

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 551.332.56

DOI 10.46698/VNC.2024.85.56.001

Механизмы прорывов озёр Эльбруса

Мухтар Юсубович Беккиев

Высокогорный геофизический институт, профессор, доктор технических наук, директор, Россия, Нальчик, mbekk@mail.ru

Михаил Дмитриевич Докукин

Высокогорный геофизический институт, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Россия, Нальчик, inrush@bk.ru

Руслан Хажбарович Калов

Высокогорный геофизический институт, доцент, кандидат физ.-мат. наук, заместитель директора по научной работе, Россия, Нальчик, ruslan_kalov@mail.ru

Сергей Иванович Шагин

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, помощник ректора, профессор, доктор географических наук, Россия, Нальчик, uniid-sergey@yandex.ru

Ахмат Русланович Акаев

Высокогорный геофизический институт, ведущий инженер, Россия, Нальчик, akaev.axmat@mail.ru

Аннотация. На основе анализа разновременных аэрофотоснимков, космических снимков и публикаций приведены данные о механизмах прорывов озёр, в разное время существовавших у ледников Эльбруса в период 1957–2023 гг. Чаще всего озёра прорывались в результате перелива по поверхности ледяных гряд. Прорывы озёр также происходили по подземным и по подледным каналам, в результате размыва морен гляциальными паводками, обрушения моренных масс в озеро, оползневых деформаций участков озёрных котловин.

Ключевые слова: Эльбрус, ледник, озеро, механизм прорыва, аэрофотоснимок, космический снимок

Для цитирования: Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Шагин С.И., Акаев А.Р. Механизмы прорывов озёр Эльбруса // Вестник Владикавказского научного центра. 2024. Т. 24. № 3. С. 73–84. DOI 10.46698/VNC.2024.85.56.001.

Mechanisms of Elbrus lakes outburst

Mukhtar Yu. Bekkiev

High-Mountain Geophysical Institute, Director, Professor, Dr., Russia, Nalchik, mbekk@mail.ru

Mikhail D. Dokukin

High-Mountain Geophysical Institute, Leading Researcher, PhD, Russia, Nalchik, nrush@bk.ru

Ruslan Kh. Kalov

High-Mountain Geophysical Institute, Deputy Director, Docent, PhD, Russia, Nalchik, ruslan_kalov@mail.ru

Sergey I. Shagin

Kabardino-Balkar State University named after H.M. Berbekov, Dr., Head of the Department of Scientific Research and Innovation, Russia, Nalchik, uniid-sergey@yandex.ru

Ahmat R. Akaev

High-Mountain Geophysical Institute, Lead Engineer, Russia, Nalchik, akaev.axmat@mail.ru

Abstract. Based on the analysis of multi-time aerial photographs, satellite images and publications, data on the mechanisms of lake outburst that existed at different times near the glaciers of Elbrus in the period 1957–2023 are presented. Mostly lakes were emptied as a result of overflow over the surface of ice ridges. Lake outbursts also occurred through underground and subglacial channels, as a result of erosion of moraine by glacial floods, collapse of moraine masses into the lake, landslide deformations of lake basins sections.

Keywords: Elbrus, glacier, lake, outburst mechanism, aerial view, satellite image

For citation: Bekkiev M. Yu., Dokukin M. D., Kalov R. Kh., Shagin S. I., Akaev A. R. Mechanisms of Elbrus lakes outburst // Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2024. T. 24. № 3. P. 73–84. DOI 10.46698/VNC.2024.85.56.001.

Изменение климата приводит к ускорению темпов деградации ледников, что сопровождается появлением перед ледниками новых и ростом существующих озёр. Период существования озёр различен. Некоторые озёра существуют до ста и более лет, но, бывает, от появления до исчезновения озера проходит несколько суток. Особенно важно учитывать информацию о динамике озёр ледникового происхождения в связи с вероятностью их катастрофических прорывов. Примером крупнейшей катастрофы является прорыв озера Чорабари в штате Уттаракханд (Индия) в 2013 г., в результате

которого погибло более 6 000 человек [16]. На Кавказе катастрофическим был прорыв озера Башкара в ущелье Адылсу бассейна р. Баксан в 2017 г. [7, 15].

Крупнейшим узлом оледенения Кавказа является массив горы Эльбрус. На участках подножия Эльбруса в разное время образовывались и затем прорывались озёра. В литературе есть описания последствий прорывов озёр у ледника Большой Азау в 1895 г. [10], у ледника Бирджалычиран в 1909 и 2006 гг. [3, 14], у ледника Малый Азау в 1978 г. [12] и 2011 г. [6], у ледника Гарабаши в 1912 и 1947 г. [12]. На основе анализа разновременных аэрофо-

тоснимков и космоснимков собраны данные о формировании и прорывах озёр у ледников Бирджалычиран и Чунгурчатчиран за период 1957–2020 гг. [4, 5, 8] (охарактеризована динамика 19 озёр), у ледника Малый Азау [6] (охарактеризована динамика 5 озёр), у ледника Большой Азау [1] (охарактеризована динамика 15 небольших озёр, самое крупное из которых имело площадь 20,25 тыс. м²).

По расположению относительно ледника обычно выделяют типы озёр: перигляциальные (не граничащие с ледником), прогляциальные (граничащие с ледником), супрагляциальные (наледниковые). Озера могут существовать и под ледником – субгляциальные. В пределах озёрных котловин существуют участки, сложенные мореной, ледниковым или мертвым льдом, коренными породами. В зависимости от типов озёр и их котловин выделяются различные механизмы их прорыва или постепенного опорожнения.

В настоящей статье приводятся результаты обобщения информации о механизмах прорывов озёр на территории, прилегающей к ледникам Эльбруса, и на участках самих ледников. Кроме данных публикаций использованы материалы анализа и сравнительного дешифрирования космоснимков и аэрофотоснимков за период 1957–2023 гг. Космоснимки Sentinel-2 и Landsat 5 получены с сайта <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>. Правообладателями космоснимков являются: IRS 1C/1D – © 2006 National Remote Sensing Centre, Department of Space, Government of India, IRS P5 – © 2003–2007 ANTRIX, SPOT 5 – © CNES 2011. Космоснимок с международной космической станции получен с сайта НАСА (ISS005-E-11193), GeoEye-1 – с сайта World Imagery Map, космоснимки проекта Corona – с сайта EarthExplorer. Аэрофотоснимки получены из Архива ФГБУ «ВГИ». Вертолетные и наземные фотографии предоставлены М.Д. Докукиным.

Наибольшее количество прошлых и существующих озёр выявлено на северном склоне Эльбруса [2, 3, 4, 5, 8, 9, 13], среди которых были самые крупные: Среднее Бирджалы и Восточное Бирджалы площадью до прорыва соответственно 74,2 тыс. м² и 89,0 тыс. м². В результате анализа аэрокосмической информации и полевых наблюдений [14] определен механизм их прорыва – разрывом (пропиливанием) ледяных массивов (гряд). Такой механизм выявлен и для озёр на южном склоне Эльбруса.

ПРОРЫВЫ ОЗЁР РАЗМЫВОМ (ПРОПИЛИВАНИЕМ) ЛЕДЯНЫХ МАССИВОВ

Былое существование и прорыв озера Среднее Бирджалы были выявлены при сравнении космоснимков 2002 г. (с МКС) и 2004 г. (IRS 1C/1D). Эти факты приведены в работе [4]. Было отмечено, что следы прорыва видны на участках промежуточных отложений селевых потоков у слияния левой и правой составляющей р. Бирджалысу, а также на участке ниже слияния р. Бирджалысу с потоком от

ледника Микельчиран. Полевыми измерениями на дне бывшего озера в 2007 г. определено, что глубина озера была небольшой – максимально 3–3,5 м. В результате анализа космоснимков Landsat 5 уточнен период времени, когда случился прорыв – 12–28 августа 2003 г. На *рис. 1 (а, б)* показано, как постепенно происходило таяние правой боковой морены ледника Бирджалычиран, понижение поверхности ледника и увеличение площади озера.

При понижении поверхности ледника Бирджалы и достижении уровня поверхности озера поток устремился в ложбину между поперечными грядами поверхностных морен. После прорыва в пустой котловине остались несколько озёр (*рис. 1 в*), которые зафиксированы при обследовании в работе [14] и отмечены в [4]. Практически такой же механизм прорыва был у озера перед ледником Бирджалычиран в 1909 г. Тогда уровень озера понизился на 3,7 м [3, 14], а площадь до прорыва была значительно больше – 113 тыс. м².

В работах [4], [9] и [14] подробно охарактеризован прорыв озера Восточное Бирджалы 11 августа 2006 г. (*рис. 1, а-в*). Наличие космоснимка 11.08.2006 IRS 1C/1D, сделанного в момент прорыва озера, позволило оценить скорость пропиливания прорывным паводком гребня ледяной гряды срединной морены – около 0,6 м/ч со средним расходом 12,7 м³/с [4]. Ниже по долине в результате эрозии и подпруживания расход селя достигал 150 м³/с [9, 14]. Последствия прорыва озера были разрушительными для участка минеральных источников «Джилы-Су» (Жыласу), где отложилось около 50 тыс. м³ селевого материала. В 2007 г. поток из котловины прорвавшегося озера уже устремился по подледному каналу под грядой срединной морены. Это свидетельствует о том, что если бы высота гряды срединной морены к 2006 г. была больше, то прорыв озера мог быть подледным, как прорыв под этой же грядой озера Северное Бирджалы в 1966 г.

В работе [6] приведены данные о прорыве озера у ледника Малый Азау в 2011 г. (*рис. 1 ж, и*). До прорыва озеро Малое Азау имело площадь 25,45 тыс. м² (по данным космоснимка 22.08.2011 SPOT 5). 22 августа 2011 г. восточная граница озера вплотную подошла к оси ледяной гряды, которая сдерживала воды озера от перелива. Превышение гребня срединной морены над поверхностью озера в нижнем бьефе составляло всего 1,8 м. При переливе уровень одной части озера Малое Азау, ограниченной моренной грядой (первой слева на *рис. 1 ж*), понизился на 0,6 м. На участке между двумя грядами понижение уровня составило 1,8 м и при этом уровень небольшого озера в нижнем бьефе не изменился (*рис. 1и*). Всего при прорыве слилось 15–17 тыс. м³ воды. Объем рыхлообломочного материала, перенесенного водой при паводке и отложенного на конусе выноса в долине Азау, составил около 10–12 тыс. м³. Вследствие небольшого расхода прорывного паводка прорыв

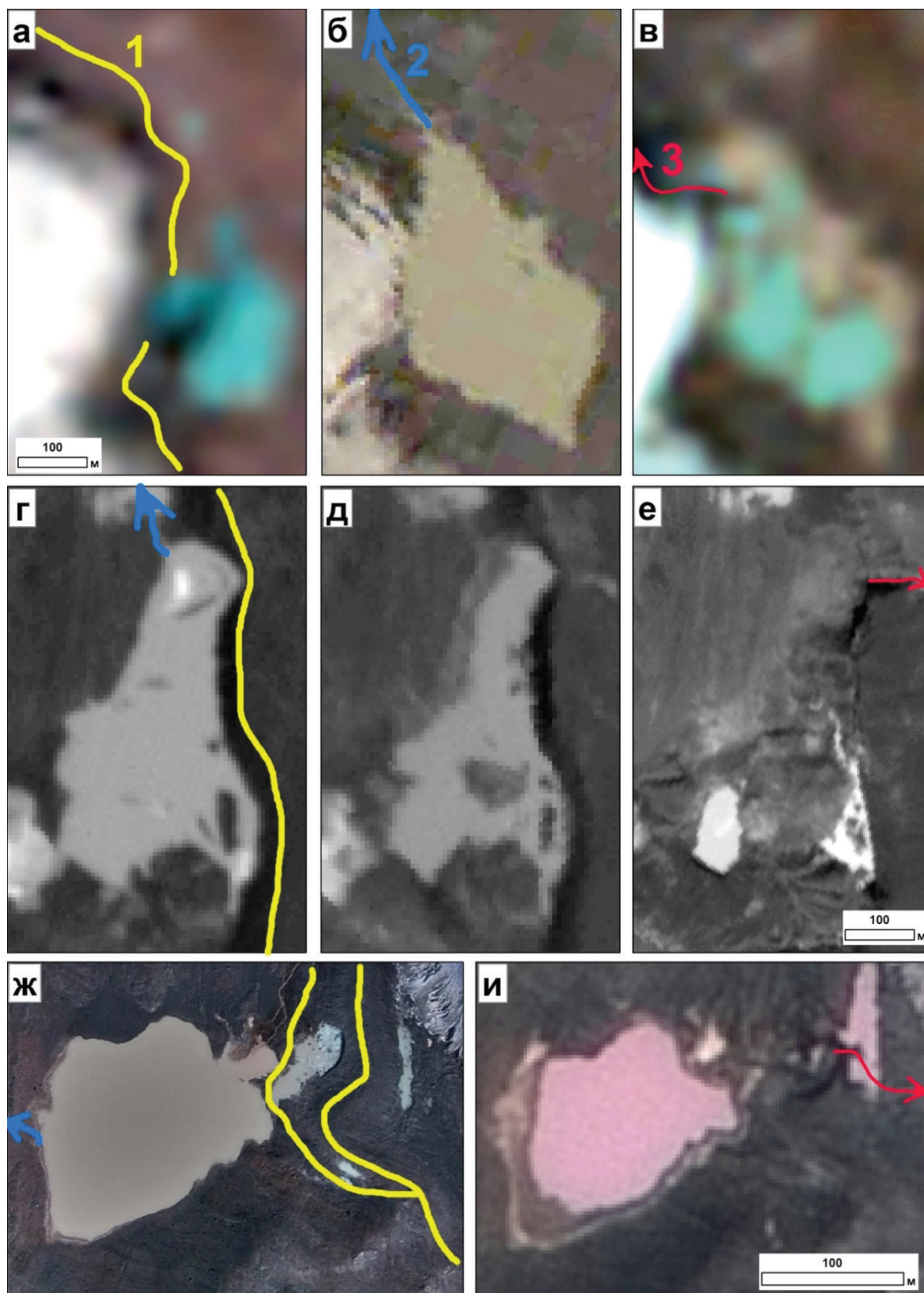


Рис. 1. Прорывы озёр размывом (пропиливанием) ледяных массивов. Озеро Среднее Бирджалы:

a – 30.08.1998 Landsat 5, б – 25.08.2002 фото МКС, в – 28.08.2003 Landsat 5. Озеро Восточное Бирджалы: г – 01.08.2006 IRS 1C/1D, д – 11.08.2006 IRS 1C/1D, е – 12.09.2007 IRS P5. Озеро Малое Азау: ж – 19.09.2009 GeoEye-1, и – 21.09.2011 SPOT 5. Обозначения: 1 – ледяные гряды боковых и фронтальных морен, 2 – участки поверхностного стока из озёр до прорыва, 3 – участки прорыва озёр по поверхности ледяных гряд

озера не имел негативных последствий. По случаю прорыва озера Малое Азау в 2011 г. можно сделать вывод о том, что даже незначительная высота ледяной гряды, пропиленной водным потоком при прорыве, создает условия для развития ниже по долине селевого потока.

ПОДЛЕДНЫЙ ПРОРЫВ ОЗЕРА СЕВЕРНОЕ БИРДЖАЛЫ В 1966 Г.

В работе [4] в результате сравнительного дешифрирования аэрофотоснимков 1957 и 1980 гг. было выявлено отсутствие озера Северное Бирджалы, но гребень срединной морены, ограничивавшей озеро с востока, не был прорезан. Был сделан вывод о подледном прорыве озера. В работе [8] период, в который произошел прорыв, был уменьшен до 1957–1974 гг. Использование космических снимков проекта Corona позволило определить год прорыва – 1966. На *рис. 2* показано состояние озера и его котловины в 1957 (фрагмент а), в 1962 г. (фрагмент б) и в 1966 г. (фрагмент в).

На космоснимке 17.08.1966 г. (*рис. 2 в*) на поверхности ледника к востоку от гряды срединной морены обнаружен след от потока воды в виде темных полос, упирающихся в следующую грядку на пути, которую поток преодолел также по подледному каналу. Площадь озера до прорыва составляла около 45 тыс. м². Далее при сравнении космоснимка SPOT 5 от 21.09.2011 и вертолетной фотографии 22.08.2013 г. был выявлен факт образования нового подледного канала под этой же грядой, но гипсометрически выше, и прохождения паводка с ледника Бирджалычиран [5] по поверхности ледника Чунгурчатчиран.

Таким образом, одна и та же гряда срединной морены была местом прорыва озера Северное Бирджалы и Восточное Бирджалы в 1966 и 2006 гг. и участком прохождения паводка по подледному каналу в 2013 г. Следовательно, процесс деградации ледника сопровождается резкими изменениями в подледной дренажной системе стока талых вод и изменениями направления русел поверхностного стока, что необходимо учитывать при оценке опасности в будущем.

ПРОРЫВЫ ОЗЁР ПО ПОДЗЕМНЫМ КАНАЛАМ И В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРУШЕНИЯ МОРЕННЫХ МАСС В ОЗЕРО

В работе [8] приведены данные о прорывах озера Северное Чунгурчат, которое было ограничено моренным валом. Протяженность фронтального уступа вала составляла более 100 м, высота около 30–40 м. Характер поверхности и динамика фронтального уступа свидетельствуют о значительной доле внутреннего льда, что позволило сформироваться подземному каналу стока воды из озера. На *рис. 3 (а, б, в)* показана заключительная фаза динамики озера, которое испытало прорывы по подземным каналам в период 1957–1980 гг. В августе 1980 г. был зафиксирован подъем уровня воды в озере, возможно, вследствие блокирования подземного канала стока, и площадь озера достигла 27,0 тыс. м² (*рис. 3 а*). Вода стала стекать из северо-восточной части озера по ложбине между фронтальным уступом и склоном.

На аэрофотоснимке 1982 г. (точная дата неизвестна) видны следы прорыва озера, который произошел вследствие обрушения (оползания) блока морены в озеро в северо-восточной части (*рис. 3б*). Ширина ниши отрыва оползня составляла 30 м. Ниже фронтального уступа селевыми отложениями было занесено небольшое озеро.

На аэрофотоснимке 1987 г. (*рис. 3 в*) озеро отсутствует и видны следы сброса воды из него с захватом значительной массы обломочного материала фронтального уступа (объемом около 20–30 тыс. м³) с шириной эрозионно-оползневой ниши около 90 м. Ниже фронтального уступа образовался конус выноса селевых отложений площадью 10,5 тыс. м². При этом бровка уступа сохранилась как плотина озера, что свидетельствует о подледном прорыве. Возможно, прорыв озера произошел в 1983 г., когда, по данным [2], был зафиксирован сход селя по р. Бирджалысу. Сель 1987 г., скорее всего, не был связан с прорывом озера Северное Чунгурчат, так как следы эрозионных размывов и селевых отложений на аэрофотоснимке (*рис. 3 в*) уже не такие четкие.

Сравнение космических снимков и вертолетных



Рис. 2. Подледный прорыв озера Северное Бирджалы в 1966 г.:

а – 22.08.1957 аэрофотоснимок, б – 29.08.1962 КН-4А (Corona), в – 17.08.1966 КН-4В (Corona). Обозначения: 1 – ледяная гряда срединной морены, 2 – озеро и направление стока воды из озера до прорыва, 3 – направление стока после прорыва озера

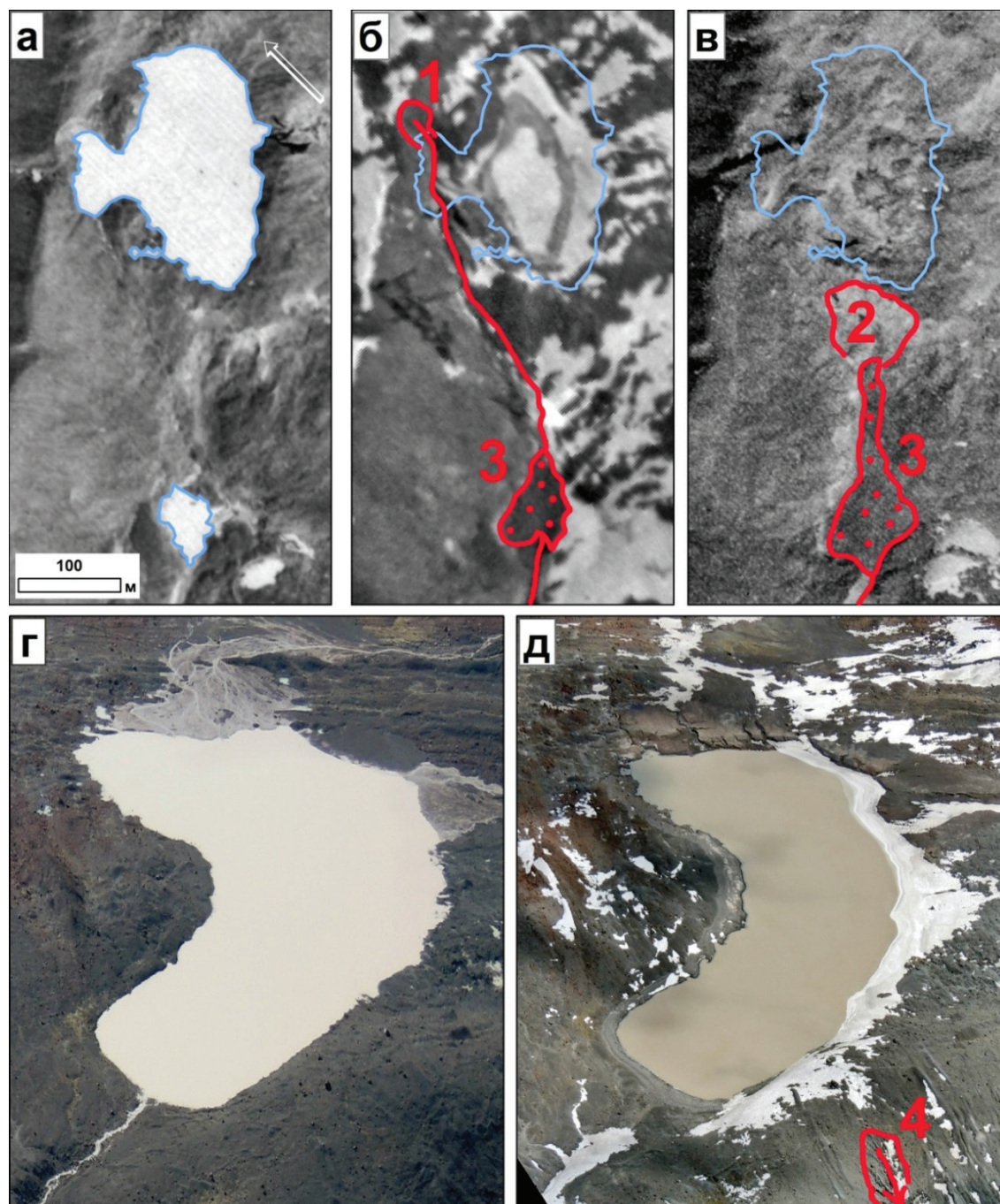


Рис. 3. Подземные прорывы озёр Северное Чунгурчат (а-в) и Подкова (г, д). Аэрофотоснимки:

а – 28.08.1980, б – 1982 г., в – 28.09.1987. Вертолетные фотографии: г – 01.08.2012, д – 10.09.2013. Обозначения: 1 – участок обрушения массива морены в озеро Северное Чунгурчат и селевое русло, 2 – участок выхода подземного канала стока из озера Северное Чунгурчат, 3 – участки селевых отложений, 4 – участок выхода подземного канала стока из озера Подкова. Голубой контур – границы озера Северное Чунгурчат в 1980 г.

фотографий позволило выявить частичный прорыв озера Подкова, которое возникло на участке пути прорыва озера Среднее Бирджалы, при отступании ледника Бирджалычиран. На рис. 3 (г, д) показано озеро до и после прорыва (вертолетные фотографии 2012 и 2013 гг.).

По данным космоснимков, наибольшая площадь озера Подкова зафиксирована в 2011 г. – 29,2 тыс.

м². К 2012 г. южная часть озера уже была частично занесена отложениями потоков с ледника Бирджалычиран. 22 августа 2013 г. во время вертолетного облета было зафиксировано падение уровня воды в озере Подкова и прекращение поверхностного стока из него (рис. 3 б) при продолжавшемся значительном притоке воды в озерную котловину. Во время облета 10 сентября (рис. 3 д) на склоне и

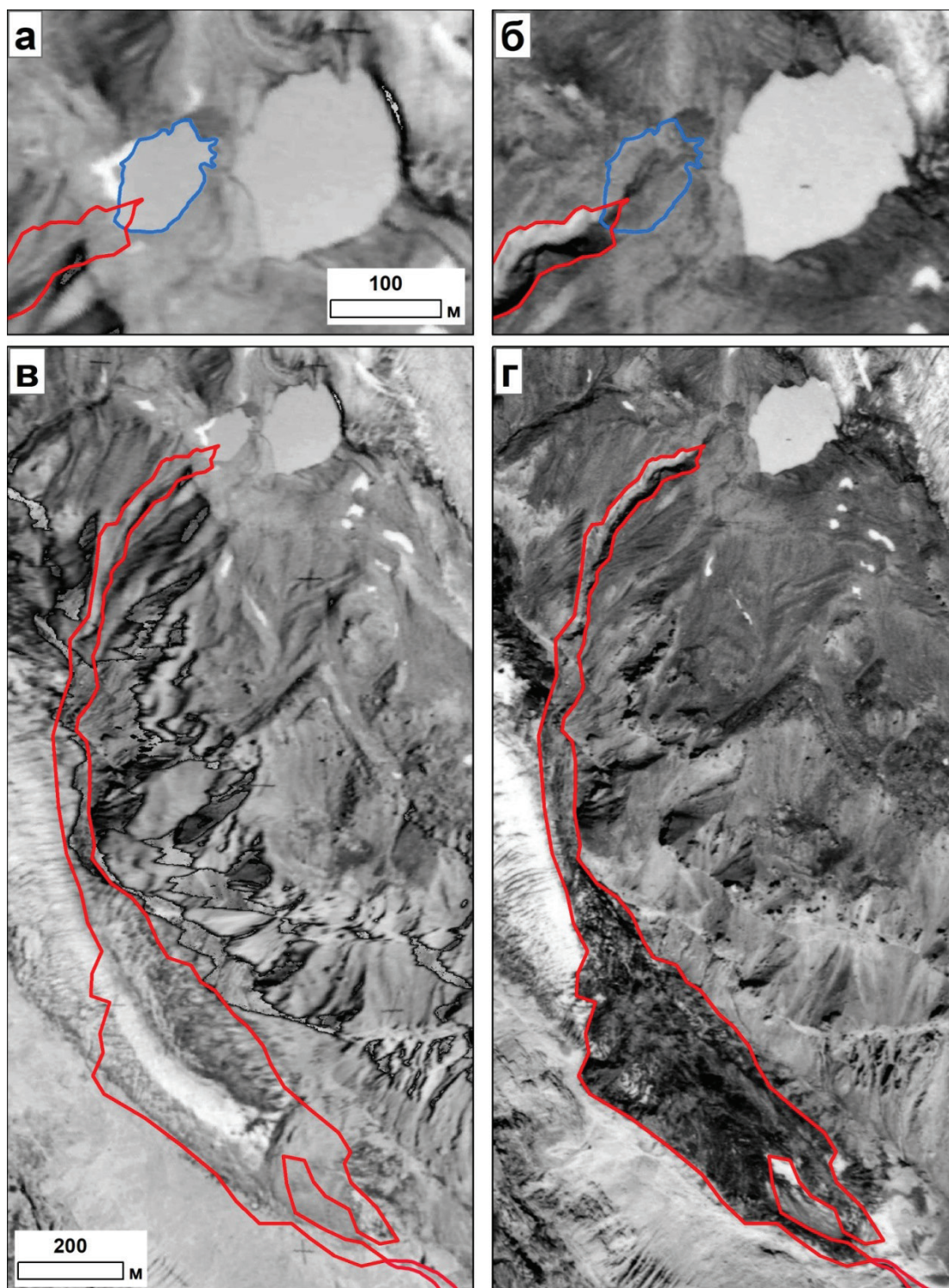


Рис. 4. Прорыв озера Малое Азау в 1978 г. в результате оползневой деформации (разжижение морены) участка озерной котловины

Фрагменты аэрофотоснимков: а – 1975 г., б – 1980 г. (крупные фрагменты); в – 1975 г., г – 1980 г. Голубой контур – границы озера до прорыва, красный контур – зона поражения селевым потоком (врез и отложения)

у подножия моренного вала, ограничивающего озеро с запада, были выявлены свежие эрозионные размыты и конус выноса. При этом береговая линия озера оставалась такой же, как и 22 августа. Уменьшение площади в результате падения уровня

воды составило 8,3 тыс. м² (площадь озера, занесенная отложениями флювиогляциальных потоков, не учитывалась). Объем воды, вытекшей из озера и проникшей внутрь моренного вала, составил около 48,4 тыс. м³ (был вычислен по величине падения

уровня воды около 2 м (определена в результате полевого обследования) и средней площади между значениями до и после прорыва – 24,2 тыс. м²). Если учесть, что минимальное расстояние между входным и выходными порталами составляло около 70–80 м, можно сделать вывод, что сток воды осуществлялся по нескольким подземным каналам при одном входном отверстии. Это подтверждается наличием серии рытвин на внешнем склоне моренного вала (рис. 3 д). Возможно еще, что в моренном валу были и полости, которые заполнялись водой из озера, перед тем как она была сброшена через выходной портал.

У подножия вала образовался конус выноса площадью менее 1 тыс. м², сложенный в основном песчано-гравийным материалом. Так как на склоне в рытвинах в большом количестве остался на месте и не был захвачен потоком глыбово-щебнистый материал, можно сделать вывод о том, что сечение подземных каналов стока воды из озера было малым, и расходы сбрасываемой воды были небольшими.

Формирование подземного канала стока озера Подкова происходило около семи лет – с момента объединения небольших озёр, оставшихся от прорыва озера Среднее Бирджалы в 2003 г., в одно подковообразное.

В дальнейшем режим стока воды из озера Подкова по подземному каналу сохранялся, о чем свидетельствуют данные космоснимков – в июле 2016 г. площадь озера оставалась такой же, как и в 2014 г., и поверхностный сток из озера также отсутствовал. В дальнейшем озера Подкова постепенно заносилось флювиогляциальными отложениями, и к 2023 г. его площадь уменьшилась до 3,0 тыс. м².

Таким образом, формирование и развитие подземных каналов стока, с которыми связаны прорывы озёр, происходило с разной периодичностью и имело различные масштабы прорывных паводков вследствие разного строения моренных валов, ограничивающих озёра.

ПРОРЫВ ОЗЕРА МАЛОЕ АЗАУ (ЗАПАДНОЕ) В 1978 Г. ВСЛЕДСТВИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЧАСТИ КОТЛОВИНЫ

В работе [6] приведены данные о параметрах озёр у ледника Малый Азау до и после прорыва в

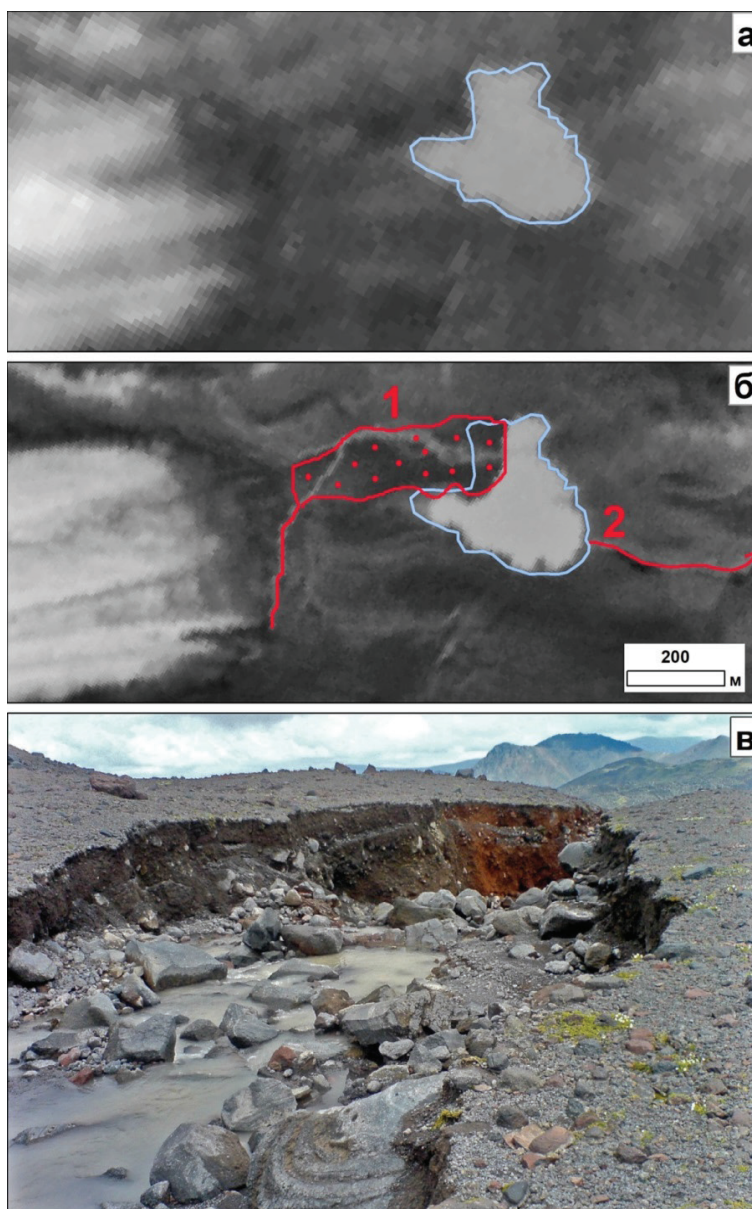


Рис. 5. Прорыв озера Микельчиран в 2007 г. в результате размыва морены водным импульсом с ледника:

а – 01.08.2006 космоснимок IRS 1C/1D, б – 12.09.2007 космоснимок IRS P5. в – наземное фото М.Д. Докукина 11.07.2007. Обозначения: го-лубой контур – границы озера до прорыва, 1 – участок отложенный водного импульса с ледника, 2 – участок размыва морены прорывным паводком (см. фрагмент в)

1978 г., информация о котором приведена в [12]. На рис. 4 показано состояние озёр и участка долины р. Азау до и после прорыва. До прорыва западное озеро имело площадь 6,3 тыс. м².

Причины и последствия прорыва озера описаны И.Б. Сейновой в [12]. Согласно этим данным, прорыв озера вызван падением блока льда в восточное озеро. Действительно, условия для падения блока льда в озеро в то время существовали. Если бы возникла прорывная волна, то, скорее всего, была бы прорезана перемычка, разделяющая восточное и западное озёра, но видимые изменения

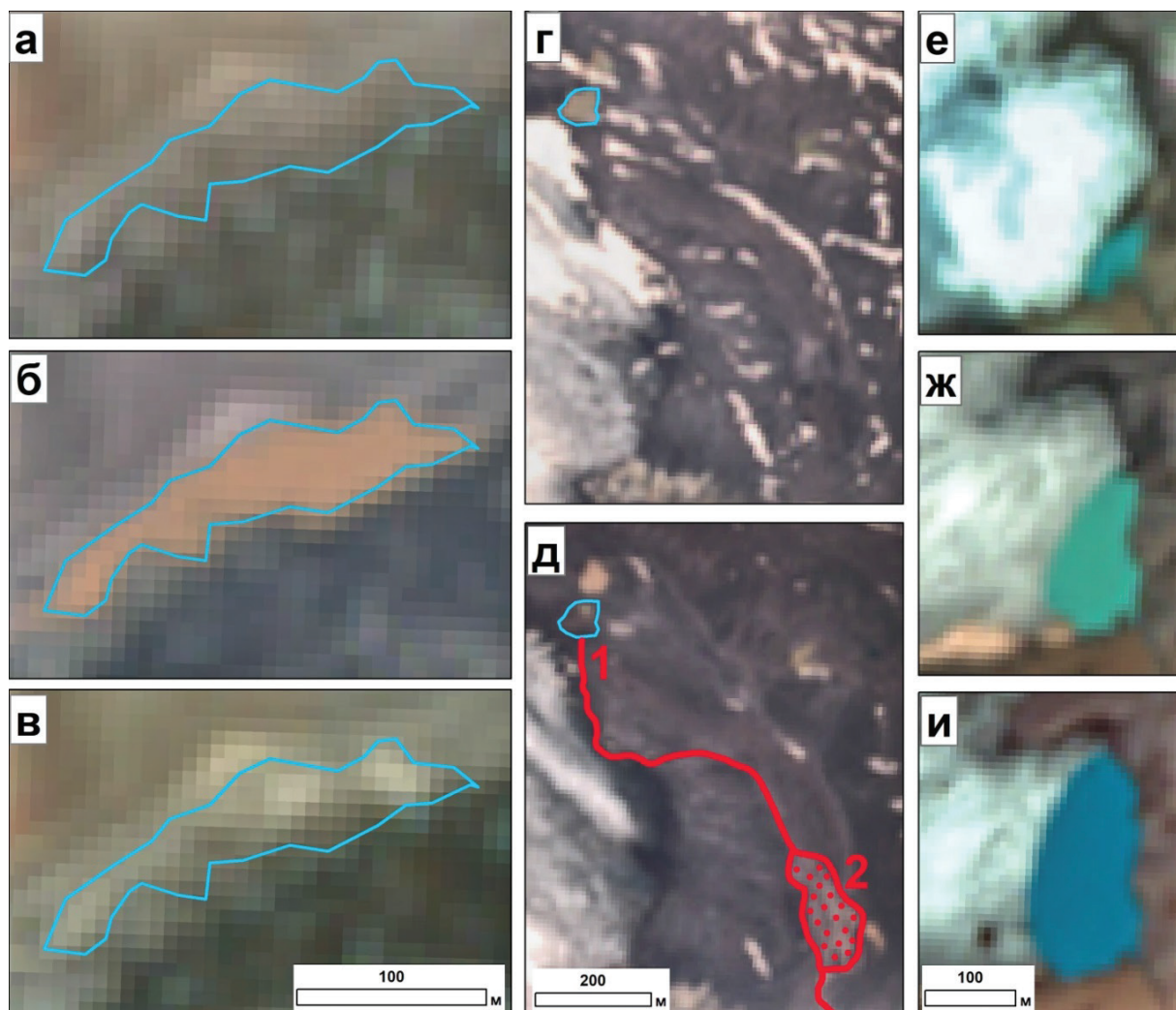


Рис. 6. Динамика озёр в последние годы:

появление и исчезновение озера на леднике Кюкюртлю в 2022 г. (а–в), прорыв озера у ледника Терскол в 2020 г. (г, д), рост озера Бирджалы Южное в 2019–2023 гг. (е–и). Фрагменты космоснимков Sentinel-2: а – 10.08.2022, б – 17.08.2022, в – 22.08.2022, г – 03.07.2020, д – 16.07.2020, е – 31.08.2019, ж – 30.08.2021, и – 01.09.2023. Обозначения: 1 – место прорыва озера по поверхности ледяной гряды, 2 – участок промежуточной аккумуляции селевого потока

на участке перемычки отсутствовали. Если бы в перемычке образовалась промоина, то на величину ее заглубления упал бы уровень восточного озера. Но этого не произошло. Уровень воды в восточном озере совсем не понизился (см. *рис. 4 а, б*). Таким образом, не исключая выплеска части воды из восточного озера, можно сделать вывод о том, что это не явилось настоящей причиной прорыва западного озера и формирования вреза [6].

Прорыв западного озера в 1978 г. был связан с насыщением водой и разжижением массива морены от таяния заключенного в нем льда. Непосредственной связи с повышением температуры не наблюдалось, так как в сезон 1978 г. температура воздуха была ниже нормы.

Моренный массив потерял устойчивость и стал сползать с образованием вреза. Объем селевого материала, вынесенный из вновь образовавшегося вresa, не сопоставим с объемом озера, существо-

вавшего до прорыва. При площади озера около 6,3 тыс. м² объем сброшенной воды не превышал 12 тыс. м³, что практически в 10 раз меньше объема селевых отложений на леднике Большой Азау (более 100 тыс. м³). Язык ледника Большой Азау был завален отложениями селя на площади около 130–140 тыс. м² (рис. 4 г). Следовательно, перемещение рыхлообломочных масс моренного массива при формировании вреза происходило в результате сползания разжиженных водой масс, а не размыва прорывным паводком. Водный поток лишь способствовал обрушению и сползанию моренных масс.

ПРОРЫВ ОЗЕРА МИКЕЛЬЧИРАН В 2007 Г. В РЕЗУЛЬТАТЕ РАЗМЫВА МОРЕННОЙ КОТЛОВИНЫ ПАВОДКОМ С ЛЕДНИКА

В результате полевого обследования в июле 2007 г. были выявлены следы прорыва озера Ми-

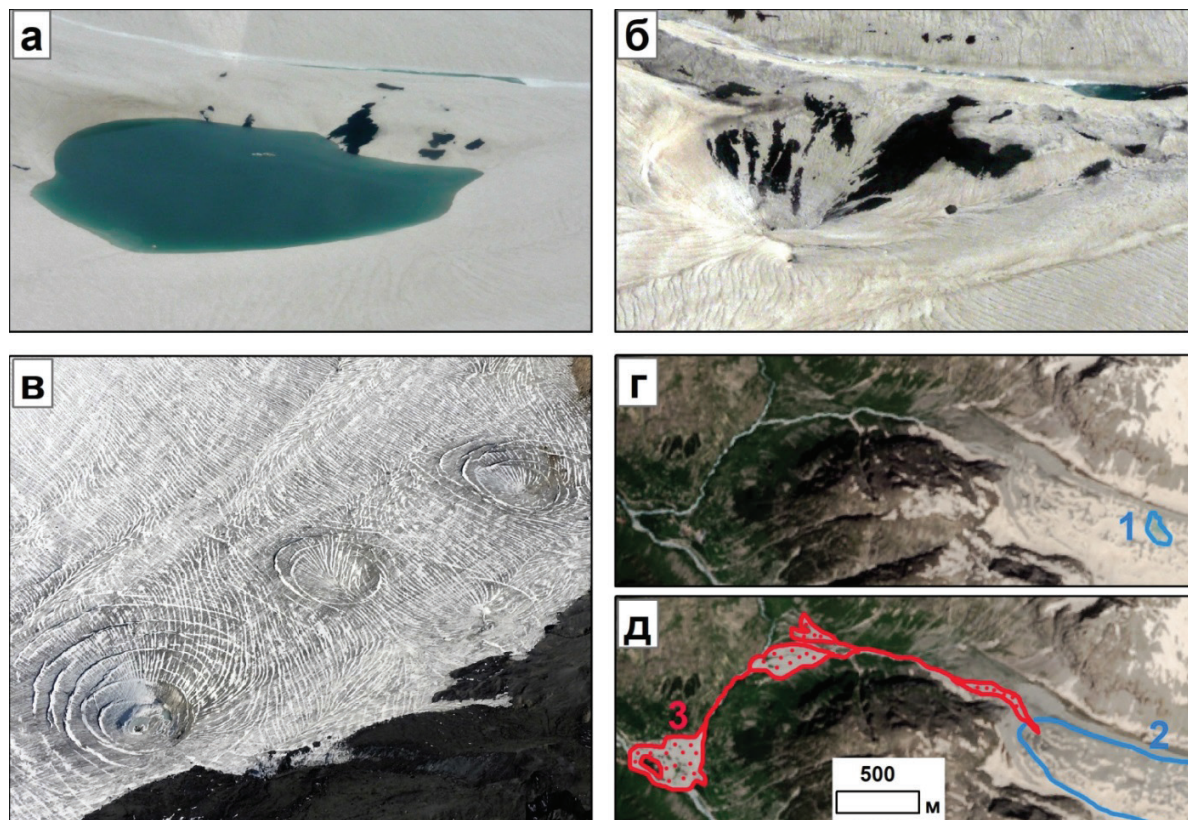


Рис. 7. Супрагляциальные озёра и их динамика: озеро на массиве мертвого льда между потоками ледника Большой Азау (а, б), воронки на правом потоке ледника Большой Азау (Хотютау) (в), озеро на леднике Бонн-Пьер и селепроваляния на участке деревни Ла-Берард (Франция) в июне 2024 г. (г, д)

Фрагменты вертолетных фотографий и космоснимков: а – 18.06.2009, б – 17.06.2011, в – 19.09.2023, г – 17.06.2024, д – 27.06.2024. Обозначения: 1 – супрагляциальное озеро до прорыва, 2 – граница ледника Бонн-Пьер, 3 – зона поражения селевым потоком деревни Ла-Берард

кельчиран у одноименного ледника. На рис. 5 (а, б) показан участок конца ледника Микельчиран и озера ниже него в 2006 г. и в 2007 г. (после прорыва).

По данным полевых измерений уровень озера Микельчиран понизился на 0,7 м, площадь уменьшилась с 16,5 до 11,6 тыс. м². Ниже озера образовался врез глубиной 4–6 м (рис. 5 в). При этом было прорвано нижнее озеро. Объем выплеснувшейся воды из верхнего озера составил около 12 тыс. м³. Вследствие выявленного заноса части котловины мелкодисперсным материалом и следов размывов ниже ледника был сделан вывод о том, что частичный прорыв озера был вызван размывом нижней части моренной котловины паводком с ледника Микельчиран.

ДИНАМИКА ОЗЁР НА ЮГЕ, СЕВЕРЕ И ЗАПАДЕ ЭЛЬБРУСА В ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ

Постоянное дешифрирование космоснимков Sentinel-2 позволило выявить некоторые изменения в динамике озёр, появление новых озёр и прорыв озера у ледника Терскол. На рис. 6 показаны участки озёр на леднике Кюкюртлю на западе (а-в), у ледника Терскол на юго-востоке (г, д) и у ледника

Бирджалычиран на северо-востоке Эльбруса (озеро Южное Бирджалы).

Два раза на одном и том же месте появлялось озеро на участке правого края ледника Кюкюртлю на высоте 3 360 м на расстоянии более 2,5 км выше конца ледника: первый раз в период 27 августа – 1 сентября 2020 г. длиной 120 м; второй раз в период 17–22 августа 2022 г. (рис. 6 а-в) длиной до 240 м, площадью до 7,6 тыс. м². При этом явных следов прорывов озера ниже ледника не обнаружено. Следовательно, озеро постепенно сливалось по подледным каналам. В 2023 г. озеро не образовывалось. Формирование озера, по-видимому, связано с какими-то изменениями в динамике ледника на этапе его деградации, которых раньше не происходило.

У ледника Терскол в период 2012–2013 гг. сформировалось два озера, одно из которых в период 3–16 июля 2020 г. прорвалось с прохождением паводка и селевого потока по р. Терскол. На рис. 6 (г, д) показано его исчезновение и значительные изменения в русле потока ниже озера. Прорыв озера произошел пропиливанием ледяной гряды. До прорыва озеро имело площадь около 3,4 тыс. м². На пологом участке в 850 м от озера на площади 13

тыс. м² отложился селевой материал. В конце августа 2020 г. селевой поток повторился в результате изменения направления русла потока на участке мертвых льдов ниже бывшего озера. Этот случай показывает, что даже самые незначительные по площади озёра могут прорываться с прохождением селевого потока. Этому могут способствовать изменения в подледной дренажной системе ледника.

В работе [8] приведены данные об образовании небольшого озера у боковой границы языка ледника Бирджалычиран (Южное Бирджалы). В 2021 г. оно имело площадь 11,6 тыс. м². К концу летнего сезона 2023 г. площадь озера увеличилась до 22,9 тыс. м². При этом, как видно на *рис. 6*, значительно сократилась ледяная перемычка, ограничивающая озеро с севера. Поэтому сделано предположение о возможном прорыве озера в 2024 г. в результате перелива по ее поверхности, как происходили прорывы озёр Среднее и Восточное Бирджалы, Малое Азау и озеро у ледника Терскол (см. *рис. 1*, *рис. 6 а, д*).

СУПРАГЛЯЦИАЛЬНЫЕ ОЗЁРА И ИХ ДИНАМИКА

В результате деградации ледника Большой Азау на юге Эльбруса, кроме того, что высвобождаются значительные площади и образуются моренно-запрудные, ригеле-запрудные, прогляциальные озёра, на поверхности ледника и массива мертвых льдов между основным потоком ледника и потоком Хотютау образуются супрагляциальные озёра [1]. Всего зафиксировано 15 разных по типу озёр. На *рис. 7 а, б* показано супрагляциальное озеро № 12 на массиве мертвых льдов в 2009 г. (площадь составляла 20,25 тыс. м²) и его пустая воронкообразная котловина в 2011 г. Озеро несколько раз появлялось и исчезало. Следы его существования были видны на космоснимках 2006 и 2007 г. Озеро существовало в июне 2013 г. (площадь более 12 тыс. м²). В конце июня 2013 г. оно исчезло. Затем озеро появилось в июне 2017 г. и просуществовало весь июнь – 27 июня имело площадь 8,4 тыс. м². Небольшое озеро было 02.06.2019 г. – менее 4 тыс. м². В последующие годы озеро № 12 отсутствовало.

К западу от массива мертвого льда на поверхности ледника Большой Азау (поток Хотютау) в разное время существовало два озера. Максимальная площадь составляла около 8 тыс. м². В 2023 г. при облёте на этом участке ледника сфотографированы три пустые воронки (*рис. 7 в*). Площадь большой воронки составляла около 25 тыс. м². До настоящего времени в XX и XXI веках исчезновение озёр на леднике Большой Азау не имело негативных последствий (значительных прорывных паводков не зафиксировано). Ранее катастрофический прорыв озера зафиксирован в 1895 г. [10]. Тогда озеро на леднике Большой Азау находилось на участке впадения в него правых притоков (сейчас это Чиперазау № 527 и Чегеткара № 526) на высоте примерно около 2 600 м.

В работе [18] приведены данные о подлед-

ном прорыве системы супрагляциальных озёр на леднике Чангри Шар в районе Эвереста в Непале в 2017 г. Общая площадь озёр до прорыва составляла 180 000 м² и объем 1,36 млн м³. Прорыв озёр происходил сначала по дренажной системе, включая участок ледника Кхумбу, затем по долине с пиковым расходом около 60 м³/с. В результате в долине были уничтожены тропы альпинистов для восхождения на Эверест.

27 июня 2024 г. в сочетании с ливнем произошел прорыв супрагляциального озера на леднике Бонн-Пьер во французских Альпах [17, 19]. Этот участок показан на *рис. 7 (г, д)*. По данным [17], за 34 часа выпало 100 мм осадков (метеостанция около города Сен-Кристоф-ан-Уазан на высоте 1 564 м). Ранее озеро на леднике Бонн-Пьер исчезало в 2023 г. в период 28 июня – 3 июля, но катастрофических последствий тогда не было. До прорыва в 2024 г. площадь озера составляла 11,3 тыс. м² (см. *рис. 7 г*). Во время прорыва из-под ледника вырвался мощный поток воды, имевший характер селевого потока. Далее поток вошел в деревню Ла-Берард, разрушив дома и постройки (см. *рис. 7 д*). Из деревни было эвакуировано 97 человек [19]. Сравнение космоснимков до и после селя показало, что в других местах и на склонах долин следов селей и микроселей не обнаружено. Это дает основание считать, что селевой поток образовался в результате воздействия ливня на водосбор ледника площадью около 4 км², сброса воды из озера и переполнения водой дренажной системы ледника с дальнейшим прорывным водным импульсом. Подобный водный импульс с ледника привел к прорыву озера Башкара в 2017 г. [7].

В работе [11] показана возможность образования в будущем на ложе ледника Большой Азау озера объемом около 9,4 млн м³. Следовательно, при дальнейшем развитии супрагляциальных озёр на леднике Большой Азау в сочетании с выпадением ливней возможен сход паводков и селей с катастрофическими последствиями.

ВЫВОДЫ

1. В разное время в период 1957–2023 гг. перед ледниками и на ледниках Эльбруса находилось 49 озёр разной величины (максимальная площадь в 2006 г. – у озера Восточное Бирджалы – 89,0 тыс. м² и максимальный прорывной паводок и селя).

2. Зафиксированы прорывы озёр с прохождением паводков и селевых потоков и исчезновение озёр без следов паводков (постепенный слив воды).

3. Прорывы озёр имели различные механизмы:

- по поверхности ледяных гряд и массивов с их размывом при переливе,
- по подледным каналам стока (под ледяными грядами, под ледниками),
- по подземным каналам стока с частичным и полным сбросом воды,
- в результате деформации (разжижения и оплывания) грунтов, слагающих котловину,

- в результате размыва конечных морен паводком с ледника,
- в результате обрушения моренных масс в озеро.

4. Кроме прорывов озёр наблюдались прорывы подледных водоемов и заполненных водой подледных каналов стока при их блокировке.

5. Опасность могут представлять как крупные озёра площадью более 50 тыс. м², так и малые площадью менее 5 тыс. м² в зависимости от механизма и условий прорыва.

6. В настоящее время угрозу прорыва представляет озеро Южное Бирджалы площадью более 20 тыс. м² с быстро сокращающейся ледяной плотиной.

7. С целью своевременного обнаружения опасности прорыва озера необходим постоянный мониторинг за озёрами и процессами у окончаний ледников.

Благодарность. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (Соглашение № 24-27-20006).

ЛИТЕРАТУРА

1. Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Шагин С.И. Динамика озер ледника Большой Азау на Эльбурсе // *Криосфера Земли*. 2023. Т. 27. № 1. С. 45–57.
2. Богаченко Е.М., Ильичев Ю.И., Зимницкий А.В. Исследование гляциальных озёр Приэльбрусья на предмет их потенциальной селевой опасности // *Труды Всероссийской конференции по селям*: 26 – 28 октября 2005 г. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. С. 175–181.
3. Герасимов А. О прорыве ледникового озера на NO склоне Эльбруса // *Изв. Геологического комитета*, 1909. Т. XXVIII. № 7. С. 156–160.
4. Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Багов А.М., Маркина А.В. О перестройке гидрографической сети северо-восточного подножия Эльбруса // *Лед и снег*. 2012. Т. 52. № 2. С. 23–30.
5. Докукин М.Д. Современная динамика (2011–2013 гг.) озерно-ледникового комплекса северо-восточного подножия Эльбруса (результаты аэрокосмического мониторинга) // *Развитие регионов в XXI веке. Материалы I Международной научной конференции. Владикавказ: Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова*, 2013. С. 190–195.
6. Докукин М.Д., Хаткутов А.В. Озёра у ледника Малый Азау на Эльбурсе: динамика и прорывы // *Лед и снег*. 2016. Т. 56. № 4. С. 472–479.
7. Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Условия и механизмы прорывов Башкалинских озёр в долине р. Адыл-су (Центральный Кавказ) // *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Коллективная монография по материалам X Всероссийской научно-технической конференции в 2 частях. Часть 2. – Грозный*, 2020. С. 369–375.
8. Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Хаткутов А.В. Эволюция озёр у ледника Джикуганкез (Северное Приэльбрусье) в 1957–2020 гг. с учетом подземных каналов стока // *Лед и снег*. 2022; 62(1):47–62.
9. Запороженко Э.В. Селевые потоки по рр. Кара-Кая-Су и Бирджалы-Су в Кабардино-Балкарской республике: сравнительный анализ прошлой и новейшей истории // *Вестник Владикавказского научного центра*. 2008. Т. 8. №1. С. 33–43.
10. Иванов М.А. В ущелье р. Баксана // *Известия Кавказского отдела Императорского русского географического общества*. – Тифлис: Типография К.П. Козловского, 1902. Т. XV, № 1. С. 7–20.
11. Ледники и климат Эльбруса. – М.: СПб: Нестор-История, 2020. 372 с.
12. Сейнова И.Б., Золотарёв Е.А. Ледники и сели Приэльбрусья. (Эволюция оледенения и селевой активности). – М.: Научный мир, 2001. 204 с.
13. Хаджиев М.М. Селевая опасность в верховьях бассейна р. Малки (Жылысу) // *Труды Всероссийской конференции по селям*. 26 – 28 октября 2005 г. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. С. 368–373.
14. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Сейнова И.Б., Крыленко И.В. Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне Эльбруса 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия // *Материалы гляциологических исследований*, 2006. Вып.102. С. 225–229.
15. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кудяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // *Криосфера Земли*. 2018. Т. 22. № 2. С. 70–80.
16. Allen S.K., Rastner P., Arora M., Huggel C., Stoffel M. Lake outburst and debris flow disaster at Kedarnath, June 2013: hydrometeorological triggering and topographic predisposition // *Landslides*. 2016. V. 13. P. 1479–1491.
17. Gascoin S. Crue du Vénéon: que nous apprennent les images satellites? 13.07.2024. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://labo.obs-mip.fr/multitemp/crue-du-veneon-que-nous-apprennent-les-images-satellites/>
18. Miles E.S., Watson C.S., Brun F., Berthier E., Esteves M., Quincey D.J., Miles, K.E., Hubbard B., Wagnon P. Glacial and geomorphic effects of a supraglacial lake drainage and outburst event, Everest region, Nepal Himalaya // *The Cryosphere*. 2018. Vol. 12, Iss. 12, P. 3891–3905, <https://doi.org/10.5194/tc-12-3891-2018>,
19. France Glacier Lake Burst, Kedarnath-like accident as a consequence of breaking of glacier lake after heavy rains in France, village washed away in particles, individuals evacuated by helicopter – France glacier lake burst, helicopters evacuate flooded village La Be-rarde within the French Alps – 2024-06-27. June 27, 2024. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://time.news/france-glacier-lake-burst-kedarnath-like-accident-as-a-consequence-of-breaking-of-glacier-lake-after-heavy-rains-in-france-village-washed-away-in-particles-individuals-evacuated-by-helicopter-fra/>

REFERENCES

1. Adzhiev A.H., Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.H., Savernyuk E.A., Shagin S.I. Dynamics of Lakes of the Bolshoy Azau Glacier on Elbrus // *Earth's Cryosphere*. 2023. XXVII (1), 39–50
2. Bogachenko E.M., Il'ichev Yu.I., Zimnickij A.V. Issledovanie glyacial'nyh ozyor Priel'brus'ya na predmet ih potencial'noj selevoj opasnosti // *Trudy Vserossiyskoj konferencii po selyam*: 26 – 28 oktyabrya 2005 g. M.: Izd-vo LKI, 2007. S. 175–181.
3. Gerasimov A. O proryve lednikovogo ozera na NO sklone El'brusa // *Izv. Geologicheskogo komiteta*, 1909. T. XXVIII. № 7. S. 156–160.
4. Dokukin M.D., Savernyuk E.A., Bagov A.M., Markina A.V. On the restructuring of drainage network of the base of mount Elbrus. *Ice and Snow*. 2012; Vol. 52. No 2. P. 23–30.

5. Dokukin M.D. *Sovremennaya dinamika (2011- 2013 gg.) ozerno-lednikovogo kompleksa severo-vostochnogo podnozhia El'brusa (rezul'taty aerokosmicheskogo monitoringa) // Razvitie regionov v HHI veke. Materialy I Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Vladikavkaz: Severo-Osetinskij gosudarstvennyj universitet im. K.L. Hetagurova, 2013. S. 190–195.*
6. Dokukin M.D., Khatkutov A.V. *Lakes near the glacier Maliy Azau on the Elbrus (Central Caucasus): dynamics and outbursts // Ice and Snow. 2016. Vol. 56. No 4. P. 472–479.*
7. Dokukin M.D., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S. *Usloviya i mekhanizmy proryvov Bashkarinskih ozor v doline r. Adyl-su (Central'nyj Kavkaz) // Sovremennye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza. Kollektivnaya monografiya po materialam X Vserossijskoj nauchno-tekhicheskoy konferencii v 2-uh chastyah. Chast' 2. Groznyj, 2020. S. 369–375.*
8. Dokukin M.D., Savernyuk E.A., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Khatkutov A.V. *Evolution of lakes near the Dzhikugankaz glacier (Northern Elbrus area) in 1957–2020 with consideration of underground flow channels // Ice and Snow. 2022. 62(1):47–62.*
9. Zaporozhchenko E.V. *Selevyje potoki po rr. Kara-Kaya-Su i Birdzhaly-Su v Kabardino-Balkarskoj respublike: sravnitel'nyj analiz proshloj i novejshej istorii // Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo centra. 2008. T. 8. №1. S. 33–43.*
10. Ivanov M.A. *V ushchel'e r. Baksana // Izvestiya Kavkazskogo otdela Imperatorskogo russkogo geograficheskogo obshchestva. Tiflis: Tipografiya K.P. Kozlovskogo, 1902. T. XV, № 1. S. 7–20.*
11. *Ledniki i klimat El'brusa. M.; SPb: Nestor-Istoriya, 2020. 372 s.*
12. Sejnova I.B., Zolotaryov E.A. *Ledniki i seli Priel'brus'ya. (Evoluciya oledeneniya i selevoj aktivnosti). M.: Nauchnyj mir, 2001. 204 s.*
13. Hadzhiev M.M. *Selevaya opasnost' v verhov'yah bassejna r. Malki (Zhylysu) // Trudy Vserossijskoj konferencii po selyam. 26 – 28 oktyabrya 2005 g. M.: Izd-vo LKI, 2007. S. 368–373*
14. Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Sejnova I.B., Krylenko I.V. *Proryv lednikovogo ozera na severo-vostochnom sklone El'brusa 11 avgusta 2006 g.: prognoz, sobytie i posledstviya // Materialy glyaciologicheskikh issledovanij, 2006. Vyp.102. S. 225–229.*
15. Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Alejnikov A.A., Bekkiev M.Yu., Viskhadzhieva K.S., Dokukin M.D., Kalov R.H., Kidyayeva V.M., Krylenko V.V., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Rec E.P., Savernyuk E.A., Smirnov A.M. *The outburst of Bashkara glacier lake (Central Caucasus, Russia) on september 1, 2017 // Earth's Cryosphere. 2018. Vol. 22. № 2. P. 70–80.*
16. Allen S.K., Rastner P., Arora M., Huggel C., Stoffel M. *Lake outburst and debris flow disaster at Kedarnath, June 2013: hydrometeorological triggering and topographic pre-disposition // Landslides. 2016. V. 13. P. 1479–1491.*
17. Gascoin S. *Crue du Vénéon: que nous apprennent les images satellites? 13.07.2024. URL: <https://labo.obs-mip.fr/multitemp/crue-du-veneon-que-nous-apprennent-les-images-satellites/>*
18. Miles E.S., Watson C.S., Brun F., Berthier E., Esteves M., Quincey D.J., Miles, K.E., Hubbard B., Wagnon P. *Glacial and geomorphic effects of a supraglacial lake drainage and outburst event, Everest region, Nepal Himalaya // The Cryosphere. 2018. Vol. 12, Iss. 12, P. 3891–3905, <https://doi.org/10.5194/tc-12-3891-2018>,*
19. *France Glacier Lake Burst, Kedarnath-like accident as a consequence of breaking of glacier lake after heavy rains in France, village washed away in particles, individuals evacuated by helicopter – France glacier lake burst, helicopters evacuate flooded village La Berarde within the French Alps – 2024-06-27. June 27, 2024. URL: <https://time.news/france-glacier-lake-burst-kedarnath-like-accident-as-a-consequence-of-breaking-of-glacier-lake-after-heavy-rains-in-france-village-washed-away-in-particles-individuals-evacuated-by-helicopter-fra/>*

