

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ СУШИ

УДК 556.5

DOI: 10.15372/KZ20210403

ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ МОРЕННОГО (ПРИЛЕДНИКОВОГО) ОЗЕРА НУРГАН, СЕВЕРО-ЗАПАДНАЯ МОНГОЛИЯ

Г.В. Пряхина¹, М.П. Кашкевич¹, С.В. Попов^{2,1}, В.А. Распутина¹, А.С. Боронина^{3,1},
Д.А. Ганюшкин¹, А.Р. Агатова⁴, Р.К. Непоп⁴

¹Санкт-Петербургский государственный университет, 199178, Санкт-Петербург, 10 линия В.О., 33, Россия; g65@mail.ru, kashmar1972@mail.ru, lerasputina88@gmail.com, ganushkinspbgu@mail.ru

²Полярная морская геологоразведочная экспедиция, 198412, Санкт-Петербург, г. Ломоносов, ул. Победы, 24, Россия; sporov67@yandex.ru

³Государственный гидрологический институт, 199004, Санкт-Петербург, 2 линия В.О., 23, Россия; al.b.s@yandex.ru

⁴Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 3, Россия; agatr@mail.ru, rnk@igm.nsc.ru

В настоящее время происходит сокращение площади оледенения горных массивов в результате потепления климата. Это приводит к формированию перигляциальных озер в районах деградации оледенения. Моренные озера в геологическом масштабе времени недолговечны и, соответственно, представляют собой динамичные и нестабильные системы. В результате разрушения моренных дамб, подпруживающих озера, происходит образование прорывных паводков, которые могут быть сопряжены с селевыми потоками. Эти явления наносят материальный ущерб территориям, расположенным ниже по долине, и нередко приводят к гибели людей. В работе рассмотрены стадии формирования приледникового озера Нурган (хребет Цамбагарав, Северо-Западная Монголия). На основе комплексных полевых исследований даны описания трансгрессивной, регрессивной и пострегрессивной фаз развития приледникового водоема.

Ключевые слова: моренные и приледниковые озера, формирование приледниковых озер, прорывы моренных озер.

FORMATION AND EVOLUTION OF MORaine-DAMMED (PERIGLACIAL) LAKE NURGAN, NORTHWESTERN MONGOLIA

G.V. Pryakhina¹, M.P. Kashkevich¹, S.V. Popov^{2,1}, V.A. Rasputina¹, A.S. Boronina^{3,1},
D.A. Ganyushkin¹, A.R. Agatova⁴, R.K. Nepop⁴

¹St. Petersburg State University, 10th line V.O., 33, St. Petersburg, 199178, Russia; g65@mail.ru

²Polar Marine Geosurvey Expedition, Pobedy str. 24, Lomonosov, St. Petersburg, 198412, Russia

³State Hydrological Institute, 2nd line V.O., 23, St. Petersburg, 199004, Russia

⁴Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Akademika Koptyuga ave. 3, Novosibirsk, 630090, Russia

The shrinking in mountain ranges caused by climate change worldwide today leads to periglacial lakes formation in the areas of degrading glaciation. The lifetime of moraine-dammed lakes is ephemeral on the geological time scale. They are characterized by dynamic instability and are prone to outbursts. Degradation of moraine dams often results in catastrophic outbursts. Generally, these floods are followed by mudflows. Thus, glacial outburst floods and mud floods cause significant damage to the infrastructure and populated localities in the mountain foothills. In this study, we present the stages of formation and evolution of a periglacial water body on the example of Lake Nurgan (Tsambagarav, Northwestern Mongolia). Based on the results of the comprehensive field research, we have described the transgressive, regressive and post-regressive phases of the periglacial reservoir evolution.

Key words: moraine-dammed lakes, periglacial lakes, formation of periglacial lakes, moraine-dammed lakes outbursts.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих горных районах происходит деградация современного оледенения, приводящая к формированию моренно-подпруженных озер. Жизнь таких водных объектов в геоло-

гическом масштабе времени коротка. Вследствие разрушения плотин, подпруживающих озера, начинает формироваться прорывной поток, характеризующийся значительными расходами и ско-

© Г.В. Пряхина, М.П. Кашкевич, С.В. Попов, В.А. Распутина, А.С. Боронина, Д.А. Ганюшкин, А.Р. Агатова, Р.К. Непоп, 2021

ростью, что вызывает сход селя [Виноградова и др., 2017; Черноморец и др., 2018].

Интерес к проблеме опасных экзогенных процессов на Алтае возрос в последние годы в связи с катастрофическим спуском моренно-подпрудного озера Маашей. Это событие произошло 15 июля 2012 г. в результате выпадения проливных дождей, что привело к размыву каменного глетчера, служившего естественной плотиной для озера, последующему прорыву озера и образованию прорывного паводка, который стал причиной формирования мощного селевого потока [Докукин, 2015].

Большинство научных работ, связанных с исследованием прорывов моренных озера, направлено на изучение процесса формирования прорывного паводка, а также выявление механизмов и факторов, оказывающих влияние на него [Кидяева и др., 2018; Emmet, Cochachin, 2013; Neupane et al., 2019]. Тогда как исследованию формирования и развития приледниковых водоемов посвящено значительно меньше публикаций. Горная террито-

рия Алтая сравнительно мало изучена в этом отношении, хотя, согласно [Ганюшкин и др., 2016], на ней происходит сокращение площади оледенения, приводящее к увеличению числа моренно-подпрудных озера.

Авторы надеются, что результаты проведенных исследований помогут дополнить представления о развитии гляциальных моренно-подпрудных озера на примере оз. Нурган (горная система Алтай, хр. Цамбагарав, Северо-Западная Монголия), являющегося типичным представителем водоемов этой группы.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Озеро Нурган расположено на территории горного массива Цамбагарав Алтайской горной страны (рис. 1) и относится к типу моренно-подпрудных горных озера. После отступления ледника Эрегтийн, берущего начало на северо-восточных и северных склонах куполовидной вершины Цаст-Ула (4208 м над ур. моря), площадь которого, со-

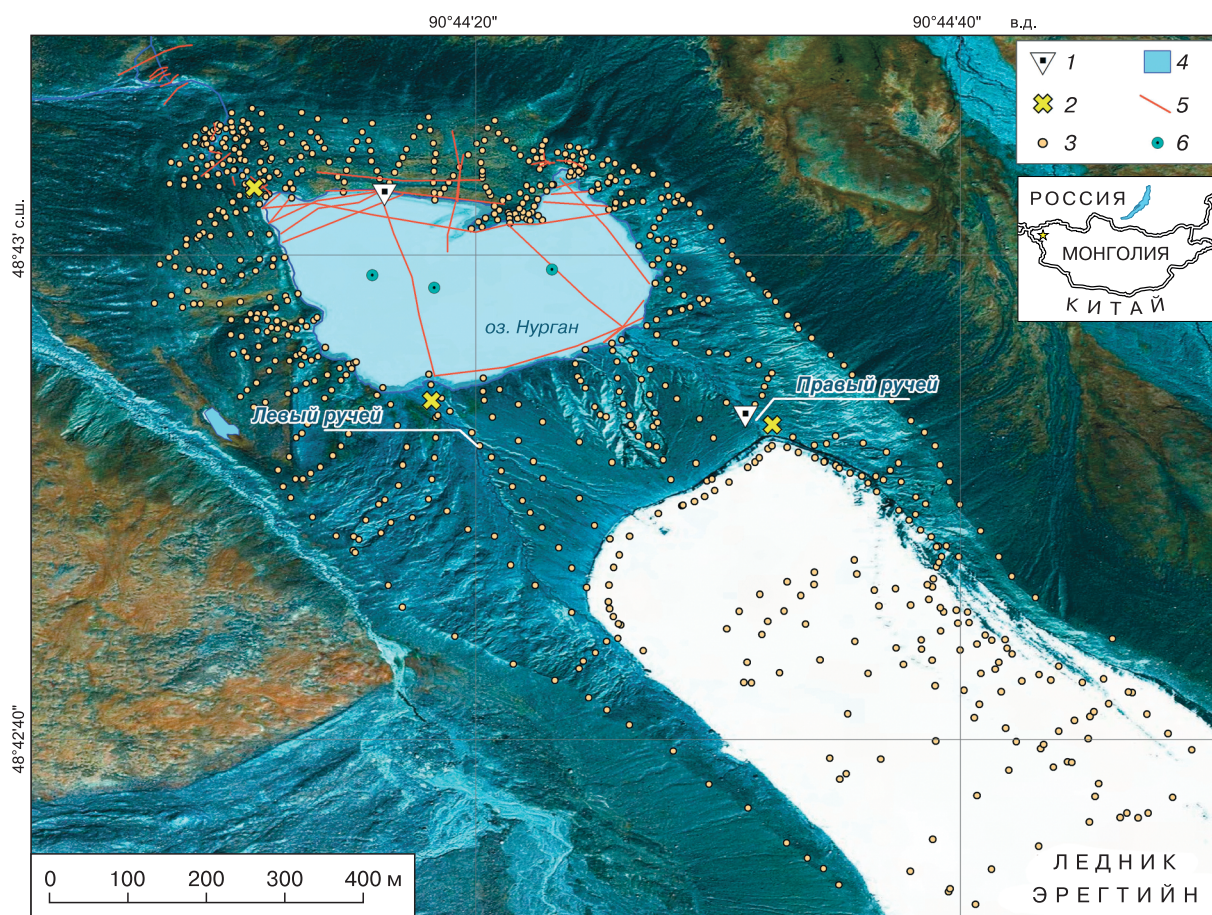


Рис. 1. Схема района работ.

1 – водомерные посты; 2 – пункты измерения скоростей течения; 3 – пункты тахеометрических измерений; 4 – область батиметрической съемки; 5 – профили георадарных зондирований; 6 – пункты отбора проб воды. Синей линией показан ручей, вытекающий из озера.



Рис. 2. Вид на оз. Нурган и запрудную морену с ледника (а), северный склон морены (б).

Фотографии А.С. Борониной и С.В. Попова, август 2019 г. Штриховой линией показаны фрагменты, фиксирующие возможные прошлые уровни высоких вод с абсолютной отметкой относительно эллипсоида WGS 84.

гласно [Ганюшкин и др., 2016], составляет 4.94 км², озеро утратило с ним прямой контакт, сохранив связь посредством двух относительно крупных ручьев, берущих начало на леднике и впадающих в водоем. Основной сток с ледника в настоящее время осуществляется через тоннель в ледяном ядре морены Малого ледникового периода с участками входа и выхода на высоте 3255 и 3185 м соответственно. В северо-западной части озерной котловины имеются следы разрушения тела подпруживающей озеро морены в виде V-образного прорана (рис. 2, а). Там же из водоема вытекает ручей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В июле–августе 2019 г. в рамках экспедиции Санкт-Петербургского государственного университета научно-исследовательским отрядом были выполнены комплексные исследования района оз. Нурган. Объем полевых работ показан на рис. 1.

Батиметрические работы осуществлялись с надувной весельной лодки. Для регистрации глубин использовался электронный эхолот-карт-плоттер Garmin ECHOMAP 42cv (Garmin Ltd., Taiwan). Контуры озера определялись с помощью спутникового приемника Garmin GPSmap64st. Составление батиметрической схемы осуществлялось в специализированной картографической программе Surfer 16 (Golden Software Inc., USA).

Тахеометрическая съемка рельефа прибрежной территории озер и поверхности ледника выполнялась с использованием тахеометра Trimble M3 DR 5" (Trimble Navigation Ltd, USA). Обработка данных осуществлялась с применением ранее разработанных алгоритмов [Попов, Боронина, 2019].

Наблюдения за уровнем воды в озере проводились с 29 июля по 5 августа на временном рееч-

ном водомерном посту два раза в сутки. Створы для измерения скоростей течения воды и отбора проб на мутность располагались на ручьях, берущих начало с ледника Эрегтийн вблизи их впадения в водоем и на выходе вытекающего из озера ручья. Скорость течения определялась при помощи гидрометрической вертушки ИСП-1. Объем аккумулированной воды в озере за сутки определялся по данным наблюдений за уровнем воды с использованием кривой объемов. Оценка соотношения между количеством поступающей в водоем и расходуемой на сток воды выполнялась по данным суточных наблюдений за изменениями расходов воды двух втекающих в озеро ручьев и вытекающего водотока. Пробы воды на мутность обрабатывались в лаборатории геоэкологического мониторинга Института наук о Земле СПбГУ в соответствии с методикой, изложенной в работе [Потанова и др., 2006]. Отбор проб озерной воды на изотопный анализ для определения $\delta^{18}\text{O}$ осуществлялся в центральной части акватории водоема с разных глубин при шаге 5 м, начиная с поверхности. Обработка производилась в лаборатории изменения климата и окружающей среды Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ, С.-Петербург) на газовом анализаторе Picarro L2120-i. В качестве стандарта использовалась дистиллированная водопроводная вода Санкт-Петербурга с характеристикой -9.79‰ по $\delta^{18}\text{O}$ относительно стандарта МАГАТЭ V-SMOW2.

Наблюдения за скоростью отступления бровки склона, на котором развивается термокарст, проводились на прибрежных участках озера 29 июля, 3 и 6 августа 2019 г. в 10 точках (рис. 3).

Геофизические исследования методом георадиолокации выполнялись на оз. Нурган и окружающих его моренных отложениях. Съемка производилась отечественным георадаром ОКО-2 (ООО

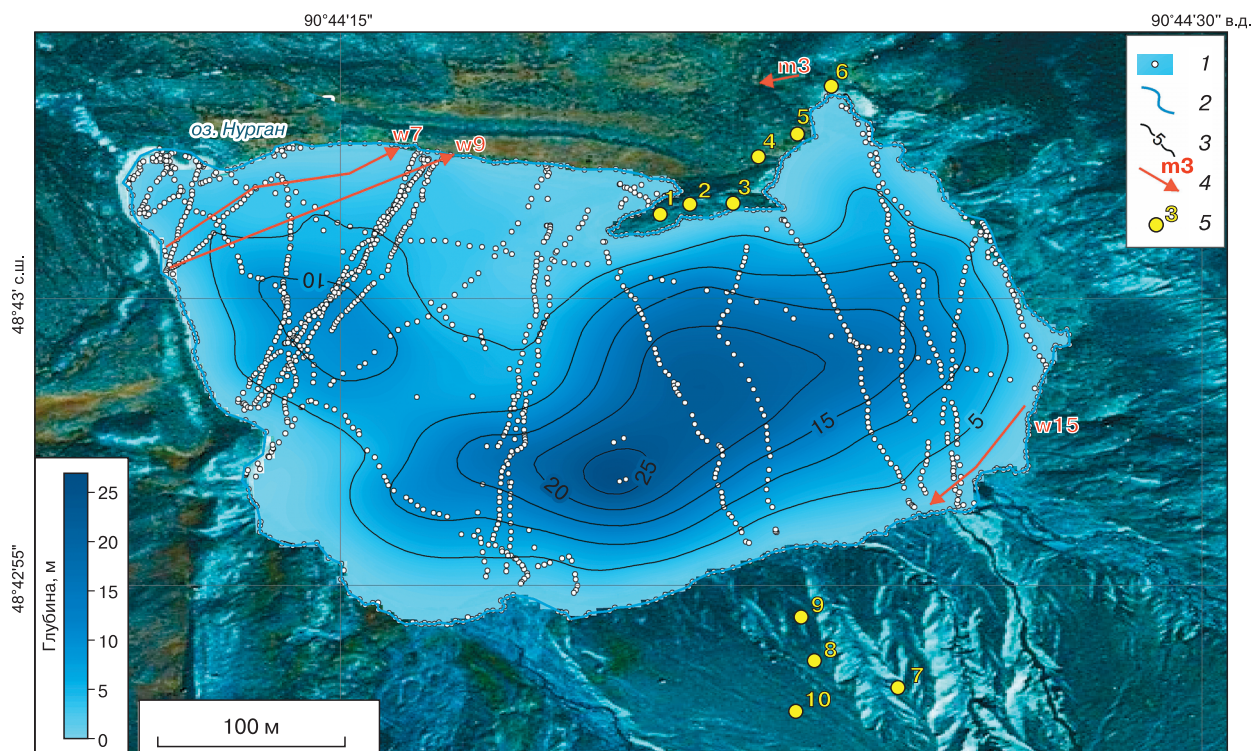


Рис. 3. Батиметрическая схема озера Нурган.

1 — пункты измерения глубин; 2 — береговая линия; 3 — изобаты (сечение 5 м); 4 — георадарные маршруты и их номера; 5 — пункты наблюдений за термокарстом.

“Логистические системы”, Россия) с экранированным антенным блоком АБ-400 (частота зондирующих импульсов 400 МГц). Визуализация и первоначальная обработка проводились с использованием программного обеспечения Geoscan32 (ООО “Логистические системы”, Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Происхождение котловины и трансгрессивная фаза развития озера

Строение озерной котловины и ее морфометрические характеристики не только оказывают влияние на гидрологический режим водоема, в частности, на уровенный и термический режимы, но и косвенным образом свидетельствуют о генезисе озерной чаши.

Анализ рельефа дна оз. Нурган показал его сложный характер: углубления чередуются с выположенными участками. Область наибольших глубин (до 25 м) расположена в южной части озера, которая непосредственно примыкает к участку забронированного мертвого льда. Из-за большей крутизны склонов с восточной стороны водоема значительные глубины начинаются, как правило, сразу от уреза воды. Второе углубление располагается в западной части озера. Здесь глубины дости-

гают 10 м (см. рис. 3). В северной и северо-восточной частях озера рельеф дна более пологий. Чередование впадин и поднятий в пределах акваторий, согласно [Зимницкий, 2005], характерно для рельефа приледниковых озер, полностью или частично сформированных во льду.

О большой роли льда в формировании котловины озера свидетельствуют и результаты геофизических исследований, выполненных на акватории водоема (рис. 4). Судя по волновой картине полученных георадиолокационных разрезов, под верхними слоями толщи донных отложений, представленных мелкодисперсным материалом (флювиогляциальные отложения) и грубообломочным материалом (терригенные отложения, образованные за счет поступления осыпи с морены ледника), расположен слой льда с включениями валунов различного размера.

На наличие донного льда указывают результаты моделирования. На представленных временных разрезах (см. рис. 4, в) имеются многочисленные дифрагированные волны, сформированные неоднородностями. Годограф одной из них удалось смоделировать в рамках модели наклонно-слоистой среды [Попов, 2017]. Он приведен на временном разрезе. Послойное моделирование показывает, что наилучшее соответствие реального и

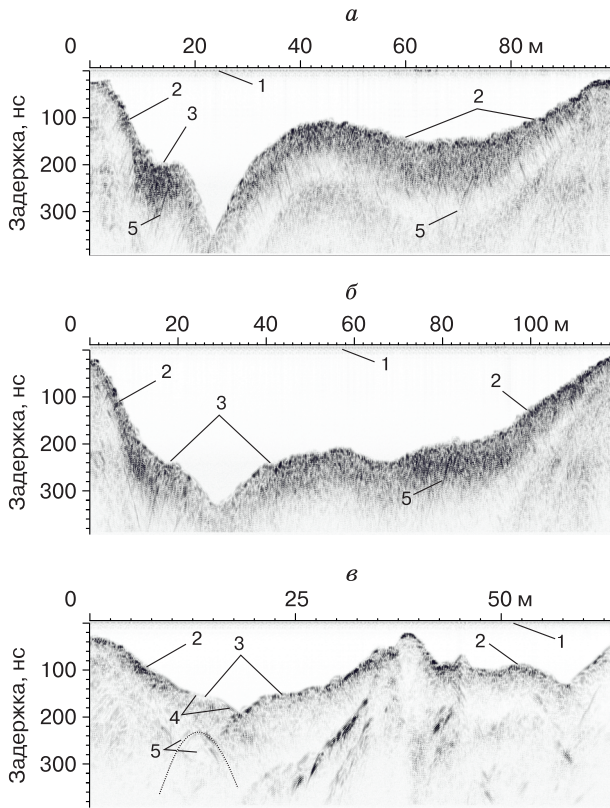


Рис. 4. Временной георадарный разрез по маршрутам w7 (а), w9 (б) и w15 (в).

1 – прямая волна; отраженные волны: 2 – от придонной части озера, 3 – от террасы, 4 – от флювиогляциальных отложений; 5 – дифрагированная волна. Модельный годограф показан пунктирной линией (в). Положение маршрутов см. на рис. 3.

модельного годографов достигается при диэлектрической проницаемости среды ~ 3.17 ед., которое характерно для льда [Мачерет, 2006].

Таким образом, с высокой степенью вероятности можно полагать, что озеро начало образовываться на поверхности льда, уже потерявшей движение, расположенной ниже ледника после кульминации Малого ледникового периода, что соответствует интервалу около 1810–1820 гг. [Ганюшкин и др., 2016]. Далее наступила трансгрессивная фаза развития оз. Нурган, которая характеризовалась заполнением чаши тальми водами с постепенным повышением уровня воды, увеличением площади и глубины водоема. Одновременно началось формирование слоя донных отложений. Мощность верхнего слоя флювиогляциальных отложений, согласно георадарным разрезам, в различных частях озера изменяется от 0 см на крутых до (20 ± 2) см на пологих участках дна. Ниже располагается слой терригенных отложений мощностью от 0.5 до 1 м (± 2 см). Если принять

скорость осадконакопления для ледниково-запрудных озер равной 0.5 мм/год [Ананьева и др., 1996], то слой тонкодисперсного материала на дне озера вполне мог образоваться за последние 200 лет.

Регрессивная фаза развития озера

На момент экспедиционных работ оз. Нурган претерпело сокращение площади и объема водной массы, пройдя основную фазу регрессивной стадии, о чем свидетельствуют сохранившиеся в рельефе следы изменений объема и направления стока моренно-подпрудного озера. Геоморфологические наблюдения показали, что на северном склоне озерной котловины сохраняются две озерные террасы, фиксирующие бывшие уровни воды с высотными отметками 2988 и 2991.5 м, что значительно выше современного уровня водоема (см. рис. 2, б). С уровня верхней террасы берет начало короткая V-образная долина, прорезающая боковой моренный вал в северо-восточной части озерной котловины. Отметка вреза достигает величины 2994 м, что примерно на 11 м выше, чем современный уровень воды в озере. В настоящее время эта долина не занята водным потоком. На топографической карте района исследования (М 46-110), изданной в 1969 г. (масштаб 1:100 000), по данным аэрофотосъемки 1948–1949 гг. (рис. 5, а), ручей, направленный от оз. Нурган, расположен в северо-восточной части морены. При этом анализ космического снимка Согопа от 11.08.1968 г. (см. рис. 5, б) показал, что в это время в северо-западной части морены уже существовал ручей, а площадь озера составляла 54 450 м², т. е. была меньше современной. Это означает, что, вероятнее всего, гидросеть на данном участке карты отражает ситуацию 1948–1949 гг.

Поэтому можно предположить, что высокие уровни озера имели место в интервале между окончанием Малого ледникового периода и серединой XX в. В промежутке между 1948 и 1968 гг. произошло разрушение моренного вала в северо-западной части, формирование там стока из водоема и снижение уровня озера. По результатам выполненной тахеометрической съемки были установлены размеры образовавшегося прорана: максимальная ширина по гребню моренной перемычки составляет 165 м, по дну 30 м; глубина около 17 м, площадь и средняя ширина были оценены в 1640 м² и 96 м соответственно.

Так как прорыв произошел при имеющемся оттоке воды из озера (ручей в северо-западной части морены), то основными факторами могли быть либо избыточное по сравнению с пропускной способностью русла ручья количество поступающей в водоем воды, либо дестабилизирующие процессы, ослабившие моренную перемычку.

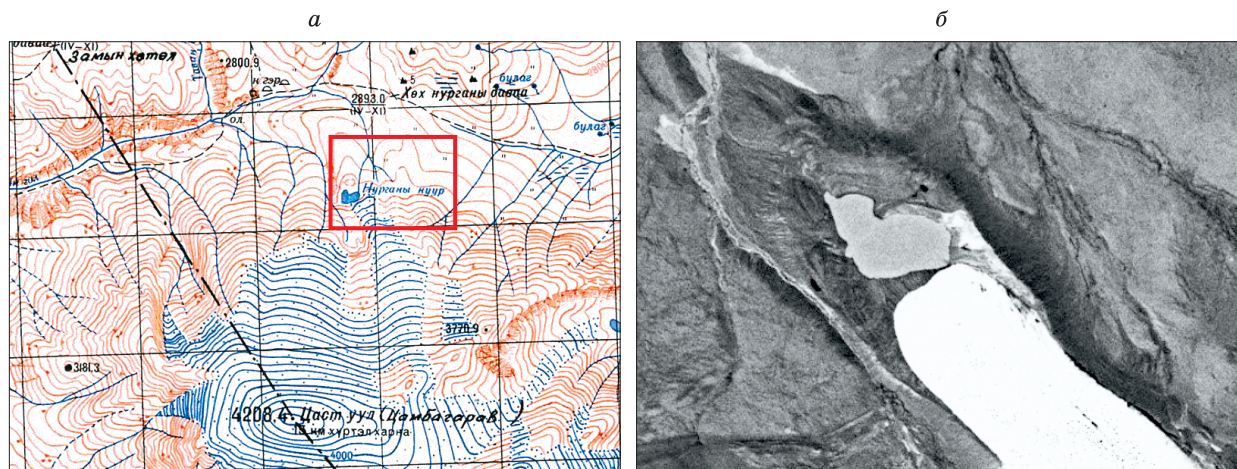


Рис. 5. Топографическая карта хребта Цамбагарав (а) и фрагмент снимка Согопа (б).

Пострегрессионное развитие водоема

После образования в морене прорана котловина озера не осушилась полностью, поверхностный сток сохранился через вытекающий на северо-западе ручей. Воспроизведем дальнейшее развитие водоема и рассмотрим основные факторы, влияющие на состояние моренно-подпрудных озер, первым из которых является *режим наполнения озерной котловины в период наибольшей абляции*.

Так как величины осадков для данного района невелики и в среднем составляют 200–300 мм [Отгонбаяр, 2012], основной источник поступления воды в озеро – ледниковый сток. Это было подтверждено результатами изотопного анализа, согласно которым содержание $\delta^{18}\text{O}$ в воде оз. Нурган однородно по глубине и составляет 16.2 ‰, что свидетельствует о полном преобладании ледникового питания. Оценка соотношения количе-

ства поступающей в водоем и расходуемой на сток воды с учетом изменения уровня озера показала, что полный объем аккумулируемой в озере воды в среднем за период суточной абляции составил 4388 м³. При этом общий приток оценен в 10 436 м³, из которого на долю руслового притока приходится 8208 м³ (79 %), а на распределенный приток с водосборной площади – 2160 м³ (21 %). Объем вытекающей воды составил 6048 м³.

Сравнительная оценка площадей водоема за период 1968–2019 гг. (по спутниковому снимку 1968 г. и по результатам батиметрической съемки 2019 г.) показала увеличение площади акватории на 12 % за 51 год, при этом уровень воды вырос на 3 м. Таким образом, было выявлено, что в период наибольшей водоотдачи ледника как в суточном, так и в сезонном аспекте, приток в озеро был больше, чем отток из него, т. е. наполнение озера происходило быстрее, чем его сработка.



Рис. 6. Ручей, вытекающий из озера Нурган.

Фотографии выполнены А.С. Бороиной с одного места, 06.08.2019 г., в 12:55 (а) и 14:55 (б).

Отметим также, что сток из озера происходит по слабо выработанному руслу, которое на расстоянии около 70 м от истока ручья теряет очертания, и вода начинает фильтроваться в морену, ввиду чего скорость потока уменьшается. По мере усиления таяния пропускная способность снижается, водная масса начинает скапливаться в понижениях рельефа, тем самым образуя небольшие озерца и создавая дополнительный подпор (рис. 6). Заливание этих участков выносимым из озера флювиогляциальным материалом со временем может привести к снижению их фильтрационной способности и затоплению.

Второй фактор, который может привести к деградации и постепенному уничтожению озера: *интенсивная аккумуляция твердого материала, т. е. заполнение котловины аллювиальными, флювиогляциальными, пролювиальными отложениями* [Зимницкий, 2005]. Анализ отобранных проб показал, что в ручье, вытекающем из водоема, величина мутности практически в 15 раз меньше, чем в ледниковых ручьях: 5.7 и 90.2 мг/л (в левом ручье) соответственно. В пересчете на весь период абляции количество осаждаемого твердого материала в озере за год оценивается в 107 т, что составляет 95 % от всего поступающего с ледниковым стоком твердого материала.

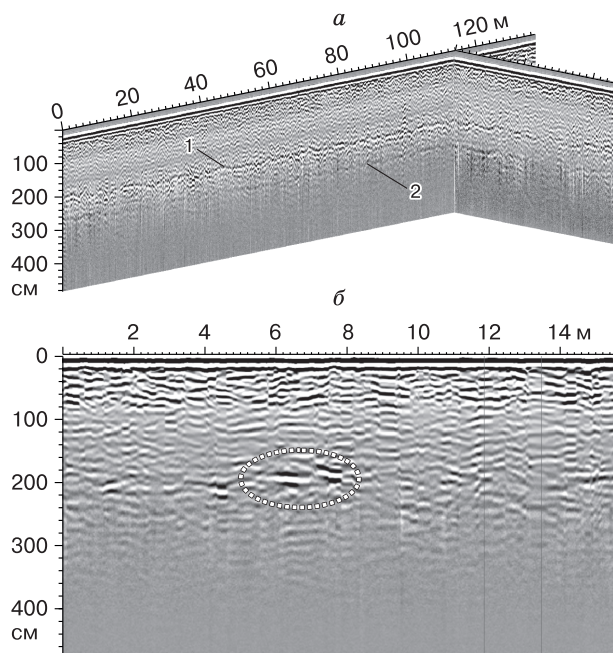


Рис. 7. Результаты георадиолокации на участке развития моренных отложений.

а – северный берег озера: 1 – граница сухих и влажных пород, 2 – граница влажных и подстилающих мерзлых пород; *б* – северо-восточный берег: яркие отражения на радарограммах (выделены пунктиром) соответствуют положению ледяных линз.

Третий фактор – *устойчивость подпруживающей плотины, которая во многом определяется фильтрационными и термоэрозионными процессами, протекающими в теле дамбы.*

В процессе полевых исследований фильтрации через морену выявлено не было. Однако, как известно, внутри морен Малого ледникового периода могут содержаться ядра “мертвого льда” либо мерзлый грунт, которые при оттаивании приводят к стремительному разрушению пород [Korup, Tweed, 2007]. Согласно [Chistyakov, Ganiushkin, 2015], в последние годы в связи с потеплением климата процессы термоэрозии значительно активизировались в горах Алтая. Так, в северо-восточной части склона исследуемой озерной котловины был обнаружен участок с активным вытаиванием и обрушением грунта, что свидетельствует о значительном развитии термоэрозии в период усиленной абляции. В течение недели полевых работ максимальное смещение кромок относительно реперных точек составило 2.18 и 1.54 м для точек 4 и 5 соответственно (см. рис. 3), при среднем значении 0.65 м.

Проведенные геофизические исследования подпруживающей морены (георадарное профилирование на частоте 400 МГц) показали, что в пределах практически всей изученной толщи прослеживается граница сухих и подстилающих водонасыщенных отложений на глубине около 2 м (цифра 1 на рис. 7, *а*). Ниже первой границы проходит еще одна с менее контрастными отражениями (цифра 2 на рис. 7, *а*). С большой степенью вероятности она может быть связана с переходным слоем между влажными и мерзлыми породами с включениями линз льда. Область контрастных отражений (см. рис. 7, *б*) соответствует предположительно контакту фрагментов погребенного ледникового льда с окружающими водонасыщенными породами в результате их сезонного оттаивания. Предельная глубина исследования моренных отложений методом георадиолокации с используемой антенной АБ-400 составила около 5 м, что связано с большим содержанием проводящей глинистой составляющей в породе и, как следствие, резким затуханием электромагнитной волны с глубиной.

Наличие границы сухих и влажных пород подтверждается натурными наблюдениями. На рис. 8, *а, б* приведены фотографии стенки обнажения непосредственно на участке выполнения георадиолокационной съемки. Георадиолокационный профиль проходил параллельно кромке обрыва, примерно в 2 м от края (см. рис. 8, *в*). Положение рулетки соответствует центру профиля.

Таким образом, на момент экспедиционных исследований в теле морены до глубины 5 м от поверхности не было обнаружено крупных ледяных

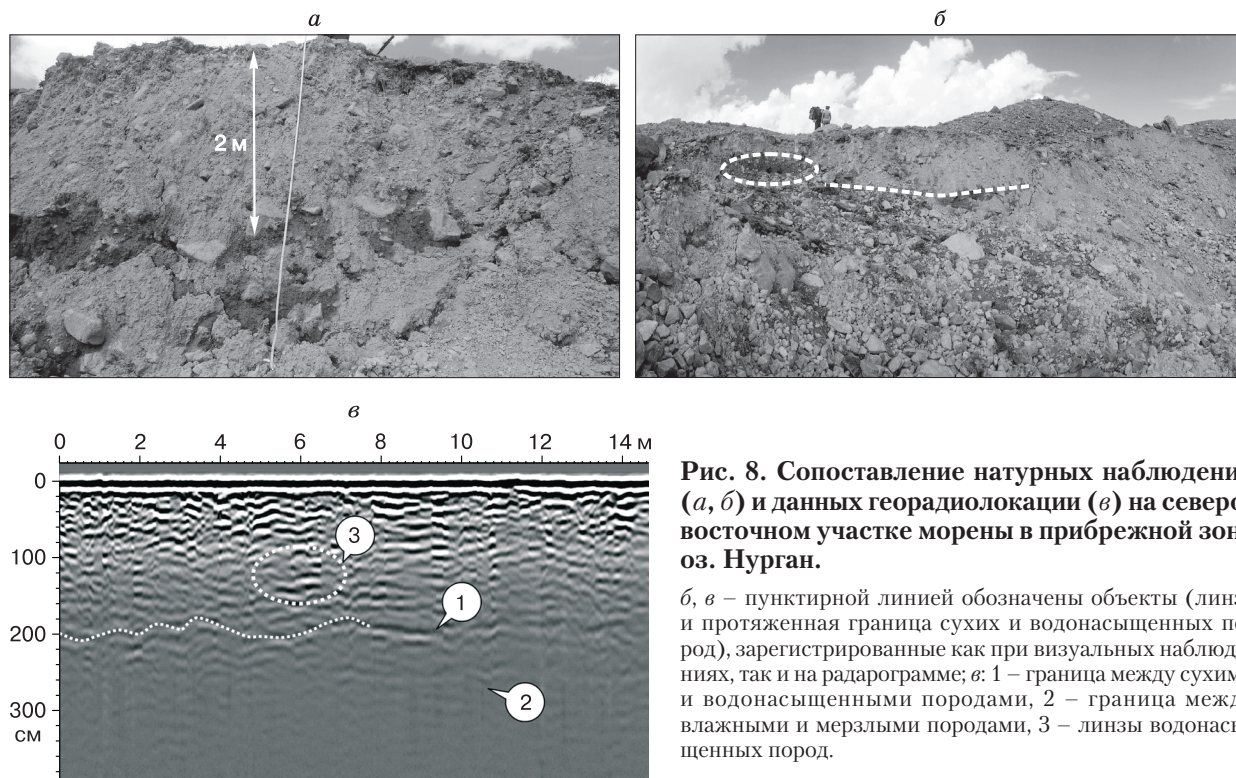


Рис. 8. Сопоставление натуральных наблюдений (а, б) и данных георадиолокации (в) на северо-восточном участке морены в прибрежной зоне оз. Нурган.

б, в – пунктирной линией обозначены объекты (линза и протяженная граница сухих и водонасыщенных пород), зарегистрированные как при визуальных наблюдениях, так и на радарограмме; в: 1 – граница между сухими и водонасыщенными породами, 2 – граница между влажными и мерзлыми породами, 3 – линзы водонасыщенных пород.

линз, протаивание которых могло бы привести к образованию внутренних каналов стока. На глубине 2.5–2.8 м от поверхности порода находится в мерзлом состоянии и, возможно, включает отдельные линзы льда, протаивание последних формирует водонасыщенный слой сезонного оттаивания, расположенный выше. Часть моренной перемычки, находящейся ниже уровня воды, очевидно, также находится в “стабильном” состоянии, так как следов подморенной абляции и эрозии выявлено не было.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов позволяет выделить этапы развития приледникового озера и факторы, влияющие на этот процесс. Как многие озера этого типа, оз. Нурган после начала формирования прошло трансгрессивную стадию развития, длительность которой авторами оценивается порядка 150 лет. В этот период произошло формирование котловины озера и заполнение ее талыми ледниковыми водами. Пройдя стадию зарождения на поверхности “мертвого льда”, водоем в итоге перешел в моренно-подпрудный. На этом этапе определяющим фактором стало количество поступающего ледникового стока. Авторы полагают, что в этот период весь сток с ледника поступал в озеро, что и привело к его наполнению до максимально возможного уровня. Прорыв подпружи-

вающей морены, который привел к частичному спуску озера, является следующей фазой, также характерной для многих озер данного типа, и относится к регрессивной стадии. Процесс, вероятно, протекал достаточно быстро, и, судя по форме и размерам образовавшегося прорана, он формировался за счет перелива озерных вод через гребень морены и размыва ее тела. Основными факторами здесь выступили давление воды на тело плотины и устойчивость перемычки, на которую могли повлиять как внешние воздействия (сейсмическая активность), так и процессы внутри самой морены. К последним прежде всего относятся фильтрация и протаивание мерзлого грунта. Отсутствие (по данным геофизических исследований) крупных ледниковых “ядер” в верхнем 5-метровом слое ненарушенной части морены и следов погребенного льда на боковых склонах прорана позволяют исключить этот фактор дестабилизации плотины. Частичный, а не полный спуск озера объясняется прежде всего тем, что котловина значительно углублена в рельеф.

После разрушения части моренной перемычки оз. Нурган перешло в стадию медленного наполнения. За истекшее время площадь озера увеличилась всего на 12 %, примерно на 0.2 % в год. На скорость заполнения влияет наличие стока из озера и тот факт, что в настоящее время значительная часть ледникового стока не поступает в

озеро, а уходит из бассейна через ледяной грот на высоте 3185 м, давая начало р. Эрегтийн-Гол. В целом можно сказать, что на сегодняшний день озеро квазистабильно.

Небольшой период наблюдений за режимом водоема, к сожалению, не позволяет с высокой степенью надежности прогнозировать его дальнейшее развитие, однако следует обратить внимание на некоторые тенденции, которые в определенном сочетании могут повлиять на ход эволюции водоема и вернуть его в активную трансгрессивную фазу:

- слабо развитый в настоящее время канал стока из озера и связанные с этим колебания уровня;

- наличие в моренной перемычке участков с развитыми термокарстовыми процессами;

- вероятность обвала и перекрытия нынешнего канала стока моренным материалом, что может привести к росту уровня воды;

- в условиях современного потепления интенсивное таяние ледника Эрегтийн может вызвать переориентацию направления стока р. Эрегтийн-Гол непосредственно в озеро, что значительно повлияет на рост уровня воды.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность Д.В. Банцеву за помощь в проведении полевых работ и за предоставление данных по изотопному анализу воды.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00535 А «Природные катастрофы и трансформация ландшафтов юго-восточного Алтая и северо-западной Монголии в период максимума оледенения»).

Литература

Ананьева Э.Г., Ефремов Ю.В., Парунин О.Б. Некоторые особенности седиментации в горных озерах Большого Кавказа // Литология и полез. ископаемые, 1996, № 4, с. 359–365.

Виноградова Т.А. Опасные гидрологические явления (краткий конспект лекций): учеб.-метод. пособие / Т.А. Виноградова, Н.А. Казаков, А.Ю. Виноградов и др. СПб., Тип. "Знак", 2017, 128 с.

Ганюшкин Д.А., Отгонбаяр Д., Чистяков К.В. и др. Современное оледенение хребта Цамбагарав (Северо-Западная Монголия) и его изменение с максимума малого ледникового периода // Лед и снег, 2016, т. 56, № 4, с. 437–452.

Докукин М.Д. Выдающиеся прорывы озер в 2012–2013 гг. (по материалам ДЗЗ) // Сб. тр. Северо-Кавказ. ин-та по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства, Пятигорск, 2015, с. 82–97.

Зимницкий А.В. Формирование, распространение и динамика приледниковых озер Западного и Центрального Кавказа (в границах России): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Краснодар, 2005, 22 с.

Кидяева В.М., Петраков Д.А., Крыленко И.Н. и др. Опыт моделирования прорыва Башкаринских озер // Геориск, 2018, т. XII, № 2, с. 38–46.

Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М., Науч. мир, 2006, 392 с.

Отгонбаяр Д. Водно-ледниковые ресурсы бессточных районов Западной Монголии: современная оценка и тенденции изменения: Дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2012, 170 с.

Попов С.В. Определение диэлектрической проницаемости по годографам дифрагированных волн в рамках модели наклонно-слоистой среды // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 3, с. 83–87.

Попов С.В., Боронина А.С. Программное обеспечение для обработки данных тахеометрической съемки // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование: Сб. материалов III Всерос. науч.-практ. конф. СПб., 2019, с. 258–263.

Потапова Т.М. Методы определения гранулометрического и геохимического состава донных отложений и взвешенных наносов: учеб.-метод. пособие / Т.М. Потапова, И.В. Федорова, Т.В. Паршина. СПб., Изд-во СПбГУ, 2006, 94 с.

Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А. и др. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 2, с. 70–80.

Chistyakov K.V., Ganiushkin D.A. Glaciation and thermokarst phenomena and natural disasters in the mountains of North-West Inner Asia // Environ. Security of the Europ. Cross-Border Energy Supply Infrastructure, NATO Science for Peace and Security Series C / M.G. Culshaw et al. (Eds.), 2015, p. 207–218, DOI: 10.1007/978-94-017-9538-8_13.

Emmer A., Cochachin A. The causes and mechanisms of moraine-dammed lake failures in the Cordillera blanca, North America Cordillera, and Himalayas // AUC Geographica, 2013, vol. 48, No. 2, p. 5–15.

Korup O., Tweed F. Ice, moraine, and landslide dams in mountainous terrain // Quatern. Sci. Rev., 2007, vol. 26, p. 3406–3422.

Neupane R., Chen H., Cao C. Review of moraine dam failure mechanism // Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, vol. 10, No. 1, p. 1948–1966.

References

Anan'eva E.G., Efremov Yu.V., Parunin O.B. Some features of sedimentation in the Great Caucasus mountain lakes. Litologiya i poleznye iskopaemye [Lithology and Mineral Resources], 1996, No. 4, p. 359–365 (in Russian).

Vinogradova T.A., Kazakov N.A., Vinogradov A.Yu. et al. Opasnye gidrologicheskie javleniya (kratkij konspekt lekcij): uchebno-metodicheskoe posobie [Hazardous hydrological phenomena (concise lectures): teaching aid]. St. Petersburg, Tipografija "Znak", 2017, 128 p. (in Russian).

Ganyushkin D.A., Otgonbayar D., Chistyakov K.V., Kunaeva E.P., Volkov I.V. Recent glacierization of the Tsambagarav ridge (North-Western Mongolia) and its changes since the Little Ice Age maximum. Led i Sneg [Ice and Snow], 2016, vol. 56, No. 4, p. 437–452 (in Russian).

Dokukin M.D. Extraordinary glacial lake outburst floods in 2012–2013 (based on remote sensing data). In: Proc. of the North Caucasus Institute for the design of water management and land reclamation construction, Pyatigorsk, 2015, p. 82–97 (in Russian).

Zimnickij A.V. Formirovanie, rasprostranenie i dinamika prilednikovyh ozer Zapadnogo i Central'nogo Kavkaza (v granicah Rossii) [Formation, distribution and dynamics of periglacial lakes in the Western and Central Caucasus (within the borders of Russia)]. PhD abstract. Krasnodar, 2005, 22 p. (in Russian).

- Kidyaeva V.M., Petrakov D.A., Krylenko I.N. et al. An experience in modeling the Bashkara lakes outbursts. *Georisk* [Georisk], 2018, vol. XII, No. 2, p. 38–46 (in Russian).
- Macheret Yu.Ya. *Radiozondirovanie lednikov* [Radio-echo Sounding of Glaciers]. Moscow, Nauchnyi mir, 2006, 392 p. (in Russian).
- Otgonbayar D. *Vodno-lednikovye resursy besstochnyh rajonov Zapadnoj Mongolii: sovremennaja ocenka i tendencii izmenenija* [Glacier-water resources of closed-drainage areas of Western Mongolia: current assessment and trends of change]. PhD. Tomsk, 2011, 170 p. (in Russian).
- Popov S.V. Determination of dielectric permittivity from diffraction traveltime curves within a dipping-layer model. *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. XXI, No. 3, p. 75–79.
- Popov S.V., Boronina A.S. Software for processing data of tachometric survey. In: *Geodesy, Cartography, Geoinformatics and Cadastre: Abstr. III Russian Conf. on Applied Science*. St. Petersburg, 2019, p. 258–263 (in Russian).
- Potapova T.M., Fedorova I.V., Parshina T.V. *Metody opredeleniya granulometricheskogo i geohimicheskogo sostava donnyh otlozhenij i vzveshennyh nanosov: uchebno-metodicheskoe posobie* [Methods for determining the granulometric and geochemical composition of bottom sediments and suspended sediments: a teaching aid]. St. Petersburg, Izd-vo SPbGU, 2006, 94 p. (in Russian).
- Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Aleynikov A.A. et al. The outburst of Bashkara glacier lake (Central Caucasus, Russia) on September 1, 2017. *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. XXII, No. 2, p. 61–70.
- Chistyakov K.V., Ganiushkin D.A. Glaciation and thermokarst phenomena and natural disasters in the mountains of North-West Inner Asia. In: *Environmental Security of the European Cross-Border Energy Supply Infrastructure, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. M.G. Culshaw et al. (Eds.), 2015, p. 207–218, DOI: 10.1007/978-94-017-9538-8_13.
- Emmer A., Cochachin A. The causes and mechanisms of moraine-dammed lake failures in the Cordillera blanca, North America Cordillera, and Himalayas. *AUC Geographica*, 2013, vol. 48, No. 2, p. 5–15.
- Korup O., Tweed F. Ice, moraine, and landslide dams in mountainous terrain. *Quatern. Sci. Rev.*, 2007, vol. 26, p. 3406–3422.
- Neupane R., Chen H., Cao C. Review of moraine dam failure mechanism. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, vol. 10, No. 1, p. 1948–1966.

*Поступила в редакцию 3 октября 2020 г.,
после доработки – 17 января 2021 г.,
принята к публикации 18 февраля 2021 г.*