

По опросным сведениям, лобовая волна паводка достигла ущелья Шхельды (6.4 км ниже истока из оз. Башкара) в районе 01:20 ночи, пос. Эльбрус (10 км ниже истока) – не позднее 01:30 ночи. К 02:30 1 сентября 2017 г. расход воды в р. Адыл-Су заметно снизился (прекратился мощный грохот). Согласно этим цифрам, скорость продвижения передовой волны паводка составила 5–6 м/с.

Паводок достиг р. Баксан и прошел по ней несколько десятков километров, вызвав местами разрушение дорог, мостов, водоводов, газопровода и ЛЭП. Вследствие прохождения прорывного паводка и сопутствующих ему деформаций русла на р. Баксан в городе Тырнауз, в 40 км от озера, был размыв на 2.0–2.2 м гребень запруды селя 14–15 августа 2017 г. из р. Герхожан-Су и заметно снижен уровень временного подпрудного водоема, существовавшего с середины августа 2017 г.

Максимальные прорывные расходы воды, судя по оставленным на леднике Башкара и в верхней части долины Адыл-Су следам, могли составить порядка 500 м³/с, расходы на участках ло-

кальной трансформации в селевой поток в 1.5–4.0 км ниже озера могли быть и больше. Так, в районе моста через р. Адыл-Су следы прохождения паводка зафиксированы на высоте 7–8 м над руслом реки. С учетом параметров моста и скорости потока примерно 5 м/с расход воды мог достигать 800 м³/с. Ниже по долине Адыл-Су максимальный расход постепенно уменьшался и к выходу в долину Баксана составил ориентировочно 200–250 м³/с.

Продолжающееся сокращение ледника Башкара. Поверхность ледника Башкара, подпиравшего дамбу в 2008 г., значительно понизилась (рис. 5). Отступление правой ветви ледника, примыкающей к оз. Башкара, по фронту с 2009 по 2017 г. составило 30–35 м, основного потока ледника Башкара, примыкающего к оз. Лапа с 2007 по 2017 г., – 100–105 м.

Понижение поверхности ледника Башкара способствовало уменьшению устойчивости моренной дамбы. Если в 2008 г. она “опиралась” на ледник, то в последние годы эта опора исчезала.

Вероятный механизм прорыва. Из-за притока большого объема воды в результате выпадения аномального количества осадков через моренную перемычку шел поток с увеличенным расходом воды. Этому способствовало: 1) временное поднятие уровня воды в озере на 55 см вследствие перекрытия зоны поверхностного стока оползневыми массами со склонов моренной гряды и быстрый ее размыв (расход воды мог увеличиваться до нескольких десятков кубометров в секунду – вода сбрасывалась на участке большей ширины, чем раньше); 2) повышение эрозионной способности потока в результате насыщения его рыхлыми оползневыми массами с большим количеством мелкозема.

На фоне резкого нарастания расходов воды через гребень до 6–10 м³/с значительно усилилась фильтрация через тело перемычки. Увеличение гидродинамического напора вместе с ослаблением устойчивости плотины из-за ее обводнения, могло привести к нарушению сплошности запруды, к ее сдвигу и почти мгновенному обрушению. Разрушение перемычки, удерживающей озеро, предположительно происходило в два этапа. На первом, очень кратковременном, происходило обрушение (сдвиг) перемычки. На втором, более продолжительном, после спада уровня в озере на 8–10 м шло образование нового узкого прорана за счет донной и боковой эрозии. В течение этого этапа уровень озера упал еще на 6–7 м.

На высокую вероятность подобного развития событий указывают следы разового единовременного выплеска большого количества воды на нижележащий ледник (см. рис. 1, 4, *з*) и отсутствие каких-либо следов террас или стояния промежу-



Рис. 5. Участок моренной дамбы на оз. Башкара в 2008 и 2017 гг.

a – 16.07.2008 г.; *б* – 28.07.2017 г. Понижение поверхности ледника Башкара более 10 м. Красная стрелка иллюстрирует изменение положения глыб относительно максимального уровня воды (*б*) по сравнению с уровнем 2008 г. (*a*). Фото М.Д. Докукина.

точных уровней в озере, что наблюдается при эрозийном разрушении перемычки (см. например, [Черноморец и др., 2007б]). В пользу этой гипотезы также указывает трапециевидная конфигурация верхней части прорана, через которую произошло опорожнение основного объема воды из озера. В результате после быстрого заполнения воронки у грота (глубиной относительно края ледника около 17–20 м) водные массы выплеснулись на поверхность ледника Башкара. По его поверхности прошел мощный и, вероятно, кратковременный вал воды.

Состояние озерно-ледниковой системы Башкары после прорыва. Результаты батиметрических съемок озер Башкара и Лапа приведены в таблице.

Озеро Башкара. Сток из озера идет через гребень перемычки (отметка гребня около 2574 м), протяженность перемычки около 70 м, ниже уклон резко увеличивается и поток ныряет в подледниковый грот с площадью сечения входного отверстия 10–15 м². В пределах перемычки поток течет во врезе с шириной дна 3–5 м и субвертикальными стенками высотой 15–20 м, сложенными мореной (см. рис. 4, б, в). Опасность представляет обрушение крупных блоков грунта со стен прорана (отмечены свежие осыпи/осовы объемом до 30 м³), что может привести к подпору в озере с последующим размывом запруды. Возможная величина подъема воды может составить дециметры–первые метры, прорывной паводок при размыве

Параметры озер Башкара и Лапа после прорыва 1 сентября 2017 г. (по состоянию на 8 октября 2017 г.)

Озеро	Площадь, тыс. м ²	Объем, тыс. м ³	Макс. глубина, м	Средняя глубина, м
Башкара	26	216	18	8
Лапа	43	218	12	5

будет незначительным и, скорее всего, сможет быть полностью пропущен через подледниковый/внутриледниковый канал стока, выполняющий роль регулятора.

Участок между озерами. Ширина заплеска составила около 50 м в створе выхода на ледник ниже грота, далее поток распластался более чем на 100 м и разделился на два рукава (см. рис. 4, з, зона б). Основной, левый поток устремился к понижению в центральной части ледника, правый относительно узкой полосой (30–40 м) прошел ближе к правобережной морене и водопадом низвергнулся с крутого (примерно 30 м) уступа над гротом потока, в который вода из оз. Башкара стекла до прорыва. Левый поток вследствие очень высокой скорости “перескочил” участок ледника с противоуклоном, взлетев на высоту более 5–7 м, достиг понижения в сильнотрещиноватой центральной части ледника, где выработал глубокий (до 15 м) и широкий котел, в котором (вероятно, уже на спаде паводка) произошло обрушение значительных блоков льда. На крутом краевом уступе ледника левый поток низвергнулся в оз. Лапа широким фронтом. Вероятно, на спаде паводка в нижней части уступа потоком воды был выработан “раструб” длиной в несколько десятков метров и шириной на выходе более 20 м.

Озеро Лапа. Подпруда-перемычка оз. Лапа образована несколькими конечно-моренными валами. После прорыва уровень держался примерно на 1 м ниже предпаводочного, хорошо фиксировался по абразионным уступам на песчаных берегах и по термоабразионной нише в вертикальных обрывах ледовых берегов. Переток начинался широким пологим переливом, ниже на 60 м расположены крутые водосливы высотой 3–4 м. Ниже водосливов рукава врезались в массив мертвых льдов размерами 60 × 100 м, обнаженный прорывным паводком, на глубину 3–5 м (см. рис. 4).

По состоянию на 8 октября 2017 г. уровень оз. Лапа снизился по сравнению с отметками до прорыва примерно на 1.8 м. Можно прогнозировать его снижение из-за регрессивной эрозии канала во льду, по которому идет перелив.

В любом случае, размыв перемычки будет проходить в мелководной части озера (рис. 6), и возможный сброс воды из озера, не считая поступающей воды, не превысит 200 тыс. м³.

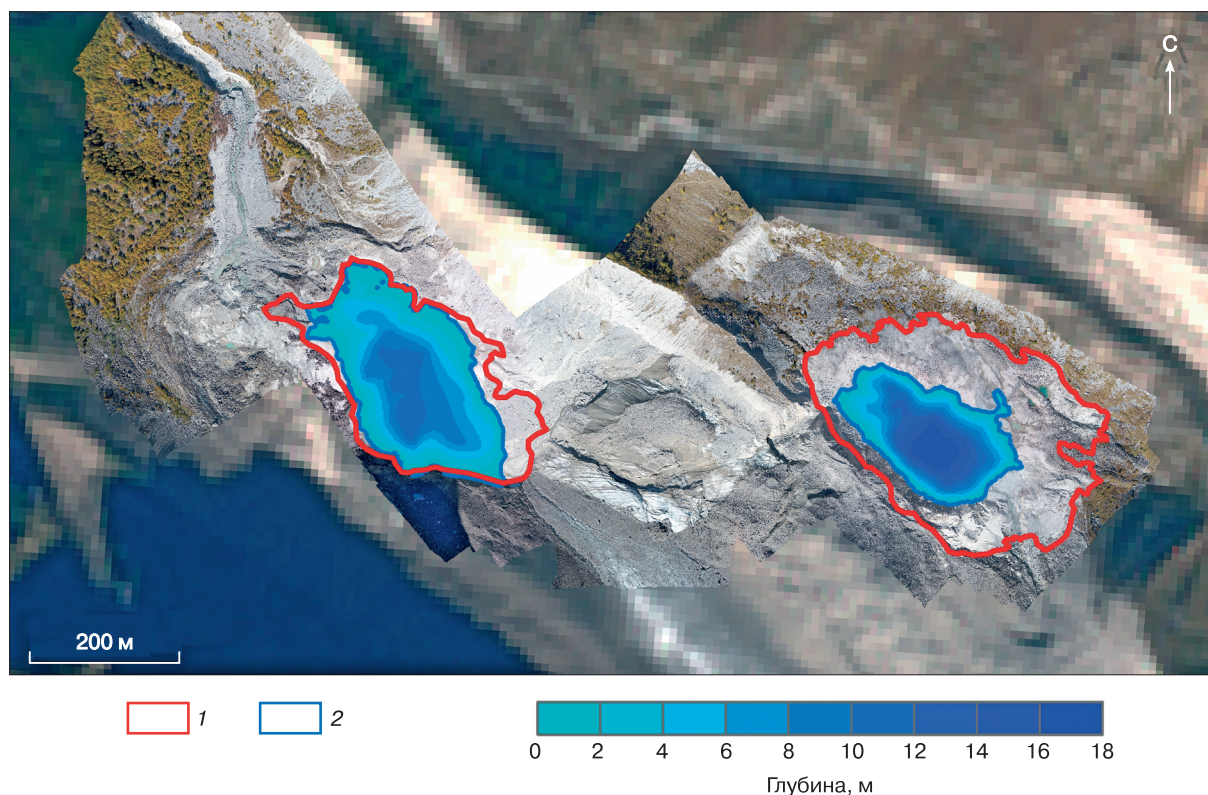


Рис. 6. Батиметрические карты озер Башкара (справа) и Лапа (слева) после прорыва.

Контур озера: 1 – по данным космического снимка Канопус В1 от 22.08.2017; 2 – по данным съемки с квадрокоптера, 08.10.2017. Подложка – космический снимок Sentinel-2 от 07.10.2017 г. и ортофотоплан из снимков с квадрокоптера от 08.10.2017 г. Съемка с квадрокоптера и батиметрические карты – Е.А. Савернюк, ортофотоплан – А.И. Яркова, Е.А. Балдина.

СЕЛЕВОЙ ПОТОК 7 СЕНТЯБРЯ В ДОЛИНЕ РЕКИ АДЫЛ-СУ

В результате сравнения материалов облетов 1–10 сентября 2017 г. был выявлен факт схода селевого потока 7 сентября. О частичном размыве

восстановленной дороги у пос. Нейтрино 7 сентября были сообщения местных жителей. На рис. 7 показан участок долины р. Адыл-Су в районе учебно-методического центра (УМЦ) “Эльбрус” после прорыва оз. Башкара 1 сентября и 10 сентября,

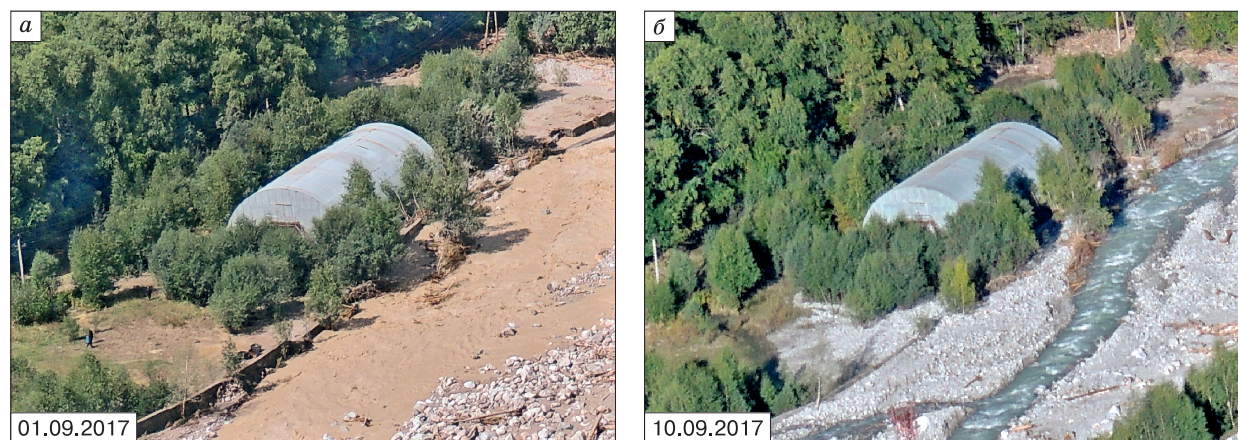


Рис. 7. Селезащитная стенка на территории учебно-методического центра “Эльбрус” до (а) и после (б) схода селевого потока 7 сентября (фото М.Д. Докукина).

после схода селя. Произошло отложение селевого материала толщиной 1.5–2.0 м, селя вышел поверх защитной стенки на территорию УМЦ “Эльбрус”. Сходу селя способствовало наличие многочисленных размывов и отложений рыхлого материала в русле р. Адыл-Су, появившихся после прорыва оз. Башкара 1 сентября 2017 г., а также интенсивные жидкие осадки, чуть более 70 мм за 15 часов.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Прорыв привел к сокращению объема воды в оз. Башкара в 5 раз. Несмотря на это, вероятность повторного прорыва существует. Образовавшийся при прорыве врез является узким и глубоким (см. рис. 4, б, в). В будущем возможно перекрытие узкого участка прорана в моренной гряде оз. Башкара в результате оползания склона с формированием временной плотины высотой до 5 м, подъемом уровня воды в озере и дальнейшим прорывом новообразованной дамбы.

В 2018 г. требуется постоянный контроль состояния перемычки озера Лапа и Башкара и наблюдения за их уровнем режимом.

Необходимо исключить непродуманные и непрофессиональные попытки понизить уровень озера без проработки всех связанных с этим аспектов. Мировой опыт (см. [Liboutry et al., 1977]) свидетельствует, что это может привести к катастрофе. Требуется разработка проекта контролируемого спуска озера. В частности, на оз. Башкара можно рекомендовать произвести расширение эвакуационного канала до 10–15 м по дну и уменьшение крутизны прилегающих к нему склонов до 15–20°, укладку труб с последующим укреплением и созданием аварийного водослива, а также использование сифонной перекачки озерной воды ежегодно в период с конца мая по сентябрь. Мероприятия на оз. Лапа требуют дополнительной проработки (например, здесь возможно применение гидромониторов для размыва и расширения ледяной перемычки).

Прорыв оз. Башкара создал новые условия формирования селей по руслу р. Адыл-Су. Появились участки крутых неустойчивых склонов, сложенных рыхлым материалом. В случае прохождения по руслам новых селей или паводков мобилизация этого материала пройдет значительно легче, чем в ситуации до 1 сентября 2017 г. Поэтому, даже если водный импульс будет не очень большим, подпитка нового потока твердым материалом может оказаться значительной и привести к разрушениям. События, подобные селевому потоку 7 сентября 2017 г., будут повторяться в более крупном масштабе.

Участки берегов, защищенные бетонными стенками, выдержали разрушительное воздействие паводка и селевого потока (см. рис. 7), что

говорит о высокой эффективности этих сооружений. В дальнейшем укрепление берегов бетонными стенками позволит минимизировать ущерб от возможного повторения паводков и селей. Разрушенные и срезанные участки дорог приурочены к местам поворота русла р. Адыл-Су (см. рис. 4, к), а наиболее проблемными являются участки, на которых селевым потоком 1 сентября были вскрыты крупными глыбы.

Авторы выражают благодарность А.В. Хаткутову, Р.Г. Мискаровой, В.В. Суркову за участие в сборе материалов, Е.А. Балдиной, А.И. Ярковой за обработку снимков с БПЛА, Л.В. Десинову, У.Д. Курданову, В.В. Борисову, Б.Х. Хоханаеву, К.Х. Залиханову, Э.В. Запорожченко, М.М. Хаджиеву за ценные дискуссии, ГУ МЧС России по Кабардино-Балкарии, В.В. Поповнину, А.Х. Аджиеву за логистическую поддержку. Авторы благодарят специалистов ФГБУ “НИЦ “Планета” А.А. Невского, Н.И. Абросимова и В.В. Асмуса за предоставленные космические снимки Канопус-В1.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 15-05-08694, 16-35-60042, 18-05-00520).

Литература

- Гнездилов Ю.А., Ивашенко Е.Н., Красных Н.Ю.** Оценка гипотетического прорыва озера Башкара // Сб. науч. тр. Северо-Кавказского института по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства (ОАО “Севкавгипроводхоз”). Пятигорск, 2007, вып. 17, с. 123–145.
- Gnezdilov, Y.A., Ivashchenko, E.N., Krasnykh, N.Y., 2007. Estimation of the hypothetical outburst of Bashkara Lake, in: Proceedings of the North Caucasian Engineering and Design Institute for Water Industry and Land Reclamation (Sevkavgiptovodhoz). Pyatigorsk, issue 17, pp. 123–145. (in Russian)
- Докукин М.Д., Савернюк Е.А.** Наступание ледников в конце XX века как фактор активизации гляциальных селевых процессов (Центральный Кавказ) // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Тр. Второй конф., посвящ. 100-летию С.М. Флейшмана / Отв. ред. С.С. Черноморец. М., МГУ, 2012, с. 31–32.
- Dokukin, M.D., Savernyuk, E.A., 2012. The advance of glaciers at the end of the 20th century as a factor of activation of glacial debris flows (Central Caucasus), in: Debris flows: disasters, risk, forecast, protection. Proceedings of the International Conference dedicated to the centenary of Professor S.M. Fleishman. Ed. by S.S. Chernomorets. MSU, Moscow, pp. 31–32. (in Russian)
- Докукин М.Д., Шагин С.И.** Особенности динамики ледниковых озер с подземными каналами стока (анализ разновременной аэрокосмической информации) // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 47–56.
- Dokukin, M.D., Shagin, S.N., 2014. Features of dynamics of glacial lakes with underground drain channels (analysis of multi-temporal aerospace information). Earth's Cryosphere XVIII (2), 41–50.
- Залиханов М.Ч., Анахаев К.Н., Недугов А.Н.** О селеопасном озере Башкара // Метеорология и гидрология, 2009, № 2, с. 89–92.
- Zalikhonov, M.Ch., Anakhaev, K.N., Nedugov, A.N., 2009. On mudflow hazardous Bashkara Lake. Meteorologia i Hidrologia 2, 89–92.

Кидяева В.М., Крыленко И.Н., Крыленко И.В. и др. Колебания уровня воды горных ледниковых озер Приэльбрусья // Геориск, 2013, № 3, с. 8–15.

Kidyayeva, V.M., Krylenko, I.N., Krylenko, I.V., et al., 2013. Fluctuations in the water levels of the glacier lakes of the Mount Elbrus region. Georisk, No. 3, 8–15.

Ковалев П.В. О селях на северном склоне Центрального Кавказа // Материалы Кавказ. экспедиции (по программе МГГ). Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, 1961, т. III, с. 149–161.

Kovalev, N.V., 1961. On debris flows on the northern slope of Central Caucasus, in: Proceedings of the Caucasian Expedition (by the program of the International Geophysical Year), Kharkov University Press, Kharkov, vol. III, 149–161. (in Russian)

Мысливская Г. Стихией можно управлять. Валентина Матвиенко оценила работу властей КБР по преодолению последствий селя // Рос. газета, 2017, 8 сент. – URL: <https://rg.ru/2017/09/08/reg-skfo/matvienko-vlasti-kbr-horoshospravilis-s-posledstviiami-selia.html>.

Myslivskaya, G., 2017. A disaster may be controlled. Valentina Matviyenko appreciates the work conducted by the authorities of Kabardino-Balkaria Republic to overcome the effects of a debris flow. Rossiyskaya Gazeta, September 8, 2017.

Петраков Д.А. Селевая опасность ледниковых озер и оценка вероятности их прорыва // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Тр. Междунар. конф. (Пятигорск, Россия, 22–29 сентября 2008 г.) / Отв. ред. С.С. Черноморец. Пятигорск, Ин-т “Севкавгипроводхоз”, 2008, с. 309–312.

Petrakov, D.A., 2008. Debris flow hazard of glacial lakes and assessment of their outburst risk, in: Chernomorets, S.S. (Ed.). Debris flows: disasters, risk, forecast, protection. Proceedings of the International Conference. Pyatigorsk, Russia, September, 22–29, 2008. Sevkaavgiprovodhoz, Pyatigorsk, pp. 309–312. (in Russian)

Сейнова И.Б. Ледники и сели Приэльбрусья. (Эволюция оледенения и селевой активности) / И.Б. Сейнова, Е.А. Золотарев. М., Науч. мир, 2001, 204 с.

Seynova, I.B., Zolotarev, E.A., 2001. The Glaciers and the Debris Flows of the Elbrus Region. Nauchny Mir, Moscow, 204 pp. (in Russian)

Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Тутубалина О.В., Алейников А.А., Тарбева А.М. Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-Су (Кавказ) // Криосфера Земли, 2007а, т. XI, № 1, с. 72–84.

Chernomorets, S.S., Petrakov, D.A., Krylenko, I.V., Krylenko, I.N., Tutubalina, O.V., Aleynikov, A.A., Tarbeva, A.M., 2007a. Changes of the Bashkara glacier-lake system and assessment of debris flow hazard in the Adyl-Su river valley (Caucasus). Earth's Cryosphere XI (1), 72–84.

Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В. и др. Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне Эльбруса 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия // Материалы гляциол. исслед., 2007б, вып. 102, с. 211–215.

Chernomorets, S.S., Petrakov, D.A., Tutubalina, O.V., et al., 2007b. The outburst of a glacier lake on the north-eastern slope of Mount Elbrus on August 11, 2006: the forecast, event and after-effects. Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy (Data of Glaciological Studies), issue 102, 211–215.

Черноморец С.С., Тутубалина О.В., Алейников А.А. Новые селеопасные озера у края ледника Башкара на Центральном Кавказе // Материалы гляциол. исслед., 2003, вып. 95, с. 153–160.

Chernomorets, S.S., Tutubalina, O.V., Aleinikov, A.A., 2003. New hazardous lakes near the edge of Bashkara Glacier in Central Caucasus. Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy (Data of Glaciological Studies), issue 95, 153–160.

Lliboutry, L., Morales Arnao, B., Pautre, A., Schneider, B. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention // J. Glaciol., 1977, vol. 18, p. 239–254.

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. Monitoring of Bashkara Glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst // Natural Hazards, 2012, vol. 61, No. 3, p. 1293–1316.

*Поступила в редакцию
31 октября 2017 г.*