

Оценка прорывоопасности малоизученных озер массива Монгун-Тайга*

В. А. Распутина¹, Д. А. Ганюшкин¹, Д. В. Банцев¹, Г. В. Пряхина¹,
В. С. Вуглинский^{1,2}, С. С. Свирепов¹, Н. А. Панютин¹, Д. Д. Волкова¹,
М. Р. Николаев¹, Е. В. Сыроежко¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,

Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Государственный гидрологический институт,

Российская Федерация, 199004, Санкт-Петербург, 2-я линия В. О., 23

Для цитирования: Распутина, 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. (2021). Оценка прорывоопасности малоизученных озер массива Монгун-Тайга. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 66 (3), 487–509.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.304>

В результате потепления климата происходит сокращение площади оледенения горных массивов, что приводит к образованию озерно-ледниковых комплексов в районах деградации оледенения. Эти комплексы представляют собой динамичные системы, стремительно изменяющиеся во времени (что подтверждается анализом картографического материала и спутниковых снимков за разные годы), и, следовательно, являются нестабильными и потенциально прорывоопасными. Прорывы моренных и приледниковых озер относятся к опасным гидрологическим явлениям. В результате прорывов может происходить формирование катастрофических прорывных паводков и селевых потоков, наносящих серьезный ущерб инфраструктуре расположенных ниже по течению населенных пунктов и приводящих нередко к человеческим жертвам. В связи с этим изучение прорывоопасных озер необходимо и является важной прикладной задачей, связанной с прогнозированием опасных природных явлений. В настоящей работе была проведена оценка прорывоопасности малоизученных моренных и приледниковых озер горного массива Монгун-Тайга (Республика Тыва, Российская Федерация) при помощи метода балльной оценки, дополненного с учетом региональных особенностей и с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Выполненная оценка, согласно спутниковым снимкам, показала, что большинство озер массива имеет высокую прорывоопасность. По результатам оценки была выбрана группа озер, расположенных в верховьях правого притока р. Толайты с целью более детального обследования в полевых условиях (гидрологические и геофизические исследования). Полевые работы, которые проводились на выбранной группе озер, позволили скорректировать выполненную оценку. В работе оценена применимость метода на основе сравнения натурных данных и данных, полученных по спутниковым снимкам.

Ключевые слова: моренные и приледниковые озера, прорывы озер, опасные гидрологические явления.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-05-00535 А «Природные катастрофы и трансформация ландшафтов юго-восточного Алтая и северо-западной Монголии в период с максимума оледенения»).

1. Введение

Прорывы моренных и приледниковых озер являются одними из наиболее серьезных ледниковых катастроф и происходят в различных районах нашей планеты (Björnsson, 1976; Нуркадилов и др., 1986; Попов, 1987; Черноморец и др., 2007; Докукин и Хаткутов, 2016; Боронина и др., 2019). Такие прорывы чаще всего формируют катастрофические паводки и селевые потоки, наносящие значительный ущерб инфраструктуре расположенных ниже по течению населенных пунктов и нередко сопровождающиеся человеческими жертвами (Виноградов, 1977; Richardson and Reynolds, 2000; Черноморец и др., 2003; Clarke, 2003). В этой связи оценка прорывоопасности моренных и приледниковых озер является важной прикладной задачей, связанной с изучением и прогнозированием опасных природных явлений. Методические подходы, применяемые для ее решения, весьма разнообразны, включают в себя методы физического и математического моделирования, использование дистанционного зондирования, эмпирические формулы и т. д. (Виноградов, 1976; 1977; Haerberli, 1983; Costa, 1985; Мочалов и Цукерман, 1982; Reynolds, 2003; Huggel et al., 2004; Беликов, 2005; Докукин и Хаткутов, 2016; Попов и др., 2019; Пряхина и др., 2019). Также для оценки прорывоопасности используются методы балльной оценки (Reynolds, 2003; Huggel et al., 2004), которые позволяют выделять опасные объекты при наличии общей информации после визуального осмотра плотины и озера. Однако для проверки методик и верификации моделей также необходимы данные натурных наблюдений, которых существует не так много в связи с тем, что подобные водные объекты, как правило, расположены в труднодоступных районах, где организовать мониторинг практически невозможно. В связи с этим на начальных этапах исследования часто используются методы дистанционного зондирования Земли, так как с их помощью можно быстро изучить необходимые характеристики, как было сделано в работе (Черноморец и др., 2018). Данные зондирования применяются в моделировании природных процессов для расчета сложных характеристик объекта (глубина, объем), как указано в работах (Коновалов и Рудаков, 2016; Семакова и Семаков, 2017). Космические снимки используются для мониторинга озер, так как позволяют проследить сезонную и годовую динамику.

В качестве объектов исследования рассматривались водоемы в пределах озерно-ледниковых комплексов, представляющих собой динамичные системы, стремительно изменяющиеся во времени (Селиверстов, 1972; Голубев, 1976; Ревякин и Мухаметов, 1986; Ganyushkin et al., 2017), что подтверждается анализом картографического материала и спутниковых снимков за разные годы. Выбор района исследования был обусловлен тем, что рассматриваемые горные территории сравнительно мало изучены в отношении прорывоопасности озер, соответственно, результаты, приведенные в настоящей работе, призваны дать новый материал по данной проблеме. Особое внимание было уделено тем водоемам и водотокам, которые на настоящий момент еще имеют связь с окружающими их ледниками. Таким образом, целью работы являлось выявление потенциально прорывоопасных озер по данным дистанционного зондирования, определение их характеристик и сравнение с наблюдаемыми данными.

2. Объекты исследования

Район исследования расположен в самом центре Алтае-Саянской горной страны (юго-запад республики Тыва) на границе с Монголией (рис. 1). Массив Монгун-Тайга относится к слабоизученным с гидрологической точки зрения районам. Плотность гидропостов на исследованной территории невелика. Оледенение массива по данным на 2010 г. составляет по общей площади 20,27 км² и представлено 32 ледниками, большей частью малыми (более 80%) (Ганюшкин и др., 2011). В настоящее время на территории насчитывается около 450 озер (включая малые термокарстовые), имеющих в основном гляциальный генезис. Распределение озер по высотам имеет четкий максимум в интервале высот 2300–2400 м, что связано с моренными образованиями максимума позднеюрмского оледенения (Чистяков и др., 2012).

3. Материалы и методы

Задачей первого этапа работы было выделить из всего массива озер прорывоопасные озера, ранжировать их по степени прорывной опасности, сделать предварительные выводы о связи прорывоопасности с возрастом озер и на этой основе выбрать объекты полевого исследования. Для предварительной оценки прорывоопасности был использован метод балльной оценки. Применялась интервальная шкала для трудно совмещаемых шкал измерения в соответствии с методикой Ю. Г. Симонова (1997). Каждый фактор прорыва в этом случае может иметь вес в интервале от 0 (не влияет) до 100 (полностью определяет).

Вероятность прорыва ледникового озера представляет собой функцию устойчивости плотины и результата воздействия внешнего фактора (триггера) (Richardson and Reynolds, 2000). Устойчивость плотины, по Ричардсону и Рейнольдсу, в основном зависит от следующих характеристик:

- тип плотины (скала — 0, морена — 20, морена с ледяным ядром — 50, лед — 80);
- высота низшей точки плотины над урезом (более 10 м — 10, от 1 до 10 м — 40, менее 1 м — 90);
- отношение ширины плотины к ее высоте (более 0.5 — 0, от 0.2 до 0.5 — 30; менее 0.2 — 70);
- характер стока через плотину (сток через морену по руслу с отмошкой — 10, сток по дренажной системе ледника — 30, фильтрация через морену — 60, сток отсутствует — 80, сток по поверхности льда — 100);
- объем озера (менее 100 тыс. м³ — 10, от 100 тыс. до 1 млн м³ — 20, более 1 млн м³ — 30).

Для ледяной плотины следует также учесть возможность ее всплытия (+100 баллов). Воздействие внешнего фактора может проявиться в виде:

- волн, вызванных ледяными и каменными лавинами, оползнями и отколами айсбергов (волны намного ниже плотины — 10, высота волн сопоставима с высотой плотины — 50, волны существенно выше плотины — 100);
- экстремальной жары/дождей (один из факторов — 10, ливень после продолжительной жары — 30).

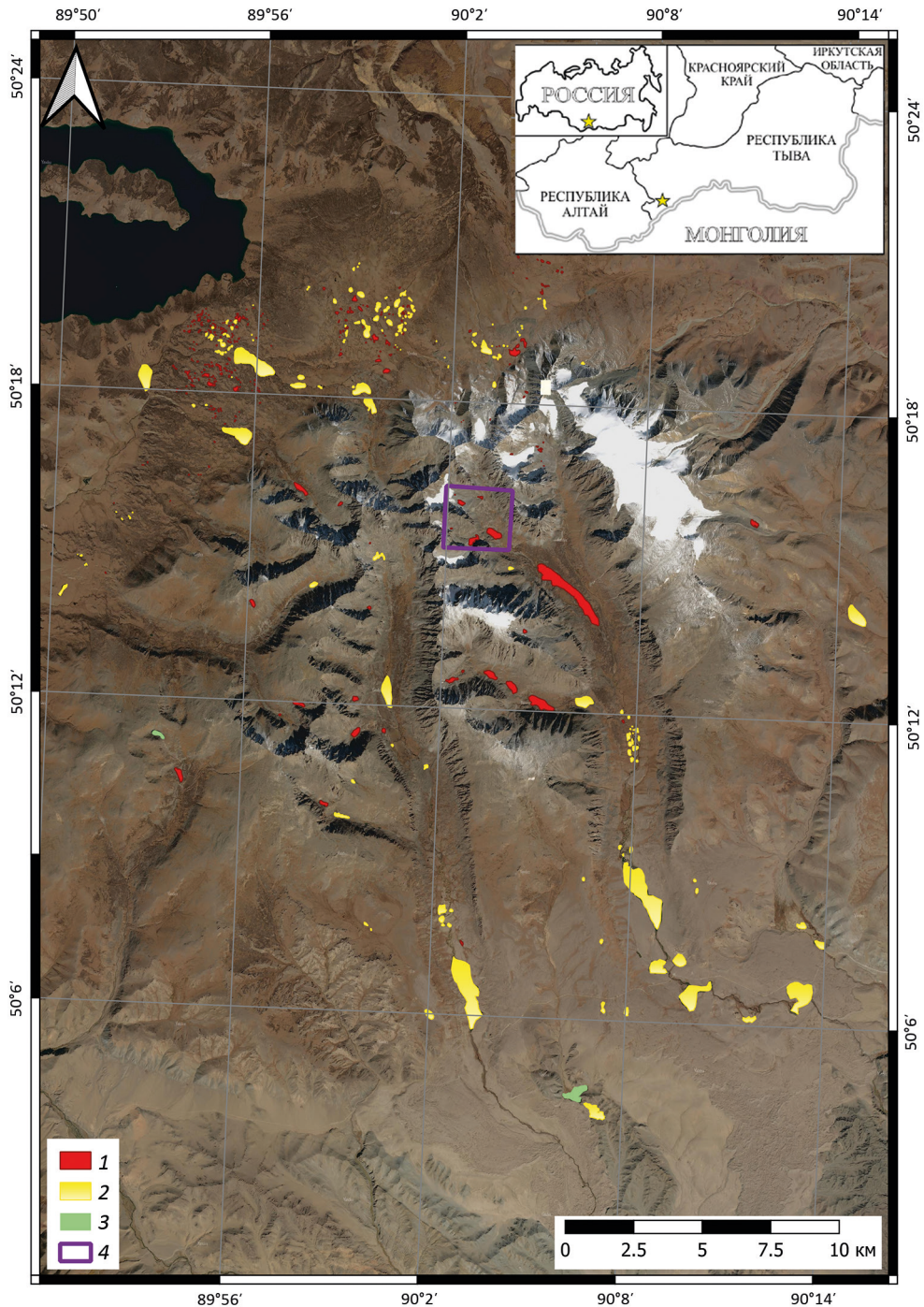


Рис. 1. Схема расположения озер на территории массива Монгун-Тайга: 1, 2, 3 — озера, имеющие высокую, среднюю и низкую прорывоопасность соответственно (на основе выполненного анализа), 4 — район работ. Схема составлена авторами

Определение факторов прорыва выполнялось в специальном картографическом ПО QGIS Desktop. Такие характеристики, как тип плотины и характер стока через плотину, были получены с помощью визуального дешифрирования космических снимков высокого разрешения World View-2 (дата снимка — 26.06.2015, пространственное разрешение — 1.84 м) с уточнениями по результатам экспедиционных работ лета 2016 года. Определение высот было выполнено на основе цифровой модели рельефа SRTM (разрешение — 30 м).

Оценка максимальной глубины и объема озера проводилась в соответствии с методикой, описанной в работе (Коновалов, 2009). В связи с невозможностью определения средней глубины по снимкам для определения объема водоема была использована формула (1), как предлагается в (Коновалов, 2009):

$$V = a_1 H_{\max} + b_1 F + c_1, \quad (1)$$

где a_1 , b_1 , c_1 — коэффициенты, полученные для расчета объема прорывоопасных озер гляциального генезиса согласно (Коновалов, 2009), F — площадь озера, H_{\max} — максимальная глубина, которая определяется с помощью выражения (2):

$$H_{\max} = \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \left(\arctg \left(\frac{L}{H_2} \right) \right)}, \quad (2)$$

где L — длина озера, H_2 — высота подпруживающей плотины от подошвы до уреза воды.

Вышеприведенные формулы являются эмпирическими и были апробированы на гляциогенных озерах, расположенных на территории бассейна р. Гунт (Памир). Поэтому расчетные значения максимальной глубины и объемов воды для озер массива Монгун-Тайга, полученные с использованием этих формул, носят оценочный характер и требуют проверки путем сравнения с полевыми данными.

На рис. 2 показана принципиальная схема использования метода оценки вероятности прорыва озера. По оси абсцисс откладывается сумма баллов, показывающая устойчивость плотины, а по оси ординат — сумма баллов по возможному триггеру. Вероятность прорыва тем выше, чем больше сумма баллов по каждой из категорий. Самопроизвольное разрушение плотины возможно при большой сумме баллов, действие триггера понижает порог опасности. Он возможен в любое время, если вероятность прорыва высокая. Предложенный метод можно использовать только как указатель опасных озер (Петраков, 2008).

В нашей работе мы несколько дополнили данную методику с учетом региональных особенностей. Например, в ходе работы выяснилось, что у 20 озер из всего массива возникновение волн, превышающих высоту 1 м, с учетом малых размеров озер возможно в результате оползней, обвалов. Воздействие последних было признано вероятным (триггер 100 баллов, волны выше плотины) для случаев, когда имеющиеся в настоящее время осыпные конусы выносов и оползневых тел от близких к озеру крутых склонов непосредственно выходят хотя бы в одном месте к его урезу. В случае, когда к озеру непосредственно примыкают крутые скалистые склоны, вероятность схода в озера большой массы породы существенно меньше,

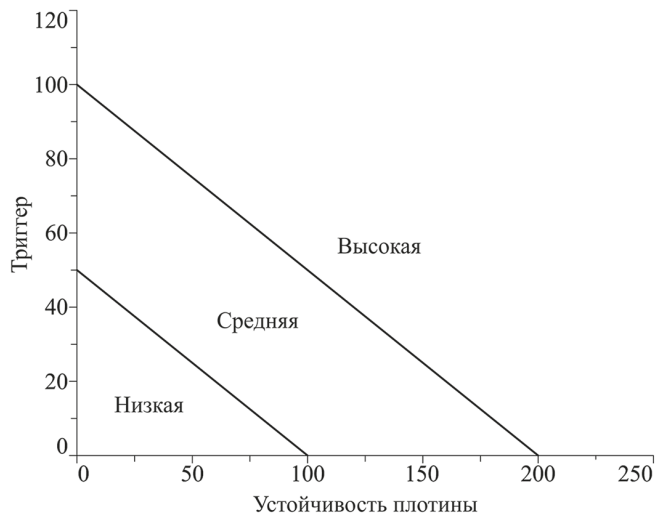


Рис. 2. Вероятность прорыва ледникового озера в зависимости от состояния плотины и действия триггерного механизма (Петраков, 2008)

соответственно, в качестве возможного триггера приняты волны с высотой, сопоставимой с высотой плотины (50 баллов). Кроме того, очевидно, что в долинах, лишенных в настоящее время ледников, экстремально жаркие условия не могут являться триггером из-за малых в условиях аридного климата объемов снежников и наледей; скорее, напротив, связанное с потеплением увеличение испарения будет перекрывать по своему воздействию вероятное увеличение стока. Соответственно, для озер в подобных долинах жаркая погода не рассматривалась как триггер.

На основе результатов первого этапа работы на территории массива Монгун-Тайга была выбрана группа потенциально прорывоопасных озер для проведения экспедиционных исследований и сравнения натуральных данных и данных, полученных с помощью спутниковых снимков.

На втором этапе на выбранных озерах были проведены гидрологические и геофизические полевые работы. При выполнении батиметрической съемки для регистрации глубин использовался электронный эхолот-картплоттер Garmin ECHOMAP 42cv (Garmin Ltd., USA). По результатам промеров глубин составлены батиметрические схемы и определены основные морфометрические характеристики озер: площадь водного зеркала, объем воды, максимальная и средняя глубина, длина водной акватории, ее максимальная и средняя ширина. Составление батиметрических схем осуществлялось компьютерным способом, путем формирования гридов — регулярной сети прямоугольных матриц, в узлах которых располагались некоторые эффективные значения картируемых величин. Построения выполнялись в специализированной картографической программе Surfer 13.6 (Golden Software Inc., USA). Оформление схем осуществлялось в программе ArcGIS 10.3 (ESRI Inc., USA). Наблюдения за уровнями воды на временных водомерных постах, расположенных на водоемах и водотоках, выполнялись в сроки согласно (Наставление..., 1973). Для выявления внутрисуточной изменчивости стока на ручьях, впадающих в озера, 17.07.2019 и 19.07.2019 были организованы наблюдения за стоком (измере-

ние расходов воды) с помощью гидрометрической вертушки ИСП-1. Измерения проводились в светлое время суток с дискретностью 1 час.

Для установления вклада воды из разных источников в питание водоемов были отобраны образцы воды из ручьев и озер, ледникового льда и атмосферных осадков на изотопный анализ в герметичные пробирки емкостью 50 мл. Объем пробы составлял 40 мл. Все пробы герметично запаковывались, а в лабораториях хранились в замороженном виде. Измерения изотопного состава производились в Лаборатории изменения климата и окружающей среды Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) на газовом анализаторе Picarro L2120-i. В качестве стандарта использовалась дистиллированная водопроводная вода Санкт-Петербурга со следующими характеристиками: 9.79 ‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и 75.47 ‰ по δD относительно стандарта МАГАТЭ V-SMOW2. Точность измерений составляла 0.05 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 0.5 ‰ для δD . Доли осадков и ледникового стока в питании озер определялись с помощью двухкомпонентного изотопного разделения по следующей формуле (Чижова и др., 2016):

$$R^{18}\text{O}_1 f_1 + R^{18}\text{O}_2 f_2 = R^{18}\text{O}, \quad (3)$$

где $R^{18}\text{O}_1$ — изотопный состав первого компонента, f_1 — доля первого компонента, $R^{18}\text{O}_2$ — изотопный состав второго компонента, f_2 — доля второго компонента, $R^{18}\text{O}$ — результирующий изотопный состав.

Тахеометрическая съемка прибрежной территории озер до уровня высоких вод выполнялась по методике, подробно описанной в работе (Попов и Боронина, 2019) с использованием тахеометра Trimble M3 DR 5" (Trimble Navigation Ltd., USA). Геофизическая съемка проводилась на леднике № 24 с применением георадара «ОКО-2» (ООО «Логические системы», Россия) при частоте зондирующих импульсов 150 МГц. Также проводилось визуальное обследование подпруживающих морен с целью оценки их устойчивости к прорывам.

4. Результаты

Всего на территории массива Монгун-Тайга находится 434 озера суммарной площадью 11.72 км² (расчетный суммарный объем — 0.02 км³). Согласно нашему анализу на основе методики Д. А. Петракова (2008), было выявлено 268 озер с высокой прорывоопасностью, 2 озера с низкой прорывоопасностью, остальные — со средней прорывоопасностью (рис. 1).

При анализе информации по массиву прорывоопасных озер выяснилось, что все они связаны с территорией развития древних ледников и подпруживаются моренами. Форма, объем и степень прорывоопасности при этом оказываются тесно связанными с морфологией и возрастом морен.

На территории массива выделяются три основные группы моренных образований, отнесенных нами по времени образования на основе абсолютного и относительного датирования к MIS 4, MIS 2 и позднему голоцену (Ganyushkin et al., 2018). Первая группа (MIS 4) представлена голубовато-серым глинистым и песчаным материалом, содержащим большое количество округлых валунов, в основном гранитных. Его поверхность имеет холмисто-западинный рельеф со множеством небольших округлых термокарстовых депрессий, к которым часто приурочены

Таблица 1. Соотношение прорывоопасности озер на территории массива Монгун-Тайга с группами морен, к которым они приурочены

Группа морен	Количество озер	Суммарный расчетный объем, млн м ³	Средний расчетный объем, м ³	Средняя сумма баллов по устойчивости плотины	Средняя сумма баллов по триггерам
MIS 4	214	1.32	6184	199.7	20.0
MIS 2	33	6.80	205 949	164.9	64.8
Поздний голоцен	21	0.46	21 806	210.5	72.9

озера. Эти морены расположены при переходе из трогов в межгорные впадины на высотах 1800–2200 м, в плане они имеют форму лопастей или конусов. Средние уклоны поверхностей этих морен невелики (2–3°), что и предопределяет сравнительно слабую расчлененность данных образований водотоками. В некоторых долинах эти морены можно проследить на плечах трогов до цирков (до высоты около 3100 м). Кроме того, эти морены можно подразделить на несколько стадий: древнейшая имеет наибольшую площадь, но в некоторых местах конечные морены самой молодой стадии ее перекрывают. Озера, приуроченные к данной группе морен, многочисленны и малы (средний объем чуть более 6000 м³, табл. 1). Эти озера лишены постоянного стока, что несколько повышает вероятность их прорыва. В то же время единственным источником питания таких озер являются атмосферные осадки, годовое количество которых в данном поясе гор составляет чуть более 200 мм, отсутствует питание от постоянных водотоков (они не получают сток от многолетних снежников и ледников). Также практически отсутствует вероятность возникновения в таких озерах высоких волн, связанных с обвалами или оползнями. Такие озера в наименьшей степени прорывоопасны, да и сами вероятные их прорывы слишком малы по своему объему и неопасны.

Морены второй группы (MIS 2) расположены внутри долин, начиная с высот 2100–2200 м. Береговые морены этой группы можно проследить на троговых плечах до цирков на высоте около 2600–2700 м, но на 50–150 м ниже морен предыдущей группы. Их состав похож на состав морен первой группы. Это типичные морены долинного оледенения, представленные хорошо выраженными валами дугообразной в плане формы. Положение морен на днищах трогов благоприятно для подпруживания ими озер (здесь располагаются относительно крупные озера объемом до 665 тыс. м³) несмотря на то, что все морены этой группы прорезаны водотоками. Таким образом, озера этой группы проточны, часть из них расположена в ледниковых долинах и получает сток с ледников, хотя, как правило, озера располагаются на расстоянии более 5 км от них. Несмотря на проточность и связанную с ней большую устойчивость плотины, для данной группы озер возрастает вероятность обвальных и оползневых явлений со склонов трогов, увеличивается возможность избыточного притока талых вод со снежников и ледников при высоких температурах, возрастает годовое количество осадков. За счет совокупности этих факторов данная группа озер оказывается более прорывоопасной, чем предыдущая.

Морены третьей группы (позднеголоценовые) располагаются в высокогорной части массива (на высотах более 2600 м) и характеризуются крупным угловатым каменным материалом, переслаивающимся с песчаными и глинистыми отложениями. Эта группа морен представлена двумя-тремя стадийными валами, непосредственно примыкающими друг к другу и окаймляющими современные ледники. Наиболее молодая из морен данной группы относится к малому ледниковому периоду. Во многих случаях образования данной группы имеют языковидную форму и представляют собой каменные глетчеры. Диагностическими признаками данных морен являются незадернованность или наличие пионерной растительности, крутизна фронтов, наличие погребенного льда, слагающего ядро этих образований и во многих местах выходящего на поверхность. Эти морены почти не подвержены эрозии, при этом в настоящее время активны термокарстовые процессы, проявляющиеся в том числе и в уходе водотоков в тоннели в погребенном льду со внутренней стороны морен и на выходе с внешней стороны. Особенности озер, приуроченных к моренам данной группы, являются отсутствие поверхностного стока, близость или непосредственный контакт с ледниками, изменчивость контуров и нестабильность очертаний береговой линии, связанная как с колебаниями уровней, так и с термокарстовыми процессами и отступанием ледников. Соответственно, устойчивость плотины данной группы озер наименьшая (табл. 1). При этом в ледниковых долинах доминирует ледниковое питание озер, что делает озера чувствительными к повышению температуры, вызывающему повышенное таяние. Триггерное воздействие высоких температур проявляется здесь и через активизацию термокарстовых процессов, что может приводить к разрушению плотины. Широкое распространение рыхлых отложений и близость крутых склонов благоприятствуют обвальным явлениям, этому же способствует и термокарст. Соответственно, растет вероятность возникновения волн, превышающих высоту плотины.

Таким образом, среди рассматриваемых нами водоемов с высокой прорывоопасностью выделяется группа озер, связанная с позднеголоценовыми моренами, имеющая наибольшую прорывоопасность. Необходимость проверки предварительного вывода о прорывоопасных озерах массива предопределила выбор объектов полевого исследования.

При рассмотрении всего массива прорывоопасных озер была выделена группа озер, расположенных в верховьях правого притока р. Толайты, с целью дальнейшего их изучения в полевых условиях (рис. 3). Выбор этих водных объектов был обусловлен несколькими факторами:

- высокая прорывоопасность согласно нашему анализу по методике Петракова (сумма баллов по устойчивости морены/триггерам составила: оз. Верхнее — 150/130, оз. Хойнур — 190/130, оз. Лагерное — 100/80, оз. Малое — 210/130);
- наличие около озер современных ледников, что обеспечивает динамизм их изменчивости;
- наличие ниже по долине каскада озер, что увеличивает вероятность серии прорывов, спровоцированных прорывными событиями в высокогорной части;
- расположение в нижней части долины автомобильной дороги, соединяющей республики Алтай и Тыва, что обуславливает прикладное значение работы;

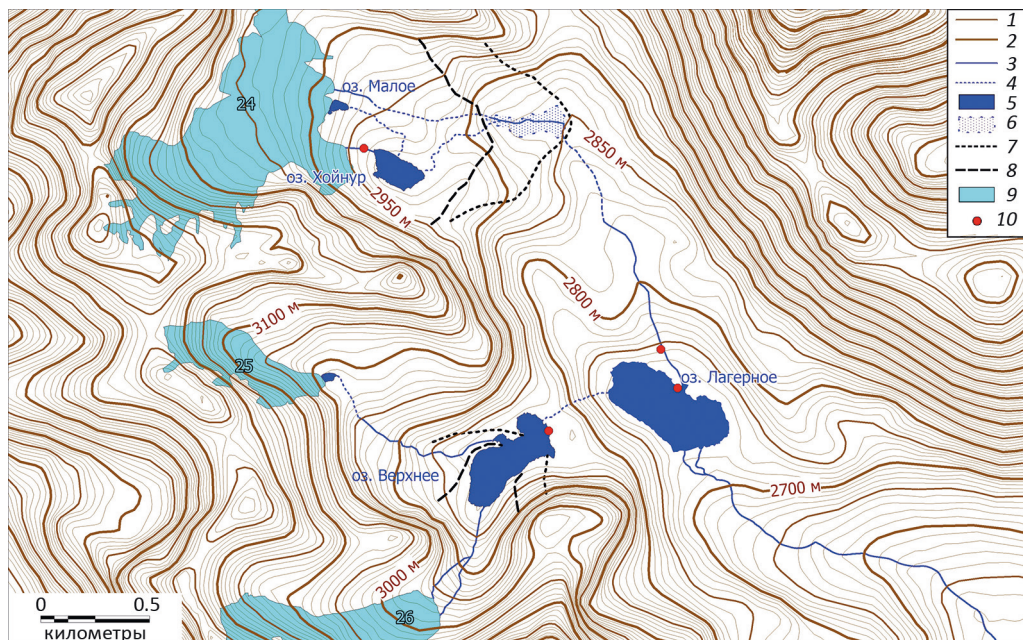


Рис. 3. Район полевых работ: 1 — изогипсы, проведенные через каждые 10 м (получены на основе цифровой модели рельефа (The NASA Version 3.0 SRTM Global 1 arc second, Earth Resources Observation and Science Center (eros.usgs.gov, n. d.)); 2 — изогипсы, проведенные через 50 м; 3 — водные потоки; 4 — участки фильтрации воды через морену; 5 — озера; 6 — следы древнего спущенного озера; 7 — гребни морен исторической стадии; 8 — гребни морен малого ледникового периода; 9 — ледники; 10 — пункты расположения гидрологических постов

— расположение озер на небольшом расстоянии друг от друга, что дает возможность проводить на них одновременные полевые исследования.

4.1. Оценка прорывоопасности озер по полевым исследованиям

Важными факторами для формирования условий, при которых возможен прорыв водоема, являются наличие в нем критического объема воды, неустойчивое состояние подпруживающей плотины и характер стока из озера. В связи с этим при проведении полевых исследований данным аспектам уделялось основное внимание.

Озеро Лагерное. По результатам батиметрической съемки (рис. 4) величина площади акватории и объем водной массы оз. Лагерное при абсолютной отметке уреза воды около 2719 м соответственно составили 127.5 тыс. м² и 1.576 млн м³. Суточные наблюдения за стоком на ручье, впадающем в оз. Лагерное, показали незначительное изменение расходов воды. Это свидетельствует об отсутствии влияния на сток суточной абляции ледника напрямую, несмотря на то что по данным изотопного анализа в ручье преобладают воды ледникового происхождения (среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ составляет 16.3 ‰). Очевидно, это объясняется тем, что створ измерения располагался в двух километрах от ледника и на своем пути ручей вначале фильтруется через морену, а затем принимает приток, берущий начало в озере, тем

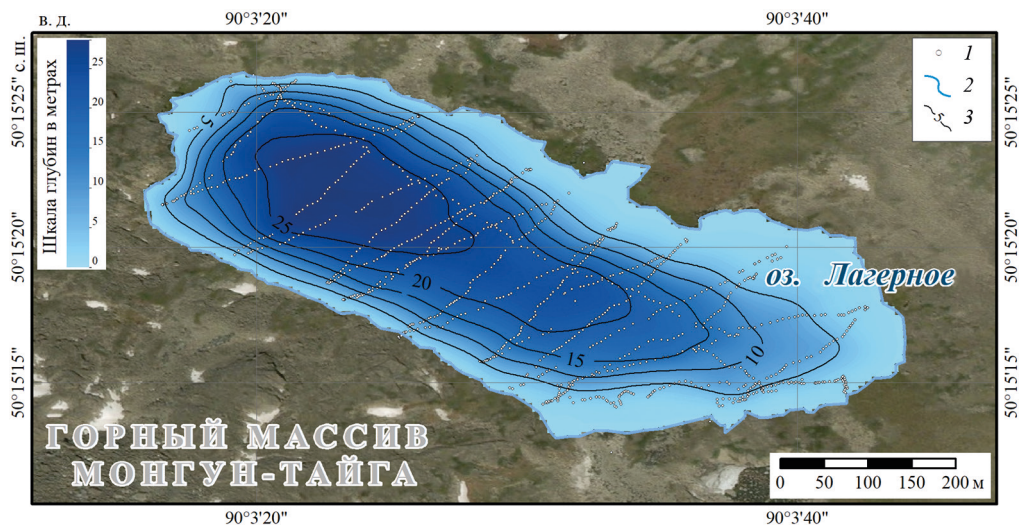


Рис. 4. Батиметрическая схема оз. Лагерное: 1 — пункты измерения глубин; 2 — береговая линия; 3 — изобаты (сечение 5 м). На заднем плане спутниковый снимок, дата съемки — 25 июня 2015 г. Схема выполнена авторами

самым в определенной степени сглаживая колебания стока за счет таяния ледника. В вытекающем из озера ручье $\delta^{18}\text{O}$ равнялось 16.9‰, что позволило провести изотопное разделение с использованием следующих значений: $\delta^{18}\text{O}$ выпадавших осадков — 9.7‰; $\delta^{18}\text{O}$ талых ледниковых вод — 17.5‰. За изотопный состав ледникового стока приняты средние значения проб талых вод, отобранных непосредственно у края ледника № 24 в разное время. Изотопное разделение показало, что вклад осадков в питание озера составил всего 8%.

Согласно выполненной ранее оценке (см. рис. 1), озеро было отнесено к категории высокой прорывоопасности. Однако результаты полевых исследований показали, что водоем находится преимущественно в скалистых берегах, является проточным, запрудной плотины как таковой не выявлено. Возможное стремительное увеличение его объема, вызванное продолжительными ливневыми осадками, приведет только к более интенсивному стоку из озера. Осыпи и обвалы на прибрежной территории незначительны. Ситуация перекрытия стока обвалом горной породы и формирование так называемого «запасного объема воды», который мог бы пойти на формирование прорывного паводка, маловероятны. Таким образом, по полученным полевым данным озеро относится к категории низкой прорывоопасности.

Озеро Верхнее представляет собой относительно небольшой водоем, расположенный у ледника № 26, примыкает к моренному чехлу малого ледникового периода. Озеро связано с ледником через ручей, который берет начало с ледника № 26 и впадает в водоем в юго-западной части. По результатам батиметрической съемки (рис. 5) средняя глубина водоема составляет 6.2 м, а максимальная — 24.8 м. Площадь озера на момент съемки оценена величиной 77.2 тыс. м² при соответствующем объеме водной массы около 478 тыс. м³. Колебания уровней воды за период наблюдений были незначительными. Изотопный состав воды в водоеме практически не меняется по глубине (было отобрано 8 проб воды через 1 м глубины) и со-

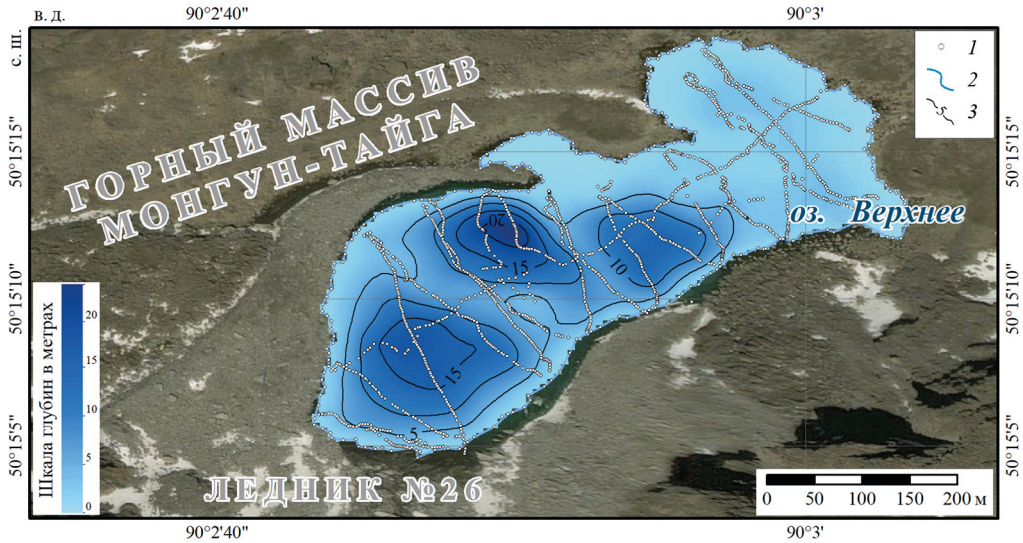


Рис. 5. Батиметрическая схема оз. Верхнее: 1 — пункты измерения глубин; 2 — береговая линия; 3 — изобаты (сечение 5 м). На заднем плане спутниковый снимок, дата съемки — 25 июня 2015 г. Схема выполнена авторами

ставляет 16.3%, что свидетельствует о преобладании ледникового питания. Также были отобраны пробы осадков для определения их изотопного состава, что позволило приблизительно оценить их вклад в питание озера. Для определения соотношения ледникового и неледникового питания озера использовались следующие значения $\delta^{18}\text{O}$: 9.7‰ для атмосферных осадков и 17.5‰ для ледникового стока. Используя значения $\delta^{18}\text{O}$ пробы воды озера, атмосферных осадков и ледникового стока, при помощи формулы двухкомпонентного изотопного разделения соотношение ледникового и неледникового питания оз. Верхнее можно оценить как 85 на 15% соответственно. Несмотря на преобладание ледникового питания, на момент полевых работ объем воды, который мог бы пойти на формирование прорывного паводка, был равен нулю и не накапливался в котловине озера по причине наличия стока из водоема.

Анализ устойчивости склонов озерной котловины показал, что обвальные процессы в северо-восточной части склона довольно активны, что позволяет рассмотреть один из возможных сценариев дальнейшего развития водоема. При условии, что моренные валуны в результате обвала перекроют русло вытекающего ручья (красный прямоугольник на рис. 6), образовав устойчивую запрудную плотину, вода в озере может начать накапливаться. При отметке уреза на момент обследования в 2818.6 м гипотетически уровень воды может возрасть до отметки 2822 м (рис. 6, пунктир). При этом объем озера увеличится до 851 тыс. м³, что в два раза больше объема в настоящий момент, при площади водной поверхности около 126.5 тыс. м². Ввиду устойчивости возможной запрудной плотины к размыву прорыв, вероятнее всего, случится в виде перелива. Таким образом, запасной объем воды, который пойдет на формирование паводка, может составить около 373 тыс. м³. Вероятность подобного развития событий невелика, но в случае стечения определенных условий



Рис. 6. Прибрежная территория оз. Верхнее. Красным прямоугольником отмечено русло вытекающего ручья, а пунктиром показано, до какой отметки может подняться уровень воды при образовании запрудной плотины. Фотография выполнена В. А. Распутиной в июле 2019 г.

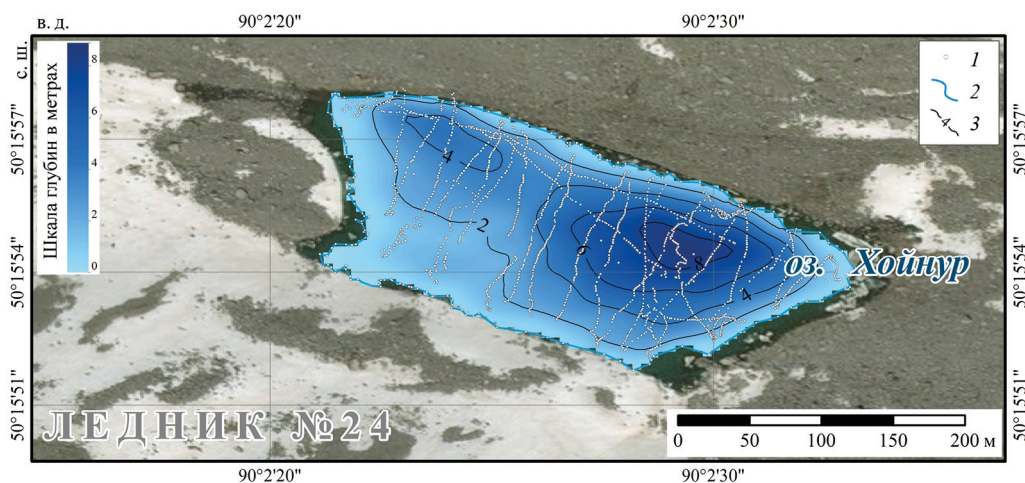


Рис. 7. Батиметрическая схема оз. Хойнур: 1 — пункты измерения глубин; 2 — береговая линия; 3 — изобаты (сечение 2 м). На заднем плане спутниковый снимок, дата съемки — 25 июня 2015 г. Схема выполнена авторами

исключать ее полностью нельзя. Выполненная оценка прорывоопасности по спутниковым снимкам показала, что озеро имеет высокую вероятность прорыва, однако, исходя из результатов полевых исследований, оз. Верхнее может быть отнесено к этой категории при определенном стечении обстоятельств.

Озеро Хойнур. Во время рекогносцировочных исследований было выявлено, что наиболее интересным в плане возможной прорывоопасности является оз. Хойнур.

По результатам батиметрической съемки (рис. 7) площадь акватории оз. Хойнур оценивается в 24.8 тыс. м², а объем воды достигает 86.8 тыс. м³. Средняя глубина при этом оценена в 3.5 м, а максимальная — 10 м.

Оценка прорывоопасности по данным дистанционного зондирования Земли показала, что оз. Хойнур также входит в категорию высокопрорывоопасных озер. При анализе спутниковых снимков разных лет сделан вывод о том, что границы

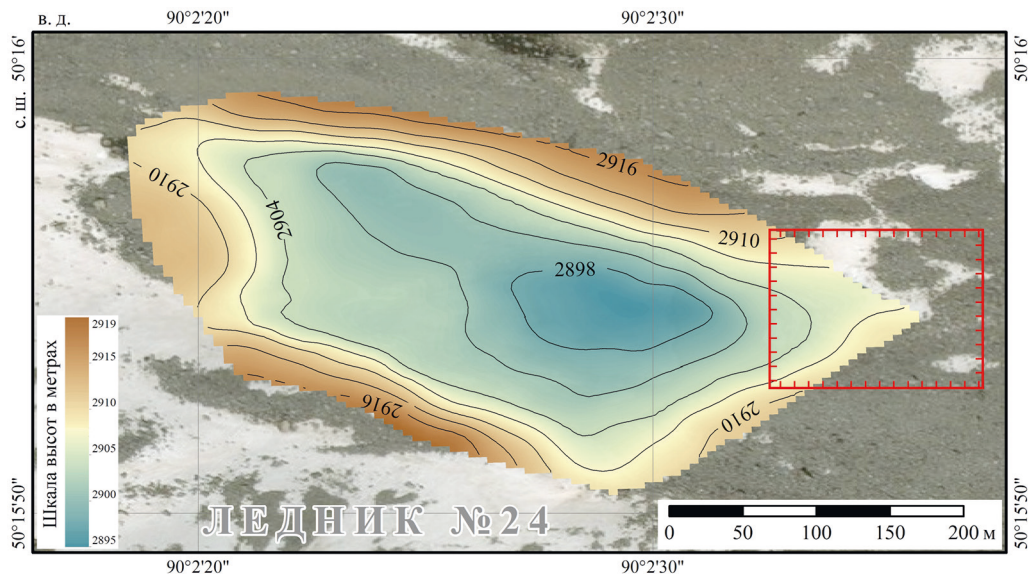


Рис. 8. Карта высот прибрежной территории оз. Хойнур на 17 июля 2019 г. Красный прямоугольник — возможное место сброса озерных вод. Схема выполнена авторами

водоема изменяются незначительно, это косвенно указывает на наличие оттока озерных вод в результате фильтрации через моренные отложения. Поверхностного стока из водоема не выявлено, а в его западной части отмечено впадение относительно крупного притока, берущего начало с ледника. В силу отдаленности расположения озера водомерный пост на нем не устанавливался. Однако на ручье, втекающем в водоем, проводились наблюдения за внутрисуточным изменением стока. Сначала было зарегистрировано нарастание расходов воды до момента наибольшей абляции, а затем их уменьшение. Таким образом, основными источниками питания озера являются талые воды ледника и снежников, что также подтверждается изотопным составом воды в ручье: диапазон $\delta^{18}\text{O}$ воды составлял от 15.2 до 17.7 ‰, среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ — 17.2 ‰. В случае аномально высоких температур воздуха, продолжительных ливневых осадков, интенсивного таяния снега и льда следует ожидать повышения уровня воды в озере ввиду того, что сток из него будет происходить намного медленнее, чем приток. Также повышение уровня может быть вызвано обвалами крупных моренных валунов с береговых склонов. При современном рельефе прибрежной территории перелив воды через гребень морены может произойти в восточной части озера (рис. 8, выделено квадратом), где наблюдается понижение с отметкой поверхности около 2906 м, что на 2 м выше положения береговой линии на момент обследования. При этом объем озера составит 142.6 тыс. м³, при соответствующей площади поверхности около 33 тыс. м². В этом случае, по нашему мнению, сформируется поверхностный водоток, образование которого не приведет к катастрофическим последствиям на нижележащих территориях. Также возможен прорыв озерной воды через тело морены при наличии в ней погребенного льда. Таким образом, согласно полевым исследованиям, в случае, когда озеро переполняется и образуется поверхностный русловой сток,

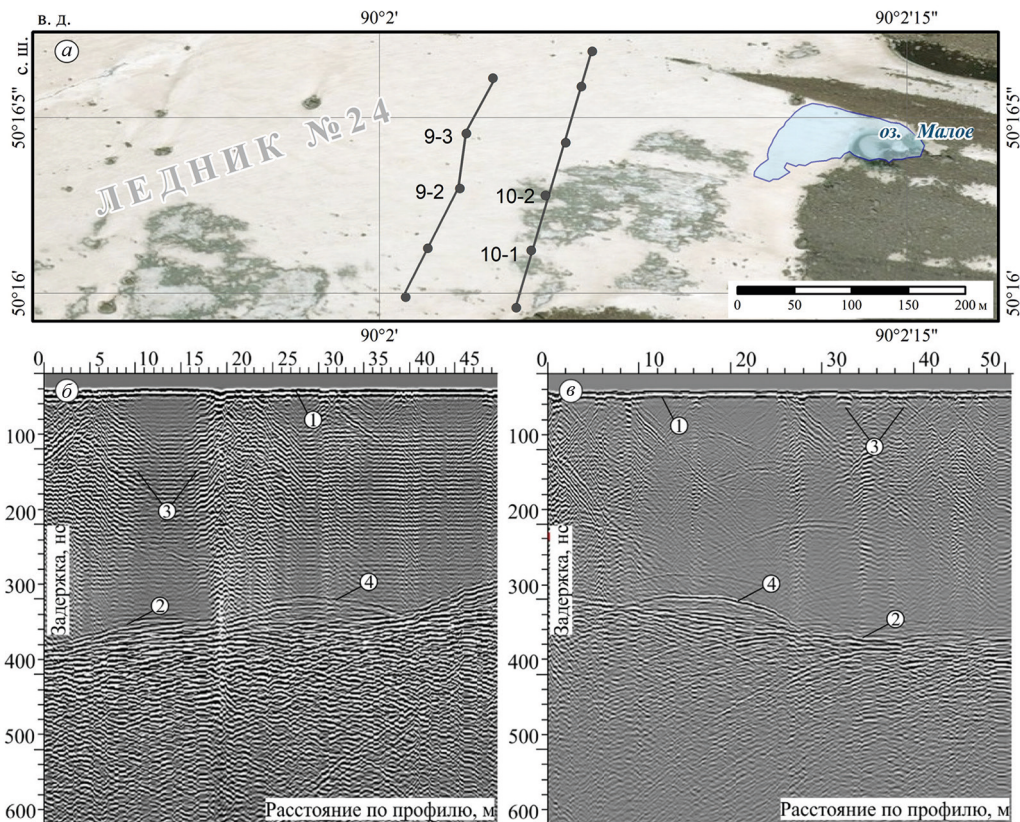


Рис. 9. Георадарные разрезы (серые линии) 9-2-9-3 и 10-1-10-2 на леднике № 24 (георадар «ОКО-2», частота зондирующих импульсов 150 МГц). Их местоположение (а) и особенности строения: 9-2-9-3 (б), 10-1-10-2 (в):

1 — прямая волна; 2 — кровля каменного основания; 3 — дифрагированные волны, связанные с наличием луж и, возможно, обводненных приповерхностных трещин небольшого размера; 4 — внутриледниковый канал (вероятно). Схема выполнена авторами

оз. Хойнур относится к категории неопасных. В то же время нельзя исключать возможное наличие ледяного ядра в моренном чехле, через который может произойти прорыв. Наличие ледяных ядер в моренах малого ледникового периода на территории массива Монгун-Тайга подтверждается результатами работ, выполненных ранее (Чистяков и др., 2015). При таком сценарии развития событий оз. Хойнур сразу перейдет в категорию высокопрорывоопасных водных объектов, что соответствует оценке прорывоопасности по предложенной методике.

Оценивая прорывоопасность, следует также упомянуть об оз. Малом (рис. 9). Этот водоем является приледниковым и примыкает к леднику № 24. Согласно выполненной предварительной оценке прорывоопасности водоем входит в категорию высоко прорывоопасных. По причине труднодоступности озера водомерный пост на нем не устанавливался.

Анализируя спутниковые снимки разных периодов, можно заметить, что размеры водоема изменяются в сторону увеличения: на момент 25 июня 2015 г. озеро

характеризовалось меньшей площадью, чем в конце июля 2019 г. Сейчас оз. Малое непосредственно примыкает к леднику, талые воды которого являются его основным источником питания. По этой причине на примыкающем к озеру леднике дополнительно были выполнены геофизические исследования с целью определения его мощности и выявления особенностей строения. В качестве примера на рис. 9 представлены два временных георадарных разреза, полученных на языке ледника № 24. Их местоположение отмечено серой линией на рис. 9, а. На разрезах (рис. 9, б, в) наиболее интенсивно проявлены отражения 1, связанное с прямой волной, и 2, сформированное скальным основанием. Цифрой 3 на обоих временных разрезах показаны дифрагированные волны, сформированные лужами на его поверхности. В некоторых местах имеются трещины, наличие которых обеспечивает поступление талой воды с поверхности в тело ледника, а в случае небольших мощностей непосредственно к его ложу. Косвенным подтверждением существования обводненных каналов в придонной части ледника является отражение на временных разрезах, отмеченное цифрой 4. Судя по его характеру, можно сделать вывод о том, что на контакте ледника и каменного основания с большой долей вероятности имеется канал, по которому проходил сброс воды в озеро. На момент съемки он был либо пуст, либо заполнен льдом. Соответственно, поступление воды в оз. Малое происходит не только по поверхности ледника, но и под ним.

Таким образом, тесный контакт озера с ледником, а также увеличение размеров водоема в многолетнем разрезе дают основание отнести оз. Малое к категории высокопрорывоопасных озер.

4.2. Сравнение результатов

Применимость используемой методики оценки прорывоопасности озер была оценена на основе сравнения морфометрических характеристик озер (площади поверхности и объема воды, максимальной глубины) и характеристик устойчивости подпруживающих плотин, полученных в результате обработки спутниковых снимков и непосредственно в ходе полевых исследований (табл. 2).

Сравнительная оценка площадей водной поверхности исследуемых озер показала, что максимальная ошибка определения не превышает 20 % (для оз. Лагерное) (табл. 2), что можно считать удовлетворительным результатом. В то же время максимальная ошибка определения максимальной глубины по данным дистанционного зондирования Земли оказалась 27 % (оз. Лагерное). Величины объемов озер, рассчитанные по предложенной методике, были завышены по сравнению с полученными по данным батиметрической съемки для всех трех озер: для оз. Лагерного — на 34 %, а для озер Верхнее и Хойнур — практически в 3 раза. Это обусловлено тем, что при расчете объемов водной массы использовалась расчетная максимальная глубина водоемов, вычисляемая по формуле (2), ввиду того, что определение средней глубины по спутниковым снимкам не представлялось возможным. Формула (2), используемая для расчета максимальной глубины, была разработана для высокогорных прорывоопасных озер, расположенных на территории Памира. Вероятно, это могло увеличить ошибку.

Согласно выполненной оценке прорывоопасности озер по данным дистанционного зондирования Земли, все выбранные водные объекты были отнесены

Таблица 2. Сравнение полученных результатов морфометрических характеристик по спутниковым снимкам и полевым исследованиям

Название озера		Лагерное	Верхнее	Хойнур	Малое
Площадь, м ²	по спутниковому снимку	102 788	63 135	21 688	860
	полевые данные	127 575	77 250	24 780	–
	ошибка, %	20	19	13	–
Объем, м ³	по спутниковому снимку и формуле (1)	2 107 154	1 515 240	271 100	9405
	полевые данные	1 576 342	478 200	86 770	–
	ошибка, %	34	216	212	–
Максимальная глубина, м	по спутниковому снимку и формуле (2)	20.5	24	12.5	11
	полевые данные	28.2	24.8	10	–
	ошибка, %	27	3	25	–

к категории высокопрорывоопасных озер. Однако более детальное обследование объектов во время экспедиционных исследований позволило скорректировать полученную предварительно оценку, по результатам которой оз. Лагерное перешло в категорию низкой прорывоопасности, а озера Верхнее и Хойнур могут стать высокопрорывоопасными только при определенном стечении обстоятельств.

5. Заключение

Исследование было направлено на выявление потенциально прорывоопасных озер горного массива Монгун-Тайга. Оценка прорывоопасности, выполненная на основе данных дистанционного зондирования Земли по методике балльной оценки с учетом местных факторов, показала, что подавляющее большинство озер массива имеет высокую прорывоопасность. Полевые исследования, которые проводились на выбранной группе озер, позволили скорректировать выполненную оценку. Было выявлено, что на склонах прибрежной территории оз. Лагерного осыпные и обвальные процессы не распространены, что понизило баллы по воздействию триггера, и водоем перешел в категорию низкой прорывоопасности. На спутниковом снимке сток из оз. Верхнее не был зарегистрирован, но при полевом обследовании было установлено наличие вытекающего из водоема ручья. Также объем воды озера, полученный в результате батиметрических работ, оказался в 3 раза меньше, чем рассчитанный по спутниковому снимку. Тем не менее неустойчивое состояние окружающих озеро склонов дает основание отнести водоем к высокопрорывоопасным. При анализе спутникового снимка для оценки прорывоопасности оз. Хойнур сток из водоема выявлен не был. Однако в ходе выполнения полевых исследований было предположено, что сток осуществляется путем фильтрации

через моренную перемычку, что уменьшает баллы по рассматриваемой методике, с одной стороны, а с другой — снижает устойчивость плотины. Таким образом, с высокой степенью вероятности, оз. Хойнур относится к категории высокопрорывоопасных водных объектов. Следует отметить, что все исследованные в полевых условиях озера приурочены к позднеголоценовым моренам, что позволяет с определенностью говорить о высокой прорывоопасности таких водных объектов. На территории массива выявлено 21 подобное озеро.

Как показал опыт, метод балльной оценки для определения прорывоопасных озер не является универсальным и требует учитывать особенности каждой конкретной территории. Несомненно, его можно использовать для предварительного анализа прорывоопасности озер на больших территориях. Оценка в некоторых случаях может показывать более высокий класс прорывоопасности и требует корректировки в процессе полевых исследований. Определение морфометрических характеристик водных объектов по спутниковым снимкам в отдельных случаях имеет значительную погрешность, так же, как и выявление наличия и характера стока из озера.

Литература

- Беликов, В. В. (2005). *Совершенствование методов и технологий прикладного численного моделирования и в гидравлике открытых потоков*. Дис. ... д-ра техн. наук.
- Боронина, А. С., Четверова, А. А., Попов, С. В., Пряхина, Г. В. (2019). Обзор потенциально прорывоопасных озер и последствия прохождения их паводков в районах холмов Тала и Ларсеманн (Восточная Антарктида). В: *Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России, материалы II Всерос. науч.-практ. конф., Иркутск, 5–7 июня 2019 г.* Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 307–318.
- Виноградов, Ю. Б. (1976). Метод расчета гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера. *Селевые потоки*, 1, 138–153.
- Виноградов, Ю. Б. (1977). *Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки*. Ленинград: Гидрометеоиздат.
- Ганюшкин, Д. А., Чистяков, К. В., Москаленко, И. Г. (2011). Современное оледенение северо-запада внутренней Азии и его динамика. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. География, География*, (2), 94–110.
- Голубев, Г. Н. (1976). *Гидрология ледников*. Ленинград: Гидрометеоиздат.
- Докукин, М. Д., Хаткутов, А. В. (2016). Озера у ледника Малый Азау на Эльбрусе: динамика и прорывы. *Лед и Снег*, 56 (4), 472–479. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-4-472-479>
- Коновалов, В. Г. (2009). Дистанционный мониторинг прорывоопасных озер на Памире. *Криосфера Земли*, 13 (4), 80–89.
- Коновалов, В. Г., Рудаков, В. А. (2016). Дистанционное определение резервного объема прорывоопасных высокогорных озер. *Лед и Снег*, 56 (2), 235–245. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-235-245>
- Мочалов, В. П., Цукерман, И. Г. (1982). Методы расчета гидрографов паводков при прорыве горных озер. *Селевые потоки*, 6, 34–50.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам.* (1973). Вып. 7. Ч. 1. Гидрометеорологические наблюдения на озерах и водохранилищах, 3-е изд., переработ. и дополнен.
- Нуркадилов, З. К., Хегай, А. Ю., Попов, Н. В. (1986). Искусственное опорожнение прорывоопасного озера у подножья пульсирующего ледника. *Материалы гляциологических исследований*, 58, 108–110.
- Петраков, Д. А. (2008). Селевая опасность ледниковых озер и оценка вероятности их прорыва. В: *Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита, труды междунар. конф., Пятигорск, 22–29 сентября 2008 г.* Пятигорск: Институт «Севкавгипроводхоз», 309–312.

- Попов, Н. В. (1987). Прорывные гляциальные сели и борьба с ними в горах Северного Тянь-Шаня. *Материалы гляциологических исследований*, 59, 188–193.
- Попов, С. В., Боронина, А. С. (2019). Программное обеспечение для обработки данных тахеометрической съемки. В: *Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование, материалы III всерос. науч.-практ. конф.*, 6–8 ноября 2019 г. Санкт-Петербург: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 258–263.
- Попов, С. В., Пряхина, Г. В., Боронина, А. С. (2019). Оценка расхода воды в процессе развития прорывного паводка ледниковых и подледниковых водоемов. *Криосфера Земли*, 23 (3), 25–32. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-3\(25-32\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-3(25-32))
- Пряхина, Г. В., Боронина, А. С., Попов, С. В., Распутина, В. А., Войнаровский, А. Е. (2019). Физическое моделирование разрушения грунтовой дамбы водохранилища в процессе переполнения водоема. *Изв. РГО*, 151 (2), 51–63. <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151251-63>
- Ревякин, В. С., Мухаметов, Р. М. (1986). Динамика ледников Алтае-Саянской горной системы за 150 лет. *Материалы гляциологических исследований*, 57, 95–99.
- Селиверстов, Ю. П. (1972). Современное оледенение Монгун-Тайги (юго-запад Тувы). *Изв. ВГО*, 104 (1), 40–44.
- Семакова, Э. Р., Семаков, Д. Г. (2017). О возможности использования методов дистанционного зондирования Земли при расчетах гляциологических показателей для горных районов Узбекистана. *Лед и снег*, 57 (2), 185–199. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-2-185-199>
- Симонов, Ю. Г. (1997). Балльные оценки в прикладных географических исследованиях и пути их совершенствования. *Вестник Московского университета. Серия 5: География*, 4, 7–10.
- Черноморец, С. С., Петраков, Д. А., Алейников, А. А., Беккиев, М. Ю., Висхаджиева, К. С., Докучкин, М. Д., Калов, Р. Х., Кидяева, В. М., Крыленко, В. В., Крыленко, И. В., Крыленко, И. Н., Рец, Е. П., Савернюк, Е. А., Смирнов, А. М. (2018). Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 г. *Криосфера Земли*, 22 (2), 70–80. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2\(70-80\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2(70-80))
- Черноморец, С. С., Петраков, Д. А., Тутубалина, О. В. (2007). Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне г. Эльбрус 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия. *Материалы гляциологических исследований*, 102, 225–229.
- Черноморец, С. С., Тутубалина, О. В., Алейников, А. А. (2003). Новые селеопасные озера у края ледника Башкара на Центральном Кавказе. *Материалы гляциологических исследований*, 95, 153–160.
- Чижова, Ю. Н., Рец, Е. П., Васильчук, Ю. К., Токарев, И. В., Буданцева, Н. А., Киреева, М. Б. (2016). Два подхода к расчету расчленения гидрографа стока реки с ледниковым питанием с помощью изотопных методов. *Лед и снег*, 56 (2), 161–168. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-161-168>
- Чистяков, К. В., Ганюшкин, Д. А., Курочкин, Ю. Н. (2015). Современное состояние и динамика низовально-гляциальных систем массивов Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола. *Лед и снег*, 1 (129), 49–60. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-1-49-60>
- Чистяков, К. В., Ганюшкин, Д. А., Москаленко, И. Г., Зелепукина, Е. С., Амосов, М. И., Волков, И. В., Глебова, А. Б., Гузель, Н. И., Журавлев, С. А., Прудникова, Т. Н., Пряхина, Г. В. (2012). *Горный массив Монгун-Тайга*. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс.
- Björnsson, H. (1976). Subglacial water reservoirs, jökulhlaups and volcanic eruptions. *Jökull*, 26, 1–15.
- Clarke, G. K. C. (2003). Hydraulics of subglacial outburst floods: new insights from the Spring-Hutter formulation. *Journal of Glaciology*, 49 (165), 299–313. <https://doi.org/10.3189/172756503781830728>
- Costa, J. E. (1985). *Floods from dam failures*. Denver, Colorado. eros.usgs.gov. (n. d.). *Earth Resources Observation and Science (EROS) Center*. [online] Доступно на: <https://eros.usgs.gov/> [Дата доступа 04.08.2021].
- Ganyushkin, D. A., Chistyakov, K. V., Volkov, I. V., Bantsev, D. V., Kunaeva, E. P. and Terekhov, A. V. (2017). Present Glaciers and Their Dynamics in the Arid Parts of the Altai Mountains. *Geosciences*, 7 (4), 117. <https://doi.org/10.3390/geosciences7040117>
- Ganyushkin, D., Chistyakov, K., Volkov, I., Bantsev, D., Kunaeva, E., Brandová, D., Raab, G., Christl, M. and Egli, M. (2018). Palaeoclimate, glacier and treeline reconstruction based on geomorphic evidences in the Mongun-Taiga massif (south-eastern Russian Altai) during the Late Pleistocene and Holocene. *Quaternary International*, 470 (Part A), 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.12.031>

- Haerberli, W. (1983). Frequency, characteristics of glacier floods in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 4, 85–90.
- Huggel, C., Haerberli, W., Kaab, A., Bieri, D. and Richardson, S. (2004). An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 41 (6), 1068–1083.
- Reynolds, J. M. (2003). *Development of glacial hazard and risk minimization protocol in rural environment*. UK: Reynolds Geo-Sciences LTD.
- Richardson, S. D. and Reynolds, J. M. (2000). An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, 65/66, 31–47.

Статья поступила в редакцию 16 августа 2020 г.

Статья рекомендована в печать 18 июня 2021 г.

Контактная информация:

Распутина Валерия Алексеевна — lerasputina88@gmail.com
Ганюшкин Дмитрий Анатольевич — ganushkinspbgu@mail.ru
Банцев Дмитрий Вадимович — bancev-d@yandex.ru
Пряхина Галина Валентиновна — g65@mail.ru
Вуглинский Валерий Сергеевич — vvuglins@mail.ru
Свирипов Степан Сергеевич — svirepovss@yandex.ru
Панютин Николай Алексеевич — nic9898@yandex.ru
Волкова Дарья Дмитриевна — dvolkova1996@mail.ru
Николаев Михаил Романович — nukolaevmihael7@gmail.com
Сироержко Евгений Владимирович — siroezhko.evgeny@yandex.ru

Outburst hazard of little-studied lakes assessment at the Mongun-Taiga massif*

V. A. Rasputina¹, D. A. Ganyushkin¹, D. V. Bantcev¹, G. V. Pryakhina¹,
V. S. Vuglinsky^{1,2}, S. S. Svirepov¹, N. A. Paniutin¹, D. D. Volkova¹,
M. R. Nikolaev¹, E. V. Siroezhko¹

¹ St. Petersburg State University,

7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² State Hydrological Institute,

23, 2-ia liniia V. O., St. Petersburg, 199004, Russian Federation

For citation: Rasputina, V. A., Ganyushkin, D. A., Bantcev, D. V., Pryakhina, G. V., Vuglinsky, V. S., Svirepov, S. S., Paniutin, N. A., Volkova, D. D., Nikolaev, M. R., Siroezhko, E. V. (2021). Outburst hazard of little-studied lakes assessment at the Mongun-Taiga massif. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 66 (3), 487–509. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.304> (In Russian)

There is a reduction in the area of glaciation of mountain massifs as a result of climate warming, which leads to the formation of lake-glacial complexes in areas of glacial degradation. These complexes are dynamic systems that are rapidly changing over time. Therefore, they are unstable and have an outburst potential. Outbursts of moraine and periglacial lakes are dangerous hydrological phenomena. As a result of outbursts, catastrophic floods and mudflows can form, causing serious damage to the infrastructure of settlements located downstream and often lead to human casualties. Therefore, the study of outburst-hazardous lakes is necessary and is an important applied problem associated with forecasting natural

* This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 19-05-00535 A “Natural disasters and transformation of landscapes in southeastern Altai and northwestern Mongolia during the period from the maximum glaciation”).

hazards. In this work, the assessment of the outburst hazard of little-studied moraine and periglacial lakes at the Mongun-Taiga mountain massif (Tyva Republic, Russian Federation) was carried out using the scoring method, supplemented by taking into account regional characteristics, and data from the remote sensing of the Earth. The performed assessment, according to satellite images, showed that most of the massif's lakes have a high outburst hazard. Based on the results of the assessment, a group of lakes was selected located in the right tributary upstream of the river "Tolaity" for the purpose of a more detailed field survey (hydrological and geophysical studies were carried out). Field work carried out on the selected group of lakes allowed the authors to correct the performed assessment. In the article, the applicability of the method based on comparing field data and data obtained from satellite images was estimated.

Keywords: moraine and periglacial lakes, lakes outbursts, dangerous hydrological phenomena.

References

- Belikov, V. V. (2005). *Improvement of methods and technologies of applied numerical modeling in open flow hydraulics*. Dr. Sci. thesis. (In Russian)
- Björnsson, H. (1976). Subglacial water reservoirs, jökulhlaups and volcanic eruptions. *Jökull*, 26, 1–15.
- Boronina, A. S., Chetverova, A. A., Popov, S. V. and Pryakhina, G. V. (2019). Review of potentially outburst-hazardous lakes and the consequences of their floods in the areas of the Tala and Larsemann hills (East Antarctica). In: *Current trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia, Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference, Irkutsk, 5–7 June 2019*. Irkutsk: Irkutsk State University Press, 307–318. (In Russian)
- Chernomorets, S. S., Petrakov, D. A. and Tutubalina, O. V. (2007). The breakthrough of a glacial lake on the north-eastern slope of Elbrus on August 11, 2006: forecast, event and consequences. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniy*, 102, 225–229. (In Russian)
- Chernomorets, S. S., Petrakov, D. A., Aleinikov, A. A., Bekkiev, M. Iu., Viskhadzhieva, K. S., Dokukin, M. D., Kalov, R. Kh., Kidiaeva, V. M., Krylenko, V. V., Krylenko, I. V., Krylenko, I. N., Rets, E. P., Saverniuk, E. A., Smirnov, A. M. (2018). The outburst of Bashkara glacier lake (Central Caucasus, Russia) on September 1, 2017. *Kriosfera Zemli*, 22 (2), 70–80. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2\(70-80\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2(70-80)) (In Russian)
- Chernomorets, S. S., Tutubalina, O. V. and Aleinikov, A. A. (2003). New mudflow-hazardous lakes near the edge of the Bashkara glacier in the Central Caucasus. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniy*, 95, 153–160. (In Russian)
- Chistiakov, K. V., Ganyushkin, D. A., Moskalenko, I. G., Zelepukina, E. S., Amosov, M. I., Volkov, I. V., Glebova, A. B., Guzel' N. I., Zhuravlev, S. A., Prudnikova, T. N. and Pryakhina, G. V. (2012). *Mongun-Taiga Mountain massif*. St. Petersburg: Art-Express Publ. (In Russian)
- Chistyakov, K. V., Ganyushkin, D. A., Kurochkin, Yu. N. (2015). Present state and dynamics of glacio-nival systems of Mongun-Taiga and Tavan-Bogdo-Ola Mountain massives. *Ice and Snow*, 1, 49–60. <https://doi.org/10.15356/IS.2015.01.05> (In Russian)
- Chizhova, Y. N., Rets, E. P., Vasil'chuk, Y. K., Tokarev, I. V., Budantseva, N. A. and Kireeva, M. B. (2016). Two approaches to hydrograph separation of the glacial river runoff using isotopic methods. *Ice and Snow*, 56 (2), 161–168. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-161-168> (In Russian)
- Clarke, G. K. C. (2003). Hydraulics of subglacial outburst floods: new insights from the Spring-Hutter formulation. *Journal of Glaciology*, 49 (165), 299–313. <https://doi.org/10.3189/172756503781830728>
- Costa, J. E. (1985). *Floods from dam failures*. Denver, Colorado.
- Dokukin, M. D. and Khatkutov, A. V. (2016). Lakes near the glacier Maliy Azau on the Elbrus (Central Caucasus): dynamics and outbursts. *Ice and Snow*, 56 (4), 472–479. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-4-472-479> (In Russian)
- eros.usgs.gov. (n. d.). *Earth Resources Observation and Science (EROS) Center*. [online] Available at: <https://eros.usgs.gov/> [Accessed 4 Aug. 2021].
- Ganyushkin, D. A., Chistiakov, K. V. and Moskalenko, I. G. (2011). Contemporary glaciation of the north-west of inner Asia and its dynamics. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya*, (2), 94–110. (In Russian)

- Ganyushkin, D. A., Chistyakov, K. V., Volkov, I. V., Bantcev, D. V., Kunaeva, E. P. and Terekhov, A. V. (2017). Present Glaciers and Their Dynamics in the Arid Parts of the Altai Mountains. *Geosciences*, 7 (4), 117. <https://doi.org/10.3390/geosciences7040117>
- Ganyushkin, D., Chistyakov, K., Volkov, I., Bantcev, D., Kunaeva, E., Brandová, D., Raab, G., Christl, M. and Egli, M. (2018). Palaeoclimate, glacier and treeline reconstruction based on geomorphic evidences in the Mongun-Taiga massif (south-eastern Russian Altai) during the Late Pleistocene and Holocene. *Quaternary International*, 470 (Part A), 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.12.031>
- Golubev, G.N. (1976). *Hydrology of glaciers*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
- Haeberli, W. (1983). Frequency, characteristics of glacier floods in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 4, 85–90.
- Huggel, C., Haeberli, W., Kaab, A., Bieri, D. and Richardson, S. (2004). An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 41 (6), 1068–1083.
- Konovalov, V. G. (2009). Remote sensing monitoring of the outburst hazardous lakes in pamiir. *Earth's Cryosphere*, 13 (4), 80–89. (In Russian)
- Konovalov, V. G. and Rudakov, V. A. (2016). Remote assessment of reserve capacity of outburst alpine lakes. *Ice and Snow*, 56 (2), 235–245. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-235-245> (In Russian)
- Manual for hydrometeorological stations and posts*. (1973). Iss. 7. Part 1. Hydrometeorological observations on lakes and reservoirs, 3rd ed., revised and supplemented. (In Russian)
- Mochalov, V. P. and Tsukerman, I. G. (1982). Methods for calculating flood hydrographs due to the outburst of mountain lakes. *Sevyye potoki*, 6, 34–50. (In Russian)
- Nurkadilov, Z. K., Khagai, A. Iu. and Popov, N. V. (1986). Artificial emptying of an outburst-hazardous lake at the foot of a surging glacier. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniy*, 58, 108–110. (In Russian)
- Petrakov, D. A. (2008). Mudflow hazard of glacial lakes and assessment of the probability of their outburst. In: *Debris flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection, Proceedings of the International Conference, Pyatigorsk, 22–29 Sept. 2008*. Pyatigorsk: Sevkavgirovodkhoz Institute Publ., 309–312. (In Russian)
- Popov, N. V. (1987). Outburst glacial mudflows and the combat against them in the Northern Tien Shan mountains. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniy*, 59, 188–193. (In Russian)
- Popov, S. V. and Boronina, A. S. (2019). Software for processing data of tacheometric survey. In: *Geodesy, Cartography, Geoinformatics and Cadastre. Science and Education, Proceeding of the International Conference, 6–8 Nov. 2019*. St. Petersburg: Herzen State Pedagogical University Press, 258–263. (In Russian)
- Popov, S. V., Pryakhina, G. V., Boronina, A. S. (2019). Estimation of the water discharge during the development of the glacial and subglacial outburst floods. *Kriosfera Zemli*, 23 (3), 25–32. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-3\(25-32\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-3(25-32)) (In Russian)
- Pryakhina, G. V., Boronina, A. S., Popov, S. V., Rasputina, V. A. and Voinarovskii, A. E. (2019). Physical modelling of the destruction of reservoir ground dam in consequence of the overflow of water body. *Izv. RGO*, 151 (2), 51–63. <https://doi.org/10.31857/S0869-6071151251-63> (In Russian)
- Reviakin, V. S. and Mukhametov, R. M. (1986). Dynamics of glaciers of the Altai-Sayan Mountain system for 150 years. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniy*, 57, 95–99.
- Reynolds, J. M. (2003). *Development of glacial hazard and risk minimization protocol in rural environment*. UK: Reynolds Geo-Sciences LTD.
- Richardson, S. D. and Reynolds, J. M. (2000). An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, 65/66, 31–47.
- Seliverstov, Yu. P. (1972). Contemporary glaciation of Mongun-Taiga (southwestern Tuva). *Izv. VGO*, 104 (1), 40–44. (In Russian)
- Semakova, E. R. and Semakov, D. G. (2017). On a possibility to use the remote sensing techniques for glaciological analysis in mountain regions of Uzbekistan. *Ice and Snow*, 57 (2), 185–199. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-2-185-199> (In Russian)
- Simonov, Yu. G. (1997). Scores in applied geographical research and ways to improve them. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 5, Geografiya*, 4, 7–10. (In Russian)
- Vinogradov, Yu. B. (1976). Method for calculating flood hydrograph in case of a glacier-dammed lake outburst. *Sevyye potoki*, 1, 138–153. (In Russian)
- Vinogradov, Yu. B. (1977). *Glacial outburst floods and mudflows*. Leningrad: Gidrometizdat Publ. (In Russian)

Received: August 16, 2020

Accepted: June 18, 2021

Contact information:

Valeriia A. Rasputina — lerasputina88@gmail.com
Dmitry A. Ganyushkin — ganushkinspbgu@mail.ru
Dmitrii V. Bantsev — bancev-d@yandex.ru
Galina V. Pryakhina — g65@mail.ru
Valery S. Vuglinsky — vvuglins@mail.ru
Stepan S. Svirepov — svirepovss@yandex.ru
Nikolai A. Paniutin — nic9898@yandex.ru
Daria D. Volkova — dvolkova1996@mail.ru
Mihail R. Nikolaev — nukolaevmihael7@gmail.com
Evgenii V. Siroezhko — siroezhko.evgeny@yandex.ru