

Статья принята в печать и будет опубликована в журнале:  
«Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле»

## **Оценка прорывоопасности малоизученных озёр массива Монгун-Тайга**

*Распутина Валерия Алексеевна, Ганюшкин Дмитрий  
Анатольевич, Банцев Дмитрий Вадимович, Пряхина Галина  
Валентиновна, Вуглинский Валерий Сергеевич, Свирепов Степан Сергеевич, Панютин  
Николай Алексеевич, Волкова Дарья Дмитриевна, Николаев Михаил Романович,  
Сыроежко Евгений Владимирович*



DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.304>

Дата получения рукописи: 16.08.2020

Дата принятия рукописи в печать: 18.06.2021

**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 озёр массива Монгун-Тайга. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 66 (3). <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.304>

Это неотредактированный файл принятой к публикации рукописи. До публикации в окончательном виде она будет подвергнута редактированию и верстке. Обратите внимание, что во время производственного процесса могут быть выявлены ошибки, влияющие на содержание. К данной рукописи применяются все правовые оговорки, относящиеся к журналу.

УДК 556.5

### Оценка прорывоопасности малоизученных озёр массива Монгун-Тайга\*

*Распутина Валерия Алексеевна<sup>1</sup>, Ганюшкин Дмитрий Анатольевич<sup>1</sup>, Банцев Дмитрий Вадимович<sup>1</sup>, Пряхина Галина Валентиновна<sup>1</sup>, Вуглинский Валерий Сергеевич<sup>2,1</sup>, Свирепов Степан Сергеевич<sup>1</sup>, Панютин Николай Алексеевич<sup>1</sup>, Волкова Дарья Дмитриевна<sup>1</sup>, Николаев Михаил Романович<sup>1</sup>, Сыроежко Евгений Владимирович<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, Санкт-Петербург, 10 линия В.О., д. 33, 199178

<sup>2</sup>Государственный гидрологический институт, Россия, Санкт-Петербург, 2 линия В.О., д. 23, 199004

Распутина В.А.: [lerasputina88@gmail.com](mailto:lerasputina88@gmail.com)

Ганюшкин Д.А.: [ganushkinspbgu@mail.ru](mailto:ganushkinspbgu@mail.ru)

Банцев Д.В.: [bancev-d@yandex.ru](mailto:bancev-d@yandex.ru)

Пряхина Г.В.: [g65@mail.ru](mailto:g65@mail.ru)

Вуглинский В.С.: [vvuglins@mail.ru](mailto:vvuglins@mail.ru)

Свирепов С.С.: [svirepovss@yandex.ru](mailto:svirepovss@yandex.ru)

Панютин Н.А.: [nic9898@yandex.ru](mailto:nic9898@yandex.ru)

Волкова Д.Д.: [dvolkova1996@mail.ru](mailto:dvolkova1996@mail.ru)

Николаев М.Р.: [nukolaevmihael7@gmail.com](mailto:nukolaevmihael7@gmail.com)

Сыроежко Е.В.: [siroezhko.evgeny@yandex.ru](mailto:siroezhko.evgeny@yandex.ru)

#### Аннотация

В результате потепления климата происходит сокращение площади оледенения горных массивов, что приводит к образованию озёрно-ледниковых комплексов в районах деградации оледенения, которые представляют собой динамичные системы, стремительно изменяющиеся во времени, что подтверждается анализом

---

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

картографического материала и спутниковых снимков за разные годы, и, следовательно, нестабильные и потенциально прорывоопасные. Прорывы моренных и приледниковых озёр относятся к опасным гидрологическим явлениям. В результате прорывов может происходить формирование катастрофических прорывных паводков и селевых потоков, наносящих серьёзный ущерб инфраструктуре расположенных ниже по течению населённых пунктов и приводящих нередко к человеческим жертвам. В связи с этим изучение прорывоопасных озёр необходимо и является важной прикладной задачей, связанной с прогнозированием опасных природных явлений. В настоящей работе была проведена оценка прорывоопасности малоизученных моренных и приледниковых озёр горного массива Монгун-Тайга (Республика Тыва, Российская Федерация) при помощи метода балльной оценки, дополненного с учётом региональных особенностей, с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Выполненная оценка согласно спутниковым снимкам показала, что большинство озёр массива имеет высокую прорывоопасность. По результатам оценки была выбрана группа озёр, расположенных в верховьях правого притока р. Толайты с целью более детального обследования в полевых условиях (проведены гидрологические и геофизические исследования). Полевые работы, которые проводились на выбранной группе озёр, позволили скорректировать выполненную оценку. В работе оценена применимость метода на основе сравнения натурных данных и полученных по спутниковым снимкам.

**Ключевые слова:** моренные и приледниковые озёра, прорывы озёр, опасные гидрологические явления.

## **Введение**

Прорывы моренных и приледниковых озёр являются одними из наиболее серьёзных 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 населённых 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 озёр является важной прикладной задачей, связанной с изучением и прогнозированием опасных природных явлений.

Методические подходы, применяемые для её 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 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 расчёта сложных характеристик объекта (глубина, объём), как указано в работах (Коновалов и Рудаков, 2016; Семакова и Семаков, 2017). Космические снимки используются для мониторинга озёр, так как позволяют проследить сезонную и годовую динамику.

В качестве объектов исследования рассматривались водоёмы в пределах озёрно-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 озёр, соответственно, результаты, приведённые в настоящей работе, призваны дать новый материал по данной проблеме. Особое внимание было уделено тем водоёмам и водотокам, которые на настоящий момент ещё имеют связь с окружающими их ледниками. Таким образом, целью работы являлось выявление потенциально прорывоопасных озёр по данным дистанционного зондирования, определение их характеристик и сравнение с наблюдаемыми данными.

## 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 км<sup>2</sup> и представлено 32 ледниками, большей частью, малыми (более 80%) (Ганюшкин и др., 2011). На территории в настоящее время насчитывается около 450 озёр (включая малые термокарстовые), имеющих в основном гляциальный генезис. Распределение озёр по высотам имеет чёткий максимум в интервале высот 2300-2400 м, что связано с моренными образованиями максимума позднеюрмского оледенения (Чистяков и др., 2012).

## Материалы и методы

Задачей первого этапа работы было выделить из всего массива озёр прорывоопасные озёра, ранжировать их по степени прорывной опасности, сделать предварительные выводы о связи прорывоопасности с возрастом озёр, 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 (Симонов, 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:

- типа плотины (скала – 0, морена – 20, морена с ледяным ядром – 50, лед – 80);
- высоты низшей точки плотины над урезом ( $> 10$  м – 10, 1-10 м – 40,  $< 1$  м – 90);
- отношения ширины плотины к её высоте ( $> 0.5$  – 0, 0.2 – 0.5 – 30;  $< 0.2$  – 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);
- объёма озера ( $< 100$  тыс. м<sup>3</sup> – 10, 100 тыс. м<sup>3</sup> – 1 млн м<sup>3</sup> – 20, более 1 млн м<sup>3</sup> – 30).

Для ледяной плотины следует также учесть возможность её всплытия (+ 100 баллов). Воздействие внешнего фактора может проявиться в виде: - волн из-за ледяных и каменных лавин, оползней и откола айсбергов (1) (волны намного ниже плотины – 10, высота волн сопоставима с высотой плотины – 50, волны существенно выше плотины – 100); - экстремальной жары/дождей (2) (один из факторов – 10, ливень после продолжительной жары – 30).

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 г., 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 объёма озера проводилась в соответствии с методикой, описанной в работе (Коновалов, 2009). В связи с невозможностью определения средней глубины по снимкам, для определения объёма водоёма 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 расчёта объёма прорывоопасных озёр гляциального генезиса согласно (Коновалов, 2009),  $F$  – площадь озера,  $H_{max}$  – максимальная глубина, которая определяется с помощью выражения (2):

$$H_{max} = \frac{L}{2} * \frac{1}{tg(\arctg(\frac{L}{H_2}))}, \quad (2)$$

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

Выше приведённые формулы являются эмпирическими и были апробированы на гляциогенных озёрах, расположенных на территории бассейна р. Гунт (Памир). Поэтому расчётные значения максимальной глубины и объёмов воды для озёр массива Монгун-Тайга, полученные с использованием этих формул, носят оценочный характер и требуют проверки путём 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 озёр (Петраков, 2008).

В нашей работе мы несколько дополнили данную методику с учётом региональных особенностей. Например, в ходе работы выяснилось, что у 20 озёр из всего массива возникновение волн, превышающих высоту 1 м, с учётом малых размеров озёр 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, 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, объёмов снежников и наледей, скорее напротив, связанное с потеплением увеличение испарения будет перекрывать по своему воздействию вероятное увеличение стока. Соответственно, для озёр 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 озёр для проведения экспедиционных исследований и сравнения натурных данных и данных, полученных с помощью спутниковых снимков.

На втором этапе, на выбранных озёрах были проведены гидрологические и геофизические полевые работы. При выполнении батиметрической съёмки 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 озёр: площадь водного зеркала, объём воды, максимальная и средняя глубина, длина водной акватории, её максимальная и средняя ширина. Составление батиметрических схем осуществлялось компьютерным способом, путём 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 водоёмах и водотоках выполнялись в сроки согласно (Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, 1973). Для выявления внутрисуточной изменчивости стока на ручьях, выпадающих в озера 17.07.2019 г. и 19.07.2019 г были организованы наблюдения за стоком (измерение 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 водоёмов были отобраны образцы воды из ручьёв и озёр, ледникового льда и атмосферных осадков на изотопный анализ в герметичные пробирки ёмкостью равной 50 мл. Объём 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 ААНИИ на газовом анализаторе Picarro L2120-i. В качестве стандарта использовалась дистиллированная водопроводная вода Санкт-Петербурга со следующими характеристиками:  $-9,79 \text{ ‰}$  по  $\delta^{18}\text{O}$  и  $-75,47 \text{ ‰}$  по  $\delta\text{D}$  относительно стандарта МАГАТЭ «V-SMOW2». Точность измерений составляла  $0,05 \text{ ‰}$  для  $\delta^{18}\text{O}$  и  $0,5 \text{ ‰}$  для  $\delta\text{D}$ . Доли осадков и ледникового стока в питании озёр 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 съёмка прибрежной территории озёр 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 съёмка 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.



## Результаты

Всего на территории массива Монгун-Тайга находится 434 озера суммарной площадью 11.72 км<sup>2</sup> (расчётный суммарный объём 0.02 км<sup>3</sup>). Согласно нашему анализу на основе методики Д.А. Петракова (2008), было выявлено 268 озёр с высокой прорывоопасностью, 2 озера с низкой прорывоопасностью, остальные – со средней прорывоопасностью (рис. 1).

При анализе информации по массиву прорывоопасных озёр 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, отнесённых 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 с множеством небольших округлых термокарстовых депрессий, к которым часто приурочены озёра. 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<sup>0</sup>), что и предопределяет сравнительно слабую расчленённость 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 её перекрывают. Озёра, приуроченные к данной группе морен, многочисленны и малы (средний объём чуть более 6000 м<sup>3</sup>, табл. 1). Эти озёра лишены постоянного стока, что несколько повышает вероятность их прорыва. В то же время единственным источником питания таких озёр 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 озёрах высоких волн, связанных с обвалами или оползнями. Такие озёра в наименьшей степени прорывоопасны, да и сами вероятные их прорывы слишком малы по своему объёму и неопасны.

Морены группы II 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 первую группу. Это типичные морены долинного оледенения, представленные хорошо выраженными валами дугообразной в плане формы. Положение морен на днищах трогов благоприятно для подпруживания ими озёр (здесь располагаются относительно крупные озёра объёмом до 665 тыс. м<sup>3</sup>), несмотря на то, что все морены этой группы прорезаны водотоками. Таким образом, озёра этой группы проточны, часть из них расположена в ледниковых долинах и получает сток с ледников, хотя, как правило, озёра располагаются на расстоянии более 5 км от них. Несмотря на проточность и связанную с ней большую устойчивость плотины, для данной группы озёр возрастает вероятность обвальных и оползневых явлений со склонов трогов, увеличивается возможность избыточного притока талых вод со снежников и ледников при высоких температурах, годовое количество осадков также возрастает, за счёт совокупности этих факторов данная группа озёр оказывается более прорывоопасной, чем предыдущая.

Морены III группы (позднеголоценовые) располагаются в высокогорной части массива (на высотах более 2600 м) и характеризуются крупным угловатым каменным материалом, переслаиваемым с песчаными и глинистыми отложениями. Эта группа морен представлена 2-3 стадийными валами, непосредственно примыкающими друг к другу и окаймляющие 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 погребённого льда, слагающего ядро этих образований и во многих местах выходящего на поверхность. Эти морены почти не подвержены эрозии, в то же время в настоящее время активны термокарстовые процессы, проявляющиеся в том числе и в уходе водотоков в тоннели в погребённом льду со внутренней стороны морен и выходе с внешней стороны. Особенностью озёр, 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 этой группы озёр наименьшая (табл. 1). При этом в ледниковых долинах доминирует ледниковое питание озёр, 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, таким образом, растёт вероятность возникновения волн, превышающих высоту плотины.

Таким образом, среди водоёмов с высокой прорывоопасностью, выделенных нами, выделяется группа озёр, связанная с позднеголоценовыми моренами, имеющая наибольшую прорывоопасность. Необходимость проверки предварительного вывода о прорывоопасных озёрах массива предопределила выбор объектов полевого исследования.

При рассмотрении всего массива прорывоопасных озёр была выделена группа озёр, 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: 1. 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). 2. Наличие около озёр современных ледников, что обеспечивает динамизм их изменчивости. 3. Наличие ниже по долине каскада озёр, что увеличивает вероятность серии прорывов, спровоцированных прорывными событиями в высокогорной части. 4. Расположение в нижней части долины автомобильной дороги, соединяющей республики Алтай и Тыва, что обуславливает прикладное значение работы. 5. Расположение озёр на небольшом расстоянии друг от друга давало возможность проводить на них одновременные полевые исследования.

#### *Оценка прорывоопасности озёр по полевым исследованиям*

Так как важными факторами для формирования условий, при которых возможен прорыв водоёма, являются наличие в нём критического объёма воды, неустойчивое состояние подпруживающей плотины и характер стока из озера, при проведении полевых исследований этим аспектам уделялось основное внимание.

*Озеро «Лагерное».* По результатам батиметрической съёмки (рис. 4) величина площади акватории и объём водной массы озера «Лагерное» при абсолютной отметке уреза воды около 2719 м соответственно составили 127.5 тыс. м<sup>2</sup> и 1.576 млн. м<sup>3</sup>. Суточные наблюдения за стоком на ручье, впадающем в озеро «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 2 км от ледника и на своем пути ручей вначале фильтруется через морену, а затем принимает приток, берущий начало в озере, тем самым в определенной степени сглаживая колебания стока за счёт 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 водоём находится преимущественно в скалистых берегах, является проточным, как таковой запрудной плотины не выявлено. Возможное стремительное увеличение его объёма, вызванное продолжительными ливневыми осадками, приведёт 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 объёма воды», который мог бы пойти на формирование прорывного паводка, маловероятна. Таким образом, по полученным полевым данным озеро относится к категории низкой прорывоопасности.

*Озеро «Верхнее»* представляет собой относительно небольшой водоём, расположенный у ледника № 26, примыкая к моренному чехлу малого ледникового периода. Озеро связано с ледником через ручей, который берёт начало с ледника № 26 и впадает в водоём в юго-западной части. По результатам батиметрической съёмки (рис. 5) средняя глубина водоёма составляет 6.2 м, а максимальная 24.8 м. Площадь озера на момент съёмки оценена величиной 77.2 тыс. м<sup>2</sup> при соответствующем объёме водной массы около 478 тыс. м<sup>3</sup>. Колебания уровней воды за период наблюдений были незначительными. Изотопный состав воды в водоёме практически не меняется по глубине (было отобрано 8 проб воды через 1 м глубины) и составляет -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 озера «Верхнее» может быть оценено как  $85\%$  на  $15\%$  соответственно. Несмотря на преобладание ледникового питания, на момент полевых работ объём воды, который мог бы пойти на формирование прорывного паводка, был равен нулю и не накапливался в котловине озера по причине наличия стока из водоёма.

Анализ устойчивости склонов озёрной котловины показал, что обвальные процессы в северо-восточной части склона довольно активны, что позволяет рассмотреть один из возможных сценариев дальнейшего развития водоёма. 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 возрасти до отметки  $2822$  м (рис. 6, пунктир).

При этом объём озера увеличится до величины  $851$  тыс.  $\text{м}^3$ , что в два раза больше, чем есть на настоящий момент, при площади водной поверхности около  $126.5$  тыс.  $\text{м}^2$ . Ввиду устойчивости возможной запрудной плотины к размыву, прорыв, вероятнее всего, случится в виде перелива. Таким образом, запасной объём воды, который пойдёт на формирование паводка, может составить около  $373$  тыс.  $\text{м}^3$ . Вероятность подобного развития событий невелика, но исключать ее полностью, в случае стечения определенных условий, нельзя. Выполненная оценка прорывоопасности по спутниковым снимкам показала, что озеро имеет высокую вероятность прорыва, однако, исходя из результатов полевых исследований, озеро «Верхнее» может быть отнесено к этой категории при определенном стечении обстоятельств.

Во время рекогносцировочных исследований было выявлено, что наиболее интересным в плане возможной прорывоопасности является озеро «Хойнур».

По результатам батиметрической съёмки (рис. 7) площадь акватории озера «Хойнур» оценивается в  $24.8$  тыс.  $\text{м}^2$ , а объём воды достигает  $86.8$  тыс.  $\text{м}^3$ . Средняя глубина при этом оценена в  $3.5$  м, а максимальная  $10$  м.

Оценка прорывоопасности по данным дистанционного зондирования Земли показала, что озеро «Хойнур» также входит в категорию высоко прорывоопасных озёр. При анализе спутниковых снимков разных лет, сделан вывод о том, что границы водоёма изменяются незначительно, это косвенно указывает на наличие оттока озёрных вод в результате фильтрации через моренные отложения. Поверхностного стока из водоёма не

выявлено, а в его западной части отмечено впадение относительно крупного притока, берущего начало с ледника. В силу отдалённости расположения озера водомерный пост на нём не устанавливался. Однако, на ручье, втекающем в водоём проводились наблюдения за внутрисуточным изменением стока. Было зарегистрировано сначала 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 был от -15.2‰ до -17.7‰, среднее  $\delta^{18}\text{O}$  - 17.2‰. В случае аномально высоких температур воздуха, продолжительных ливневых осадков, интенсивного таяния снега и льда следует ожидать повышение 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 метра выше положения береговой линии на момент обследования. При этом, объём озера составит 142.6 тыс. м<sup>3</sup>, при соответствующей площади поверхности около 33 тыс. м<sup>2</sup>. 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 погребённого льда. Таким образом, согласно полевым исследованиям, в случае, когда озеро переполняется и образуется поверхностный русловой сток, озеро «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 озеро «Хойнур» сразу перейдёт в категорию высокопрорывоопасных водных объектов, что соответствует оценке прорывоопасности по предложенной методике.

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

Анализируя спутниковые снимки разных периодов, можно заметить, что размеры водоёма изменяются в сторону увеличения: на момент 25-го июня 2015 г озеро характеризовалось меньшей площадью, чем в конце июля 2019 г. Сейчас озеро «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 секции рис. 9а. 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 съёмки он был либо пуст, либо заполнен льдом. Таким образом поступление воды в озеро «Малое» происходит не только по поверхности ледника, но и под ним.

Таким образом, тесный контакт озера с ледником, а также увеличение размеров водоёма в многолетнем разрезе дают основание отнести озеро «Малое» к категории высоко прорывоопасных.

### *Сравнение результатов*

Применимость используемой методики оценки прорывоопасности озёр была оценена на основе сравнения морфометрических характеристик озёр (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 озёр показала, что максимальная ошибка определения не превышает 20% (для озера «Лагерное») (табл. 2), что можно считать удовлетворительным результатом. В то же время максимальная ошибка определения максимальной глубины по данным дистанционного зондирования

Земли оказалась 27% (озеро «Лагерное»). Величины объёмов озёр, рассчитанные по предложенной методике, были завышены по сравнению с рассчитанными по данным батиметрической съёмки для всех трёх озёр: для «Лагерного» на 34%, а для «Верхнего» и «Хойнур» практически в 3 раза. Это обусловлено тем, что при расчёте объёмов водной массы использовалась расчётная максимальная глубина водоёмов, которая определялась по формуле (2), ввиду того, что определение средней глубины по спутниковым снимкам не представлялось возможным. Формула (2), используемая для расчёта максимальной глубины, была разработана для высокогорных прорывоопасных озёр, расположенных на территории Памира. Вероятно, это могло увеличить ошибку.

Согласно выполненной оценке прорывоопасности озёр по данным дистанционного зондирования Земли все выбранные водные объекты были отнесены к категории высоко прорывоопасных озёр. Однако, более детальное обследование объектов во время экспедиционных исследований позволили скорректировать полученную предварительно оценку, по результатам которой озеро «Лагерное» перешло в категорию низкой прорывоопасности, а «Верхнее» и «Хойнур» могут стать высоко прорывоопасными только при определенном стечении обстоятельств

## **Заключение**

Исследование было направлено на выявление потенциально прорывоопасных озёр горного массива Монгун-Тайга. Оценка прорывоопасности, выполненная на основе данных дистанционного зондирования Земли по методике балльной оценки с учётом местных факторов показала, что подавляющее большинство озёр массива имеет высокую прорывоопасность. Полевые исследования, которые проводились на выбранной группе озёр, позволили скорректировать выполненную оценку. Было выявлено, что на склонах прибрежной территории озера «Лагерное» осыпные и обвальные процессы не распространены, что понизило баллы по воздействию триггера, и водоём перешёл в категорию низкой прорывоопасности. На спутниковом снимке сток из озера «Верхнее» не был зарегистрирован, но при полевом обследовании было установлено наличие вытекающего из водоёма ручья. Также, объём 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 водоём к высоко прорывоопасным. При анализе спутникового снимка для оценки прорывоопасности озера «Хойнур», сток из водоёма выявлен не был. Однако, в ходе выполнения полевых



исследований было предположено, что сток осуществляется путём 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, озеро «Хойнур» относится к категории высоко прорывоопасных водных объектов. Следует отметить, что все исследованные в полевых условиях озёра приурочены к позднеголоценовым моренам, что позволяет с определённой уверенностью говорить о высокой прорывоопасности таких водных объектов. На территории массива выявлено 21 подобное озеро.

Как показал опыт, метод балльной оценки для определения прорывоопасных озёр не является универсальным и требует учитывать особенности каждой конкретной территории. Несомненно, его можно использовать для предварительного анализа прорывоопасности озёр 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.

## Список литературы

Беликов, В.В. (2005). *Совершенствование методов и технологий прикладного численного моделирования и в гидравлике открытых потоков*. Диссертация доктора технических наук.

Боронина, А.С., Четверова, А.А., Попов, С.В., Пряхина, Г.В. (2019). Обзор потенциально прорывоопасных озёр и последствия прохождения их паводков в районах холмов Тала и Ларсеманн (Восточная Антарктида). В: *II Всероссийская научно-практическая конференция, приуроченная к 55-летию кафедры гидрологии и природопользования ИГУ «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России» 5-7 июня 2019 г., материалы всероссийской конференции*. Иркутск: Издательство Иркутского государственного университета, 307- 318.

Бурман, Э.А. (1969). *Местные ветры*. Л.: Гидрометеоздат, 341 с

Виноградов, Ю.Б. (1976). Метод расчёта гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера. *Селевые потоки*, 1, 138- 153.

Виноградов, Ю.Б. (1977). *Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки*. Л.: Гидрометеоздат, 153 с.

Ганюшкин, Д. А., Чистяков, К. В., Москаленко, И. Г. (2011). Современное

оледенение северо-запада внутренней Азии и его динамика. *Вестник СПбГУ*, 7 (2), 94-110.

Голубев, Г.Н. (1976). *Гидрология ледников*. Л.: Гидрометеиздат, 248 с.

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>

Керемкулов, В.А., Цукерман, И.Г. (1985). Модель опорожнения моренного озера через грот. *Селевые потоки*, 9, 59-70.

Кидяева, В.М. (2014). *Оценка потенциальной опасности при прорывах горных озер*. Диссертация кандидата географических наук, М., МГУ, 239 с.

Коновалов, В.Г. (2009). Дистанционный мониторинг прорывоопасных озёр на Памире. *Криосфера Земли*, 13 (4), 80-89.

Коновалов, В. Г., Рудаков, В. А. (2016). Дистанционное определение резервного объёма прорывоопасных высокогорных озёр. *Лед и снег*, 56 (2), 235-245. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-235-245>

Москаленко И.Г., Селиверстов Ю.П., Чистяков К.В. (1993). *Горный массив Монгун-Тайга (Внутренняя Азия). Опыт эколого-географической характеристики*. СПб.: Изд-во РГО, 94 с.

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. Выпуск 7. Часть 1. Гидрометеорологические наблюдения на озёрах и водохранилищах (3-е издание, переработ. и дополнен.), 1973. 261 с.

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 озёр и оценка вероятности их прорыва. В: *Международная конференция «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита», материалы международной конференции*. Пятигорск: Издательство: 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 съёмки. В: *Геодезия, картография, геоинформатика и*

кадастры. *Наука и образование (06-08 ноября 2019 г.), материалы III Всероссийской науч.- практ. конференции.* СПб.: Издательство 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. doi: 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 расчётах гляциологических показателей для горных районов Узбекистана. *Лёд 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 ун-та*, сер. 5, география, 4, 7-10.

Черноморец, С.С., Петраков, Д.А., Алейников, А.А., Беккиев, М.Ю., Висхаджиева, К.С., Докукин, М.Д., Калов, Р.Х., Кидяева, В.М., Крыленко, В.В., Крыленко, И.В., Крыленко, И.Н., Рец, Е.П., Савернюк, Е.А., Смирнов, А.М. (2018). Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года. *Криосфера Земли*, 22 (2), 70–80. DOI: 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 гляциол. 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 нивально-гляциальных систем массивов Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола. *Лед и снег*, 1 (129), 49-60. DOI: 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*. Под ред. К.В. Чистякова. СПб.: «Арт-Экспресс», 310 с.

Björnsson, H. (1976). Subglacial water reservoirs, jökulhlaups and volcanic eruptions. *Jökull*, 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. DOI: <https://doi.org/10.3189/172756503781830728>

Costa, J.E. (1985). *Floods from dam failures*. Denver, Colorado, 54 p.

Ganyushkin, D., Chistyakov, K., Volkov, I., Bantcev, D., Kunaeva, E., Brandová, D., Raab, G., Christl, M., 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. doi:10.1016/j.quaint.2017.12.031.

Ganyushkin, D.A., Chistyakov, K.V., Volkov, I.V., Bantcev, D.V., Kunaeva, E.P., 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>

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., 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*. Reynolds Geo-Sciences LTD, UK, 69 p.

Richardson, S.D., Reynolds, J.M. (2000). An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, 65/66, 31-47.

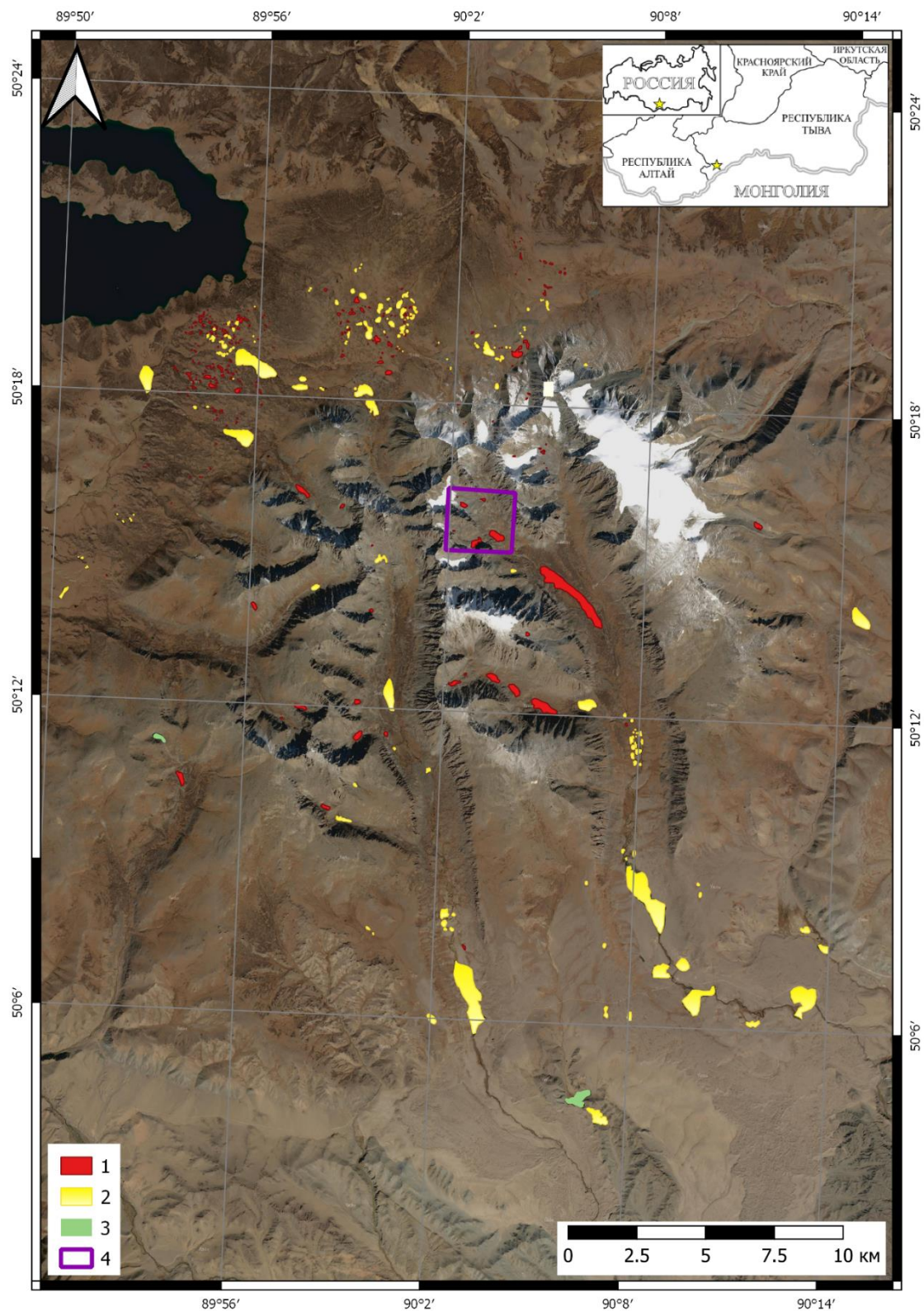
Таблица 1. Соотношение прорывоопасности озёр на территории массива Монгун-Тайга с группами морен, к которым они приурочены.

Группа морен	Количество озёр	Суммарный расчётный объём, млн. м <sup>3</sup>	Средний расчётный объём, м <sup>3</sup>	Средняя сумма баллов по устойчивос	Средняя сумма баллов по триггерам
MIS 4	214	1,32	6184	199,7	20,0
MIS 2	33	6,80	205949	164,9	64,8
Поздний голоцен	21	0,46	21806	210,5	72,9

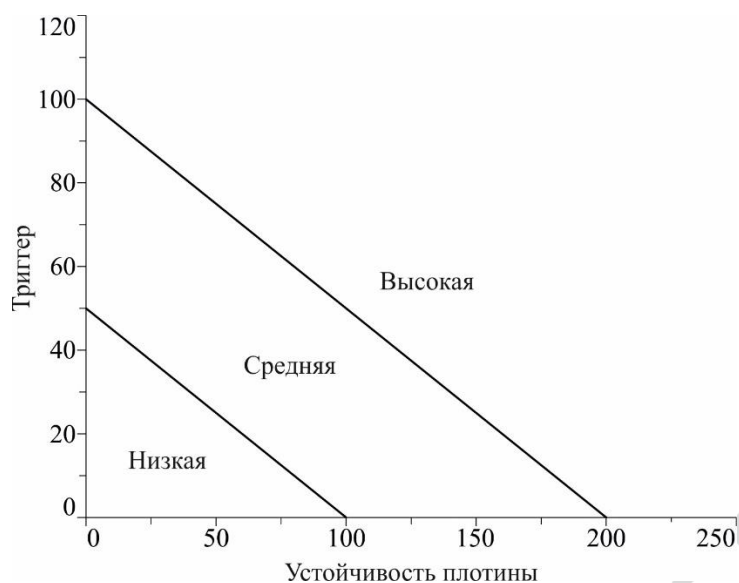
Таблица 2. Сравнение полученных результатов морфометрических характеристик по спутниковым снимкам и полевым исследованиям.

Название		«Лагерное»	«Верхнее»	«Хойнур»	«Малое»
Площадь, м <sup>2</sup>	По спутниковому снимку	102788	63135	21688	860
	Полевые данные	127575	77250	24780	-
	Ошибка	20%	19%	13%	-
Объём, м <sup>3</sup>	По спутниковому снимку и формуле (1)	2107154	1515240	271100	9405
	Полевые данные	1576342	478200	86770	-
	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%	-

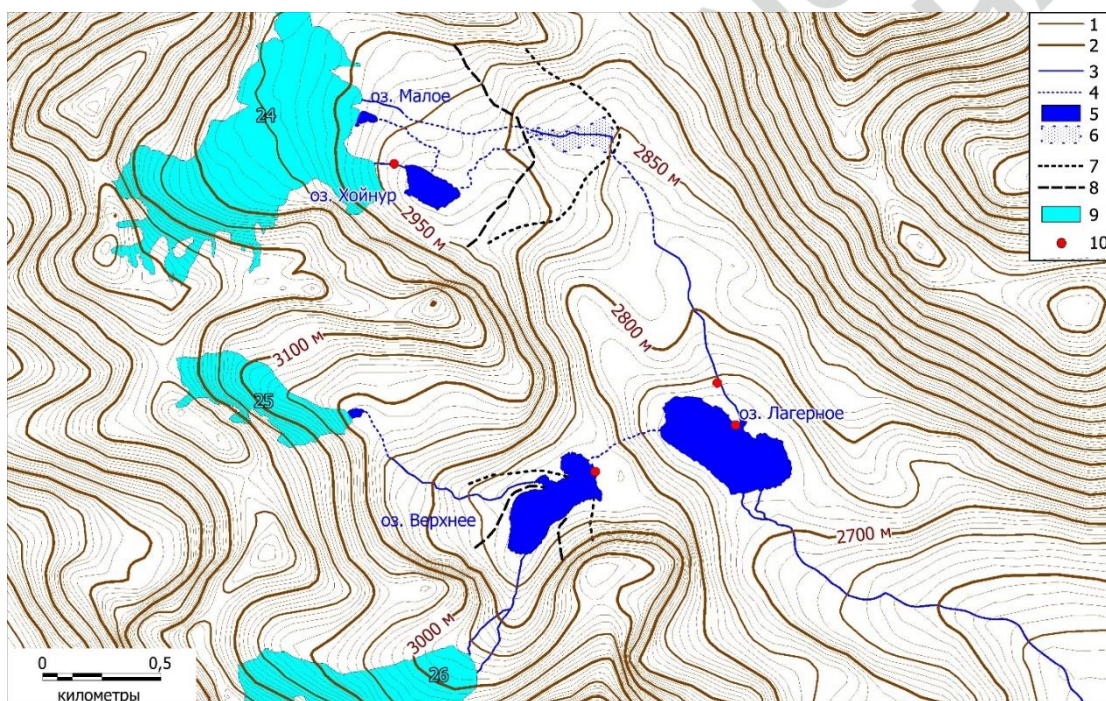
## Рисунки



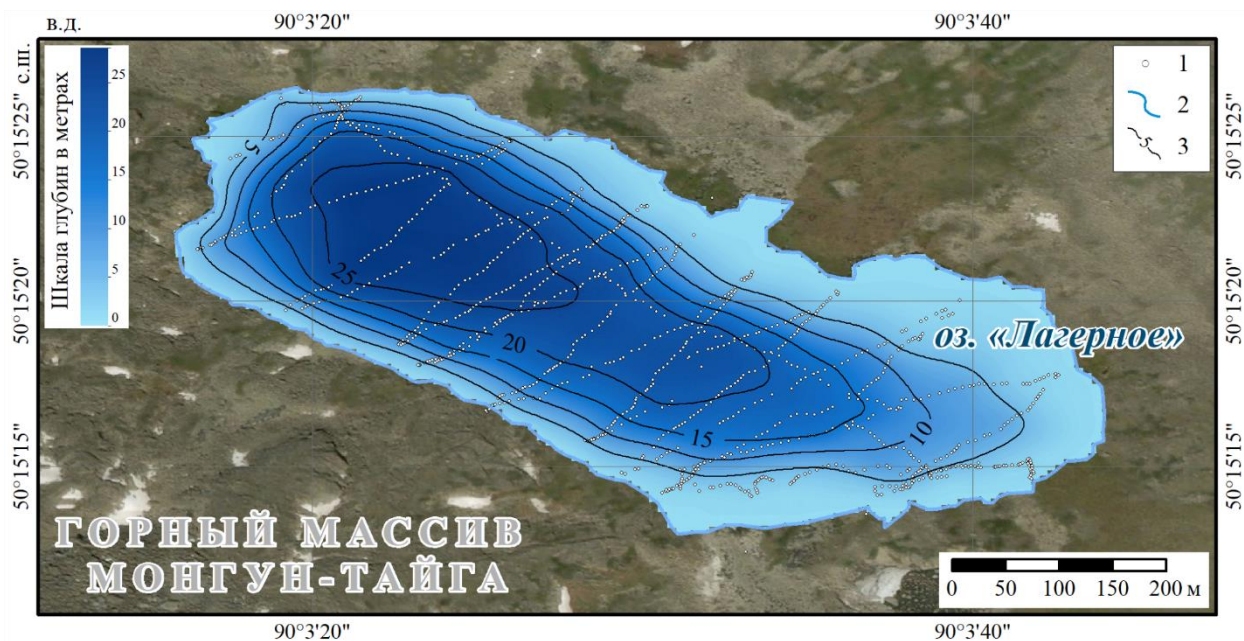
**Рис. 1.** Схема расположения озёр на территории массива Монгун-Тайга. Цифрами 1, 2, 3 обозначены озёра, которые имеют высокую, среднюю и низкую прорывоопасность соответственно на основе выполненного анализа, а цифрой 4 - район работ. Схема выполнена авторами.



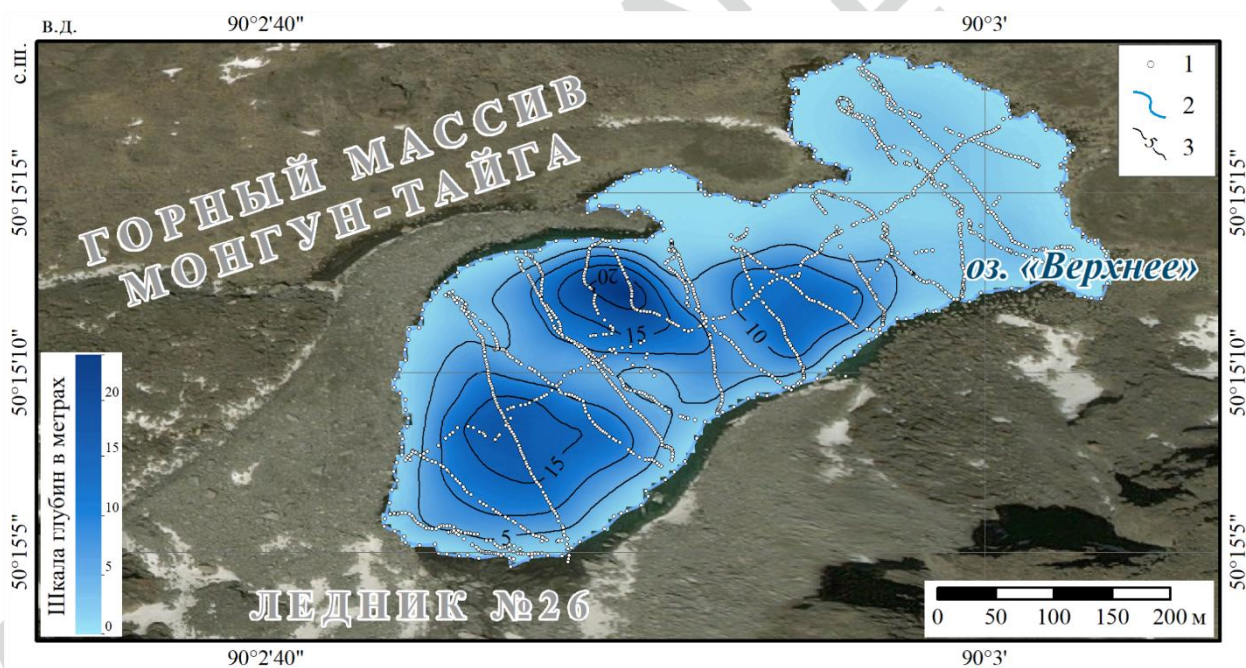
**Рис. 2.** Вероятность прорыва ледникового озера в зависимости от состояния плотины и действия триггерного механизма (Петраков, 2008).



**Рис. 3.** Район полевых работ. Обозначения: 1 - изогипсы, проведённые через 10 м (получены на основе цифровой модели рельефа (The NASA Version 3.0 SRTM Global 1 arc second, Earth Resources Observation and Science Center) (онлайн-ресурс, URL: <https://eros.usgs.gov/> (Retrieved 03.04.2018)), 2 - изогипсы, проведённые через 50 м, 3 - водные потоки, 4 - участки фильтрации воды через морену, 5 - озёра, 6 - следы древнего спущенного озера, 7 - гребни морен исторической стадии, 8 - гребни морен малого ледникового периода, 9- ледники, 10 – пункты расположения гидрологических постов.



**Рис. 4.** Батиметрическая схема озера «Лагерное». 1-пункты измерения глубин; 2- береговая линия; 3- изобаты (сечение 5 м). На заднем плане спутниковый снимок, выполненный 25-го июня 2015 г. Схема выполнена авторами.

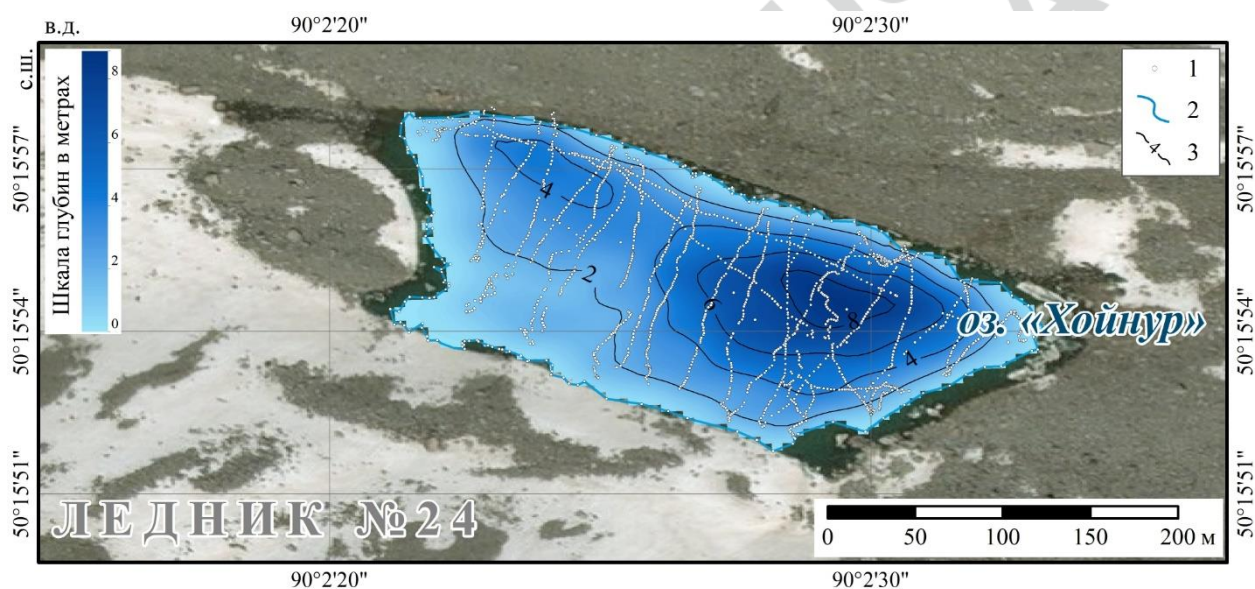


**Рис. 5.** Батиметрическая схема озера «Верхнее». 1- пункты измерения глубин; 2- береговая линия; 3- изобаты (сечение 5 м). На заднем плане спутниковый снимок, выполненный 25-го июня 2015 г. Схема выполнена авторами.

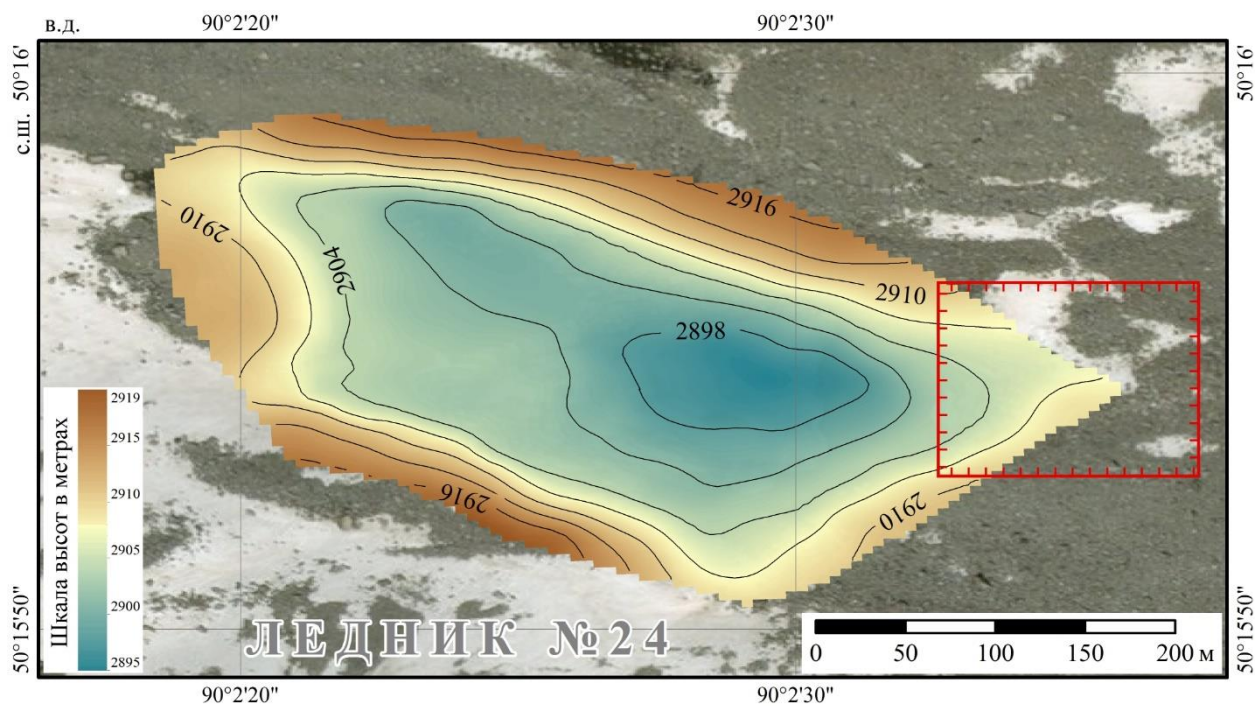




**Рис. 6.** Прибрежная территория озера «Верхнее» Красным прямоугольником отмечено русло вытекающего ручья, а пунктиром показано до какой отметки может подняться уровень воды при образовании запрудной плотины. Фотография выполнена *В.А. Распутиной* в июле 2019 г.

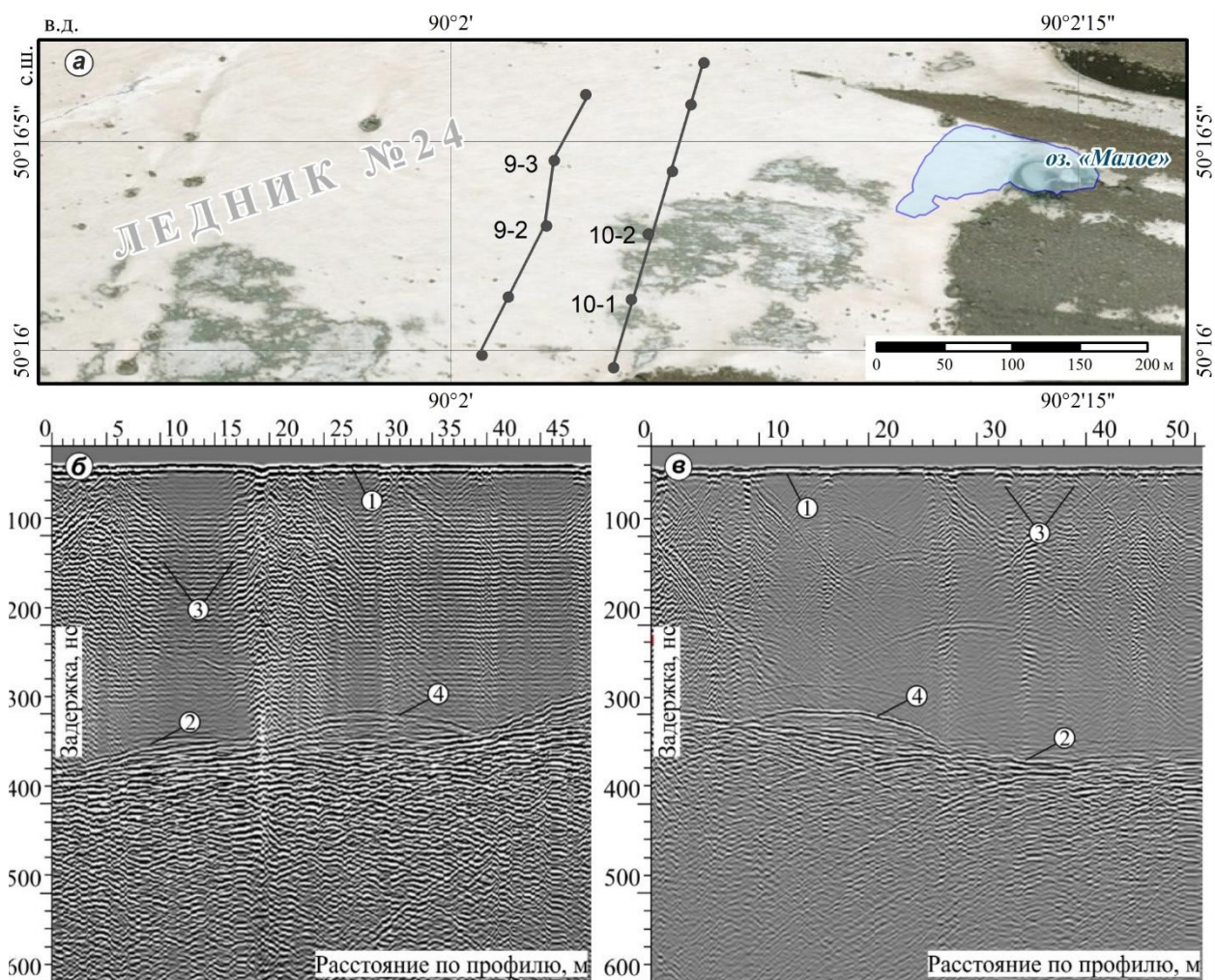


**Рис. 7.** Батиметрическая схема озера «Хойнур». 1- пункты измерения глубин; 2- береговая линия; 3- изобаты (сечение 2 м). На заднем плане спутниковый снимок, выполненный 25-го июня 2015 г. Схема выполнена авторами.



**Рис. 8.** Карта высот прибрежной территории озера «Хойнур» на 17-е июля 2019 г. Красный прямоугольник – возможное место сброса озёрных вод. Схема выполнена авторами.

ACCEPTED MANUSCRIPT  
ПРИНЯТО В ПЕЧАТ



**Рис. 9.** Георадарные разрезы (серые линии) 9-2 – 9-3 (б) и 10-1 – 10.2 (в) на леднике № 24 (георадар ОКО-2, частота зондирующих импульсов 150 МГц) и их месторасположение. 1- прямая волна; 2- кровля каменного основания; 3- дифрагированные волны, связанные с наличием луж и, возможно, обводнённых приповерхностных трещин небольшого размера; 4- внутриледниковый канал (вероятно).

**Outburst hazard of little-studied lakes assessment at the Mongun-Taiga massif<sup>†</sup>**

*Valeriia A. Rasputina<sup>1</sup>, Dmitry A. Ganyushkin<sup>1</sup>, Dmitrii V. Bantcev<sup>1</sup>, Galina V. Pryakhina<sup>1</sup>, Valery S. Vuglinsky<sup>2,1</sup>, Stepan S. Svirepov<sup>1</sup>, Nikolai A. Paniutin<sup>1</sup>, Daria D. Volkova<sup>1</sup>, Mihail R. Nikolaev<sup>1</sup>, Evgenii V. Siroezhko<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>St Petersburg University, Russia, St. Petersburg, 10th line V.O., 33, 199178

<sup>2</sup>State Hydrological Institute, 2nd line V.O., 23, 199004

Rasputina V.A.: [lerasputina88@gmail.com](mailto:lerasputina88@gmail.com)

Ganyushkin D.A.: [ganushkinspbgu@mail.ru](mailto:ganushkinspbgu@mail.ru)

Bantsev D.V.: [bancev-d@yandex.ru](mailto:bancev-d@yandex.ru)

Pryakhina G.V.: [g65@mail.ru](mailto:g65@mail.ru)

Vuglinsky V.S.: [vvuglins@mail.ru](mailto:vvuglins@mail.ru)

Svirepov S.S.: [svirepovss@yandex.ru](mailto:svirepovss@yandex.ru)

Paniutin N.A.: [nic9898@yandex.ru](mailto:nic9898@yandex.ru)

Volkova D.D.: [dvolkova1996@mail.ru](mailto:dvolkova1996@mail.ru)

Nikolaev M.R.: [nukolaevmihael7@gmail.com](mailto:nukolaevmihael7@gmail.com)

Siroezhko E.V.: [siroezhko.evgeny@yandex.ru](mailto:siroezhko.evgeny@yandex.ru)

**Annotation**

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 glaciation degradation. These complexes are dynamic systems that are rapidly changing over time, therefore, unstable and potentially outburst. Moraine and periglacial lakes outbursts 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 leading to human toll. Therefore, the study of outburst-hazardous lakes is necessary and is an important applied problem associated with forecasting natural hazards. In this paper an

---

<sup>†</sup> This work was supported by the RFBR 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."

the outburst hazard of little-studied moraine and periglacial lakes at the Mongun-Taiga mountain massif (Tyva Republic, Russian Federation) assessment was carried out using the scoring method, supplemented taking into account regional characteristics, using data from 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 assessment results a group of lakes was selected located in the right branch 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 us to correct the performed assessment. In paper 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*. DSc. (In Russian)
- Björnsson, H. (1976). Subglacial water reservoirs, jökulhlaups and volcanic eruptions. *Jökull*, 1–15.
- Boronina, A.S., Chetverova, A.A., Popov, S.V., 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: *II Vserossiiskaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia, priurochennaia k 55-letiiu kafedry gidrologii i prirodopol'zovaniia IGU «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiia gidrometeorologii v Rossii» 5-7 iunia 2019 g., materialy vserossiiskoi konferentsii*. Irkutsk: Irkutskii gosudarstvennyi universitet Publ., 307-318. (In Russian)
- Burman, E.A. (1969). *Local winds*. L.: Gidrometeoizdat, 341 p. (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. *Earth's Cryosphere*, 22 (2), 70–80. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(70-80) (In Russian)
- Chernomorets, S.S., Tutubalina, O.V., Aleinikov, A.A. (2003). New mudflow-hazardous lakes near the edge of the Bashkara glacier in the Central Caucasus. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniia*, 95, 153-160. (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. doi:10.15356/IS.2015.01.05 (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., Pryakhina, G.V. (2012). *Mongun-Taiga mountain massif*. Saint Petersburg: Art-Express Publ., 310 p. (In Russian)

Chizhova, Y.N., Rets, E.P., Vasil'chuk, Y.K., Tokarev, I.V., Budantseva, N.A., Kireeva, M.B. (2016). Two approaches to hydrograph separation of the glacial river runoff using isotopic methods. *Ice and Snow*, 56 (2), 161-168. (In Russian) <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-161-168>

Clarke, G.K.C. (2003). Hydraulics of subglacial outburst floods: new insights from the Spring–Hutter formulation. *Journal of Glaciology*, 49 (165), 299-313. DOI: <https://doi.org/10.3189/172756503781830728>

Costa, J.E. (1985). *Floods from dam failures*. Denver, Colorado, 54 p.

Dokukin, M.D., 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. (In Russian) <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-4-472-479>

Ganyushkin, D. A., Chistyakov, K. V., Moskalenko, I. G. (2011). Contemporary glaciation of the northwest of inner Asia and its dynamics. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 7 (2), 94-110. (In Russian)

Ganyushkin, D., Chistyakov, K., Volkov, I., Bantcev, D., Kunaeva, E., Brandová, D., Raab, G., Christl, M., 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. doi:10.1016/j.quaint.2017.12.031.

Ganyushkin, D.A.; Chistyakov, K.V.; Volkov, I.V.; Bantcev, D.V.; Kunaeva, E.P.; 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>

Golubev, G.N. (1976). *Hydrology of glaciers*. L.: Gidrometeoizdat Publ., 248 s.

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., Richardson, S. (2004). An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 41 (6),

1068-1083.

Keremkulov, V.A., Tsukerman, I.G. (1985). Model of a moraine lake emptying through a grotto. *Selevye potoki*, 9, 59-70. (In Russian)

Kidiaeva, V.M. (2014). Assessment of the potential hazard in case of outburst of mountain lakes. PhD, 239 s. (In Russian)

Konovalov, V.G. (2009). Remote sensing monitoring of the outburst hazardous lakes in pamir. *Earth's Cryosphere*, 13 (4), 80-89. (In Russian)

Konovalov, V.G., Rudakov, V.A. (2016). Remote assessment of reserve capacity of outburst alpine lakes. *Ice and Snow*, 56 (2), 235-245. (In Russian)  
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-235-245>

*Manual for hydrometeorological stations and posts. Issue 7. Part 1. Hydrometeorological observations on lakes and reservoirs (3rd edition, revised and supplemented).* (1973). 261 p.

Mochalov, V.P., Tsukerman, I.G. (1982). Methods for calculating flood hydrographs due to the outburst of mountain lakes. *Selevye potoki*, 6, 34 - 50. (In Russian)

Moskalenko, I.G., Seliverstov, Yu.P., Chistyakov, K.V. (1993). *Mongun-Taiga mountain massif (Inner Asia). An experiment of ecologic-geographical characteristic.* Saint Petersburg: Russian Geographical Society Publ., 94 p. (In Russian).

Nurkadilov, Z.K., Khagai, A.Iu., 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: *Mezhdunarodnaia konferentsiia «Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita», materialy mezhdunarodnoi konferentsii.* Piatigorsk: Institut "Sevkavgiprovodkhoz" 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., Boronina, A.S. (2019). Software for processing data of tacheometric survey. In: *Geodeziia, kartografiia, geoinformatika i kadastry. Nauka i obrazovanie (06-08 noiabria 2019 g.), materialy III Vserossiiskoi nauch.- prakt. konferentsii.* Saint Petersburg: RGPU im. A. I. Gertsena Publ., 258–263. (In Russian)

Pryakhina, G.V., Boronina, A.S., Popov, S.V., Rasputina, V.A., 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. (In Russian). doi: 10.31857/S0869-6071151251-63

Reviakin, V.S., Mukhametov, R.M. (1986). Dynamics of glaciers of the Altai-Sayan mountain system for 150 years. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniy*, 57, 95–99.

Seliverstov, Yu.P. (1972). Contemporary glaciation of Mongun-Taiga (southwestern Tuva). *Izv. VGO*, 104 (1), 40–44. (In Russian)

Semakova E.R., 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. (In Russian) <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-2-185-199>

Simonov, Yu.G. (1997). Scores in applied geographical research and ways to improve them. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya. 5, Geografiya*, 4, 7-10.

Reynolds, J.M. (2003). *Development of glacial hazard and risk minimization protocol in rural environment*. Reynolds Geo-Sciences LTD, UK, 69 p.

Richardson, S.D., Reynolds, J.M. (2000). An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, 65/66, 31-47.

Vinogradov, Yu.B. (1976). Method for calculating flood hydrograph in case of a glacier-dammed lake outburst. *Selevye potoki*, 1, 138- 153. (In Russian)

Vinogradov, Yu.B. (1977). *Glacial outburst floods and mudflows*. L.: Gidrometizdat Publ., 153 s. (In Russian)