

Особенности уровня режима приледниковых моренно-подпрудных озёр в стадии роста (на примере озёр горного массива Таван-Богдо-Ола, Юго-Восточный Алтай)

© 2022 г. В.А. Распутина*, Г.В. Пряхина, Д.А. Ганюшкин, Д.В. Банцев, Н.А. Панютин

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*lerasputina88@gmail.com

The water level regime of periglacial lakes during the growth stage (the lakes of the Tavan-Bogdo-Ola mountain massif, South-Eastern Altai)

V.A. Rasputina*, G.V. Pryakhina, D.A. Ganyushkin, D.V. Bantsev, N.A. Paniutin

¹Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*lerasputina88@gmail.com

Received May 13, 2022 / Revised June 10, 2022 / Accepted July 11, 2022

Keywords: *glacier lakes, moraine lakes, formation of lakes, Altai.*

Summary

Assessment of the dynamics of high-altitude glacial lakes is becoming increasingly important in the context of modern climate instability. The formation of new periglacial lakes and the growth of existing lakes as a result of the reduction of glaciers are recorded almost all over the world, including Russia. A rapid increase of a periglacial lake size may lead to the formation of an outburst flood. In this context, in order to prevent outburst floods, it is necessary to investigate outburst hazard lakes at all stages of their development. The periglacial lakes of the Altai mountains have been little-studied in comparison with other mountainous areas. At the same time, they are also characterized by the formation of new lakes during the period of climate nonstationarity. It was confirmed by the identified statistically significant trends in average monthly air temperatures during the ablation period. Based on the analysis of multi-temporal satellite images, it was found that the number of new periglacial lakes in the high-altitude territories of the Altai Republic (Katunsky ridge, North-Chuya ridge, South-Chuya ridge and the Tavan-Bogdo-Ola mountain massif) is increasing exponentially. For a more detailed survey and field hydrological studies, the authors chose the recently formed periglacial Lake Barsovo and periglacial Lake Gachi-Kol. Both lakes located within the northern slope of the Tavan-Bogdo-Ola mountain massif. Field observations, which were carried out in July-August 2021, have shown that both lakes are currently at the transgressive stage of development (growth stage). The transgressive phase of the lakes development is characterized by a rapid increase in size by the end of the warm period and a complex level regime on both diurnal and annual scales, due to the fact that both lakes are adjacent to the glacier.

Citation: Rasputina V.A., Pryakhina G.V., Ganyushkin D.A., Bantsev D.V., Paniutin N.A. The water level regime of periglacial lakes during the growth stage (the lakes of the Tavan-Bogdo-Ola mountain massif, South-Eastern Altai). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (3): 441–454. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673422030143, edn: jgoyau.

Поступила 13 мая 2022 г. / После доработки 10 июня 2022 г. / Принята к печати 11 июля 2022 г.

Ключевые слова: *приледниковые озёра, моренные озёра, формирование озёр, Алтай.*

На основе анализа изменчивости гидролого-морфометрических характеристик озёр с применением спутниковых изображений и данных полевых гидрологических наблюдений, выполненных авторами в июле – августе 2021 г., описаны особенности гидрологического режима двух приледниковых озёр с трансгрессивной фазой развития, расположенных на территории горного массива Таван-Богдо-Ола (Республика Алтай).

Введение

В условиях современного изменения климата проблема оценки динамики лимногляциальных систем становится всё более значимой в связи с их нестабильностью. Быстрый рост приледникового озера может привести к ослаблению подпруживающей перемычки в результате усиления

воздействия ряда факторов (перелив, интенсивная фильтрация через каналы стока в морене, таяние ядер погребённого льда, вызывающего просадку грунта) и прорыву озера (Виноградова и др., 2017), последствиями которого могут быть серьёзные разрушения территорий, расположенных ниже по долине, и гибель людей. Современные исследования, посвящённые анализу

распространения моренных озёр, их динамика и прорывам (Докукин и Шагин, 2014; Shugar et al., 2020; Harrison et al., 2018; Veh et al., 2019), подтверждают факт образования новых озёр и рост уже существующих в результате сокращения оледенения горных массивов практически по всему миру, в том числе и в России.

В статье (Shugar et al., 2020) рассмотрена динамика приледниковых озёр, их распространение по всему миру на основе спутниковых снимков с 1990 по 2018 г. Анализ показал, что за исследуемый период число озёр и их общая площадь увеличились на 53 и 51% соответственно. Самые быстро растущие озёра (по площади) (Shugar et al., 2020) расположены в скандинавских странах, Исландии и России. Международный коллектив исследователей (Harrison et al., 2018) дал глобальную пространственно-временную оценку прорывных паводков, образующихся при прорывах моренных приледниковых озёр. Для оценки выбраны 165 моренных дамб, расположенных в Альпах, Памире, Тянь-Шане, Гималаях, США и Южной Америке. Эта оценка даёт представление об исторических тенденциях прорывных паводков и их распределении в условиях нынешнего и будущего глобального изменения климата. Установлено возрастание частоты прорывных паводков и их регулярности в 1930 г., что, вероятно, представляет собой запаздывающую реакцию на потепление после малого ледникового периода (Harrison et al., 2018).

Научное исследование учёных из Германии (Veh et al., 2019) посвящено выявлению прорывов моренных озёр в Гималаях на основе анализа спутниковых снимков Landsat с 1980 по 2017 г. В работе (Докукин, Шагин, 2014) приведены данные о динамике ледниковых озёр с подземными каналами стока на территории Кабардино-Балкарской Республики (Центральный Кавказ) и других горных районов.

М.Д. Докукин (Докукин, 2014) на основе материалов ДЗЗ рассмотрел условия формирования и последствия прорывных паводков в Гималаях, Андах и на Алтае, оценил масштабы и установил механизмы прорывов озёр. Учёные из Чехии и Швейцарии в 2013 г. создали онлайн-базу данных прорывов приледниковых озёр, в которой есть информация о местоположении озёр, их типе, подпруживающей перемычке, объёме прорывного паводка и ущербе от прорыва, а также

о том, каким образом произошёл прорыв, каков был триггерный механизм. Однако открытая база данных на настоящий момент охватывает только территории Перуанских Анд, Патагонских Анд и Кордильер (Emmer et al., 2016).

В статье (Черноморец и др., 2015) впервые для территории районов Зебак и Вахан (провинция Бадахшан, горы Северного Афганистана) на основе дешифрирования спутниковых снимков Landsat-8 OLI приведена информация о каталоге озёр, который включает в себя 347 объектов. В нём для каждого озера приведены следующие характеристики: местоположение, площадь, высота уреза воды, положение относительно ледника, тип стока из озера, тип подпруживающей плотины, каскадность и др. Согласно выполненному исследованию, большая часть озёр (60%) подпружена перемычкой, сложенной из моренных отложений.

Высокогорные озёра территории Алтая по сравнению, например, с Кавказом и Гималаями исследованы мало, хотя для высокогорий Алтая в последние годы также характерно образование приледниковых озёр. Так, на территории горного массива Монгун-Тайга (Юго-Восточный Алтай) у ледника № 24 авторы во время полевых работ 2019 г. зафиксировали недавно возникшее и увеличивающееся в размерах оз. Малое (Распутина и др., 2021). Настоящая статья продолжает серию работ, в которых рассматривались вопросы развития моренных приледниковых озёр Юго-Восточного Алтая, гидрологического режима, а также оценки их прорывоопасности (Пряхина и др., 2021; Распутина и др., 2021). Район исследования расположен в пределах высокогорных территорий Республики Алтай (российская часть горного массива Таван-Богдо-Ола, Южно-Чуйский хребет, Северо-Чуйский хребет и Катунский хребет).

Цель исследования — выявить особенности гидрологического режима приледниковых озёр в период трансгрессивной фазы на основе анализа изменчивости гидролого-морфометрических характеристик озёр с использованием спутниковых снимков и данных полевых гидрологических наблюдений. В задачи исследования входило: построение трендов среднемесячных температур воздуха за период абляции (летние месяцы); анализ спутниковых снимков высокогорных территорий Республики Алтай для выявления новых

Спутниковые снимки, используемые при выполнении анализа роста приледниковых озёр

Дата	Спутник	Пространственное разрешение, м	ID снимка
28.07.1977 г.	Landsat-2	60	LM21550261977209AAA03
25.08. – 3.09.1989 г.	Landsat Sensor TM Landsat-4	30	MTN-45-45_LOC LT41430261989246XXX02
22.06. – 12.10.1992 г.	Landsat-5	30	etp144r26_5t19920622 etp144r25_5t19921012
22.07. – 7.08.2000 г.	Landsat-7 Sensor ETM+	15 м	EPP144R025_7F20000722 EPP144R026_7F20000807
24.08. – 26.08.2016 г.	WorldView-2	0,5	1577333 1577334 1763939 1578810 1578873
17.07.2020 г.	Sentinel-2 L2A	10	L1C_T45UWQ_A026471_20200717T051132
1.08.2021 г.	Sentinel-2 L2A	10	L1C_T45UWR_A031905_20210801T050927 L1C_T45UWQ_A031905_20210801T050927

приледниковых озёр, на основе которого были выбраны объекты для более детального исследования; полевые гидрологические работы на выбранных приледниковых озёрах на территории горного массива Таван-Богдо-Ола.

Объекты и методика исследований

Чтобы установить рост числа приледниковых озёр, расположенных на современных моренных отложениях и моренах малого ледникового периода (МЛП) на рассматриваемой территории, выполнен анализ спутниковых снимков за период 1977–2021 гг. в программе ArcMap 10.4.1. На спутниковых снимках озёра выделяли путём визуального дешифрирования (таблица). В качестве объектов исследования выбраны озера Барсово и Гачи-Коль, расположенные в восточной части мощного горно-ледникового комплекса Таван-Богдо-Ола (рис. 1), который считается вторым по величине крупнейшим центром оледенения Алтая с суммарной площадью ледников 192,39 км². За последние 44 года оледенение массива Таван-Богдо-Ола сократилось на 27,6% (Ganyushkin et al., 2022).

В рассматриваемом районе распространены два типа озёр — термокарстовые и моренно-подпрудные (Рудой и др., 2000). В высокогорной зоне встречаются главным образом каровые, моренно-подпрудные и ригеле-подпрудные озёра. Моренно-подпрудные озёра присутствуют в каждом горно-ледниковом бассейне и имеют

широкий возрастной диапазон: от современных ледниковых до реликтовых. Сток из таких озёр происходит путём фильтрации сквозь моренные перемычки, и только около одной трети моренно-подпрудных озёр имеют поверхностный открытый сток. По массиву Таван-Богдо-Ола проходит водораздел между бассейном Северного Ледовитого океана и внутренним бассейном котловин Центральной Азии. Выбранные приледниковые озёра Барсово и Гачи-Коль относятся к бассейну р. Аргут (правый приток р. Катунь) и представляют собой приледниковые моренно-подпрудные озёра, которые находятся у языка карового ледника № 12 (Каталог ледников СССР, 1977; Ganyushkin et al., 2022), площадь которого на 2020 г. составляла 0,78 км². В 1977 г. площадь ледника была 1,33 км², т.е. за 44 года площадь ледника сократилась 41%. Скорость отступления края ледника № 12 в период с 1962 по 2001 г. была наибольшей — 5,1 м/год; с 2001 по 2004 г. — наименьшей (0,9 м/год); с 2004 по 2021 г. скорость ледника равнялась 4 м/год. Отступление 1962–1984 гг. получено с использованием АФС и полевых наблюдений, все остальные данные — непосредственно авторами путём полевых наблюдений. Интерес к этим озёрам связан со сложным уречным режимом водоёмов как в суточном, так и в годовом разрезе, а также с возможностью рассмотреть особенности водного режима оз. Гачи-Коль, возникшего у языка ледника около восьми лет назад и в настоящий момент находящегося в активной стадии роста и заполнения своей чаши.

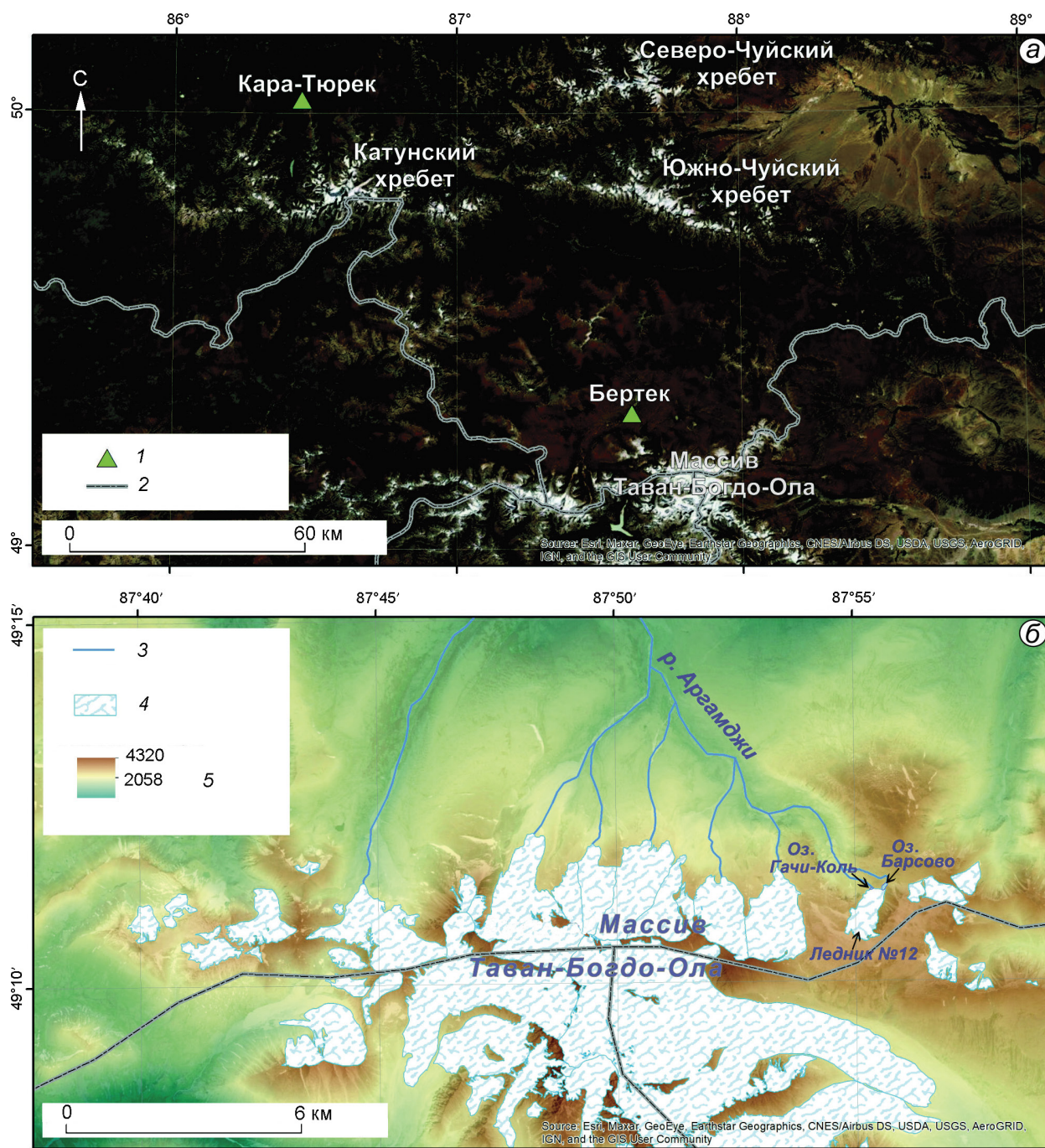


Рис. 1. Объект исследований:

a – схема расположения района исследования; *б* – массив Таван-Богдо-Ола; 1 – метеостанции; 2 – границы государств;

Fig. 1. The object of research:

a – the layout of the research area; *б* – the Tavan-Bogdo-Ola mountain range;

1 – weather stations; 2 – borders of states; 3 – hydrography; 4 – glaciers; 5 – elevation marks, m

В рамках комплексной экспедиции СПбГУ в июле–августе 2021 г. на озёрах Барсово и Гачи-Коль проведены гидрологические работы с целью исследования гидрологического режима

водоёмов в условиях активной трансгрессивной фазы развития (Пряхина и др., 2021). Гидрологические работы предусматривали: гидрографическое описание объектов, стандартные гидро-

логические наблюдения на временных речных водомерных постах, батиметрические съёмки озёр для получения современной информации о морфометрических характеристиках водоёмов, тахеометрические съёмки прибрежных территорий озёр. Стандартные наблюдения на водомерном посту на оз. Барсово выполняли пять раз в сутки, а на водомерном посту на оз. Гачи-Коль — каждый час с 8:00 до 23:00, так как для обоих озёр установлена значительная внутрисуточная динамика уровня воды. Для оценки внутрисуточного изменения стока ручья, вытекающего из оз. Барсово, измерялись скорости течения при помощи гидрометрической вертушки ИСП-1 с последующим расчётом расходов воды (измерения вели в дневное время с дискретностью два часа).

Батиметрические съёмки озёр выполняли с надувной вёсельной лодки. Для регистрации глубин использовали эхолот-картплоттер Garmin 42-cv (Garmin Ltd., USA). По результатам промеров глубин составляли батиметрические схемы озёр и определяли морфометрические характеристики водоёмов. Батиметрические схемы строили в картографической программе Surfer (Golden Software Inc., USA) путём формирования гридов. Гриды глубин озёр формировались методом интерполяции Kriging. Площади озёр определяли в программе ArcMap 10.4.1 (ESRI Inc., USA) вручную. Объёмы озёр рассчитывали автоматически в программе Surfer (инструмент Grid Volume). Схемы оформляли в программе ArcMap 10.4.1. Тахеометрическую съёмку прибрежной территории озёр вели с использованием тахеометра Trimble M3 DR 5" (Trimble Navigation Ltd, USA). Данные обрабатывались по методике, описанной в работе (Попов, Боронина, 2019). Для измерения температуры и влажности воздуха в районе проведения полевых работ был установлен метеодатчик EClerk-M-RHT, который записывал метеорологические характеристики с дискретностью 10 мин.

Результаты исследований

Анализ спутниковых снимков высокого разрешения Республики Алтай за отдельные годы (1977, 1989, 1992, 2000, 2016, 2020, 2021 гг.) позволил определить рост числа новых озёр в связи с отступанием ледников и потеплением климата за последние 44 года (рис. 2, а, б). Озёра формиру-

ются на современных моренах и моренах МЛП, в основном на территориях, высвобождающихся от ледника, в его приязыковой части.

Рост числа приледниковых озёр — результат деградации ледников и дегляциации территории в результате изменения климата, которое, согласно (Второй оценочный доклад..., 2014), началось в конце 1970 г. Подтверждением считаются положительные статистически значимые тренды среднемесячной температуры воздуха периода абляции (июнь, июль и август) за период 1980–2020 гг. (рис. 3), полученные по данным метеостанций (м/с) Бертек и Кара-Тюрек. Метеостанция Бертек расположена на высоте 2146 м в 21 км к северо-западу от массива Таван-Богдо-Ола, а м/с Кара-Тюрек — в 16 км к северу от Катунского хребта на высоте 2596 м (см. рис. 1). В связи с закрытием м/с Бертек в 1980-е годы ряды среднемесячных температур воздуха восстановлены с использованием данных м/с Кош-Агач (величина корреляции между рядами значений температуры воздуха на м/с Бертек и Кош-Агач за совместный период наблюдений составила 0,9) (Ганюшкин и др., 2017). Проверка рядов годовых сумм осадков на значимость показала отсутствие значимых трендов.

На графике (см. рис. 2, а, б) видно, что активный рост числа новых озёр начался с середины 1990 г., что связано с запаздывающей реакцией на повышение температуры воздуха. Рост числа озёр происходит нелинейно. Выборочный анализ спутниковых снимков за период 2000–2021 гг. позволил проследить изменения площадей озёр Барсово (см. рис. 2, в) и Гачи-Коль (см. рис. 2, г) в разные сезоны года (площадь озёр определялась в программе ArcMap 10.4.1 вручную). К концу периода абляции площади озёр ежегодно увеличиваются (см. рис. 3), причём по экспоненциальной зависимости. Так, площадь оз. Барсово с 2010 по 2021 г. возросла на 66%. Что касается оз. Гачи-Коль, то в августе 2010 г. на спутниковом снимке оно ещё не дешифрируется (на его месте край ледника), но в 2016 г. площадь озера уже составила 698 м², а в 2021 г. — 6506 м². Таким образом, за последние пять лет размеры озера увеличились в девять раз.

Анализ спутниковых снимков Sentinel-2 L2A за осенне-зимний период показал значительное сокращение площади оз. Барсово и полное исчезновение оз. Гачи-Коль. В связи с этим авто-

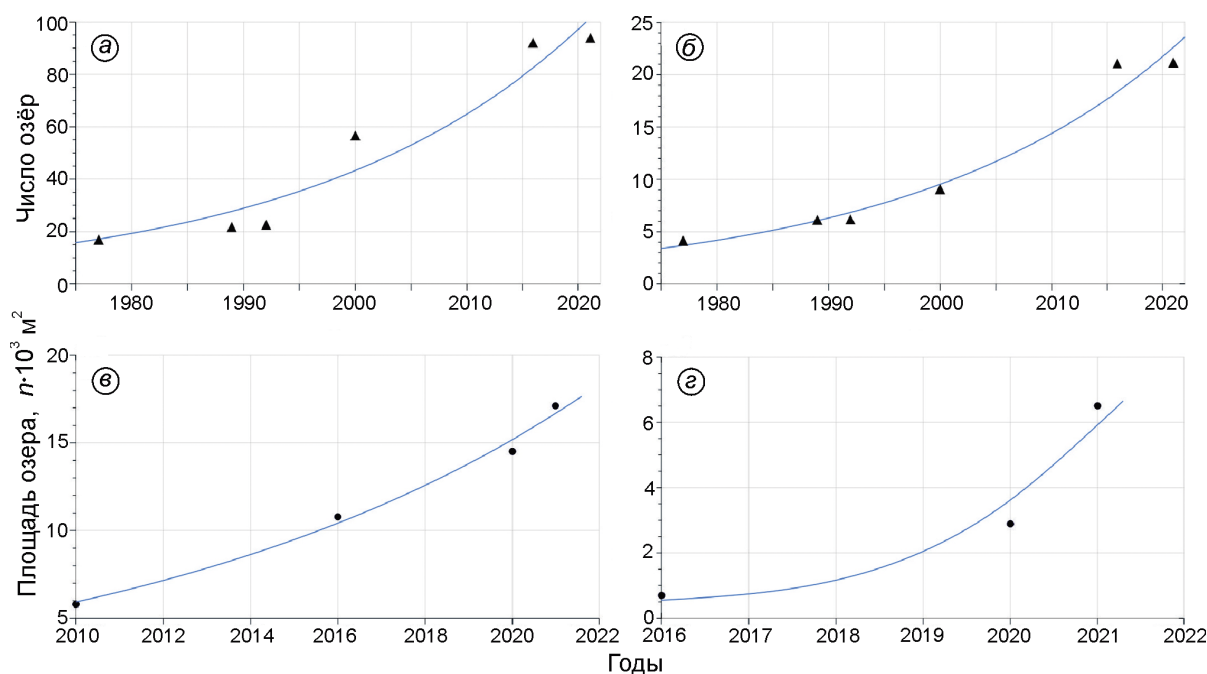


Рис. 2. Рост числа приледниковых озёр:

a – на территории Республики Алтай (массив Таван-Богдо-Ола, Северо-Чуйский, Южно-Чуйский и Катунский хребты); *б* – на территории массива Таван-Богдо-Ола; *в* – рост площади оз. Барсово; *г* – рост площади оз. Гачи-Коль

Fig. 2. The increase in the number of glacial lakes:

a – on the territory of the Altai Republic (Tavan-Bogdo-Ola massif, Severo-Chuysky, Yuzhno-Chuysky and Katunsky ridges); *b* – on the territory of the Tavan-Bogdo-Ola massif; *v* – the growth of the area of lake Barsovo; *z* – the growth of the area of lake Gachi-Kol

ры более детально рассмотрели изменение размеров зеркала водоёмов внутри года с января 2021 по январь 2022 г. Анализ изменения площадей в годовом аспекте показал, что за зимний период площадь оз. Барсово изменяется незначительно ($10\,267 \text{ м}^2$), в весенний период она увеличивается до $14\,287 \text{ м}^2$ и остаётся стабильной до середины июня. В период максимальной абляции (июль–август) площадь озера достигает $17\,112 \text{ м}^2$, а с сентября начинает уменьшаться с $16\,820 \text{ м}^2$ до $12\,141 \text{ м}^2$ в ноябре. В январе площадь равна $10\,837 \text{ м}^2$, сократившись за осенне-зимний период 2021–2022 гг. на 37% относительно своего максимального значения. Оз. Гачи-Коль, согласно анализу разновременных спутниковых снимков, существует только в период абляции (конец июня – середина сентября). Причинами такой динамики считается наличие фильтрационных каналов стока, обеспечивающих сброс озёрных вод через моренную перемычку и более глубокий отток воды в результате водообмена с подземными горизонтами. С прекращением таяния ледника оба озера лишаются основного источника питания, в результате оз. Барсово

уменьшается в размерах, а оз. Гачи-Коль прекращает существовать из-за малых размеров (максимальная глубина не превышает 2,5 м).

Результаты полевых исследований

По материалам полевых исследований впервые сделаны гидрографические описания озёр и определены их морфометрические характеристики.

Озеро Барсово (рис. 4, *a*). Котловина озера вытянута с юго-запада на северо-восток (см. рис. 4, *в*). На юге примыкает к открытой, а на юго-востоке – к забронированной частям ледника № 12 (на забронированную часть ледника приходится 3533 м^2), с запада и севера окружено мореной, в восточной части ограничено коренными породами. Моренные отложения, слагающие подпруживающую перемычку, рыхлые и представлены мелким гравием, суглинками и валунами разных размеров (от 1 мм до 1 м). Сосредоточенный приток в озеро по сравнению с распределённым очень мал. В северной части из озера вытекает ручей (при пониже-

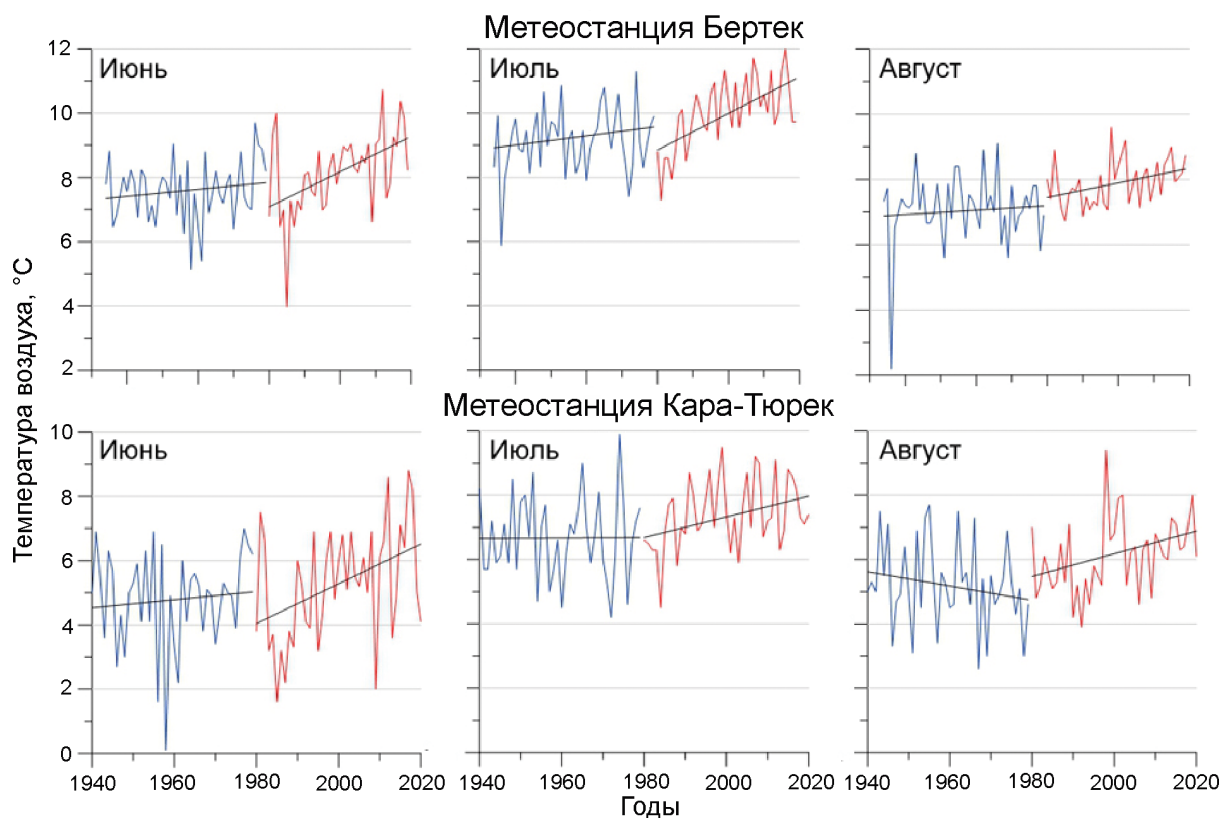


Рис. 3. Тренды среднемесячных температур за летние месяцы для метеостанций Бертек и Кара-Тюрек
Fig. 3. Trends of average monthly temperatures for the summer months for Bertek and Kara-Turek meteorological stations

нии уровня водной поверхности поверхностный сток ручья переходит в подземный, т.е. происходит фильтрация воды через моренную перемычку). Рассчитанный расход воды фильтрационного стока — $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$. В питании озера, кроме талых вод и погребённого льда, участвуют также ручьи, которые образуются при таянии снежников, расположенных на водосборной территории озера, и атмосферные осадки. По результатам батиметрической съёмки площадь зеркала озера и объём водной массы составили $17\,112 \text{ м}^2$ и $126\,778 \text{ м}^3$ соответственно при уровне водной поверхности 3259 м над ур. моря.

Озеро Гачи-Коль. Южная часть озера примыкает к языку ледника № 12 (рис. 5, а, в), северная и восточная части окружены боковой мореной, а в северо-западной части водоём подпружен моренной перемычкой. Моренная перемычка сложена моренным суглинком, гравием и валунами разных размеров (от 1 мм до 1 м). При визуальном обследовании обнаружены фильтрация озёрной воды через тело перемычки, предположительно по фильтрационным каналам, а также

эрозионный врез на гребне моренной перемычки, который сформировался в результате перелива озёрных вод. По результатам тахеометрической съёмки прибрежной территории озера установлено, что фильтрационный канал находится на 2 м ниже максимального уровня воды, предположительно — канал наклонный. Так как озеро непосредственно контактирует с ледником, основные виды питания — ледниковое и снеговое. Отметим, что на момент проведения экспедиционных исследований западнее оз. Гачи-Коль у края ледника № 12 формировалось ещё одно приледниковое озеро, площадь которого в шесть раз меньше оз. Гачи-Коль. По данным батиметрической съёмки площадь акватории озера составила 6506 м^2 при объёме водной массы 5144 м^3 .

Анализ уровня режима. Данные наблюдений за уровнем воды показали, что для обоих озёр характерны внутрисуточные колебания уровня воды, что связано с режимом таяния ледника: рост температуры воздуха приводит к увеличению уровня воды в озёрах (см. рис. 4, б; см. рис. 5, б) и расходов воды в вытекающих ручьях.

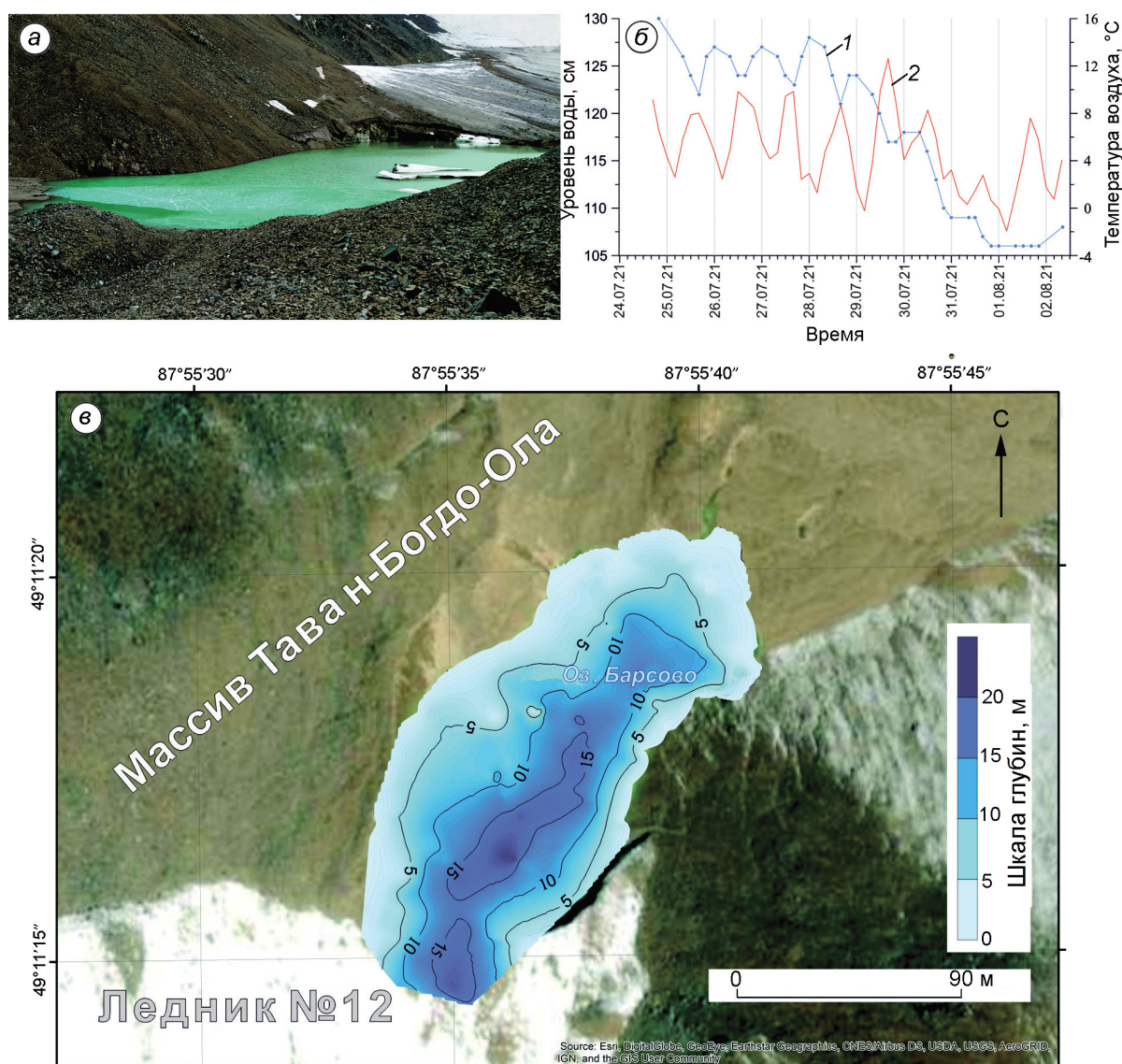


Рис. 4. Оз. Барсово. Фото В.А. Распутиной (а); б – совмещённые графики хода уровня воды оз. Барсово (1) и температуры воздуха (2); в – батиметрическая схема озера.

Fig. 4. Lake Barsovo. Photo of V.A. Rasputina (a); б – combined graphs of the course of the water level of Lake Barsovo (1) and air temperature (2); в – bathymetric diagram of the lake

В период, когда были зафиксированы минимальные температуры воздуха, уровни воды в озёрах были минимальны. Однако временной ход уровня и наступление максимальных и минимальных его значений для озёр Барсово и Гачи-Коль различны. В первом случае суточный минимум значений уровня воды приходился на 16:00 часов, после чего происходил его рост и максимальное значение фиксировалось в 00:00 часов. В случае оз. Гачи-Коль ход уровня воды в озере находился в противофазе с уровнем оз. Барсово: максимум наступал в интервале 15:00–16:00 и не изменялся

около 1–1,5 часов, после чего уровень начинал понижаться и достигал минимальных значений к 00:00 часов. Амплитуда колебания уровня в течение суток достигала 80 см. При повышении уровня воды до 170 см через подпруживающую озеро перемычку начинался перелив озёрных вод, который продолжался до момента, пока уровень воды не становился ниже этого значения, отметим, что во всех случаях фильтрация через морену присутствовала.

Причина неодинакового уровня режима озёр, расположенных в пределах одного лед-

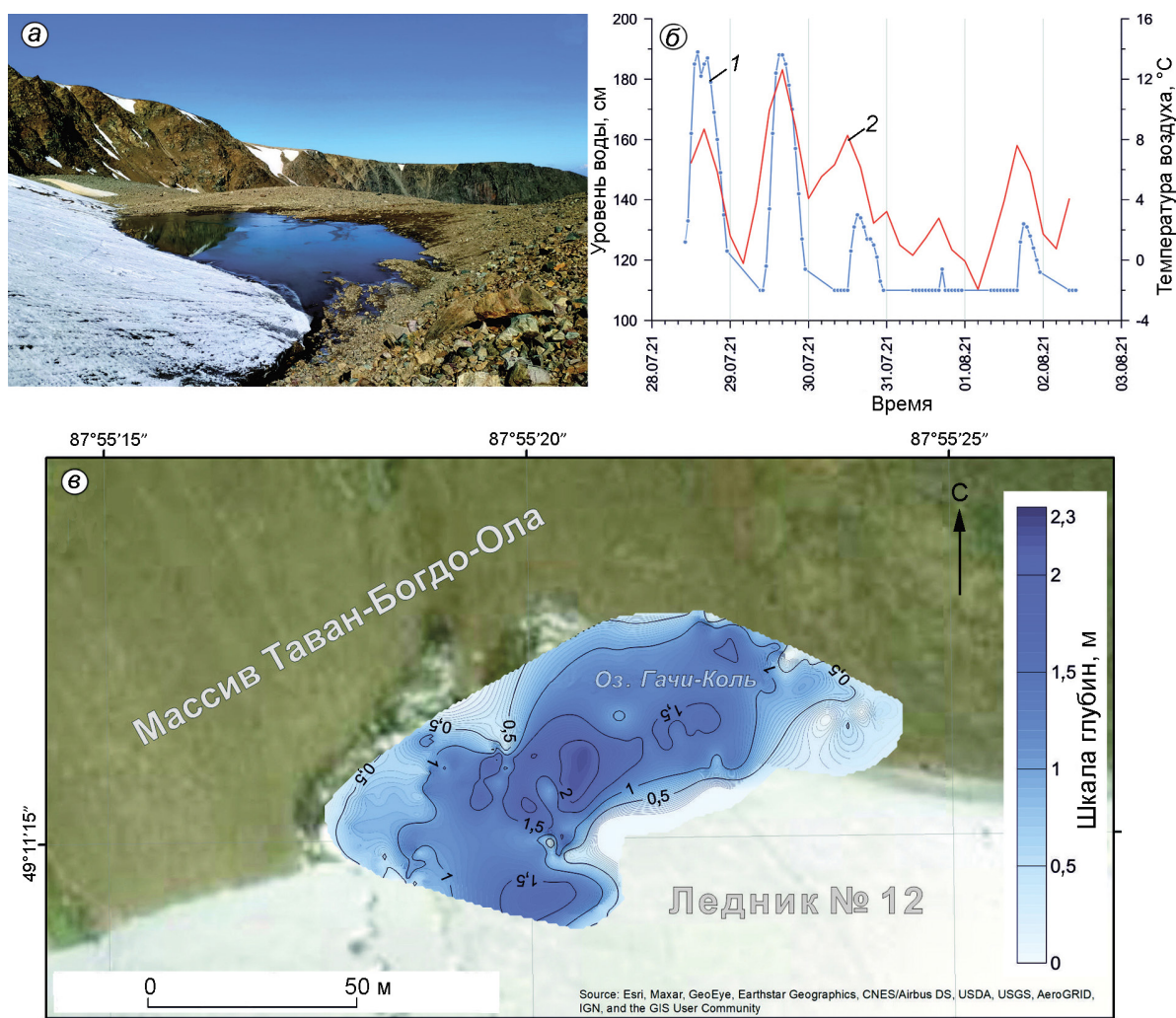


Рис. 5. Оз. Гачи-Коль. Фото В.А. Распутиной (а); б – совмещённые графики хода уровня воды оз. Гачи-Коль (1) и температуры воздуха (2); в – батиметрическая схема озера.

Fig. 5. Photo of Lake Gachi-Kol by V.A. Rasputina (a); б – combined graphs of water level of Lake Gachi-Kol (1) and air temperature (2); в – bathymetric scheme of the lake

ника в непосредственной близости (200 м) друг от друга, – скорость поступления талых ледниковых вод в водоёмы. Для оз. Гачи-Коль максимумы уровней воды совпадают с максимумами температуры воздуха, и талая вода с ледника поступала в озеро без существенной задержки, а максимальная абляция на леднике наблюдалась около 16:00. Для оз. Барсово время добегания составляло около восьми часов, а амплитуда колебаний уровня воды была значительно меньше, чем у оз. Гачи-Коль, и составляла в среднем 10–15 см. В оз. Гачи-Коль приток воды – сосредоточенный, и талые воды поступают по сформированным каналам стока на поверхности ледника. На оз. Барсово сосредоточенный приток

воды с ледника в озеро не выявлен. Вероятно, это связано с тем, что на той части ледника, с которой поступает вода в озеро, распространены трещины, которые могут задерживать поверхностный сток, и вода в водоём приходит с запозданием. В течение всего периода наблюдений часто выпадали дожди, но они не вызвали локальных повышений уровня воды в озёрах.

Для установления пропорционального соотношения поступающих в озёра талых ледниковых вод построены линии тока на леднике № 12 в программе ArcMap 10.4.1 с применением цифровой модели рельефа и инструмента Hydrology. Линии тока позволили установить, какая доля площади ледника участвует в питании озёр.

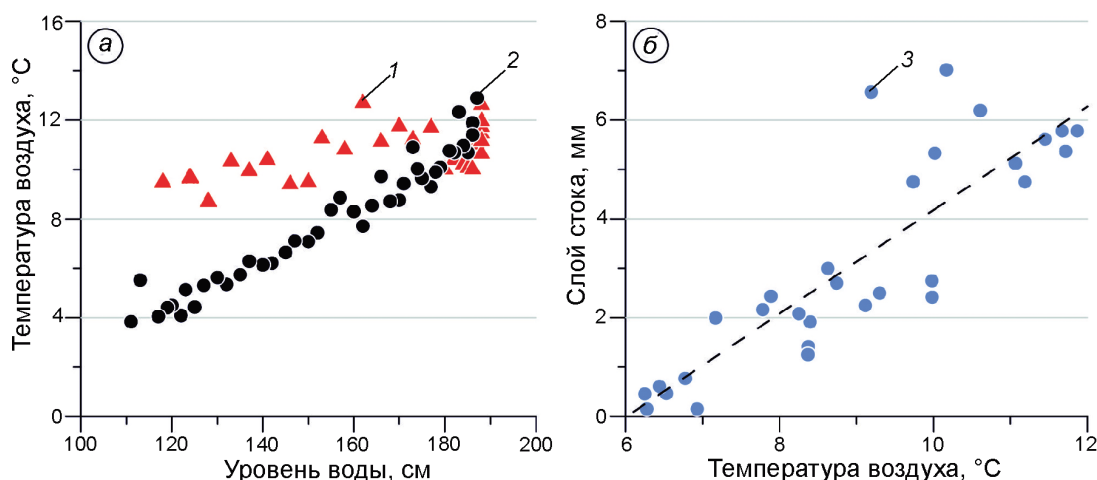


Рис. 6. Зависимость уровня воды оз. Гачи-Коль от температуры воздуха (а): эмпирические точки уровня воды при соответствующей температуре воздуха на росте уровня (1) и на спаде уровня воды (2); б – зависимость слоя стока с ледника № 12 от температуры воздуха (3)

Fig. 6. Dependence of the water level of Lake Gachi-Kol on the air temperature (а): empirical points of the water level at the corresponding air temperature on the rise of the level (1); on the decline of the water level (2); б – dependence of the runoff layer from glacier № 12 on the air temperature (3)

В оз. Гачи-Коль талые воды поступают с 40% площади ледника № 12 (315 550 м²), а в питании оз. Барсово участвует только 2% площади (17 755 м²), на забронированную часть приходится 3533 м². Питание оз. Барсово происходит ещё и за счёт протаивания забронированной части ледника, которое происходит с запаздыванием по сравнению с таянием открытого льда (Резепкин, Поповнин, 2018), что также объясняет разницу во времени формирования талых вод.

На графике связи температуры воздуха и уровней воды оз. Гачи-Коль (рис. 6, а), прослеживаются две ветви, свидетельствующие о нелинейном характере зависимости. При этом верхняя ветвь (треугольники), соответствующая периоду подъёма уровня воды за счёт притока воды с ледника, имеет больший разброс точек и более выраженный нелинейный характер связи уровней с температурой воздуха, что объясняется сложным многофакторным характером связи процессов таяния и водоотдачи на леднике в этот период. После достижения максимальных величин таяния во второй половине дня начинается спад уровней (точки синего цвета). Характер связи в этот период носит практически линейный характер с достаточно высоким коэффициентом детерминации, достигающим $R^2 = 0,9$. В этот период основной фактор, влияющий на процесс водоотдачи, — темпера-

тура воздуха, при понижении которой абляция ледника становится менее интенсивной и сокращается объём поступающей воды.

На характер зависимостей влияют и погодные условия: для 28 и 29 июля зависимости уровня воды от температуры воздуха схожи, так как в эти дни наблюдались одинаковые погодные условия (ясная погода, отсутствие осадков, практически одинаковая температура воздуха). Коэффициенты корреляции между уровнями воды и температурой воздуха составили 0,77 и 0,81 соответственно. 31 июля выпал снег, который до 1 августа лежал на поверхности ледника и окружающей территории. 1 августа подъём уровня воды в озере происходил в основном в результате таяния снега, характер связи изменился, коэффициент корреляции стал значительно меньше и составил 0,54. В качестве примера приведён график для уровня воды 29 июля (см. рис. 6, а).

Детальный анализ колебаний уровня воды в оз. Гачи-Коль позволил выделить в режиме водоёма четыре фазы внутри суток: в фазу 1 происходит приток талых ледниковых вод в озеро и отток озёрных вод через фильтрационный канал; в фазы 2 и 3 — приток талых ледниковых вод в озеро и отток озёрных вод через фильтрационный канал и путём перелива через гребень моренной перемычки (в фазу 2 приток воды больше оттока, а в фазу 3 отток воды превышает

ет приток воды в озеро); в *фазу 4* — только отток озёрных вод через фильтрационный канал, притока талых вод нет. Составлена система балансовых уравнений для расчёта объёмов стока в различные фазы суточного режима:

$$\begin{cases} \Delta W_1 = W_{\text{пр}} - W_{\text{ф}} \\ \Delta W_{2,3} = W_{\text{пр}} - W_{\text{ф}} - W_{\text{перелив}} \\ \Delta W_4 = -W_{\text{ф}} \end{cases}$$

где ΔW — изменение объёма воды (определялось по изменениям уровня воды в разные фазы); $W_{\text{пр}}$ — объём притока воды в озеро; $W_{\text{ф}}$ — объём оттока воды в результате фильтрации; $W_{\text{перелив}}$ — объём оттока воды в результате перелива воды через гребень моренной перемычки (определялось по измеренным расходам воды на вытекающем ручье).

При этом испарение с поверхности воды не учитывалось ввиду его незначительной величины по сравнению с остальными параметрами. Решение системы уравнений позволило определить объём притока талой воды в озеро, а также объём фильтрации через моренную перемычку. Зная площадь ледника, с которой поступает вода в озеро, мы рассчитали слой стока с ледника и построили зависимость слоя стока от температуры воздуха (см. рис. 6, б). Значение коэффициента корреляции между слоями стока и температурой воздуха составило 0,84. Рассчитанные суточные величины слоя стока с ледника достигали 6,8 см, что сопоставимо со средними значениями для рассматриваемой территории (Ресурсы..., 1969). Полученное уравнение связи носит региональный характер и может использоваться для получения оценочных величин жидкого стока с ледников массива Таван-Богдо-Ола. Рассчитанный средний расход воды притока талых вод с ледника в озеро равен 0,75 м³/с, а рассчитанный фильтрационный расход через моренную перемычку в среднем составил 0,21 м³/с.

Трансгрессивная фаза развития озёр (фаза роста). Согласно (Зимницкий, 2005), трансгрессивная фаза развития моренного приледникового озера характеризуется заполнением озёрной чаши талыми ледниковыми водами с повышением уровня воды, увеличением площади зеркала и глубин озера. В настоящее время исследуемые озёра имеют достаточно непростой режим уровней как в течение суток, так и в годовом разрезе. Ежегодно

к концу тёплого периода оба водоёма увеличивают свои размеры по экспоненциальной зависимости, что, согласно (Виноградов, Виноградова, 2014), относится к факту возрастающего риска прорыва.

При визуальном обследовании прибрежной территории озёр прошлых уровней высоких вод замечено не было, это показывает, что озёра находятся в фазе роста (трансгрессивная фаза). Озеро *Барсова* наиболее интенсивно увеличивается в южной части, примыкающей к леднику, где происходит механическая абляция (на леднике зафиксированы крупные трещины и обвалы), в результате которой крупные глыбы льда попадают в озеро и тают в нём. Об этом свидетельствует наличие айсберга в озере во время полевых исследований. Айсберги зафиксированы и на спутниковых снимках. При дальнейшем увеличении объёма озера следует ожидать рост стока из водоёма в северной части. При этом нельзя исключать ситуацию, когда повышенный сток может размывать моренную перемычку и спровоцировать прорыв воды. Изменение площади озера в разные периоды года подтверждает наличие в теле подпруживающей перемычки фильтрационных каналов, вероятно, расположенных выше минимального уровня воды, что не приводит к полному спуску всей водной массы. С одной стороны, наличие фильтрационных каналов понижает риск прорыва, так как уменьшает водную массу озера и давление на моренную перемычку. С другой стороны, наращивая свои размеры с каждым годом, озеро увеличивает давление на подпруживающую дамбу, что может вызвать рост диаметра фильтрационного канала, его размыв, снижение устойчивости запрудной плотины и её разрушение.

Анализируя дальнейшее развитие озера, отметим статью (Селиверстов и др., 2003), в которой при описании ледника № 12 упоминается оз. Барсово: «На гипсометрическом уровне 3245 м стоку талых вод с ледника препятствует естественная плотина в виде покрытой моренным чехлом линзы льда, упирающейся в поперечный по отношению к речной долине скальный ригель. С внешней стороны высота подпруды достигает 12–15 м, с внутренней — 3–5 м. Мощность моренного перекрытия ледяного ядра варьирует от 30 см до 1 м. При малом объёме талых вод их сток происходит по выработанному подо льдом руслу. При более интенсивном таянии или при обилии

дождевых осадков сток через такие каналы оказывается недостаточным. В этом случае перед плотиной образуется приледниковое озеро, которое может прорываться вниз по долине в виде селевого потока. В августе 2001 г. такой селевой поток в верхней части долины оставил врез глубиной 15–18 м и шириной до 20 м». Таким образом, согласно (Селиверстов и др., 2003), в моренной перемычке, подпруживающей оз. Барсово, находится ледяное ядро, таяние которого также может привести к ослаблению моренной плотины и образованию прорывного паводка, сопряжённого с селевым потоком.

Размеры оз. *Гачи-Коль* увеличиваются в результате отступления языка ледника и заполнения чаши озера. Анализ линий стекания показал, что около 40% стока с ледника поступает в оз. *Гачи-Коль* (в оз. Барсово 2%). В результате полевых работ установлено, что при повышении уровня воды в оз. *Гачи-Коль* начинается перелив воды через гребень подпруживающей моренной перемычки в результате переполнения озёрной чаши. Это указывает на возможность перехода озера из трансгрессивной фазы в регрессивную в результате прорыва водоёма. Анализ данных ДЗЗ за год показал, что оз. *Гачи-Коль* существует только в период абляции ледника: в середине июня котловина озера наполняется, а в конце сентября озеро полностью спускается по фильтрационным каналам, что понижает риск прорыва. Тем не менее, ежегодное увеличение объёма озера в тёплый период также ведёт к росту давления воды на подпруживающую перемычку, оставляя вопрос риска прорыва открытым.

На будущий сценарий развития событий может влиять и озеро, которое формируется у края ледника № 12, западнее оз. *Гачи-Коль*. Дальнейшее отступление ледника может привести к тому, что оба озера будут увеличиваться в размерах и образуется каскад озёр, при котором вода из одного озера будет поступать в другое. Это может вызвать переполнение озёрной чаши, и в результате могут произойти перелив воды через подпруживающую перемычку или объединение озёр в одно приледниковое озеро. На дальнейшее развитие озёр влияет также естественный занос озёр материалом флювиогляциальных потоков. При продолжительном существовании озера на его дне могут откладываться ледниковые отложения, в результате чего абсо-

лютная отметка дна озера может увеличиваться, а уровень воды в водоёме будет повышаться.

Таким образом, водный режим исследуемых озёр в период трансгрессивной фазы характеризуется суточной динамикой, обусловленной различной интенсивностью абляции ледника в течение суток, внутригодовой динамикой (оз. Барсово в период с сентября до января уменьшается в размерах, затем стабилизируется и начинает увеличиваться в летний период, а оз. *Гачи-Коль* существует только с июня по сентябрь) и межгодовой изменчивостью (оба озера ежегодно к концу тёплого периода увеличивают свои размеры по сравнению с предыдущим годом).

Заключение

Анализ данных дистанционного зондирования Земли за 1977–2020 гг. позволил установить для высокогорных территорий Республики Алтай увеличение числа приледниковых водоёмов, расположенных на современных конечных моренах. Наиболее интенсивное формирование озёр, начавшееся с середины 1990-х годов, обусловлено быстрым отступанием ледников, с некоторым запозданием реагирующих на потепление климата, начавшееся в 1980-е годы. Образованные в начале 2000 г. озёра Барсово и *Гачи-Коль* находятся на этапе трансгрессивной стадии развития, что подтверждается ежегодным ростом их площадей к концу тёплого периода. Однако водный режим водоёмов очень не стабилен: в осенне-зимней период происходит спуск воды из озёр по фильтрационным каналам, при этом оз. *Гачи-Коль* осушается полностью.

Выявлен сложный режим уровней озёр в течение суток. Озёра имеют практически круглосуточный сток по фильтрационным каналам, а при достижении определённого значения уровня вода переливается через гребень подпруживающей перемычки (для оз. *Гачи-Коль*). Сложный гидрологический режим озёр, обусловленный близким расположением озера к леднику, свидетельствует о трансгрессивной фазе развития, что характерно и для других приледниковых озёр, сформировавшихся в результате отступления ледников и находящихся в стадии роста. Таким образом, в условиях нестационарности климатической обстановки гидрологический режим приледниковых озёр,

тесно связанных с режимом ледников, может быть индикатором климатических изменений.

Изучение приледниковых озёр, находящихся на этапе трансгрессивной стадии развития, вносит теоретический вклад в понимание процесса формирования и эволюции высокогорных водных объектов на территории Алтая и других горных систем. Выполненные исследования позволяют говорить и о потенциальной прорывоопасности озёр. Дальнейшее отступление ледника неминуемо приведёт к увеличению объёмов водных масс озёр и, следовательно, к росту давления воды на моренные перемычки. В этой ситуации высока вероятность ослабления и размыва уже существующих фильтрационных каналов и, как следствие, разрушения подпруживающей плотины, а также формирования прорывного паводка. С учётом возрастающей туристической привлекательности высокогорий Алтая необходим мониторинг приледниковых озёр, который

позволит снизить риски и ущербы от развития опасных природных явлений.

Благодарности. Авторы благодарят своих коллег Е.С. Деркач, С.А. Григу и К.А. Ибраева за помощь в организации и проведении полевых гидрологических работ. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19–05–00535 А «Природные катастрофы и трансформация ландшафтов юго-восточного Алтая и северо-западной Монголии в период с максимума оледенения».

Acknowledgements. The authors are grateful to their colleagues E.S. Derkach, S.A. Griga and K.A. Ibraev for assistance in organizing and conducting field hydrological research. This research was funded by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), grant number № 19–05–00535 A «Natural catastrophes and transformation of the landscapes of the southeastern Altai and northwestern Mongolia in the period from the maximum of the last glaciation».

Литература

- Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Прикладная гидрология. СПб.: СПбГЛТУ, 2014. 196 с.
- Виноградова Т.А., Казаков Н.А., Виноградов А.Ю., Генсировский Ю.В., Пряхина Г.В. Опасные гидрологические явления (краткий конспект лекций). СПб: Знак, 2017. 128 с.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: общее резюме. М.: Изд. Росгидромета, 2014. 61 с.
- Ганюшкин Д.А., Чистяков К.В., Волков И.В., Банцев Д.В., Кунаева Е.П., Харламова Н.Ф. Новейшие данные об оледенении северного склона массива Таван-Богдо-Ола // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 307–325. doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-307-325.
- Докукин М.Д. Выдающиеся прорывы озёр в 2012–2013 гг. (по материалам дистанционного зондирования Земли // Сб. трудов Северо-Кавказского ин-та по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства. Т. 20. Пятигорск: «Севкавгипроводхоз», 2014. С. 82–97.
- Докукин М.Д., Шагин С.И. Особенности динамики ледниковых озёр с подземными каналами стока (анализ современной аэрокосмической информации) // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII. № 2. С. 47–56.
- Зимницкий А.В. Формирование, распространение и динамика приледниковых озёр Западного и Центрального Кавказа (в границах России): Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Краснодар, Кубанский гос. ун-т, 2005. 22 с.
- Каталог ледников СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1. Горный Алтай и Верхний Иртыш. Ч. 5. Бассейн р. Аргута. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 47 с.
- Попов С.В., Боронина А.С. Программное обеспечение для обработки данных тахеометрической съём-

References

- Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. *Prikladnaya gidrologiya*. Applied hydrology. St. Petersburg: Saint Petersburg State Forest Technical University, 2014: 196 p. [In Russian].
- Vinogradova T.A., Kazakov N.A., Vinogradov A.Yu., Gensirovskiy Yu.V., Pryakhina G.V. *Opasnyye gidrologicheskiye yavleniya (kratkiy konspekt lektsiy): uchebno-metodicheskoye posobiye*. Hazardous hydrological phenomena (brief lecture notes): teaching aid. St. Petersburg: Znakh, 2017: 128 p. [In Russian].
- Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii: obshcheye rezyume. The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation: general summary. M.: Roshydromet, 2014: 61 p. [In Russian].
- Ganyushkin D.A., Chistyakov K.V., Volkov I.V., Bantsev D.V., Kunaeva E.P., Kharlamova N.F. Modern data on glaciation of the northern slope of Tavan-Bogdo-Ola massif (Altai). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (3): 307–325. [In Russian]. doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-307-325.
- Dokukin M.D. Excurrent lake outbursts in 2012 – 2013 (based on materials of RS). *Sbornik trudov Severo-Kavkazskogo instituta po proyektirovaniyu vodokhozyaystvennogo i meliorativnogo stroitelstva*. Pyatigorsk. «Sevkavgirovodkhoz» T. 20. Proc. of the North Caucasian Institute for the design of water management and reclamation construction T. 20. Pyatigorsk: «Sevkavgirovodkhoz», 2014: 82–97. [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, XVIII (2): 47–56. [In Russian].
- Zimnitskiy A.V. *Formirovaniye, rasprostraneniye i dinamika prilednikovykh ozer Zapadnogo i Tsentralnogo Kavkaza (v granitsakh Rossii)*. Formation, distribution and dynamics of glacial lakes in the Western and Central Caucasus (within the borders of Russia): Abstract of the PhD-thesis. Krasnodar: Kubanskiy gosudarstvennyy universitet, 2005: 22 p. [In Russian].

- ки // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование. Сб. материалов III Всерос. науч.-практич. конф. 6–8 ноября 2019 г., СПб. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2019. С. 258–263.
- Пряхина Г.В., Кашкевич М.П., Попов С.В., Распутина В.А., Боронина А.С., Ганюшкин Д.А., Агатова А.Р., Непоп Р.К. Формирование и развитие моренного (приледникового) озера Нурган, Северо-Западная Монголия // Криосфера Земли. 2021. Т. XXV. № 4. С. 26–35. doi: 10.15372/KZ20210403.
- Распутина В.А., Ганюшкин Д.А., Банцев Д.В., Пряхина Г.В., Вуглинский В.С., Свирипов С.С., Панютин Н.А., Волкова Д.Д., Николаев М.Р., Сыроежко Е.В. Оценка прорывоопасности малоизученных озер массива Монгун-Тайга // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле. 2021. Т. 66. № 3. С. 487–509. doi.org/10.21638/spbu07.2021.304.
- Резепкин А.А., Поповнин В.В. О влиянии поверхностной морены на состояние ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) к 2025 г. // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 3. С. 307–321. doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-307-321.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Вып. 1. Ч. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 316 с.
- Рудой А.Н., Лысенкова З.В., Рудский В.В., Шишин М.Ю. Укок (прошлое, настоящее и будущее). Барнаул: Изд-во Алтайского ун-та, 2000. 172 с.
- Селиверстов Ю.П., Москаленко И.Г., Чистяков К.В. Оледенение северного склона массива Таван-Богдо-Ола и его динамика // Изв. РГО. 2003. Т. 135. № 5. С. 1–16.
- Черноморец С.С., Савернюк Е.А., Докукин М.Д., Тутубалина О.В., Висхаджиева К.С. Оценка селевой опасности высокогорных озер в Северном Афганистане: методика и результаты // Сб. Геоморфологические ресурсы и геоморфологическая безопасность: от теории к практике. 18–21 мая 2015 г. М.: ООО «МАКС Пресс», 2015. С. 193–196.
- Emmer A., Vilimek V., Huggel C., Klimeš J., Schaub Y. Limits and challenges to compiling and developing a database of glacial lake outburst floods // Landslides. 2016. V. 13. P. 1579–1584. doi: 10.1007/s10346-016-0686-6.
- Ganyushkin D., Chistyakov K., Derkach E., Bantsev D., Kunaeva E., Terekhov A., Rasputina V. Glacier Recession in the Altai Mountains after the LIA Maximum // Remote Sensing. 2022. V. 14. № 1508. P. 1–29. doi.org/10.3390/rs14061508.
- Harrison S., Kargel J.S., Huggel C., Reynolds J., Shugar D.H., Betts R.A., Emmer A., Glasser N., Haritashya U.K., Klimes J., Reinhardt L., Schaub Y., Wiltshire A., Regmi D., Vilimek V. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods // The Cryosphere. 2018. V. 12. P. 1195–1209. doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018.
- Shugar D.H., Burr A., Haritashya U.K., Kargel J.S., Watson C.S., Kennedy M.C., Bevington A.R., Betts R.A., Harrison S., Strattman K. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990 // Nature Climate Change. 2020. V. 10. P. 939–945.
- Veh G., Korup O., von Specht S., Roessner S., Walz A. Unchanged frequency of moraine-dammed glacial lake outburst floods in the Himalaya // Nature Climate Change. 2019. V. 9. P. 379–383.
- Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory. V. 15. Is. 1. Pt. 5. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1977: 47 p. [In Russian].
- Popov S.V., Boronina A.S. Software for processing data of tachometric survey. *Geodeziya, kartografiya, geoinformatika i kadastry. Nauka i obrazovaniye. Sbornik materialov III vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 06-08 noyabrya 2019 g., SPb.* Geodesy, cartography, geoinformatics and cadasters. Science and education. Sat. materials of the III All-Russian scientific-pract. conf. November 6–8, 2019, St. Petersburg. St. Petersburg: Publishing house RGPU them. A.I. Herzen, 2019: 258–263. [In Russian].
- Pryakhina G.V., Kashkevich M.P., Popov S.V., Rasputina V.A., Boronina A.S., Ganyushkin D.A., Agatova A.R., Nepop R.K. Formation and evolution of moraine-dammed (periglacial) lake Nurgan, northwestern Mongolia. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere.* 2021, XXV (4): 26–35. [In Russian]. doi: 10.15372/KZ20210403.
- Rasputina V.A., Ganyushkin D.A., Bantsev D.V., Pryakhina G.V., Vuglinsky V.S., Svirupov S.S., Paniutin N.A., Volkova D.D., Nikolayev M.R., Siroyezhko E.V. Outburst hazard of little-studied lakes assessment at the Mongun-Taiga massif. *Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta. Nauki o Zemle. Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences.* 2021. 66 (3): 487–509. [In Russian]. doi.org/10.21638/spbu07.2021.304.
- Rezepkin A.A., Popovnin V.V. Influence of the surface moraine on the state of Djankuat Glacier (Central Caucasus) by 2025. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2018, 58 (3): 307–321. [In Russian]. doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-307-321.
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Resources of surface waters of the USSR. V. 15. Is. 1. Pt 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1969: 316 p. [In Russian].
- Rudoy A.N., Lysenkova Z.V., Rudskiy V.V., Shishin M.Yu. *Ukok (proshloye, nastoyashcheye i budushcheye). Ukok (past, present and future).* Barnaul: Altai State University, 2000: 172 p. [In Russian].
- Seliverstov Yu.P., Moskalenko I.G., Chistyakov K.V. Glaciation of the northern slope of the Tavan-Bogdo-Ola massif and its dynamics. *Izvestiya RGO. Proc. of the Russian Geographical Society.* 2003, 135 (5): 1–16. [In Russian].
- Chernomorets S.S., Savernyuk E.A., Dokukin M.D., Tutubalina O.V., Viskhadzhiyeva K.S. Mudflow hazard assessment of high-mountain lakes in northern Afghanistan: methodology and results. *Sbornik «Geomorfologicheskiye resursy i geomorfologicheskaya bezopasnost: ot teorii k praktike. 18–21 maya 2015 g.».* Proceedings «Geomorphological resources and geomorphological safety: from theory to practice. May 18–21, 2015». M.: LLC MAKPS Press, 2015: 193–196. [In Russian].
- Emmer A., Vilimek V., Huggel C., Klimeš J., Schaub Y. Limits and challenges to compiling and developing a database of glacial lake outburst floods. *Landslides.* 2016, 13: 1579–1584. doi: 10.1007/s10346-016-0686-6.
- Ganyushkin D., Chistyakov K., Derkach E., Bantsev D., Kunaeva E., Terekhov A., Rasputina V. Glacier Recession in the Altai Mountains after the LIA Maximum. *Remote Sens.* 2022, 14 (1508): 1–29. doi.org/10.3390/rs14061508.
- Harrison S., Kargel J.S., Huggel C., Reynolds J., Shugar D.H., Betts R.A., Emmer A., Glasser N., Haritashya U.K., Klimes J., Reinhardt L., Schaub Y., Wiltshire A., Regmi D., Vilimek V. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere.* 2018, 12: 1195–1209. doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018.
- Shugar D.H., Burr A., Haritashya U.K., Kargel J.S., Watson C.S., Kennedy M.C., Bevington A.R., Betts R.A., Harrison S., Strattman K. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. *Nature Climate Change.* 2020, 10: 939–945.
- Veh G., Korup O., von Specht S., Roessner S., Walz A. Unchanged frequency of moraine-dammed glacial lake outburst floods in the Himalaya. *Nature Climate Change.* 2019, 9: 379–383.