

УДК 551.32

ДИНАМИКА ОЗЕР У ЛЕДНИКА МАЛЫЙ АЗАУ НА ЭЛЬБРУСЕ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 20 ЛЕТ И ИХ ПРОРЫВ В 2025 ГОДУ

© 2026 г. Е. Д. Павлюкевич^{1,2*}, И. Н. Крыленко^{1,3},
В. М. Кидяева^{1,3}, А. С. Губанов^{1,3}, В. А. Юдина^{1,3}, И. В. Крыленко³,
Е. Д. Дроздов^{3,4}

¹Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com

Поступила 19.12.2025 г.

После доработки 01.02.2026 г.

Принята к печати 23.03.2026 г.

Рассматриваются механизмы и причины прорыва озера Азау 6 августа 2025 г. На основе данных дистанционного зондирования и батиметрических съёмок определены основные изменения ледника Малый Азау и озёр, формирующихся в его моренном комплексе. Площадь ледника Малый Азау за 2000–2025 гг. сократилась на 14% (с 9.1 ± 0.4 км² в 2000 г. до 7.9 ± 0.1 км² в 2025 г.), причём за последнюю пентаду 2020–2025 гг. уменьшение площади составило 7.2% – столько же, сколько за предыдущие 20 лет. Деградация ледника привела к росту числа приледниковых озёр на освободившейся территории, изменению их площади и количества, а также к значимым прорывным событиям 2011 и 2025 гг. В результате прорыва озера Азау в 2025 г. его объём и площадь уменьшились более чем в 2 раза, при этом “нижнее” озеро полностью опорожнилось. Суммарный объём прорывного паводка составил 17 ± 2 тыс. м³, при этом текущий объём озера Азау равен 16.5 тыс. м³. В настоящее время объём озера составляет всего 25% относительно значений 2005–2011 гг. Основным триггером прорыва озера в 2025 г. выступила интенсивная абляция ледника, вызванная повышенной температурой воздуха, что обусловило рост притока воды в озеро и стока из него, переувлажнение моренной перемычки, вероятно, усугубившееся таянием мёртвого льда внутри неё, и её размыв на участке современного канала стока из озера. Озёра у ледника Малый Азау, появившиеся в XX веке, прошли минимум три полных цикла между прорывами 1978, 2011 и 2025 гг. Ключевой тенденцией является сокращение интервалов между этими событиями на фоне активизации таяния ледника. Несмотря на это, отмечено снижение объёмов прорывных паводков. По результатам работы показана необходимость дальнейшего мониторинга приледникового комплекса для предупреждения будущих прорывных событий и оценки возможности формирования новых озёр.

Ключевые слова: горная гидрология, деградация оледенения, ледниковые озёра, прорыв ледниковых озёр, Центральный Кавказ

DOI: 10.7868/S2412376526020061

ВВЕДЕНИЕ

Горное оледенение активно сокращается вследствие современных климатических изменений (Huss, Hock, 2018; Sommer et al., 2020; Yang et al., 2023). Данный процесс характерен и для тер-

ритории Кавказа (Tielidze, Wheate, 2018; Tielidze et al., 2022). С конца XIX и до второй декады XXI вв. площадь ледников Кавказа уменьшилась на 46% (Котляков и др., 2023). Процесс отступления ледников сопровождается образованием новых ледниковых озёр и развитием уже существую-

щих. В настоящее время в мире существует более 110000 ледниковых озёр с общей площадью около 15000 км² (Zhang et al., 2024). Согласно (Хромова и др., 2021) на Кавказе по спутниковым данным 2016–2019 гг. обнаружено 1830 приледниковых озёр (ледниковые озёра, расположенные на предполье ледников) общей площадью около 95.8 км², другие исследователи для этого региона также отмечают активный рост их числа и суммарной площади (Лаврентьев и др., 2020; Bazilova, Kääh, 2022; Аджиев и др., 2023).

По глобальным оценкам (Lützwow et al., 2023) в период с 1990 по 2023 г. в мире зарегистрировано 2316 прорывных паводков. Согласно (Harrison et al., 2018) количество прорывов ледниковых озёр, подпруженных моренами, в последние десятилетия снизилось даже в условиях быстрой деградации оледенения. Однако авторы данного исследования прогнозируют увеличение частоты таких паводков в ближайшие десятилетия и в XXII веке, что связано со временем отклика ледниково-моренного комплекса на изменения климата. Другие исследования (Veh et al., 2025) предполагают, что повышение объёма поступающей талой ледниковой воды в будущем приведёт к увеличению объёмов прорывных паводков как из озёр, подпруженных мореной, так и залегающих в естественных понижениях коренных пород. При этом озёра с ледяными плотинами будут уменьшаться в размерах по мере таяния ледников. Однако в настоящий момент на долю последних приходится более 92% случаев прорывов (Zhang et al., 2024), что связано с цикличностью процессов наполнения и спуска этих озёр. По оценкам (Taylor et al., 2023) прорывные паводки угрожают территории с населением около 15 млн человек по всему земному шару. Учитывая растущую опасность для населения и инфраструктуры, особое внимание уделено анализу уже произошедших прорывов ледниковых озёр. Эти данные закладываются в основу разработки прогнозов для адаптации и калибровки математических моделей.

На Кавказе с начала XX века ведётся фиксация состояния и прорывов озёр, особенно вызывающих разрушительные паводки (Зимницкий, 2007; Кидяева и др., 2013). Опорожнения озёр отмечались в 1909 г. у ледника Бирджалычиран на северо-восточном склоне Эльбруса, событие повторилось в 1993 г. (Запороженко, 2008) и в 2006 г., когда образовавшийся селевой поток частично разрушил курорт Джилы-Су (Черноморец и др., 2007). Следы маломощных прорывных паводков

на северо-восточном склоне Эльбруса наблюдались в 2013 г. — оз. Кривое (Запятая, Бирджалычиран Б-2) и в 2007 г. — оз. Микельчиран (Докукин, Шагин, 2014). По результатам дешифрирования аэрофотоснимков отмечались следы прорыва озёр в верховьях рек Тютю-Су, Сакашили-Су, Измялцы-Су, Гуркумта и на водоразделе рек Кестанты и Сарын-Су (Мальнева и др., 1990; Золотарёв, Сейнова, 1997). В бассейне р. Темир (Республика Дагестан) оз. Кахаб-Росона прорывалось в 1969, 1971, 1972, 1974 и 1975 гг. (Познанин, 1978; Докукин, Шагин, 2014; Perov et al., 2017). Следы прорыва небольшого озера на леднике Западный Джайлык в бассейне р. Адыр-Су обнаружены после массового схода селей на Центральном Кавказе в 2011 г. (Докукин и др., 2012). Прорывы оз. Башкара наблюдались в августе 1958 г., в октябре 1960 г. (Ковалев, 1961; Сейнова, 1997) и в сентябре 2017 г. (Черноморец и др., 2018).

Одним из последних прорывных паводков на Кавказе был спуск озера у ледника Малый Азау в 2025 г. В МЧС по КБР 6.08.2025 г. в 15:30 поступило сообщение о том, что на южном склоне Эльбруса на высоте около 3200 м произошёл сход селевой грязекаменной массы. Туристам было рекомендовано возвращаться с маршрутов, так как озеро находится недалеко от поляны Азау — популярного туристического места в Приэльбрусье. Селевой паводок возник в результате спуска наибольшего по площади из системы озёр у ледника Малый Азау.

Цель исследования — анализ причин прорыва озера у ледника Малый Азау 6.08.2025 и изучение его развития за предшествующие 20 лет. В статье приводится оценка динамики ледниково-озёрного и моренного комплексов на основе данных дистанционного зондирования Земли, результаты обработки гидрометеорологической информации, в том числе анализ данных об абляции, температуре и осадках перед прорывом 2025 г. В статье также представлены данные повторных батиметрических съёмки озера за исследуемый период, оценки изменения площади и объёма. Также рассмотрены причины и выявлен непосредственный механизм прорыва озера в 2025 г.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Озеро Азау расположено в Кабардино-Балкарской Республике России, в Приэльбрусье. Оно находится у подножия южного склона горы Эльбрус, в верховьях реки Азау, основного истока реки Баксан, на высоте около 3300 м над ур. моря (рис. 1).

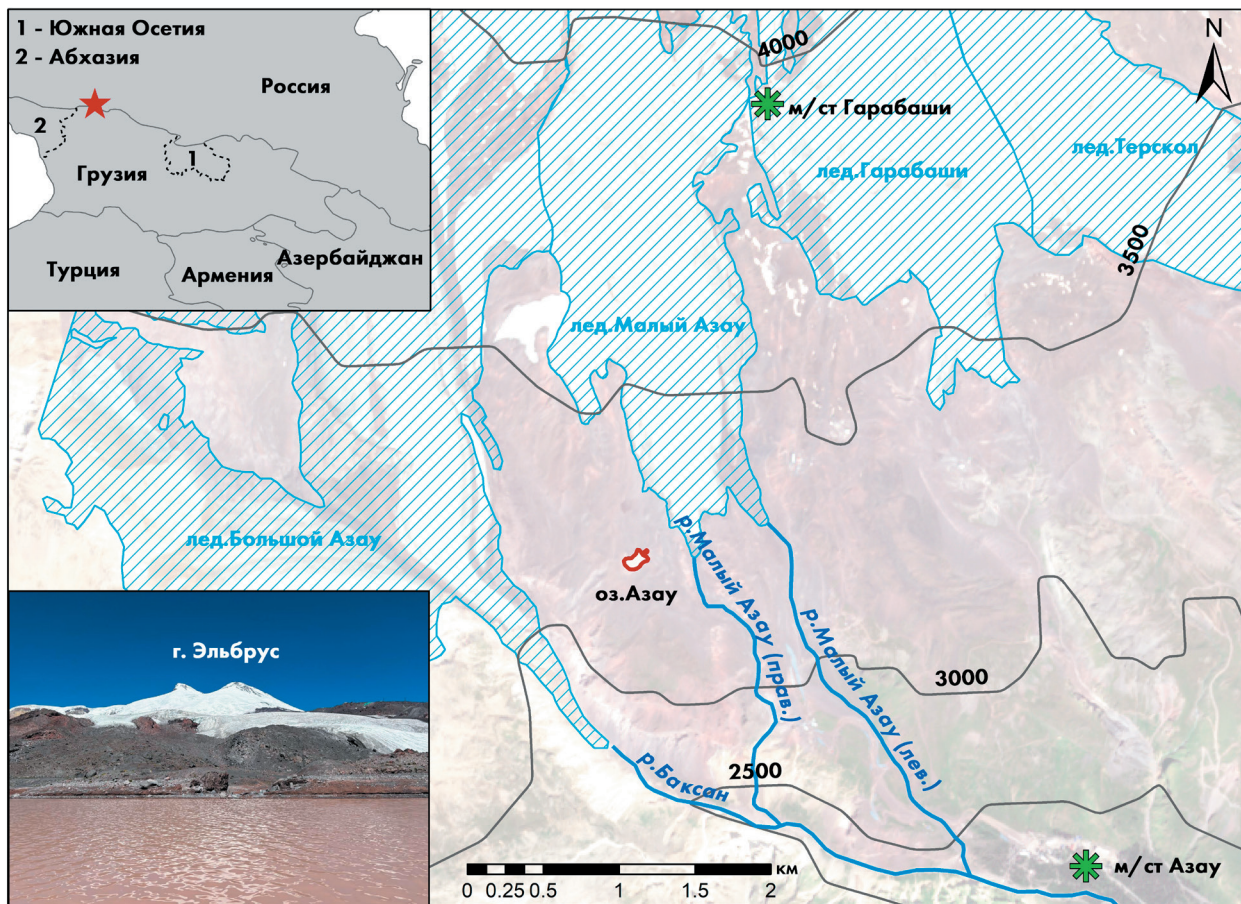


Рис. 1. Исследуемая территория
Fig. 1. Study area

В период с 1930-х по середину 1950-х годов ледник Малый Азау отступил из долины р. Азау за скальный ригель, разделяющий ледники Большой и Малый Азау. На широкой, практически плоской поверхности ригеля, частично покрытой чехлом основной морены, у правого борта ледника Малый Азау в этот период и возникло озеро Азау. Достоверные сведения об озёрах, расположенных в предполье ледника Малый Азау, начинаются с 1957 г., когда была опубликована первая крупномасштабная топографическая карта региона. Таким образом, возраст озёр у ледника Малый Азау составляет не менее 70 лет, однако за этот период существенно менялась конфигурация берегов, количество озёр, их положение относительно ледника, суммарная площадь водоёмов. Так, в 1957 г. у ледника Малый Азау находились два озера на месте современной котловины на высоте около 3271 м и одно — в 370 м к северу, на высоте около 3303 м (рис. 2, а). Сток из озёр шел в юго-западном направлении, в сторону ледника Большой Азау, затем аккумуляиро-

вался вдоль его левого борта и попадал в р. Азау. К началу 1970-х годов верхнее озеро было занесено, котловина восточного озера осталась практически без изменений, а котловина западного озера увеличилась в 3–4 раза в связи с отступанием правого края ледника Малый Азау (см. рис. 2, б). Сток из озёр также сохранялся в юго-западном направлении. Прорыв западного озера произошел в 1978 г., а восточное озеро увеличивалось в размерах до прорыва в 2011 г. и продолжает существовать до сих пор.

Согласно (Докукин, Хаткутов, 2016) до конца 1980-х годов озеро примыкало к леднику Малый Азау, оно имело полностью ледовые северо-восточный и восточный берега. Вероятно, лёд сохранялся и под дном озера, ледяное ядро также имела подпруживающая его морена.

После небольшого периода аккумуляции и стагнации в 90-е годы, начиная с 2000-х годов ледник начал отступать выше по долине.

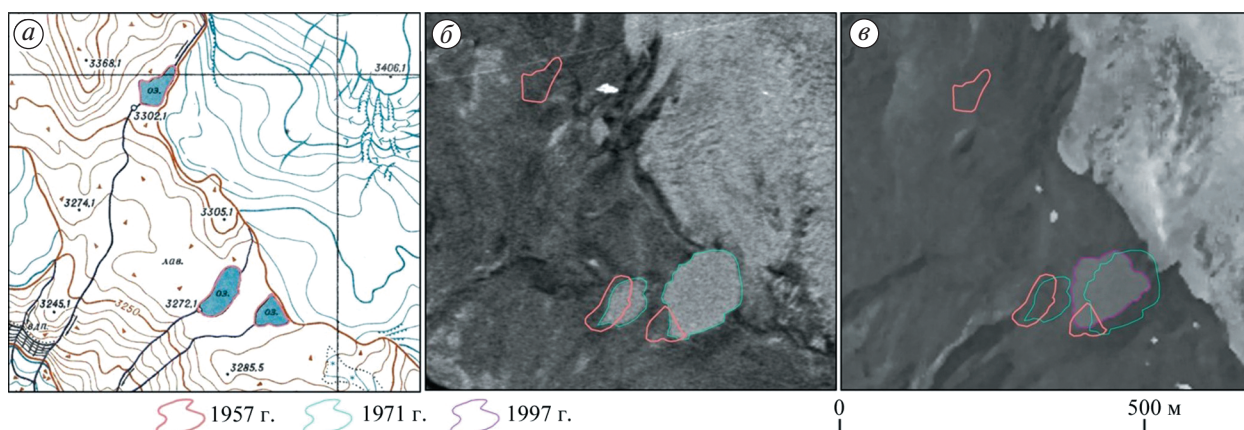


Рис. 2. Положение озёр у ледника Малый Азау в 1957–1997 гг.: топографическая карта масштаба 1 : 10000 (а); снимок Соропа 20.09.1971 (б); аэрофотосъёмка Эльбруса, 1997 г. (в)

Fig. 2. Location of lakes at the Maly Azau Glacier in 1957–1997: topographic map at 1 : 10000 scale (a); Corona satellite image from 20.09.1971 (b); air-photography of Mount Elbrus, 1997 (c)

К 2004 г. ледник Малый Азау отступил от озера на 100–150 м, и обвалы льда в озеро прекратились. Но у озера сохранялась моренно-ледовая подпруда, которая закрепилась на скальном ригеле и по-прежнему представляла угрозу, стал намечаться сток в юго-восточном направлении, а сток в юго-западном направлении прекратился. В 2005 г. обнаружено формирование мелководного залива в восточной части озера (рис. 3, а), который продолжил расти вплоть до прорыва

в 2011 г. На космических снимках 2009 г. отмечается формирование неглубокого водоёма восточнее деградирующей ледово-моренной запруды озера. Новое восточное озеро видно на фотографии, сделанной в июле 2011 г. (см. рис. 3, б), оно было вовлечено в прорывной поток, но сохранилось до 2012/13 г.

После прорыва 2011 г. центральная котловина озера разделилась на два отдельных небольших

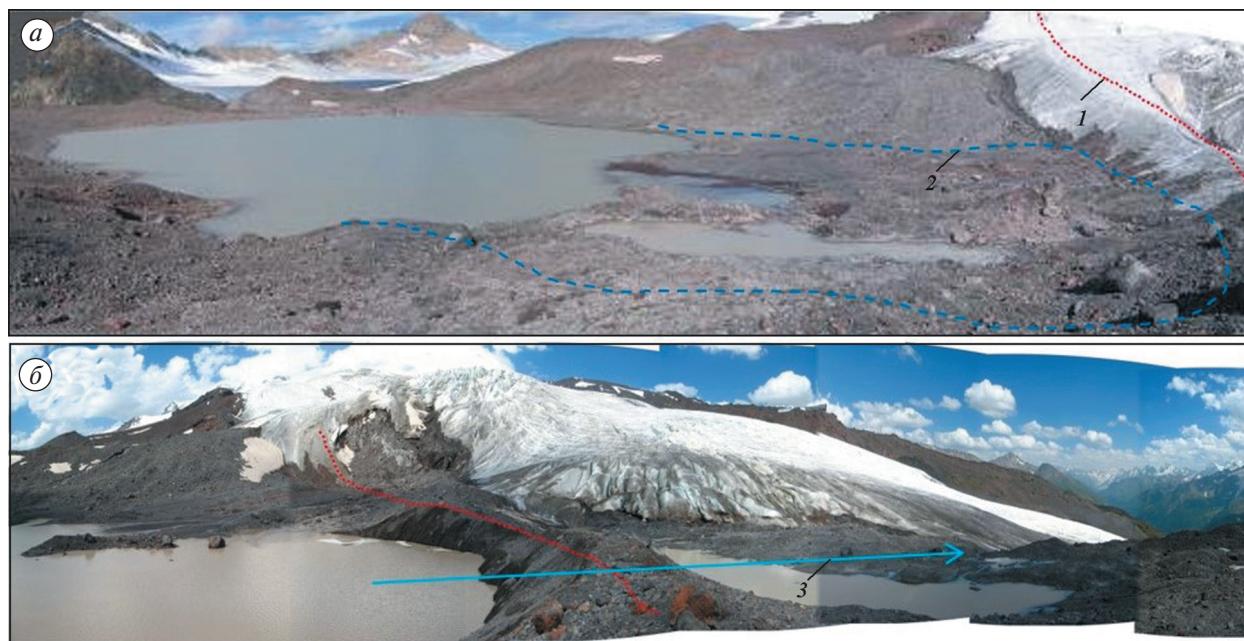


Рис. 3. Озеро Азау с юго-востока: фото Крыленко И.В. 03.09.2005 (а); фото Кидяевой В.М. 26.07.2011 (б): 1 – гребень береговой морены; 2 – контур восточного залива озера; 3 – направление прорыва озера в 2011 г.

Fig. 3. Azau Lake from the southeast: photo by I.V. Krylenko, July 2005 (a); photo by V.M. Kidyaeva, July 2011 (b): 1 – crest of the lateral moraine; 2 – outline of the lake's eastern bay; 3 – direction of the lake's outburst in 2011

озера, в 2017 г. между ними появилось третье озеро. Каждое из озёр продолжало расти до прорыва 2025 г.

Суммарная площадь водоёмов у правого борта ледника Малый Азау менялась в диапазоне от 8.5 тыс. м² (два южных озера в 1957 г.; см. рис. 2, а) до максимумов 70-х годов: 25.2 тыс. м² (1971 г.; см. рис. 2, б), 24,4 тыс. м² (1975 г.), затем было уменьшение в 90-х: 17.5-тыс. м² (1997 г., см. рис. 2, в) (Докукин, Хаткутов, 2016) и новый максимум: 26 тыс. м² (2011 г.). Достоверно известно о трёх прорывах озера – в 1978, 2011 и 2025 гг., механизмы прорывов озёр в 1978 и 2011 гг. существенно различались, поскольку в 1978 г. озеро непосредственно примыкало к леднику.

Согласно (Сейнова, Золотарев, 2001), в 1978 г. ледник Малый Азау отвесной стеной обрывался в озеро. 19.07.1978 произошёл мощный обвал этой стены в восточную котловину. Часть воды со льдом перехлестнула низкую перемычку между восточным и западным озёрами, после чего западное озеро спустилось и обрушилось на расположенный ниже язык ледника Большой Азау. До прорыва западное озеро имело площадь 6.3 тыс. м² (Докукин, Хаткутов, 2016). По мнению (Докукин, Хаткутов, 2016), механизм прорыва озера в 1978 г. был другим и связан с потерей устойчивости моренной запруды озера в западной котловине. Волновой триггер прорыва авторы исключают в связи с отсутствием на космических снимках следов заплеска на перемычке между озёрами, а также из-за того, что уровень воды в восточном озере не изменился (Докукин, Хаткутов, 2016). Согласно реконструкции (Докукин, Хаткутов, 2016), в период высоких летних температур содержащая лёд моренная запруда западного озера перенасытилась водой, потеряла устойчивость и начала оползать, вдоль вытекающего ручья начался быстрый регрессивный рост линейного вреза, который достиг озера. После этого началось опорожнение озера и формирование прорывного селевого потока. Объём сброшенной из озера воды не превышал 12 тыс. м³, объём селевых отложений на леднике Большой Азау оценивается в более 100 тыс. м³ (Докукин, Хаткутов, 2016). Язык ледника Большой Азау был завален отложениями селя на площади около 130–140 тыс. м² (Докукин, Хаткутов, 2016).

В 2011 г. озеро прорвалось в восточном направлении в результате протаивания и разрушения ледовой правой береговой морены лед-

ника Малый Азау. Как видно по фотографии (см. рис. 3, а), уже в 2005 г. в северо-восточной части озера начал формироваться небольшой залив в месте протаивания береговой морены ледника Малый Азау. В 2011 г. этот залив достиг больших размеров (см. рис. 2). На фотографии 2011 г. видно (справа), что залив отделён от основного озера небольшой грядой островов, в северо-восточной части залив вдаётся в береговую морену ледника, разбитую трещинами на отдельные блоки мёртвого льда. Высота гребня боковой морены составляла 7–8 м над урезом воды озера Азау, однако уже в 2010 г. в массиве по трещинам образовались под- и внутриледные каналы стока. У внешнего края боковой морены возникло небольшое озеро (“нижнее восточное”), отметка его уреза была на несколько метров ниже отметки уреза озера Азау. К лету 2011 г. площадь “нижнего” озера составила около 2.4 тыс. м² (при длине 120 м и ширине 20 м), его глубина могла достигать 3–5 м, следовательно, максимальный объём этого водоёма мог достигать 7.2–7.5 тыс. м³.

В результате прорыва в августе 2011 г. уровень озера Азау понизился на 2.2 м от отметки уреза, полученной при промерах в июле того же года. Объём воды, излившейся из озера, составил 39.85 тыс. м³ (почти 60% объёма озера). “Нижнее” озеро также вовлечено в паводок, судя по космическим снимкам, оно излилось почти полностью. Следовательно, максимальный объём воды, прошедший в результате прорыва по долине ледника Малый Азау, полученный по батиметрическим кривым и высотным отметкам уровней воды до и после прорыва, составил около 47 тыс. м³. Согласно оценкам (Докукин, Хаткутов, 2016), объём излившейся воды составил значительно меньше – 15–17 тыс. м³. Объём рыхлообломочного материала, перенесённого водой при паводке и отложенного на конусе выноса в долине р. Азау, составил около 10–12 тыс. м³ (Докукин, Хаткутов, 2016).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные дистанционного зондирования. Для оценки изменений площади озёр и ледника Малый Азау применялись спутниковые снимки Sentinel-2 и Landsat-5, -7, -8. Площади озёр определялись на каждый год с 2005 по 2025 г., а площадь ледника – ежепятнадно с 2000 по 2025 г. Для этого отображены соответствующие снимки, указанные в табл. 1.

Таблица 1. Данные дистанционного зондирования, используемые для оценки изменения площади ледника и ледниковых озёр

Table 1. Remote sensing data used for assessing glacier and glacial lake area changes

Дата	Спутниковый снимок	Разрешение, м	Цели исследования
18.08.2005	Landsat-7	30	Оценка изменения площади озёр
04.08.2006	Landsat-5	30	
07.08.2007	Landsat-5	30	
25.08.2008	Landsat-5	30	
28.08.2009	Landsat-5	30	
24.08.2010	Landsat-5	30	
11.08.2011 (до прорыва 2011 г.)	Landsat-5	30	
19.09.2011 (после прорыва 2011 г.)	Landsat-5	30	
12.08.2012	Landsat-7	30	
23.08.2013	Landsat-8	30	
03.08.2014	Landsat-8	30	
29.08.2015	Landsat-8	30	
09.09.2016	Landsat-8	30	
13.08.2017	Sentinel-2	10	
28.08.2018	Sentinel-2	10	
28.08.2019	Sentinel-2	10	
27.08.2020	Sentinel-2	10	
27.08.2021	Sentinel-2	10	
25.08.2022	Sentinel-2	10	
27.08.2023	Sentinel-2	10	
19.08.2024	Sentinel-2	10	
30.07.2025 (до прорыва 2025 г.)	Sentinel-2	10	
23.08.2025 (после прорыва 2025 г.)	Sentinel-2	10	
12.08.2000	Landsat-5	30	Оценка изменения площади ледника и динамики языка
18.08.2005	Landsat-7	30	
23.08.2010	Landsat-7	30	
14.08.2015	Sentinel-2	10	
29.09.2020	Sentinel-2	10	
29.08.2025	Sentinel-2	10	

Как правило, для картографирования ледниковых озёр наиболее подходящим периодом считаются летние месяцы с июля по сентябрь (Zhang et al., 2015). В это время снежный и ледяной покровы минимальны, что позволяет определить максимальную площадь ледниковых озёр. В связи с этим для работы отбирались оптимальные снимки на указанный период. Для анализа динамики ледника отбирались снимки, полученные в конце сезона абляции, когда поверхность ледника и его скального обрамления максимально освобождена от снега. Береговые линии и границы ледников для всех изображений оцифрованы вручную в ПО ESRI ArcMap 10.4.1.

Разрешение изображения влияет на точность дешифрирования границ ледников и ледниковых озёр и, как следствие, на погрешность при определении их площади. В соответствии с развитыми подходами оценки погрешности (O’Gorman, 1996; Petrakov et al., 2016), максимальная погрешность определения площади имеет порядок половины пикселя. Аналогичная методика применена для оценки точности дешифрирования площади ледников (Paul et al., 2013), использовался буферный метод: для снимков Landsat он составил 15 м (итоговая погрешность для контуров 2000, 2005 и 2010 гг. составила $\pm 0.4 \text{ км}^2$), для Sentinel-2, — 5 м (для контуров 2015, 2020 и 2025 гг. $\pm 0.1 \text{ км}^2$). Погрешность определения площади озёр, связанная с пространственным разрешением снимка, рассчитывалась для каждого объекта как произведение его периметра на величину, равную половине пикселя. Показано, что средняя относительная погрешность определения площади, обусловленная разрешением снимков Landsat (30 м), достигала 41%. Для данных спутника Sentinel-2 с более высоким разрешением (10 м) данный показатель существенно ниже и составил в среднем 17%.

Гляциологическая информация. Данные по балансу массы и поверхностной абляции опорных ледников Гарабаши и Джанкуат использованы в качестве релевантных для анализа состояния и возможных темпов абляции ледника Малый Азау, так как непосредственно на нём наблюдения не проводятся.

Ледник Малый Азау расположен на южном склоне Эльбруса. На леднике Малый Азау не проводились прямые измерения баланса массы, однако рядом расположен ледник Гарабаши, на котором с 1984 г. ведётся регулярный масс-балансовый мониторинг и по динамике которого можно проследить общие для всех ледников Эль-

бруса эволюционные тенденции (Рототаева и др., 2019). Ледники Малый Азау и Гарабаши имеют одинаковую экспозицию, контактируют в области аккумуляции (по сути, у них единое поле аккумуляции), а концы языков расположены на сопоставимых высотах. Информация по абляции на леднике Гарабаши в начале августа получена с акустического дальномера CampbellSonicRanger SR50, который обеспечивает автоматические наблюдения за скоростью аккумуляции и абляции снежно-ледовой поверхности.

На опорном леднике Джанкуат (репрезентативном уже для всего региона Центрального Кавказа) (Popovnin et al., 2024) и расположенном в том же регионе неподалёку (в 25 км), наблюдения за абляцией в период до и после прорыва озера были более дискретны — обход реек в августе 2025 г. выполняли примерно раз в 4–7 дней.

Метеорологическая информация. Для анализа метеорологических условий, предшествовавших прорыву озёр, использованы данные двух исследовательских метеостанций южного макроклона Эльбруса, установленных в различных высотных зонах. Одна из них располагается в долине реки Баксан на территории УНБ МГУ в Азау (2320 м над ур. моря) и представляет собой автоматическую метеостанцию (АМС) фирмы МиниМакс-94. Помимо основных метеорологических параметров, данная АМС позволяет получать отдельно данные по жидким и твёрдым осадкам за счёт использования оптического осадкомера. Также с августа 2024 г. в области абляции ледника Гарабаши (3970 м над ур. моря) функционирует стационарный метеорологический комплекс (Торопов и др., 2024), позволяющий получить метеорологические параметры непосредственно на поверхности горных ледников Эльбруса. На этой АМС проводятся измерения температуры, влажности воздуха и скорости ветра, а также компонент радиационного баланса и интенсивности метелевого переноса. Существенный недостаток данного комплекса — отсутствие данных по осадкам, которые могут быть получены только по данным метеостанции Азау.

Батиметрические съёмки за 2005, 2011 и 2025 гг. Батиметрические съёмки проведены в 2005, 2011 и 2025 гг. с применением двухчастотного эхолота/картплоттера Lowrance 525c DF, установленного на гребной лодке. Измерения глубин выполнялись по промерным створам с интервалом между створами 10–20 м и фиксацией координат лодки с помощью GPS-антен-

ны, встроенной в промерный комплекс. Для расчёта объёма озера и средней глубины, а также для визуализации данных батиметрических съёмки применялось программное обеспечение Surfer 15.3 и ArcMap 10.4.1. По результатам обработки данных промеров глубин построены батиграфические кривые (кривые объёма), которые позволили реконструировать динамику объёма озера Азау за период наблюдений на основе данных об изменении его площади.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка деградации ледника Малый Азау в XXI веке. Ледник Малый Азау, расположенный на южном склоне Эльбруса, в начале XXI века активно деградирует – кумулятивный баланс массы соседнего ледника Гарабаши за 2000–2025 гг. составил -18.5 м водного эквивалента (в.э.) или -0.74 м в.э./год. К 2025 г. ледник отстоит от современных озёр уже на 100 м, их питание происходит за счёт поверхностных потоков из гряд в центральной лопасти языка.

За последние 25 лет площадь ледника сократилась на 14% с 9.1 ± 0.4 км² в 2000 г. до 7.9 ± 0.1 км² в 2025 г. (рис. 4). За четверть века динамика сокращения площади ледника имеет тенденцию к ускорению: если за первую пентаду XXI века (2000–2005 гг.) изменения площади составляли -0.6% , то уже за вторую пентаду (2005–2010 гг.) сокращение составило -1% . Далее это значение только увеличивалось: 2010–2015 гг. -2% , 2015–2020 гг. -2.5% , а за последнюю пентаду 2020–2025 гг. сокращение составило -7.2% – столько же, сколько за предыдущие 20 лет. Это можно объяснить разделением языка ледника на отдельные потоки вследствие его отступления и истончения.

Изменения площади и объёма озёр. Динамика озера Азау на протяжении последних 20 лет характеризовалась двумя прорывами и существенной трансформацией его очертаний (рис. 5). На первом этапе, согласно промерам 2005 г., озеро достигло своих максимальных глубин (более 8 м при высоких летних уровнях воды). К 2011 г.,

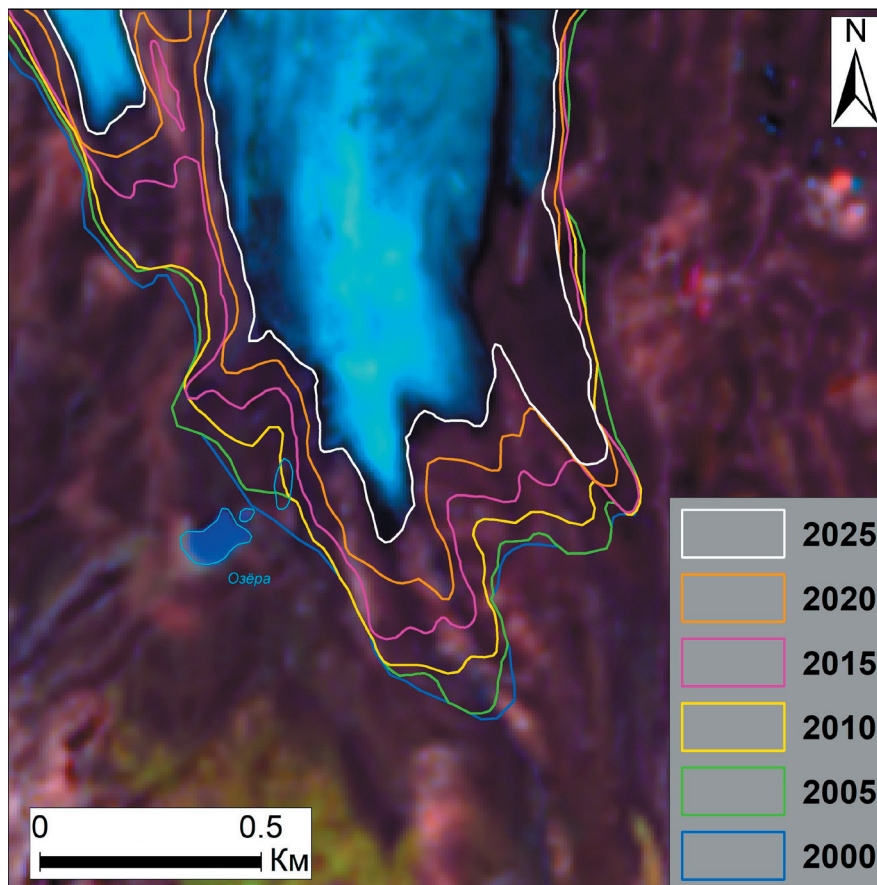


Рис. 4. Положение языка ледника Малый Азау в 2000–2025 гг. (подложка – снимок Sentinel-2 от 29.08.2025)
Fig. 4. The position of the Maly Azau Glacier tongue in 2000–2025 (background – Sentinel-2 image from 29.08.2025)

вероятно, вследствие интенсивного занесения, обусловленного поступлением большого объёма наносов, максимальные значения глубин несколько сократились. Несмотря на это, площадь и объём озера возросли в результате продолжающейся деградации и отступления ледника Малый Азау, в сторону языка которого произошло расширение акватории. По состоянию на 26 июля 2011 г. площадь озера составляла 26 тыс. м², объём – 67.7 тыс. м³.

После прорыва в 2011 г. площадь озера уменьшилась до 12.2 тыс. м², объём – до 27.9 тыс. м³, глубины достигали 6 м. Последующие значительные изменения озера зафиксированы в 2025 г. после второго прорыва, который привёл к радикальному сокращению размеров водоёма. Его объём уменьшился до 16.5 тыс. м³, площадь до 6.9 тыс. м², глубины при промерах в конце августа 2025 г. не превышали 4.5 м (табл. 2). Относительно максимальных объёмов, наблюдавшихся в 2005–2011 гг., объём озера в настоящее время составляет всего 25%.

Отступление ледника Малый Азау и прорывы озера Азау вызвали значительные изменения площади и числа приледниковых озёр в пределах рассматриваемого моренно-ледникового комплекса (рис. 6 и 7). До 2011 года на оз. Азау отмечалась тенденция к увеличению площади и объёма. После прорыва 2011 г. озеро разделилось на два: основное озеро (Азау Верхнее) и остаточное озеро (Азау Нижнее), расположенное в понижении рельефа у языка ледника Малый Азау. В последующие годы, по мере деградации ледника, площадь озера Азау Нижнее увеличивалась, достигнув максимума в 3.5 тыс. м² к концу июля 2025 г. Кроме того, начиная с 2017 г. у моренной гряды идентифицировано небольшое озеро (Азау Среднее), максимальная зафиксированная площадь которого составила 1.3 тыс. м² в августе 2022 г. Прорыв озера 06.08.2025 привёл к сокращению площади озера Азау Верхнее до 6.9 тыс. м², озера Азау Среднее – до 0.2 тыс. м² и полному исчезновению озера Азау Нижнее.

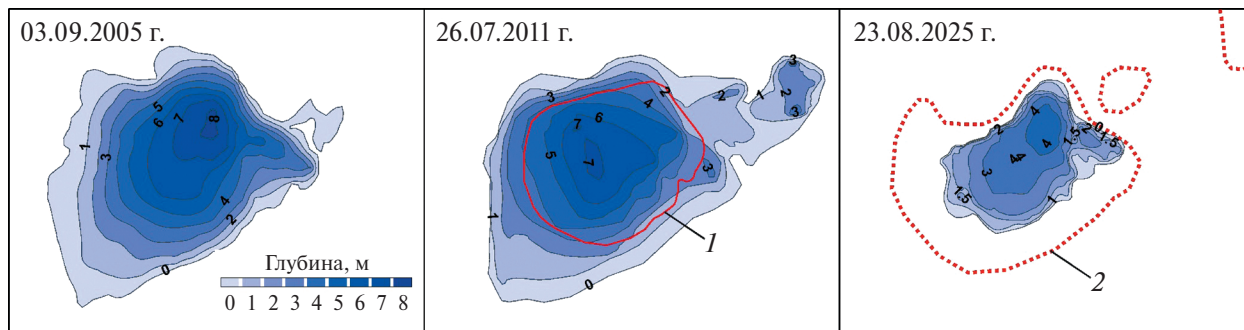


Рис. 5. Батиметрическая карта озера Азау в 2005, 2011 и 2025 годах: 1 – урез воды после прорыва 2011 года; 2 – урез воды до прорыва 2025 г.

Fig. 5. Bathymetric map of Azau Lake in 2005, 2011, and 2025: 1 – shoreline after the 2011 outburst; 2 – shoreline before the 2025 outburst

Таблица 2. Морфометрические характеристики озера Азау по данным повторных батиметрических съёмок
Table 2. Morphometric characteristics of Azau Lake according to repeated bathymetric surveys

Дата	Объём, тыс. м ³	Площадь, тыс. м ²	Глубина	
			средняя	максимальная
03.09.2005	63.4	19.5	3.25	8.3
26.07.2011	67.7	26	2.6	7.9
Сентябрь 2011 (после прорыва 2011)*	27.9	12.2	2.3	6
30.07.2025 (до прорыва 2025 г.)*	36.2	14.6	2.5	6
23.08.2025	16.5	6.9	2.4	4.5

*Восстановлено по батиметрическим кривым для объёма и космическим снимкам по площади.

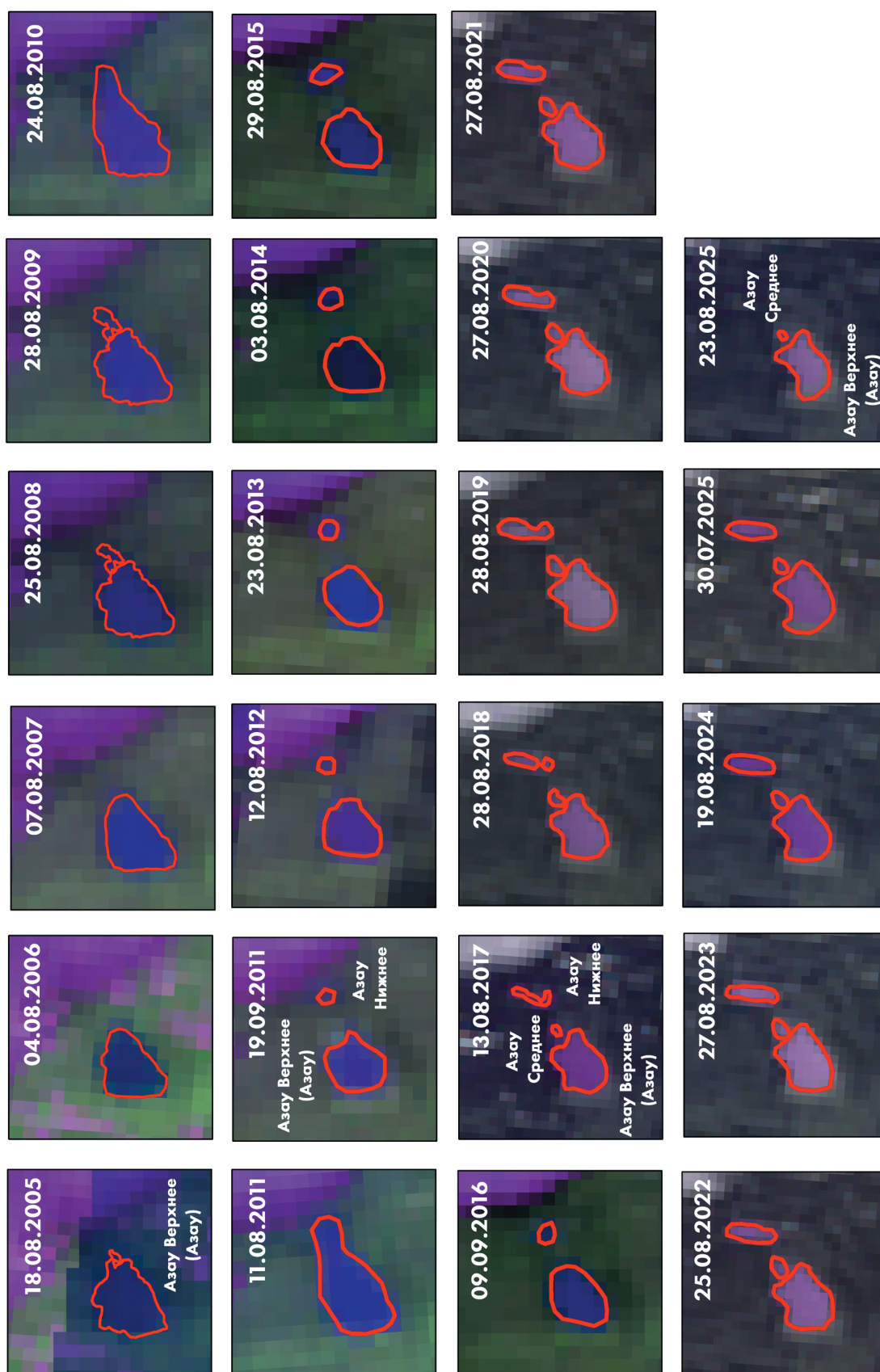


Рис. 6. Динамика озер у ледника Малый Азау с 2005 по 2025 г.
 Fig. 6. Dynamics of lakes near the Maly Azau Glacier from 2005 to 2025.

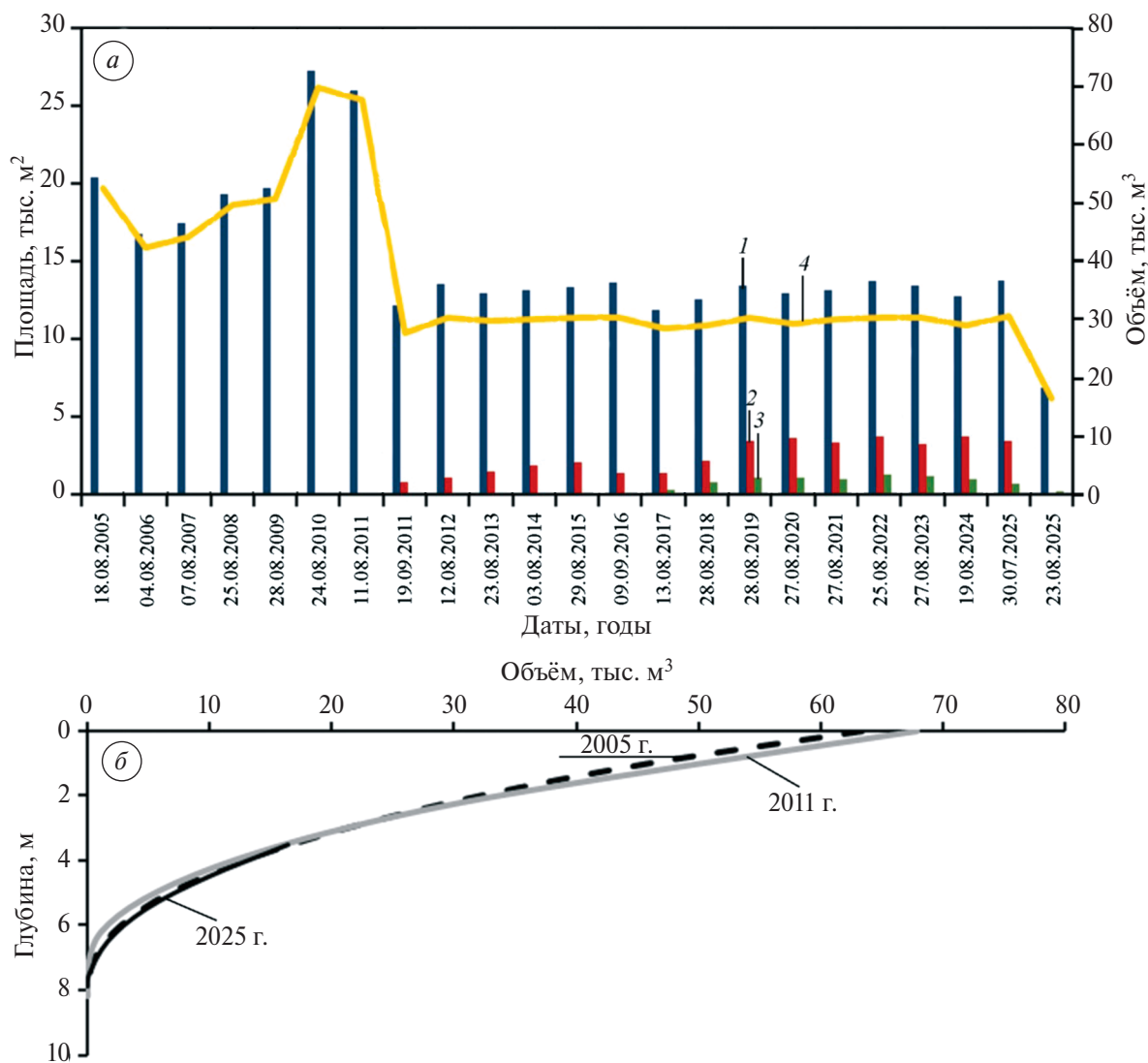


Рис. 7. Изменения площади и объёма озёр у ледника Малый Азау (а): 1 – площадь озера Азау Верхнее, 2 – площадь озера Азау Нижнее, 3 – площадь озера Азау Среднее, 4 – объём озера Азау Верхнее; кривая объёма озера Азау Верхнее (б)

Fig. 7. Changes in the area and volume of lakes near the Maly Azau Glacier (a): 1 – area of Azau Upper Lake, 2 – area of Azau Lower Lake, 3 – area of Azau Middle Lake, 4 – volume of Azau Upper Lake; Azau Upper Lake volume curve (b)

Причины прорыва озера у ледника Малый Азау в 2025 г. Перед прорывом приледникового озера Азау (Азау Верхнее) 6 августа сформировался комплекс метеорологических условий, обусловивших значительный рост притока воды в озеро. Ключевыми факторами стали высокие значения температуры воздуха и интенсивность абляции, усугублённые выпадением жидких осадков в течение двух недель (рис. 8).

Сезон абляции 2025 г. характеризовался поздним началом и исключительно высокой интенсивностью таяния. В районе метеостанции, расположенной на склоне Эльбруса вблизи языка

ледника Гарабаши, деградация сезонного снежного покрова мощностью около 2 м началась лишь в третьей декаде июня, однако к 10 августа его запасы полностью исчерпаны. Наиболее интенсивное таяние наблюдалось в течение двух недель, предшествовавших прорыву. По данным наблюдений на метеостанции, суммарная абляция за этот период превысила 600 мм в водном эквиваленте. По данным наблюдений за абляцией на опорном леднике Джанкуат также наблюдалась активная абляция в предпрорывной период. Так, для опорной рейки № 18, расположенной на языке ледника на высоте 2950 м, в период с 28 июля по 3 августа абляция составила

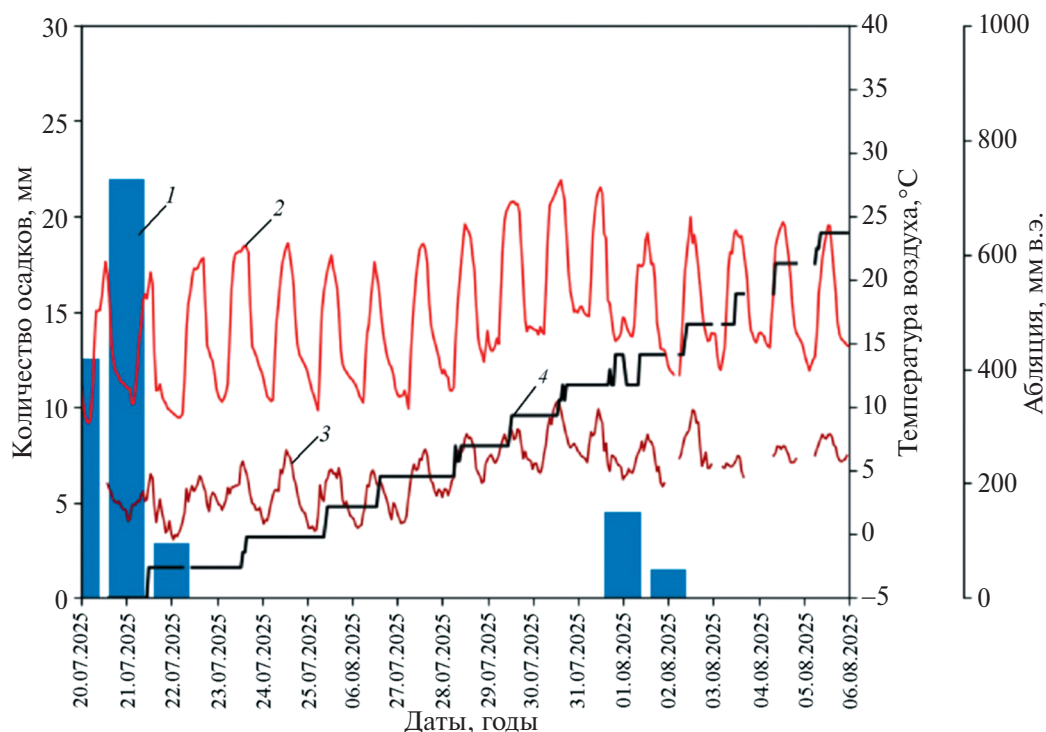


Рис. 8. Метеорологические условия перед прорывом озера Азау (Азау Верхнее) 6.08.2025: 1 – количество осадков, мм (м/ст Азау), 2 – температура воздуха, °С (м/ст Азау), 3 – температура воздуха, °С (м/ст Гарабаша), 4 – кумулятивная абляция, мм водного эквивалента (в.э.) (м/ст Гарабаша)

Fig. 8. Meteorological conditions prior to the outburst of Azau Lake (Azau Upper) on August 6, 2025: 1 – precipitation, mm (Azau), 2 – air temperature, °C (Azau), 3 – air temperature, °C (Garabashi), 4 – cumulative ablation, mm w.e. (Garabashi)

76 мм в.э./сут, тогда как с 3 по 7 августа она увеличилась до 105 мм в.э./сут. За последние 16 лет (2010–2025 гг.) средняя скорость абляции в августе составила 58 мм/сут, что в 2 раза меньше пика с 3 по 7 августа. После 7 августа темп абляции льда вернулся к 70 мм в.э./сут уже к 12 августа.

Непрерывный рост температуры воздуха, которая достигла пиковых значений за несколько дней до события, в сочетании с сохранением положительных температур в ночные часы, минимизировал периоды стабилизации таяния. Это привело к непрерывной и усиленной абляции ледниковой поверхности. Указанный процесс сопровождался осадками (сумма около 45 мм за две недели). Хотя данное количество осадков близко к средним многолетним значениям для данного периода, в сочетании с высокими темпами таяния поверхности ледника и погребённых льдов оно внесло дополнительный вклад в общее увлажнение моренного материала. Также в связи с высокими значениями температуры воздуха таял мёртвый лёд внутри моренной перемычки.

Совокупное воздействие этих факторов обусловило рост притока талых вод в озеро, что

привело к повышению его уровня, увеличению объёма и, как следствие, к росту давления воды на подпруживающую перемычку. Одновременно происходило снижение механической прочности и общее ослабление природной плотины, что в конечном итоге завершилось прорывом и формированием селевого потока.

Механизм прорыва озёр у ледника Малый Азау в 2025 г. В период полевого обследования озера у ледника Малый Азау 23.08.2025, т.е. через 17 дней после прорыва озера, проран из основного озера по-прежнему имел чёткую прямоугольную форму в верхней части (рис. 9, а), боковые стенки его были увлажнены и сложены типичным моренным материалом. Ширина прорана составила 3.6 м, высота отвесной левой (более близкой к леднику) стенки – 1.5 м, суммарная глубина от верхней бровки вреза до тальвега – около 2 м. Высота вреза по правой стороне прорана около 1.3 м, далее моренная перемычка по правому борту полого повышается. Высота полосы осушки также составила 1.3 м (см. рис.9, б). По дну прорана в период обследования наблюдался сток из озера с чётко выраженным суточным ходом, связанным с ходом таяния ледни-

ка. Ниже прорана было расположено остаточное озеро, лежащее на месте старого залива (озеро Азау Среднее) (см. рис. 9, *в*), а озеро Азау Нижнее было полностью опорожнено (см. рис. 9, *г*).

Ниже котловины озера Азау Нижнее, на повороте русла с восточного на юго-восточное направление под правым бортом, на месте современного

русла р. Малый Азау, у языка ледника Малый Азау, сформировался свежий селевой врез (см. рис. 9, *д–е*) с глубиной отвесных стенок до 3.2 м и шириной до 3–3.5 м. Далее вниз по долине селевой поток двигался по руслу р. Малый Азау (рис. 10), в нижней части русла, в районе водопада, в период прохождения селевого потока очевидцы наблюдали “селевой водопад” (см. рис. 10, врезка).



Рис. 9. Фотографии по результатам маршрутного обследования оз. Азау после прорыва в 2025г.: проран (*а*), полоса осушки (*б*), вид от остатков озера Азау Среднее вверх на проран (*в*), дно полностью спустившегося озера Азау Нижнее (*г*), свежий селевой врез по ходу движения прорывного паводка у ледника Малый Азау (*д–е*)

Fig. 9. Photographs from the field survey of Azau Lake following its 2025 outburst: dam break (*a*), exposed dry shoreline (*b*), view from the drained Azau Middle Lake up towards the dam break (*в*), bed of completely drained Azau Lower Lake (*г*), fresh debris flow incision along the path of the outburst flood near the Maly Azau Glacier (*д–е*)



Рис. 10. Схема движения прорывного паводка, врезка – “селевой водопад” ниже по течению р. Малый Азау (подложка – снимок Google Earth)

Fig. 10. Scheme of the outburst flood moving, inset shows the “mudflow waterfall” downstream on the Malyy Azau River (background – Google Earth image)

Полученные данные полевых наблюдений хорошо согласуются с анализом метеообстановки в период до прорыва озера и позволяют описать предположительный механизм его прорыва. Наиболее вероятно, в период экстремально высоких температур внутри моренной перемычки мог активно таять мёртвый лёд (о его наличии свидетельствуют влажные стенки прорана и вертикальная форма вреза), при этом материал перемычки был переувлажнён. В это же время, вследствие высоких температур воздуха и активной абляции, был повышенный сток воды из основного озера в нижние, что могло привести к срыву отсыпки и интенсивным вертикальным размывам русла (глубинной эрозии) в пределах запруды (моренной перемычки). По мере нарастания расходов воды начался прорывной паводок и сформировался проран в запруде. Врезание прорана шло до базиса эрозии, определявшегося положением дна озера Азау Среднее. В процессе прорыва вместе с водами верхнего озера полностью вовлечены в поток и воды озера Азау Нижнее, днище которого характеризовалось значительным уклоном.

Объём прорыва из основного озера, полученный по оценкам на основе батиметрических кривых предшествующих лет, составил 14 тыс. м³. С учётом возможной погрешности при совмещении кривых объёмов ± 0.2 м погрешность оценки объёма прорывного паводка может составлять ± 2 тыс. м³. Из озера Азау Нижнее, с учётом его небольшой средней глубины (по визуальным оценкам не более 1–1.5 м) и площади 3.5 тыс. м², могло дополнительно излиться до 3.5–5 тыс. м³. Таким образом, суммарный максимальный объём прорывного паводка составил 17 ± 2 тыс. м³.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прорыв озера Малый Азау вызвал повышение уровня воды в р. Баксан и рост мутности воды, которые зафиксированы логгерами, установленными в створах пос. Нейтрино и на гидропостах города Тырныауз и села Заюково. Максимальные уровни воды в створе пос. Нейтрино зафиксированы в районе 17:00 (таким образом, время добега прорывного паводка до створа пос. Нейтрино составило около 1.5 часов). На участке

от пос. Терскол до пос. Нейтрино многочислен- ные фотографии и видеосъёмки местных жите- лей и данные установленной нами на сезон абля- ции фотолоушки для съёмки состояния русла р. Баксан в створе моста у пос. Нейтрино фикси- руют значительное повышение мутности воды. О генезисе наносов, включающих значительную долю пород вулканического характера из эрози- онных врезов на склонах Эльбруса, также свиде- тельствует нетипичный рыже-бурый цвет воды р. Баксан в момент прохождения волны прорывно- го паводка. В дальнейшем мы планируем более детальный анализ механизмов трансформации волны паводка и вклада различных факторов на основе комплексного моделирования с при- влечением модели формирования стока и гид- родинамической модели, что является важным шагом для совершенствования методов прогно- зирования подобных событий в будущем.

Анализ условий, предшествовавших собы- тию, позволяет идентифицировать в качестве главного триггера прорыва продолжительный период положительных температур воздуха, вызвавший интенсивную абляцию и таяние ледяного ядра моренной перемычки. Для ин- терпретации полученных данных в контексте прогнозирования применена методика краткосрочного селевого прогноза (Сейнова и др., 2018). Данная методика, основанная на анализе многолетних рядов наблюдений (1951–2017 гг.), позволяет выполнять фоновый прогноз гляци- альных селей на основе репрезентативных дан- ных метеостанции “Терскол” для выявления метеорологических факторов и установления корреляционных связей, необходимых для про- гнозирования. К числу ключевых параметров

для гляциальной зоны Центрального Кавказа ав- торы относят: сумму среднесуточных температур воздуха от даты устойчивого перехода через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до даты события (Q), сумму осадков за тот же период (W), сумму температур за шесть суток до события (ΣT), а также прогнозные значения суточных осадков (X) и температуры воздуха (T). В рамках исследования ретроспективный ана- лиз проводился по данным метеостанции “Азау” (2320 м), поскольку доступ к исходным данным метеостанции “Терскол” (2100 м), использован- ной в методике, был ограничен.

Сравнительный анализ (табл. 3) показал, что в период, предшествующий прорыву озера Малый Азау, практически все критические поро- говые значения метеопараметров, установлен- ные в методике, были превышены в 1.5–2 раза. Исключение составил параметр X (количество осадков), существенных осадков в день прорыва зафиксировано не было. По данным метеостан- ции “Терскол” рассчитаны критические мете- опараметры для предшествующих прорывных событий в 1978 и 2011 гг. Так как в 2011 г. дата прорыва озера осталась неизвестна в связи с огра- ниченным посещением Приэльбрусья в этот пе- риод, критические значения рассчитаны только для двух параметров по состоянию на 22.08.2011, когда озеро достигало максимальных размеров (Докукин, Хаткутов, 2016). В 1978 г. превышены только несколько пороговых значений (W , ΣT и T), осадков в день события опять же не наблю- далось. В 2011 г. превышены пороговые значе- ния суммы среднесуточных температур воздуха от даты устойчивого перехода через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до даты события и суммы осадков за тот же период. Ре- зультаты сравнения указывают на то, что в случае

Таблица 3. Количественные значения метеопараметров по данным метеостанции “Азау” перед прорывом озера Азау (Азау Верхнее) 6.08.2025 и по данным метеостанции “Терскол” для пороговых значений и значений перед прорывами 2011 и 1978 гг.

Table 3. Quantitative values of meteorological parameters from the “Azau” weather station before the Azau Lake (Azau Upper) outburst on August 6, 2025, and from the “Terskol” weather station before the outbursts in 2011 and 1978

Параметр	Q , $^{\circ}\text{C}$	W , мм	ΣT (6 сут.), $^{\circ}\text{C}$	X , мм	T , $^{\circ}\text{C}$
Критические значения согласно (Сейнова и др., 2018)	670	180	72	20	9
06.08.2025	1153	579	110	0	17.5
22.08.2011	1276	356	–	–	–
19.07.1978	634	181	86	0	11

Примечание: Q – сумма среднесуточных температур воздуха от даты устойчивого перехода через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до даты события, W – сумма осадков за тот же период, ΣT – сумма температур за 6 суток до события, X – суточные осадки, T – температура воздуха.

Note: Q – sum of mean daily air temperatures from the date of a stable transition above $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ to the event date; W – total precipitation for the same period; ΣT – sum of temperatures for 6 days preceding the event; X – daily precipitation; T – air temperature.

прорывов озера Азау основным триггером события преимущественно выступает не ливневый, а температурный фактор.

Озёра у ледника Малый Азау с момента их появления в XXI веке прошли как минимум три цикла развития (Черноморец, 2005) между зафиксированными прорывами в 1978, 2011 и 2025 гг. Время между повторными прорывами сократилось на фоне усиления таяния и отступления ледника Малый Азау. Вследствие разрушения ледяного ядра моренной плотины происходит ослабление её удерживающей способности, и возможны новые прорывы озёр у ледника Малый Азау после их наполнения. Однако последующие прорывы озера будут характеризоваться меньшими объёмами паводка в связи с невысокой высотой удерживающей перемычки. Не исключено формирование новых озёр у ледника Малый Азау в будущем, что требует комплексного мониторинга моренно-ледникового комплекса.

ВЫВОДЫ

За последние 25 лет ледниково-озёрный комплекс Малый Азау существенно трансформировался. Площадь ледника сократилась на 14% с 9.1 ± 0.4 км² в 2000 г. до 7.9 ± 0.1 км² в 2025 г., причём за последнюю пентаду 2020–2025 гг. сокращение составило –7.2% – столько же, сколько за предыдущие 20 лет. В результате продолжающейся деградации и отступления ледника площадь и объём озера росли вплоть до 2011 г. По состоянию на 26.07.2011 площадь озера составляла 26 тыс. м², объём озера – 67.7 тыс. м³. После прорыва озера в 2011 г. площадь озера уменьшилась до 12.2 тыс. м², объём – до 27.9 тыс. м³. В результате последующего прорыва озера в 2025 г. объём уменьшился до 16.5 тыс. м³, площадь – до 6.9 тыс. м². Относительно максимальных объёмов озера, наблюдавшихся в 2005–2011 гг., объём озера в настоящее время составляет всего 25%.

Основным триггером прорыва озера в 2025 г. выступила температура воздуха, вызвавшая интенсивную абляцию ледника, рост притока воды в озеро, таяние мёртвого льда в моренной плотине и снижение её механической прочности. Температура воздуха за несколько дней до прорыва составляла около 8 °С по данным метеостанции “Гарабаши” и 18 °С – по метеостанции “Азау”. По данным наблюдений суммарная абляция за две недели до прорыва превысила 600 мм в водном эквиваленте. По данным наблюдений, на опорном леднике Джанкуат в предпрорывной

период также наблюдалась активная абляция, составлявшая с 3 по 7 августа до 105 мм в.э./сут. Высокие значения температуры воздуха сопровождалась интенсивными осадками (сумма около 45 мм за две недели), которые усугубили состояние моренного массива, насытив его влагой. Объём прорыва из основного озера Азау Верхнее составил 14 тыс. м³, из озера Азау Нижнее могло дополнительно излиться до 3.5–5 тыс. м³. Таким образом, суммарный объём прорывного паводка составил 17 ± 2 тыс. м³.

Озёра у ледника Малый Азау, появившиеся в XX веке, прошли минимум три полных цикла между прорывами 1978, 2011 и 2025 гг. Ключевая тенденция – сокращение интервалов между этими событиями на фоне усиления таяния ледника и снижение объёмов прорывного паводка.

Полученные результаты демонстрируют необходимость дальнейшего мониторинга приледникового комплекса из-за возможного повторного прорыва после наполнения озера и продолжающегося отступления ледника Малый Азау.

Благодарности. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-77-10049 (Анализ динамики ледниково-озерного комплекса Малый Азау за последние 20 лет и причин прорыва в 2025 г.). Обработка и анализ материалов батиметрических съёмки проводились в рамках темы Государственного задания Института водных проблем РАН № FMWZ-2025-0003. Оценка объёмов прорывного паводка и времени добегаания выполнена по планам НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова “Эрозионно-русловые системы: гидрологический режим, природно-антропогенные трансформации и прогноз опасных проявлений”. Авторы выражают благодарность Дмитрию Александровичу Петракову за участие в полевых работах в 2011 г. и предоставление результатов батиметрических съёмки.

Acknowledgements. The research was supported by Russian Science Foundation, grant no. 25-77-10049 (analysis of the dynamics of the Maly Azau glacial lake complex over the last 20 years and the causes of the 2025 outburst). The processing and analysis of bathymetric survey data were carried out under the State Assignment of the Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, no. FMWZ-2025-0003. The outburst flood volume

and lag time were carried out according to the State Task of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes at Moscow State University “Erosion-channel systems: hydrological regime, natural and anthropogenic transformations, and forecast of hazardous processes”. The authors are grateful to Dmitry Aleksandrovich Petrakov for his participation in the 2011 fieldwork and for providing the results of bathymetric surveys.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Шагин С.И.* Динамика озер ледника Большой Азау на Эльбрусе // Криосфера Земли. 2023. Т. 27. № 1. С. 45–57.
<https://doi.org/10.15372/KZ20230105>
- 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.
<https://doi.org/10.46698/VNC.2024.85.56.001>
- Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Багов А.М., Маркина А.В.* О перестройке гидрографической сети северо-восточного подножия Эльбруса // Лёд и Снег. 2012. № 2 (118). С. 23–30.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-2-23-30>
- Докукин М.Д., Хаткутов А.В.* Озёра у ледника Малый Азау на Эльбрусе: динамика и прорывы // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 4. С. 472–479.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-4-472-479>
- Докукин М.Д., Шагин С.И.* Особенности динамики ледниковых озёр с подземными каналами стока (анализ разновременной аэрокосмической информации) // Криосфера Земли. 2014. Т. 18. № 2. С. 47–56.
- Зимницкий А.В.* Современное состояние и динамика приледниковых озёр бассейна р. Баксан // Материалы гляциологических исследований. 2007. № 102. С. 161–167.
- Запорожченко Э.В.* Селевые потоки по рр. Кара-Кая-Су и Бирджалы-Су в Кабардино-Балкарии: сравнительный анализ прошлой и новейшей истории // Вестник Владикавказского научного центра. 2008. Т. 8. № 2. С. 33–43.
- Кидяева В.М., Крыленко И.Н., Крыленко И.В., Петраков Д.А., Черноморец С.С.* Колебания уровня воды в горных ледниковых озёрах Приэльбрусья // Геориск. 2013. Т. 20. № 3. С. 8–15.
- Ковалев П.В.* Современное оледенение бассейна р. Баксана // Материалы Кавказской экспедиции. 1961. Т. 2. С. 3–106.
- Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Муравьев А.Я., Никитин С.А.* Ледники в горах России (Кавказ, Алтай, Камчатка) в первой четверти XXI века // Лёд и Снег. 2023. Т. 63. № 2. С. 157–173.
<https://doi.org/10.31857/S2076673423020114>
- Лаврентьев И.И., Петраков Д.А., Курузов С.С., Коваленко Н.В., Смирнов А.М.* Оценка потенциала развития ледниковых озёр на Центральном Кавказе // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 3. С. 343–360.
<https://doi.org/10.31857/S2076673420030044>
- Мальнева И.В., Сейнова И.Б., Кононова Н.К., Берковченко С.А.* Прогноз гляциальных селей в центральной части Главного Кавказского хребта // Материалы гляциол. исследований. 1990. Вып. 69. С. 50–55.
- Познанин В.Л.* Особенности механизма формирования прорывных гляциальных селей (на примере бассейна реки Темир в Дагестане). Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1978. 145 с.
- Рототаева О.В., Носенко Г.А., Керимов А.М., Курузов С.С., Лаврентьев И.И., Никитин С.А., Керимов А.А., Тарасова Л.Н.* Изменения баланса массы ледника Гарабаши (Эльбрус) на рубеже XX–XXI вв. // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 1. С. 5–22.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-5-22>
- Сейнова И.Б.* Селевые процессы бассейна р. Баксан в последнем тысячелетии (Центральный Кавказ). М., 1997. Деп. в ВИНТИ 1997, № 9763, В97. 295 с.
- Сейнова И.Б., Андреев Ю.Б., Крыленко И.Н., Богаченко Е.М., Феоктистова Е. Г.* Опыт прогнозирования селей в условиях деградации оледенения на Центральном Кавказе // Геориск. 2018. Т. 12. № 4. С. 26–37.
- Сейнова И.Б., Золотарев Е.А.* Ледники и сели Приэльбрусья (эволюция оледенения и селевой активности). М.: Научный мир, 2001. 204 с.
- Торопов П.А., Лаврентьев И.И., Артамонов А.Ю., Дроздов Е.Д., Киселева Т.Д., Абрамов А.А., Сушинцев И.М., Дегтярев А.И., Хайрединова А.Г., Елагина Н.Э.* Гляциологические исследования Института географии РАН на Эльбрусе в 2024 г. // Лёд и Снег. 2024. Т. 64. № 4. С. 480.
- Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.Я., Никитин С.А., Лаврентьев И.И.* Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 3. С. 341–358.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421030093>
- Черноморец С.С.* Селевые очаги до и после катастроф. М.: Научный мир, 2005. 180 с.
- Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М.* Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 2. С. 70–80.

- 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. 2007. Вып. 102. С. 211–215.
- Bazilova V., Kääh A. Mapping Area Changes of Glacial Lakes Using Stacks of Optical Satellite Images // Remote Sensing. 2022. V. 14. P. 5973. <https://doi.org/10.3390/rs14235973>
- Dussaillant I., Hugonnet R., Huss M., Berthier E., Bannwart J., Paul F., Zemp M. Annual mass-change estimates for the world's glaciers // Earth System Science Data. 2025. V. 17. № 5. P. 1977–2006. <https://doi.org/10.5194/essd-17-1977-2025>
- Harrison S., Kargel J.S., Huggel C., Reynolds J., Shugar D.H., Betts R.A., Emmer A., Glasser N., Haritashya U.K., Klimesš J., Reinhardt L., Schaub Y., Wiltshire A., Regmi D., Vilímek V. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods // The Cryosphere. 2018. V. 12. P. 1195–1209. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018>
- Huss M., Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss // Nature Climate Change. 2018. V. 8. № 2. P. 135–140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Y.G., Bogachenko E.M., Krylenko I. V., Petrakov D.A. Modeling of Extreme Hydrological Events in the Baksan River Basin, the Central Caucasus, Russia // Hydrology. 2021. V. 8. № 1. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010024>
- Lützwow N., Veh G., Korup O.A. Global database of historic glacier lake outburst floods // Earth Syst. Sci. Data. 2023. V. 15. P. 2983–3000. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2983-2023>
- O’Gorman L. Subpixel precision of straight-edged shapes for registration and measurement // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 1996. V. 18. P. 746–751. <http://dx.doi.org/10.1109/34.506796>
- Paul F., Bolch T., Frey H., Le Bris R., Mölg N., Rastner P., Barrant N.E., Baumann S., Berthier E., Casey K., Joshi S.P., Kononov V., Nosenko G., Nuth C., Pope A., Racoviteanu A., Raup B., Scharrer K., Steffen S., Winsvold S. On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data // Annals of Glaciology. 2013. V. 54. № 63. P. 171–182. <http://doi.org/10.3189/2013AoG63A296>
- Perov V., Chernomorets S., Budarina O., Savernyuk E., Leontyeva T. Debris flow hazards for mountain regions of Russia: regional features and key events // Natural Hazards. 2017. V. 88. P. 1–37. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2841-3>
- Petrakov D., Shpuntova A., Aleinikov A., Kääh A., Kutuzov S., Lavrentiev I., Stoffel M., Tutubalina O., Usabaliev R. Accelerated glacier shrinkage in the Ak-Shyirak massif, Inner Tien Shan, during 2003–2013 // Science of The Total Environment. 2016. V. 562. P. 364–378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.162>
- Popovnin V., Gubanov A., Lisak V., Toropov P. Recent Mass Balance Anomalies on the Djankuat Glacier, Northern Caucasus // Atmosphere. 2024. V. 15. № 1. <https://doi.org/10.3390/atmos15010107>
- Sommer C., Malz P., Seehaus T.C., Lippl S., Zemp M., Braun M.H. Rapid glacier retreat and downwasting throughout the European Alps in the early 21st century // Nature Communications. 2020. V. 11. № 1. P. 3209. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16818-0>
- Taylor C., Robinson T.R., Dunning S., Carr J.R., Westoby M. Glacial lake outburst floods threaten millions globally // National Community. 2023. V. 14. № 487. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36033-x>
- Tielidze L.G., Nosenko G.A., Khromova T.E., Paul F. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020 // The Cryosphere. 2022. V. 16. № 2. P. 489–504. <https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022>
- Veh G., Wang B.G., Zirzow A., Schmidt C., Lützwow N., Stepapat F., Zhang G., Vogel K., Geertsema M., Clague J.J., Korup O. Progressively smaller glacier lake outburst floods despite worldwide growth in lake area // Nat. Water. 2025. V. 3. P. 271–283. <https://doi.org/10.1038/s44221-025-00388-w>
- Yang L., Zhao G., Mu X., Liu Y., Tian P., Puqiong, Danzengbandian. Historical and projected evolutions of glaciers in response to climate change in High Mountain Asia // Environmental Research. 2023. V. 237. P. 117037. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117037>
- Zemp M., Nussbaumer S.U., Gärtner-Roer I., Bannwart J., Paul F., Hoelzle M. Glacier Change Bulletin No. 4 (2018–2019). World Glacier Monitoring Service. Zurich, Switzerland, 2021. 278 p.
- Zhang G., Carrivick J.L., Emmer A., Shugar D.H., Veh G., Wang Xu., Labeledz C., Mergili M., Mölg N., Huss M., Allen S., Sugiyama S., Lützwow N. Characteristics and changes of glacial lakes and outburst floods // Nat. Rev. Earth Environ. 2024. V. 5. P. 447–462. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00554-w>
- Zhang G., Yao T., Xie H., Wang W., Yang W. An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming // Global and Planetary Change. 2015. V. 131. P. 148–157. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.05.013>

Citation: Pavlyukevich E.D., Krylenko I.N., Kidyayeva V.M., Gubanov A.S., Yudina V.A., Krylenko I.V., Drozdov E.D. Dynamics of Lakes near the Maly Azau Glacier on Mt. Elbrus over the Last 20 Years and Its Outburst in 2025. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2026, 66 (2): 298–318. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526020061

Dynamics of Lakes near the Maly Azau Glacier on Mt. Elbrus over the Last 20 Years and Its Outburst in 2025

© 2026 E. D. Pavlyukevich^{a,b*}, I. N. Krylenko^{a,c}, V. M. Kidyayeva^{a,c}, A. S. Gubanov^{a,c}, V. A. Yudina^{a,c}, I. V. Krylenko^c, E. D. Drozdov^{c,d}

^aWater Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^bHSE University, Moscow, Russia

^cLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^dInstitute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com

Received December 19, 2025; revised February 1, 2026; accepted March 23, 2026

This study examines the mechanisms and causes of the Azau Lake outburst on August 6, 2025. Based on remote sensing data and bathymetric surveys, the principal changes in the Maly Azau Glacier and the lakes forming within its moraine complex have been identified. The area of the Maly Azau Glacier decreased by 14% between 2000 and 2025 (from 9.1 ± 0.4 km² in 2000 to 7.9 ± 0.1 km² in 2025), with the reduction during the most recent five-year period (2020–2025) amounting to 7.2%, equivalent to the total reduction over the preceding 20 years. Glacier degradation has led to an increase in the number of proglacial lakes in the deglaciated area, changes in their extent and quantity, as well as significant outburst events in 2011 and 2025. As a result of the 2025 Azau Lake outburst, the lake's volume and area decreased by more than half, while the “lower” lake was completely drained. According to our estimates, the total volume of the outburst flood was 17 ± 2 thousand m³, and the current volume of Azau Lake is 16.5 thousand m³. Relative to the maximum lake volumes observed in 2005–2011, the current lake volume represents only 25%. The primary trigger for the 2025 lake outburst was intensive glacier ablation caused by elevated air temperatures, which resulted in increased water inflow to and outflow from the lake, oversaturation of the moraine dam – likely exacerbated by melting of buried dead ice within it – and its subsequent erosion at the site of the current drainage channel. The lakes near the Maly Azau Glacier, which formed in the 20th century, have undergone at least three complete cycles between the outbursts of 1978, 2011, and 2025. The key trend observed is the shortening of intervals between these events against the backdrop of intensified glacier melting. Nevertheless, a decrease in outburst flood volumes has been noted. The findings demonstrate the necessity of continued monitoring of the proglacial complex to provide early warning of future outburst events and to assess the potential formation of new lakes.

Keywords: mountain hydrology, glacier degradation, glacial lakes, glacial lake outburst flood (GLOF), Central Caucasus

REFERENCES

- Adzhiev A.Kh., Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R. Kh., Savernyuk E.A., Shagin S.I. Dynamics of lakes of the Bolshoy Azau Glacier on Elbrus. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2023, 27 (1): 45–57. <https://doi.org/10.15372/KZ20230105> [In Russian].
- Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Shagin S.I., Akaev A.R. Mechanisms of Elbrus lakes outburst. *Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Tsentra. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center*. 2024, 24 (3): 73–84. <https://doi.org/10.46698/VNC.2024.85.56.001> [In Russian].
- Dokukin M.D., Savernyuk E.A., Bagov A.M., Markina A.V. On the restructuring of the drainage network of the base of Mount Elbrus. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2012, (2) 118: 23–30. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-2-23-30> [In Russian].
- Dokukin M.D., Khatkutov A.V. Lakes near the glacier Maliy Azau on the Elbrus (Central Caucasus): dynamics and outbursts. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2016, 56 (4): 472–479. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-4-472-479> [In Russian].
- Dokukin M.D., Shagin S.I. Features of dynamics of glacial lakes with underground drain channels (Analysis of multi-temporal aerospace information). *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2014, 18 (2): 47–56. [In Russian].
- Zimnitsky A.V. Current State and Dynamics of Proglacial Lakes in the Baksan River Basin. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 2007, 102: 161–167. [In Russian].

- Zaporozhchenko E.V. Debris flows along the Kara-Kaya-Su and Birdzhali-Su rivers in Kabardino-Balkaria: comparative analysis of past and recent history. *Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Tsentra*. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2008, 8 (2): 33–43. [In Russian].
- Kidyaeva V.M., Krylenko I.N., Krylenko I.V., Petrakov D.A., Chernomorets S.S. Water level fluctuations in mountain-glacier lakes in the Elbrus region. *Georisk*. 2013, 20 (3): 8–15. [In Russian].
- Kovalev P.V. Modern glaciation of the Baksan River basin. *Materialy Kavkazskoi Ekspeditsii*. Materials of the Caucasian Expedition. 1961, 2: 3–106. [In Russian].
- Kotlyakov V.M., Khromova T.E., Nosenko G.A., Muravyev A.Ya., Nikitin S.A. Glaciers in the Russian Mountains (Caucasus, Altai, Kamchatka) in the First Quarter of the 21st Century. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2023, 63 (2): 157–173.
<https://doi.org/10.31857/S2076673423020114> [In Russian].
- Lavrentiev I.I., Petrakov D.A., Kutuzov S.S., Kovalenko N.V., Smirnov A.M. Assessment of glacier lakes development potential in the Central Caucasus. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (3): 343–360.
<https://doi.org/10.31857/S2076673420030044> [In Russian].
- Malneva I.V., Seinova I.B., Kononova N.K., Berkovchenko S.A. Forecast of glacial debris flows in the central part of the Main Caucasian Ridge. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1990, 69: 50–55. [In Russian].
- Poznanin V.L. *Osobennosti mekhanizma formirovaniya proryvnykh glyatsial'nykh selei (na primere basseyna reki Temir v Dagestane)*. Features of the mechanism of formation of outburst glacial debris flows (on the example of the Temir River basin in Dagestan). PhD. Moscow: Lomonosov Moscow State University. 1978: 145 p. [In Russian].
- Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Kerimov A.M., Kutuzov S.S., Lavrentiev I.I., Nikitin S.A., Kerimov A.A., Tarasova L.N. Changes of the mass balance of the Garabashy Glacier, Mount Elbrus, at the turn of 20th and 21st centuries. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019, 59 (1): 5–22.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-5-22> [In Russian].
- Seinova I.B. *Selevye protsessy basseyna r. Baksan v poslednem tysyacheletii (Tsentral'nyy Kavkaz)*. Debris flow processes in the Baksan River basin in the last millennium (Central Caucasus). Moscow, 1997: 295 p. [In Russian].
- Seinova I.B., Andreev Yu.B., Krylenko I.N., Bogachenko E.M., Feoktistova E.G. Experience of the debris flows forecast in the conditions of glacier degradation in the Central Caucasus. *Georisk*. 2018, 12 (4): 26–37. [In Russian].
- Seinova I.B., Zolotarev E.A. *Ledniki i seli Priel'brus'ya (evolutsiya oledeneniya i selevoy aktivnosti)*. Glaciers and debris flows of the Elbrus region (evolution of glaciation and debris flow activity). Moscow: Nauchny Mir, 2001: 204 p. [In Russian].
- Toropov P.A., Lavrentiev I.I., Artamonov A.Yu., Drozdov E.D., Kiseleva T.D., Abramov A.A., Sushintsev I.M., Degtyarev A.I., Khayredinova A.G., Elagina N.E. Glaciological studies of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences on Elbrus in 2024. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2024, 64 (4): 480. [In Russian].
- Khromova T.E., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muravyev A.Ya., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I. A New Inventory of the Russian glaciers based on satellite data (2016–2019). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (3): 341–358.
- Chernomorets S.S. *Selevye ochagi do i posle katastrof*. Debris flow centers before and after catastrophes. Moscow: Nauchny Mir, 2005: 180 p. [In Russian].
- Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Aleinikov A.A., Bekkiyev M.Yu., Viskhadzhiyeva K.S., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Kidyaeva V.M., Krylenko V.V., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Rets E.P., Savernyuk E.A., Smirnov A.M. The outburst of Bashkara Glacier Lake (Central Caucasus, Russia) on September 1, 2017. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2018, 22 (2): 70–80. [In Russian].
- Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Seinova I.B., Krylenko I.V. Breakthrough of a glacial lake on the northeastern slope of Elbrus August 11, 2006: Forecast, Event and Consequences. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2007, 102: 211–215. [In Russian].
- Bazilova V., Käb A. Mapping Area Changes of Glacial Lakes Using Stacks of Optical Satellite Images. *Remote Sensing*. 2022, 14: 5973.
<https://doi.org/10.3390/rs14235973>
- Dussaillant I., Hugonnet R., Huss M., Berthier E., Bannwart J., Paul F., Zemp M. Annual mass-change estimates for the world's glaciers. *Earth System Science Data*. 2025, 17 (5): 1977–2006.
<https://doi.org/10.5194/essd-17-1977-2025>
- Harrison S., Kargel J.S., Huggel C., Reynolds J., Shugar D.H., Betts R.A., Emmer A., Glasser N., Haritashya U.K., Klimeš J., Reinhardt L., Schaub Y., Wiltshire A., Regmi D., Vilímek V. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere*. 2018, 12: 1195–1209.
<https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018>
- Huss M., Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*. 2018, 8 (2): 135–140.
<https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Y.G., Bogachenko E.M., Krylenko I.V., Petrakov D.A. Modeling of Extreme Hydrological Events in the Baksan

- River Basin, the Central Caucasus, Russia. *Hydrology*. 2021, 8 (1): 24. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010024>
- Lützow N., Veh G., Korup O.A. Global database of historic glacier lake outburst floods. *Earth System Science Data*. 2023, 15: 2983–3000. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2983-2023>
- O’Gorman L. Subpixel precision of straight-edged shapes for registration and measurement. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1996, 18: 746–751. <http://dx.doi.org/10.1109/34.506796>
- Paul F., Bolch T., Frey H., Le Bris R., Mölg N., Rastner P., Barrand N.E., Baumann S., Berthier E., Casey K., Joshi S.P., Konovalov V., Nosenko G., Nuth C., Pope A., Racoviteanu A., Raup B., Scharrer K., Steffen S., Winsvold S. On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals of Glaciology*. 2013, 54 (63): 171–182. <http://doi.org/10.3189/2013AoG63A296>
- Perov V., Chernomorets S., Budarina O., Savernyuk E., Leontyeva T. Debris flow hazards for mountain regions of Russia: regional features and key events. *Natural Hazards*. 2017, 88: 1–37. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2841-3>
- Petrakov D., Shpuntova A., Aleinikov A., Kääh A., Kutuzov S., Lavrentiev I., Stoffel M., Tutubalina O., Usubaliev R. Accelerated glacier shrinkage in the Ak-Shyirak massif, Inner Tien Shan, during 2003–2013. *Science of The Total Environment*. 2016, 562: 364–378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.162>
- Popovnin V., Gubanov A., Lisak V., Toropov P. Recent Mass Balance Anomalies on the Djankuat Glacier, Northern Caucasus. *Atmosphere*. 2024, 15 (1): 107. <https://doi.org/10.3390/atmos15010107>
- Sommer C., Malz P., Seehaus T.C., Lippl S., Zemp M., Braun M.H. Rapid glacier retreat and downwasting throughout the European Alps in the early 21st century. *Nature Communications*. 2020, 11 (1): 3209. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16818-0>
- Taylor C., Robinson T.R., Dunning S., Carr J.R., Westoby M. Glacial lake outburst floods threaten millions globally. *Nature Communications*. 2023, 14 (487). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36033-x>
- Tielidze L.G., Nosenko G.A., Khromova T.E., Paul F. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020. *The Cryosphere*. 2022, 16 (2): 489–504. <https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022>
- Veh G., Wang B.G., Zirzow A., Schmidt C., Lützow N., Steppat F., Zhang G., Vogel K., Geertsema M., Clague J.J., Korup O. Progressively smaller glacier lake outburst floods despite worldwide growth in lake area. *Nature Water*. 2025, 3: 271–283. <https://doi.org/10.1038/s44221-025-00388-w>
- Yang L., Zhao G., Mu X., Liu Y., Tian P., Puqiong, Danzengbandian. Historical and projected evolutions of glaciers in response to climate change in High Mountain Asia. *Environmental Research*. 2023, 237:117037. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117037>
- Zemp M., Nussbaumer S.U., Gärtner-Roer I., Bannwart J., Paul F., Hoelzle M. Glacier Change Bulletin No. 4 (2018–2019). World Glacier Monitoring Service. Zurich, Switzerland, 2021: 278 p.
- Zhang G., Carrivick J.L., Emmer A., Shugar D.H., Veh G., Wang X., Labeledz C., Mergili M., Mölg N., Huss M., Allen S., Sugiyama S., Lützow N. Characteristics and changes of glacial lakes and outburst floods. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2024, 5: 447–462. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00554-w>
- Zhang G., Yao T., Xie H., Wang W., Yang W. An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming. *Global and Planetary Change*. 2015, 131: 148–157. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.05.013>