

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРИЛЕДНИКОВЫХ МОРЕННЫХ ОЗЁР АЛТАЯ

© 2024 г. Г. В. Пряхина^{1*}, В. А. Распутина¹, Е. С. Зелепукина², Д. В. Банцев¹,
А. Э. Крыжановская¹

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

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: g65@mail.ru

Поступила 3 ноября 2023 г.

После доработки 14 декабря 2023 г.

Принята к печати 10 апреля 2024 г.

На основе обширного натурного материала и данных дистанционного зондирования Земли предложены детальные признаки (критерии) трансгрессивной, регрессивной и пострегрессивной стадий развития водоёмов, которые позволяют на качественном уровне определить — на какой стадии находится озеро и оценить его дальнейшее развитие. Впервые для каждой стадии развития описаны особенности гидрологического режима водоёмов.

Ключевые слова: уловенный режим, стадии развития водоёмов, трансгрессивная стадия, регрессивная стадия, пострегрессивная стадия

DOI: 10.31857/S2076673424020033

ВВЕДЕНИЕ

Образующиеся при отступании ледников озёра широко распространены в горных областях. Зафиксированное в последнее десятилетие ускорение процесса сокращения оледенения Внутренней Азии (Ganyushkin et al., 2023) привело к значительному увеличению количества приледниковых озёр (Shugar et al., 2020), в том числе с высокой вероятностью прорыва и спуска водной массы. Важной задачей, связанной с исследованием прорывоопасных озёр, является изучение процесса их формирования, эволюции и описание стадий развития озёр. В настоящее время этой тематике уделяется крайне мало внимания, и научные работы, посвящённые развитию моренных и приледниковых водоёмов, немногочисленны (Зимницкий, 2005; Черноморец и др., 2007; Торгоев и др., 2013; Докукин, Хаткутов, 2016; Алейникова, Анацкая, 2019; Пряхина и др., 2021; Распутина и др., 2022). Отметим работу (Зимницкий, 2005), в которой автор описывает фазы развития приледниковых озёр: трансгрессивную и регрессивную. В статье (Пряхина и др., 2021) рассмотрено формирование и фазы развития приледникового озера Нурган (Северо-Западная Монголия): трансгрессивная (рост озера, увеличение его площади и объёма), регрессивная (прорыв озера) и пострегрессивная (существование озера после прорыва) фазы.

Гидрологический режим водоёмов высокогорных территорий Алтая, по сравнению с аналогичными

объектами других горных стран, исследован недостаточно (Быков, 2013; Докукин, 2014; Пряхина и др., 2021). В то же время интенсивное развитие в регионе хозяйства, туризма, логистических путей делают задачу выявления потенциально опасных водных объектов крайне актуальной. В ходе многолетних комплексных экспедиций Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета на российской и монгольской частях территории горного Алтая (массив Монгун-Тайга, Южно-Чуйский хребет, массивы Таван-Богдо-Ола и Цамбагарав) был получен обширный натурный материал о гидрологических и морфометрических характеристиках высокогорных водоёмов и их водосборов в районах деградации оледенения. Таким образом, целью данной работы стало выявление особенностей гидрологического режима приледниковых и моренных водоёмов, находящихся на разных стадиях развития, на основе анализа данных многолетних экспедиционных исследований и дистанционного зондирования Земли.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалами для выявления особенностей гидрологического режима высокогорных озёр послужили данные наблюдений за летний сезон на 10 водоёмах, расположенных в краевых частях ледников либо на моренах (современных или малого ледникового периода), имеющих в той или иной степени ледниковое питание (табл. 1). В состав полевых работ,

Таблица 1. Характеристика объектов исследования

Озеро	Горный массив/хребет	Координаты поста (с.ш./в. д.)	Высота, м	Площадь озера на момент проведения полевых наблюдений, м ²	Расстояние до ледника, м**	Отток воды из озера	Наличие (+/-) и период инструментальных наблюдений	
							гидрологические	метеорологические
MT1 «Верхнее»*	Монгун-Тайга	90.04/50.25	2820	77250	500	поверхностный	11.07.19–22.07.19	—
MT11 «Лагерное»	Монгун-Тайга	90.05/50.25	2720	127575	1300	поверхностный	11.07.19–22.07.19	—
MT8 «Малое»	Монгун-Тайга	90.03/50.26	2980	4150	0	фильтрация	11.07.19–22.07.19	—
MT2 «Хойнур»	Монгун-Тайга	90.04/50.26	2910	24780	130	фильтрация	11.07.19–22.07.19	—
TS1 Нурган	Цамбагарав	90.73/48.71	2980	62140	240	поверхностный	29.07.19–05.08.19	—
TBO10 «Барсово»	Таван-Богдо-Ола	87.92/49.18	3265	17112	0	поверхностный, фильтрация	24.07.21–02.08.21	+
TBO19 «Гачи-Коль»	Таван-Богдо-Ола	87.92/49.18	3250	6506	0	фильтрация, перелив	24.07.21–02.08.21	+
SCh4 «Билли»	Южно-Чуйский	87.74/49.84	2765	190	1230	фильтрация	11.07.22–30.07.22	+
SCh2 «Таможенное»	Южно-Чуйский	87.74/49.84	2770	25314	830	поверхностный	11.07.22–30.07.22	+
SCh74 «Чилл»	Южно-Чуйский	87.74/49.83	2990	1000	0	фильтрация	11.07.22–30.07.22	+
SCh75 «НВ»	Южно-Чуйский	87.73/49.83	2990	2190	0	перелив, фильтрация	11.07.22–30.07.22	+

Примечание. *Рабочие названия безымянных озёр приведены в кавычках, а также приведены названия по формирующемуся каталогу озёр (аббревиатура соответствует английскому написанию названия горных хребтов). **Расстояние от верхнего края озера до ледника.

подробно описанных в (Пряхина и др., 2021; Распутина и др., 2021, 2022), вошли гидрографические описания водных объектов, наблюдения за уровнями воды в водоёмах, измерения расходов воды сопряжённых с ними ручьёв, наблюдения за температурой воздуха и осадками, обследования подпруживающих моренных перемычек, тахеометрические и батиметрические съёмки озёрных котловин.

Анализ суточных колебаний уровня воды проводился по данным непосредственных полевых наблюдений. С учётом сложности организации стационарных гидрологических наблюдений в труднодоступных районах особенности многолетней изменчивости режима высокогорных водоёмов были выявлены с использованием данных дистанционного зондирования (снимки Landsat 5, 7, 8 и 9 и Sentinel 2 L2A) за период с 1989 по 2022 г., что позволило расширить перечень исследуемых водных объектов. Косвенную оценку сезонной и межгодовой изменчивости уровня воды получали на основе сравнительного анализа площадей зеркал водоёмов. Площадь озёр определялась в программе ArcMap 10.4.1 (ESRI Inc., USA) путём ручного дешифрирования с использованием комбинации каналов «естественные цвета» (для всех спутниковых снимков). Пространственное разрешение спутниковых снимков Landsat 7, 8 и 9 улучшалось путём объединения с панхроматическими снимками (разрешение 15 м), а снимки Sentinel с разрешением 10 м дешифрировались без улучшения.

Характеристику уровня режима озёр получали для стадий их развития, предложенных в классификации (Зимницкий, 2005) и дополненной в (Пряхина и др., 2021): *трансгрессивная* стадия характеризуется заполнением озёрной чаши приледникового озера тальми водами с повышением уровня воды, увеличением площади и глубин озера; *регрессивная* стадия развития водоёма характеризуется уменьшением площади озера и его водной массы; *пострегрессивная* стадия характеризуется квазистабильным состоянием водоёма.

Оценка многолетней динамики количества озёр в перигляциальной зоне горного Алтая выполнена на основе дешифрирования разновременных снимков и использования цифровой модели рельефа SRTM. Основным критерием отнесения водоёма к определённой стадии развития послужили выявленные многолетние тенденции изменения площадей озёр.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщение гидрографических описаний, данных полевых наблюдений и результатов дешифрирования спутниковых снимков позволило детализировать характеристики озёр, находящихся на разных стадиях развития (табл. 2).

Трансгрессивная стадия развития озёр. Приледниковые озёра, образовавшиеся за последние 15–20 лет в результате сокращения оледенения на территории

Таблица 2. Обобщённые характеристики озёр на разных стадиях развития

Стадия развития водоёма	Морфологические характеристики	Гидрологические характеристики	Временная изменчивость морфометрических характеристик
Трансгрессивная	Время образования не более 20 лет назад; небольшие размеры (до 6000 м ²); расположение в непосредственной близости от ледника	Выраженный внутрисуточный и многолетний ход уровня воды; преобладание ледникового питания	Постепенное увеличение площади и глубины озера на конец сезона абляции каждого следующего года
Регрессивная	Частично осушенная котловина, иногда присутствие озёрных террас; наличие прорана в подпруживающей дамбе; наличие вытекающего ручья	Снижение уровня воды в многолетнем/сезонном разрезе в результате сокращения ледникового питания при отступлении ледника либо при частичном спуске по фильтрационным каналам; иногда резкое падение уровня в случае прорыва дамбы	Постепенное уменьшение площади и глубины озера на конец сезона абляции каждого следующего года, иногда резкое сокращение водоёма в результате прорыва подпруживающей перемычки
Пострегрессивная	Частично осушенная котловина, иногда присутствие озёрных террас; наличие прорана в подпруживающей дамбе; наличие вытекающего ручья	Отсутствие значимых изменений уровня воды в многолетнем разрезе; в течение сезона абляции в период выпадения осадков внутрисуточные колебания уровня воды не выражены	Изменения размеров водоёма в многолетнем разрезе выражены слабо

горного Алтая, находятся на самом раннем этапе развития (трансгрессивная стадия). Такие озёра как «Малое» (горный массив Монгун-Тайга), «Чилл», «НВ» (Южно-Чуйский хребет), «Гачи-Коль» (горный массив Таван-Богдо-Ола) имеют небольшие размеры (до 6000 м²), расположены в непосредственной близости от ледников, в их краевых частях и частично окружены современной мореной. Основным источником питания приледниковых водоёмов служат талые ледниковые воды (Распутина и др., 2021).

Выявленные суточные колебания уровней обусловлены изменением величины абляции ледников: в дневные часы уровень воды в водоёмах повышается, а ночью резко понижается, вплоть до полного опустошения озера. Так, приледниковое озеро «Чилл» ежедневно полностью спускалось, предположительно через грот, расположенный у языка ледника (рис. 1, а). Другие озёра спускались частично путём перелива

озёрных вод через гребень подпруживающей водоём морены (оз. «НВ») (см. рис. 1, б) либо по временным водотокам, формирующимся в эрозионных врезках на внешней стороне перемычки (оз. «Гачи-Коль») (см. рис. 1, в), а также путём фильтрации через морену (см. рис. 1, г).

Установлено, что уровенный режим приледниковых водоёмов характеризуется выраженной внутри-суточной динамикой и с некоторым запаздыванием повторяет суточный ход температуры воздуха (рис. 2, а). Амплитуда колебаний уровня воды в период наблюдений составляла более 150 см.

Приледниковые озёра имеют сложный режим уровней не только в суточном, но и в годовом ходе. Так, анализ изменения площади озера «Гачи-Коль» (массив Таван-Богдо-Ола), расположенного в краевой части ледника № 12 (Каталог ледников СССР, 1977; Ganyushkin et al., 2022), показал, что озеро

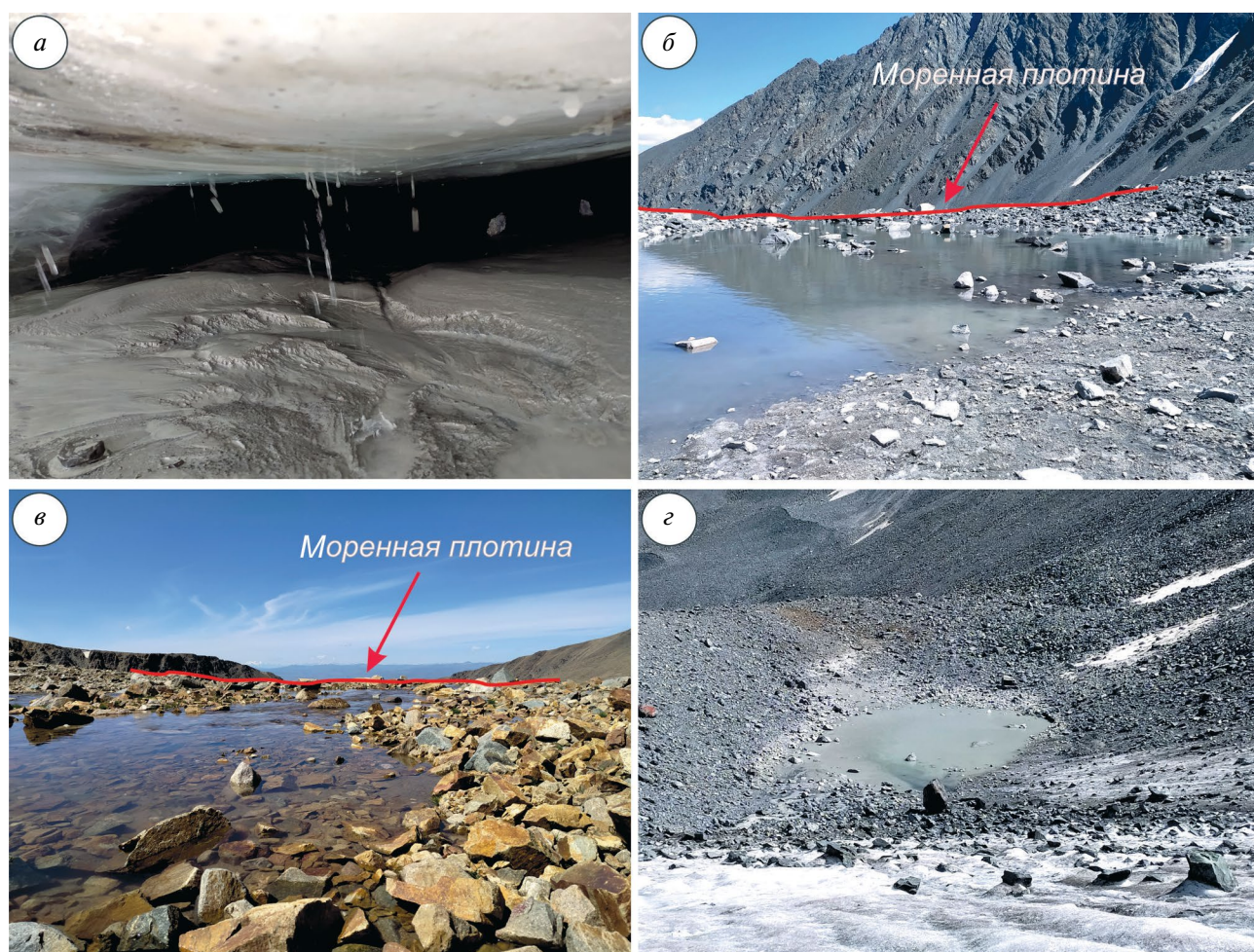


Рис. 1. Способы спуска воды из приледниковых озёр: а — отток воды через грот в леднике (оз. «Чилл»); б — перелив воды через гребень моренной плотины (оз. «НВ»); в — временный водоток через плотину (оз. Гачи-Коль); г — фильтрация (оз. «Чилл»). Фото В.А. Распутиной, июль — август 2021/22 г.

Fig. 1. Modes of water outflow from periglacial lakes: а — outflow of water through the grotto in the glacier (Lake «Chill»); б — water overflow over the crest of the moraine dam (Lake «НВ»); в — temporary watercourse through the dam (Lake «Gachi-Kol»); г — filtration (Lake «Chill»). Photos by V.A. Rasputina in July — August 2021/22

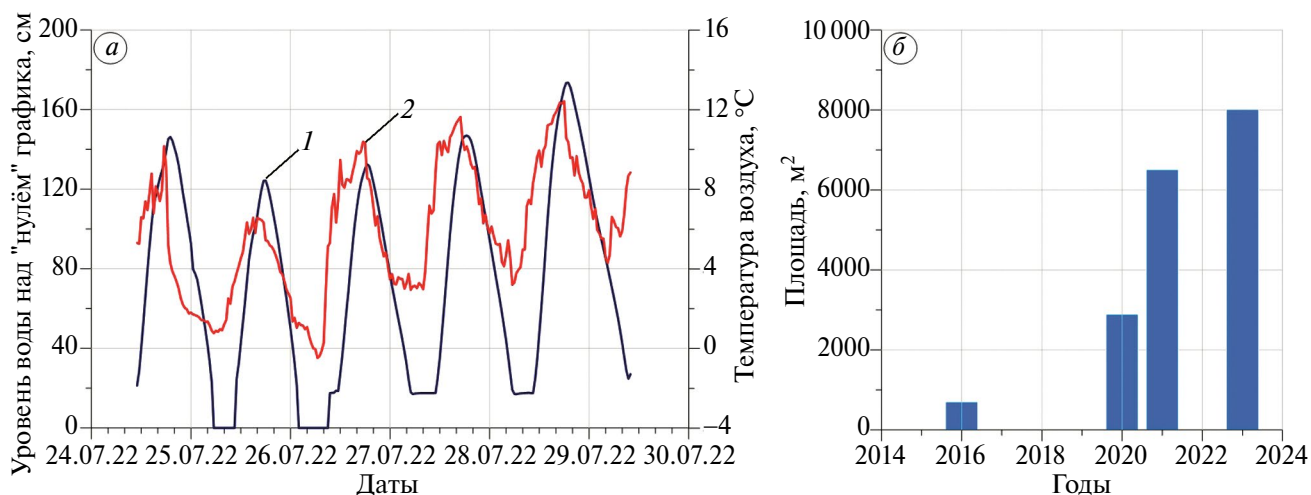


Рис. 2. Изменение уровня воды приледникового озера «Чилл» (а) и площади зеркала приледникового озера «Гачи-Коль» (б) во времени на трансгрессивной стадии развития: 1 – ход уровня воды на водомерном посту на озере «Чилл»; 2 – ход температуры воздуха на метеостанции, расположенной на леднике Некрасова на высоте 3000 м над ур. моря
Fig. 2. Changes in the water level of the periglacial lake «Chill» (a) and the area of the periglacial lake «Gachi-Kol» (b) over time during the transgressive stage of evolution: 1 – course of the water level at the water gauge station on Lake «Chill»; 2 – course air temperature at the weather station located on the Nekrasova Glacier, located at an altitude of 3000 m a.s.l.

существовало только в период абляции ледника: в середине июня котловина водоёма наполнялась, а в конце сентября происходил полный спуск воды по фильтрационным каналам. При этом на конец тёплого периода каждого следующего года объём и площадь зеркала озера становились больше (см. рис. 2, б). Схожая тенденция изменения площадей зеркала отмечена для озера «Малое», примыкающего к леднику № 24 (массив Монгун-Тайга): площадь водоёма увеличилась с 2016 по 2022 г. на 74%.

Представляют интерес «пятыщиеся» озёра, которые, сохраняя связь с отступающим ледником, меняют свою конфигурацию. В качестве примера «пятыщегося» озера можно привести приледниковый водоём, расположенный в бассейне р. Ховд на территории горного массива Хархираа (Северо-Западная Монголия) (рис. 3). При визуальном сокращении площади объём озера может увеличиваться: вероятнее всего, освобождающаяся ото льда территория имеет более глубокий врез, и озёрные воды «перетекают» ближе к леднику. Несмотря на отсутствие



Рис. 3. Изменение конфигурации «пятыщегося» озера X24 в бассейне р. Ховд (горный массив Хархираа, Северо-Западная Монголия) в период с 2000 по 2022 г.: а – июнь 2000 г.; б – август 2012 г.; в – август 2022 г. (название дано по формирующемуся каталогу озёр). Спутниковые снимки: <https://sentinel-hub.com/>
Fig. 3. Change in the area of Lake X24 in the Khovd river catchment (Kharhiraa mountain range, Northwestern Mongolia) from 2000 to 2022: а – June 2000, б – August 2012, в – August 2022 (the name is given according to the developing catalog of lakes). Satellite images from the site: <https://www.sentinel-hub.com/>

увеличения площади зеркала водоёма в многолетнем аспекте, «пятыщиеся» озёра, имеющие прямую связь с ледником, по нашему мнению, следует относить к трансгрессивной стадии развития.

Регрессивная стадия развития озёр. Сокращение размеров озера и его водной массы на конец периода абляции в многолетнем аспекте наступает в случае нарушения связи водоёма с ледником, т. е. при постепенном уменьшении ледникового питания. Например, моренно-подпрудное озеро Хойнур (горный массив Монгун-Тайга), площадь поверхности которого при потере прямой связи с отступающим ледником № 24 (Распутина и др., 2021) начала сокращаться с 2012 г. и уменьшилась практически в два раза, на сегодняшний день стабильного (пострегрессивная стадия) состояния не достигло (рис. 4, а).

Отмечено, что разрушение мореной дамбы или спуск озёрных вод по фильтрационным каналам внутри моренной перемычки может протекать

достаточно быстро (от нескольких часов до нескольких месяцев), что может привести либо к полному исчезновению озера, либо к переходу водоёма на любую стадию развития. Так, при визуальном обследовании озера «Барсово» (горный массив Таван-Богдо-Ола) в 2021 г. был выявлен поверхностный отток, который при понижении уровня воды в водоёме переходил из поверхностного в подземный и фиксировался на внешней стороне подпруживающей морены в виде высачивания. Это позволило выдвинуть предположение о высокой вероятности спуска озера (Распутина и др., 2022). В конце июня 2022 г., согласно анализу спутниковых снимков, начался процесс истечения воды, и к 3 сентября водоём был полностью осушен (см. рис. 4, в–д). На основе выполненных в 2021 г. батиметрической и тахеометрической съёмок были рассчитаны величины объёмов воды в озере в период его спуска (см. рис. 4, б). Так как от высоты положения и диаметра фильтрационных каналов зависит объём и максимальный расход прорывного паводка, достаточно

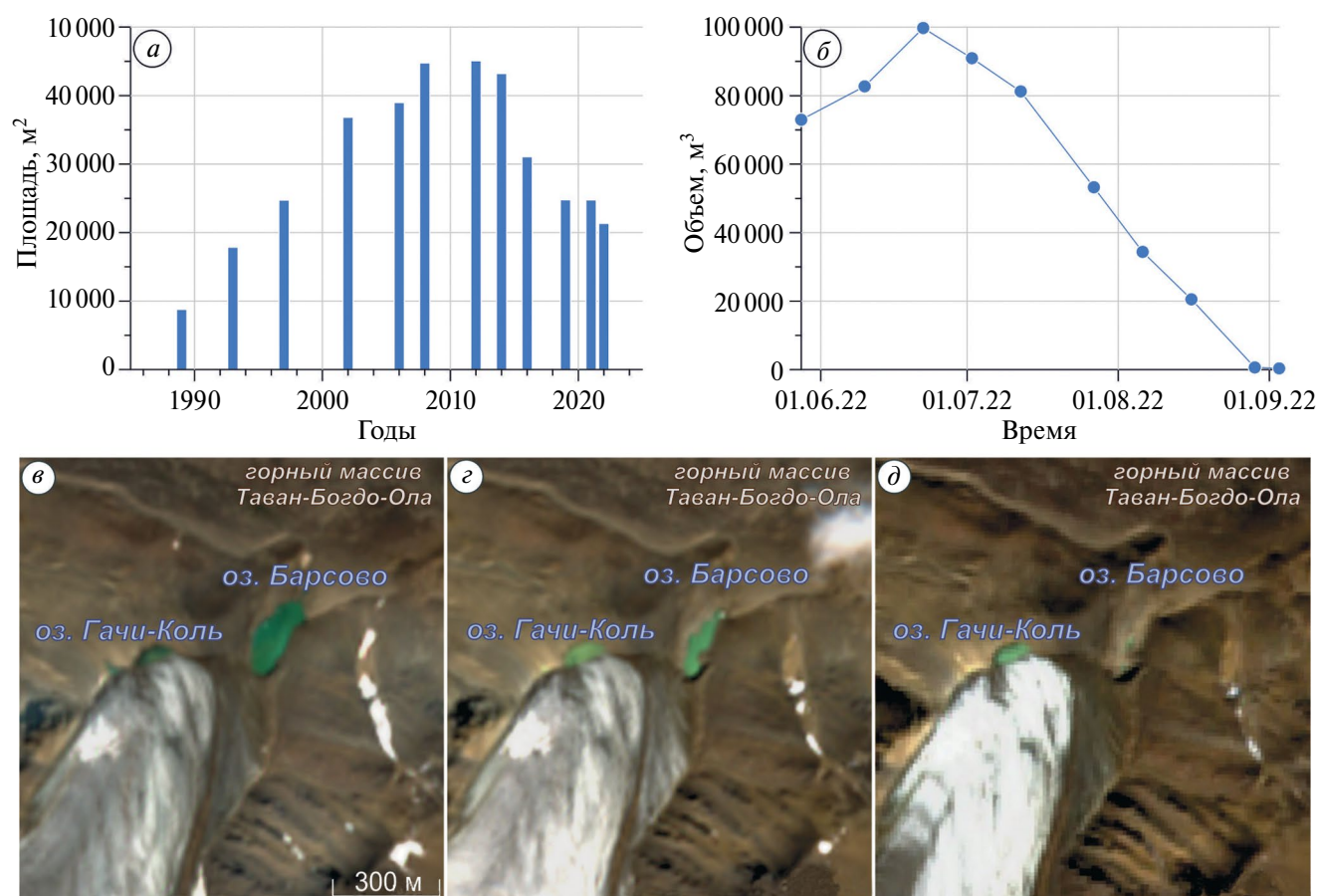


Рис. 4. Изменение площади зеркала и объёма водной массы озёр, находящихся в регрессивной стадии развития: а – сокращение площади озера «Хойнур»; б – сокращение объёма озера «Барсово» при его деградации в 2022 г. (в – 15.06.2022; з – 06.08.2022; д – 29.08.2022). Спутниковые снимки: <https://sentinel-hub.com/>

Fig. 4. Changes in the area and volume of the water mass of lakes that are in a regressive stage of evolution: а – reduction in the area of Lake «Khoynur»; б – reduction in the volume of Lake «Barsovo» during its degradation in 2022 (в – 15.06.2022; з – 06.08.2022; д – 29.08.2022). Satellite images from the site: <https://www.sentinel-hub.com/>

равномерный спуск озера «Барсово» осуществлялся по каналам с постоянными размерами, расположенными в нижней части озёрной котловины. Отметим, что для приледниковых водоёмов снижение уровня воды в период абляции может быть признаком высокой прорывоопасности озера и требует проведения мониторинговых наблюдений.

Пострегрессивная стадия развития. На суточный режим уровней водоёмов, находящихся в пострегрессивной стадии, значительное влияние оказывает сток жидких осадков с части водосбора, не занятой ледником. В период дождей рост и спад уровня растягивается на несколько суток, а при отсутствии осадков — имеет выраженный внутрисуточный ход, повторяющий ход температуры воздуха с учётом времени добегания (в нашем примере 8–10 часов) (рис. 5, а).

О внутригодовой и многолетней изменчивости уровней косвенно можно судить по изменению площадей водоёма. Например, озеро «Таможенное», расположенное в 900 м от ледника Некрасова в верховье долины р. Талдуры (Южно-Чуйский хребет), перешло в пострегрессивную стадию, о чём свидетельствует прекратившееся с 2014 г. многолетнее сокращение его площади (см. рис. 5, б). Также квазистабильное состояние характерно для карового озера «Лагерное», подпруженного скальным ригелем, площадь зеркала которого с 1987 г. на конец периода абляции значительно не менялась.

В большинстве случаев озёра в своём развитии последовательно проходят стадии трансгрессии, регрессии и пострегрессии. В отдельных случаях

тенденция развития озёр может измениться. Например, озеро Нурган, расположенное на территории горного массива Цамбагарав (Монголия), прошло основную фазу регрессивной стадии, о чём свидетельствуют сохранившиеся в рельефе следы изменений объёма и направления стока озера. Разрушение моренного вала в промежутке между 1948 и 1968 гг. (Пряхина и др., 2021) вызвало частичный спуск озера, а утрата прямой связи с отступающим ледником Эрегтийн привела к переходу водоёма из приледникового в моренно-подпрудный. Размеры озера стабилизировались. Во время полевых работ 2019 г. в северо-восточной части склона исследуемой озёрной котловины был обнаружен участок с активным вытаиванием и обрушением грунта. Максимальное смещение кромки морены относительно реперных точек за недельный период наблюдений составило 0.65 м (Пряхина и др., 2021). В связи с активизацией термоэрозии в последние годы в горах Алтая (Chistyakov, Ganiushkin, 2015) наблюдения за процессом были продолжены с использованием спутниковых снимков Sentinel. Выявлено, что термоэрозионное осыпание подпруживающей плотины привело к смещению контура озера в северо-восточной части за последние 2 года примерно на 10–15 м. При этом за четыре года площадь водоёма практически не менялась: 62.1 тыс. м² в 2019 г. (получено по полевым данным); 62.2 и 61.9 тыс. м² в 2020 и 2022 гг. соответственно (по данным ДЗЗ). Увеличение площади озера Нурган на конец периода абляции 2023 г. на 5.5% по сравнению с 2022 г., возможно, свидетельствует о начале очередной трансгрессивной

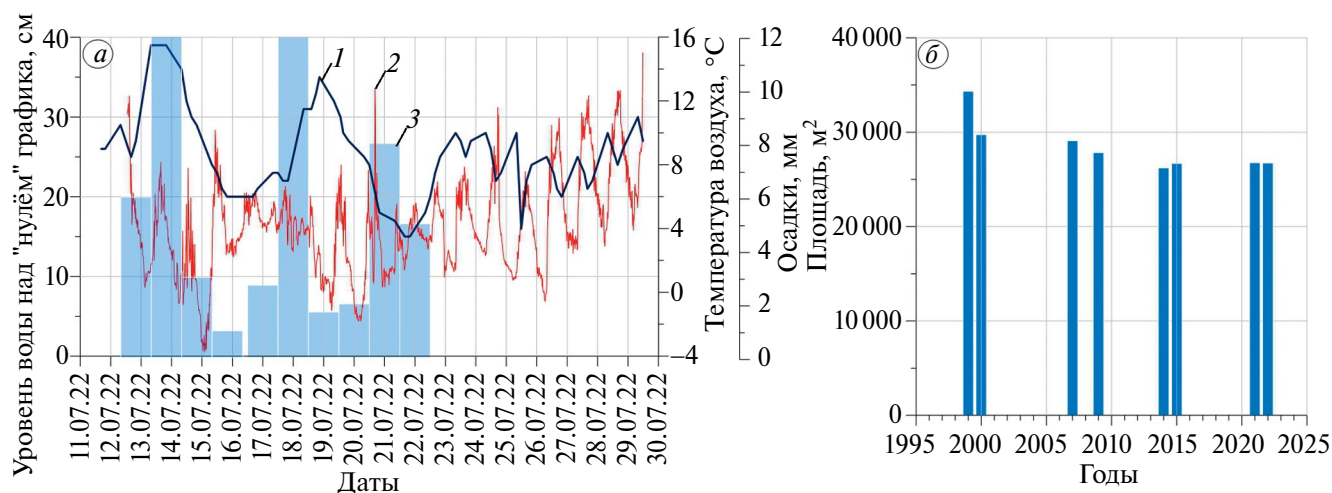


Рис. 5. Изменение во времени гидролого-морфометрических характеристик: уровня воды в зависимости от метеорологических характеристик (а) и площади зеркала (б) моренного озера «Таможенное» в период пострегрессивной стадии развития: 1 — ход уровня воды на водомерном посту на озере «Таможенное»; 2 — ход температуры воздуха; 3 — ход осадков на метеостанции, расположенной в прибрежной зоне озера на высоте 2770 м над ур. моря

Fig. 5. Changes over time in hydrological and morphometric characteristics: relation of the water level on meteorological characteristics (a) and surface area (b) of the moraine lake «Tamozhenoye» during the postregressive stage of evolution: 1 — course of water level at the water gauge on Lake «Tamozhenoye»; 2 — course of air temperature; 3 — course of precipitation at a weather station located in the coastal zone of the lake 2770 m a.s.l.

стадии. Продолжающееся отступление края моренной перемычки может привести к её разрушению и возможному прорыву водоёма и переходу в регрессивную стадию.

В связи с невозможностью получения данных непосредственных наблюдений за уровнем воды приледниковых и моренных озёр на больших или труднодоступных территориях для выявления особенностей гидрологического режима и конкретной стадии развития были использованы критерии «Временная изменчивость морфометрических характеристик» и «Морфологические характеристики» (см. табл. 2).

Анализ спутниковых снимков высокогорных территорий Алтая показал, что за последние 22 года количество озёр значительно увеличилось: на территории Северо-Чуйского хребта — с 28 до 60 озёр, на Южно-Чуйском хребте — с 39 до 73 озёр, на Катунском хребте — с 57 до 89 озёр, на территории массива Таван-Богдо-Ола — с 11 до 19 озёр, на территории массива Монгун-Тайга — с 8 до 11 озёр. Отметим, что на территории хребта Цамбагарав (Монголия) число водоёмов, по данным спутниковых снимков, практически не изменилось: с 7 до 8 озёр. В результате использования цифровой модели рельефа SRTM и сведений об обобщённых характеристиках озёр (см. табл. 2) получено распределение по высотам озёр, находящихся на разных стадиях развития для территории Алтая (Катунский, Северо-Чуйский и Южно-Чуйский хребты, горные массивы Таван-Богдо-Ола, Монгун-Тайга и Цамбагарав). В качестве

примера на рис. 6 приведено распределение по высотам количества водоёмов, расположенных на трёх хребтах Центрального Алтая.

До 2000 г. на территории Северо-Чуйского и Южно-Чуйского хребтов основная часть озёр находилась в интервале 2700—2800 м, на территории Катунского хребта — в интервале 2300—2400 м. Наибольшее количество озёр на 2022 г. находится в краевых частях современных ледников: в интервале высот 2900—3000 м над ур. моря для Северо-Чуйского хребта, в интервале 2800—2900 м над ур. моря — для Южно-Чуйского хребта и 2500—2600 м над ур. моря — для Катунского хребта. В соответствии с этим распределением отмечено, что верхняя граница интервала, в котором располагалось максимальное количество приледниковых и моренных озёр, до 2000 г. была по высоте ниже на 100—200 м, что связано с происходящим отступанием краёв ледников. Для всех хребтов характерно, что основная часть водоёмов в трансгрессивной стадии расположена в самых высотных интервалах, в то время как озёра в пострегрессивной стадии в подавляющем количестве находятся в интервалах высот, расположенных ниже, где быстрее всего утрачивается связь с ледниками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные авторами детальные признаки (критерии) отдельных стадий развития водоёмов позволяют на качественном уровне оценить дальнейшее развитие водного объекта, что представляет

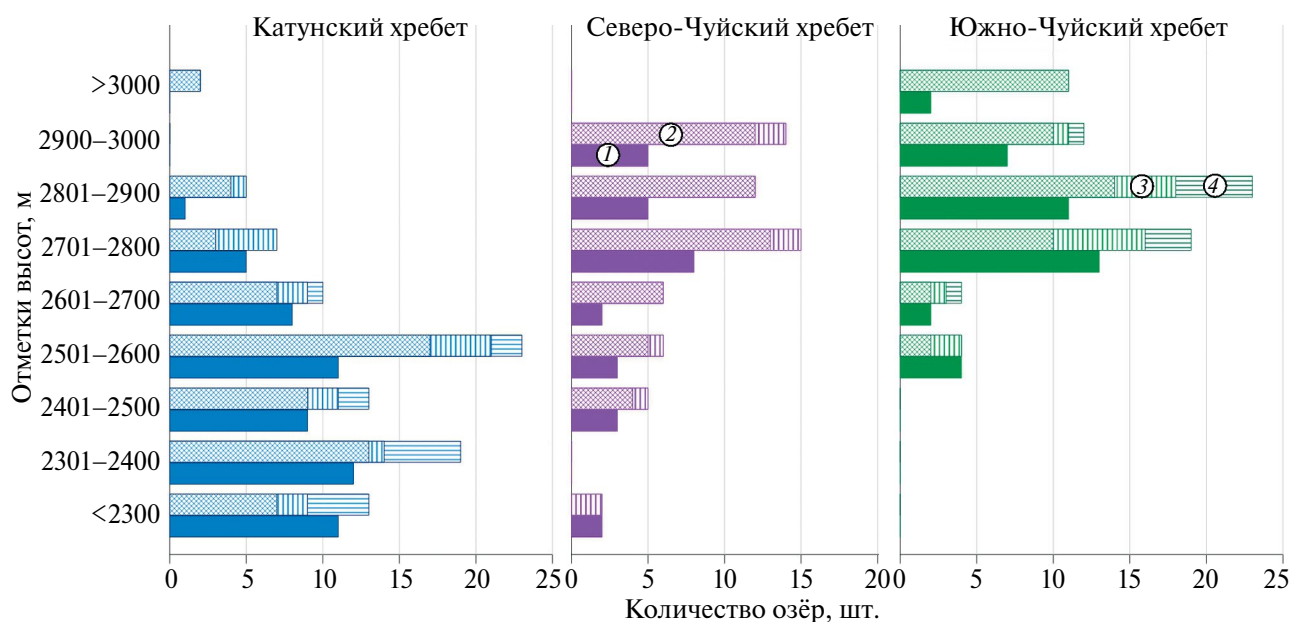


Рис. 6. Изменение количества озёр на территории Центрального Алтая с 2000 по 2022 г. с градациями согласно стадиям развития: 1 — количество озёр на 2000 г.; 2 — трансгрессивная стадия; 3 — регрессивная стадия; 4 — пострегрессивная стадия
Fig. 6. Change in the number of lakes in the Central Altai territory from 2000 to 2022 with gradations according to stages of evolution: 1 — number of lakes in 2000; 2 — transgressive stage; 3 — regressive stage; 4 — postregressive stage

собой как фундаментальную задачу, направленную на изучение жизненного цикла приледниковых и моренных озёр, так и прикладную, связанную с прогнозированием возможных опасных гидрологических явлений (прорывы озёр) в условиях нестационарной климатической ситуации, которая ускорила процессы переформирования гляционивальных ландшафтов. В частности, за последние два десятилетия увеличилось количество водоёмов в зоне наиболее активного отступления ледников, в связи с чем появилась уникальная возможность проследить смену различных стадий развития высокогорных озёр в относительно короткие сроки. Основная часть сформированных преимущественно на современных моренах водных объектов находится на трансгрессивной стадии развития. Нестабильный режим уровней небольших приледниковых водоёмов полностью зависит от режима поступления талой воды и интенсивности фильтрации через моренные перемычки, сложенные суглинком, гравием и валунами разных размеров. Характерной особенностью трансгрессивной стадии являются существенные колебания размеров водоёма и его уровня в течение суток как в сезонном, так и годовом разрезе.

При ослаблении связи с ледником озёра переходят в регрессивную стадию, характеризующуюся сокращением площади водоёмов в многолетнем аспекте. Их деградация происходит при спуске водной массы по фильтрационным каналам либо в результате прорыва моренной дамбы. После частичного сокращения объёма и площади зеркала водоём может перейти в квазистабильную стадию (пострегрессивную), отличительной особенностью которой является преобладание в питании водного объекта поверхностного стока с не занятой ледником части водосбора, а также отсутствие тенденций к изменению морфометрических характеристик в многолетнем разрезе. Дальнейшее развитие таких водоёмов зависит от режима наполнения озёрной котловины в период наибольшей абляции, интенсивности аккумуляции твёрдого материала, а также устойчивости подпруживающей плотины. Так, в случае активизации термоэрозионных процессов, протекающих в теле дамбы, водоём может перейти в регрессивную стадию за счёт усиления фильтрации.

Отмечено, что время существования вновь образованных водоёмов зависит от дальнейшего изменения климатической ситуации, сейсмической активности рассматриваемого района и требует дальнейшего исследования.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-27-00171 «Моделирование прорывов водоёмов, подпруженных дамбами естественного происхождения».

Acknowledgements. The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-27-00171 «Modelling of outbursts of reservoirs dammed by natural dams».

ЛИТЕРАТУРА

- Алейникова А. М., Анацкая Е. Е. Динамика ледников и приледниковых озёр бассейна реки Ала-Арча // Успехи современного естествознания. 2019. № 9. С. 42–47.
- Быков Н. И. Маашейское озеро: рождение, жизнь и смерть // География и природопользование Сибири. 2013. № 16. С. 22–30.
- Докукин М. Д. Выдающиеся прорывы озёр в 2012–2013 гг. (по материалам дистанционного зондирования Земли // Сб. трудов Северо-Кавказского института по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства. Т. 20. Пятигорск: «Севкавгипроводхоз», 2014. С. 82–97.
- Докукин М. Д., Хаткутов А. В. Озёра у ледника Малый Азау на Эльбурсе: динамика и прорывы // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 4. С. 472–479.
- Зимницкий А. В. Формирование, распространение и динамика приледниковых озёр Западного и Центрального Кавказа (в границах России). Автореферат 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.
- Пряхина Г. В., Кашкевич М. П., Попов С. В., Распутин В. А., Боронина А. С., Ганюшкин Д. А., Агатов А. Р., Непон Р. К. Формирование и развитие моренного (приледникового) озера Нурган, Северо-Западная Монголия // Криосфера Земли. 2021. Т. XXV. № 4. С. 26–35.
- Распутин В. А., Ганюшкин Д. А., Банцев Д. В., Пряхина Г. В., Вуглинский В. С., Свирепов С. С., Панютин Н. А., Волкова Д. Д., Николаев М. Р., Сыроежко Е. В. Оценка прорывоопасности малоизученных озёр массива Монгун-Тайга // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле. 2021. Т. 66. № 3. С. 487–509.
- Распутин В. А., Пряхина Г. В., Ганюшкин Д. А., Банцев Д. В., Панютин Н. А. Особенности уровня режима приледниковых моренно-подпрудных озёр в стадии роста (на примере озёр горного массива Таван-Богдо-Ола, Юго-Восточный Алтай) // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 3. С. 441–454.
- Торгоев И. А., Алёшин Ю. Г., Ерохин С. А. Эволюция ледниково-озёрного комплекса Петрова (Тянь-Шань) и оценка риска его прорывоопасности // Лёд и Снег. 2013. № 2. С. 137–144.
- Черноморец С. С., Петраков Д. А., Крыленко И. В., Крыленко И. Н., Тутубалина О. В., Алейников А. А., Тарбеева А. М. Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-Су (Кавказ) // Криосфера Земли. 2007. Т. 11. № 1. С. 72–85.

- Chistyakov K. V., Ganiushkin D. A.* Glaciation and Thermo-karst Phenomena and Natural Disasters in the Mountains of North-West Inner Asia // *Environmental Security of the European Cross-border Energy Supply Infrastructure*. 2015. P. 207–218.
- Ganyushkin D., Bantcev D., Derkach E., Agatova A., Nepop R., Griga S., Rasputina V., Ostanin O., Dyakova G., Pryakhina G., Chistyakov K., Kurochkin Y., Gorbunova Y.* Post-Little-Ice Age Glacier Recession in the North-Chuya Ridge and Dynamics of the Bolshoi Maashei Glacier, Altai // *Remote Sensing*. 2023. V. 15 (8). P. 2186.
- Ganyushkin D., Chistyakov K., Derkach E., Bantcev 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.
- Sentinel hub // Электронный ресурс. <https://www.sentinel-hub.com/> (Дата обращения: 15.10.2023).

Citation: Pryakhina G.V., Rasputina V.A., Zelepukina E.S., Bantcev D.V., Kryzhanovskaya A.E. Characteristics of the hydrological regime of the periglacial moraine lakes in the Altai. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (2): 202–212. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424020033

Characteristics of the hydrological regime of the periglacial moraine lakes in the Altai

G. V. Pryakhina^{1*}, V. A. Rasputina¹, E. S. Zelepukina², D. V. Bantcev¹, A. E. Kryzhanovskaya¹

¹*Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia;*

²*Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia*

**e-mail: g65@mail.ru*

Received November 3, 2023 / Revised December 14, 2023 / Accepted April 10, 2024

In the last decade glaciers of Inner Asia have been shrinking with acceleration, and the number of glacial lakes has been growing significantly, including those with a high probability of outburst and high-water discharge. The hydrological regime of lakes in the Altai is understudied in comparison with lakes in other high mountain countries. The article is based on our extensive field material on hydrological and morphometric characteristics of moraine lakes collected in the Russian and Mongolian parts of the Altai Mountains and combined with the Earth remote sensing data. We have proposed detailed indicators (criteria) of transgressive, regressive and post-regressive stages of lake development. It allows allow to determine at a qualitative level at what stage a lake is at and to assess its further development. The characteristics of hydrological regime of Altai lakes at different stages of development are described for the first time. Based on the criteria proposed, the classification of glacial and moraine lakes in the Altai high mountains was carried out. It shows that at present most of the lakes are in the transgressive stage. Over the last 22 years, the number of lakes has increased significantly: on the territory of the North Chuya Ridge – from 28 to 60, on the South Chuya Ridge – from 39 to 73, on the Katun Ridge – from 57 to 89, on the territory of the Tavan-Bogdo-Ola massif – from 11 to 19, and on the territory of the Mongun-Taiga massif – from 8 to 11 lakes.

Keywords: water level regime, stages of lakes development, transgressive stage, regressive stage, post-regressive stage

REFERENCES

- Aleynikova A. M., Anatskaya E. E.* Dynamics of glaciers and glacial lakes of the Ala-Arch river basin. *Uspekhi sovremenno estestvoznaniya*. Advances in current natural sciences. 2019, 9: 42–47. [In Russian].
- Bykov N. I.* Lake Maashei: birth, life and death. *Geografiya i prirodopolzovanie Sibiri*. Geography and environmental management of Siberia. 2013, 16: 22–30. [In Russian].
- 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., Khatkutov A. V.* Lakes near the glacier Mal'iy Azau on the Elbrus (Central Caucasus): dynamics

- and outbursts. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (4): 472–479. [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). Ph D. Krasnodar: Kubanskij gosudarstvennyj universitet, 2005: 22 p. [In Russian].
- Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory. V. 15. Is. 1. Pt. 5. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1977: 47 p. [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].
- Rasputina V. A., Ganyushkin D. A., Bantcev D. V., Pryakhina G. V., Vuglinsky V. S., Svirepov S. S., Paniutin N. A., Volkova D. D., Nikolayev M. R., Siroyezhko E. V. Outburst hazard of littlestudied lakes assessment at the Mongun-Taiga massif. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*. Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. 2021, 66 (3): 487–509. [In Russian].
- Rasputina V. A., Pryakhina G. V., Ganyushkin D. A., Bantcev 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].
- Torgoev I. A., Aleshin Y. G., Erokhin S. A. Development of Petrov glacial-lake system (Tien Shan) and outburst risk assessment. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 53 (2): 137–150. [In Russian].
- Chernomorets S. S., Petrakov D. A., Krylenko I. V., Krylenko I. N., Tutubalina O. V., Aleynikov A. A., Tarbeeva A. M. Changes of the Bashkara glacier-lake system and assessment of debris flow hazard in the Adyl-Su river valley (Caucasus). *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2007, XI (1): 72–84. [In Russian].
- Chistyakov K. V., Ganiushkin D. A. Glaciation and Thermokarst Phenomena and Natural Disasters in the Mountains of North-West Inner Asia. Environmental Security of the European Cross-border Energy Supply Infrastructure. 2015: 207–218.
- Ganyushkin D., Bantcev D., Derkach E., Agatova A., Nepop R., Griga S., Rasputina V., Ostanin O., Dyakova G., Pryakhina G., Chistyakov K., Kurochkin Y., Gorbunova Y. Post-Little-Ice Age Glacier Recession in the North-Chuya Ridge and Dynamics of the Bolshoi Maashei Glacier, Altai. *Remote Sens*. 2023, 15 (8): 2186.
- Ganyushkin D., Chistyakov K., Derkach E., Bantcev D., Kunaeva E., Terekhov A., Rasputina V. Glacier Recession in the Altai Mountains after the LIA Maximum. *Remote Sensing*. 2022, 14 (1508): 1–29.
- Sentinel hub. Retrieved from: <https://www.sentinel-hub.com/> (Last access: 15 October 2023).