

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 556.5

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОРЫВООПАСНОСТИ МОРЕННЫХ ОЗЕР ГОРНОГО АЛТАЯ

© 2026 г. В. А. Распутина^{1, *}, Г. В. Пряхина¹, В. В. Дмитриев¹, Д. А. Ганюшкин¹

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

*e-mail: lerasputina88@gmail.com

Поступила в редакцию 16.07.2025 г.

После доработки 24.05.2026 г.

Принята к публикации 29.05.2026 г.

Одной из задач, связанных с мониторингом приледниковых и моренных водоемов, является оценка их прорывоопасности. Для точного определения ряда показателей, которые используются при оценках прорывоопасности (например, объем водной массы водоема, высота низшей точки плотины над урезом, амплитуда колебания уровня воды и т.д.), не всегда хватает разрешения цифровых моделей рельефа, и требуются специальные полевые наблюдения. В статье предложен подход к интегральной оценке прорывоопасности озер с использованием метода построения композитных индексов на основе территориальных детерминант. Преимуществом разработанной интегральной оценки является то, что она включает в себя критерии, которые можно оценить дистанционно, а также учитывает метеорологические характеристики, которые значительно влияют на прорывоопасность. Использование агрегированной системы индексов предпочтения, разработанной на базе АСПИД-методологии дало возможность показать учет *ннн*-информации (нечисловой, неточной, неполной) для задания весовых коэффициентов и нахождения интегральных показателей с оценкой точности их расчета. Включение в перечень критериев метеорологических характеристик (сумма положительных температур воздуха и коэффициент увлажнения территории на границе питания) позволяют оценить влияние метеорологической ситуации каждого года на прорывоопасность. Для апробации предложенной интегральной оценки выбраны озера, для которых по материалам полевых исследований авторов ранее была установлена степень прорывоопасности методом экспертной оценки. Проведенный сравнительный анализ степени прорывоопасности водоемов, полученной с использованием разработанного подхода, показал хорошую сходимость с результатами экспертной оценки прорывоопасности, выполненной по данным полевых исследований.

Ключевые слова: моренные озера, приледниковые озера, прорывы озер, прорывоопасность, Алтай, методика оценки прорывоопасности

DOI: 10.7868/S2658697526040070

ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач, связанных с мониторингом приледниковых и моренных водоемов, является оценка прорывоопасности. Согласно (Пряхина и др., 2022), понятие “прорывоопасность” отнесено к интегративным свойствам природных систем, характеризующим степень опасного для окружающей среды и общества сочетания условий, обстоятельств и факторов, вызывающих прорывные явления. Так как критерии прорывоопасности изменяются во времени, прорывоопасность озера изменяется от года к году, а в некоторых случаях (экстремальные жара и осадки,

блокировка каналов стока) изменяется в течение короткого периода времени (часы, дни).

Важным вопросом является типизация водоемов по степени прорывоопасности, что подтверждается широким распространением исследований, посвященным оценке прорывоопасности озер (Висхаджиева, Черноморец, 2015; Ерохин, Загинаев, 2020; Кидяева, 2014; Huggel et al., 2004; Richardson and Reynolds, 2000; Wang et al., 2008). В большинстве работ ранжирование озер по степени вероятности прорыва осуществляется по таким критериям, как сток через плотину, тип подпруживающей

моренной перемычки, каскадность, наличие ледопадов, тип стока через моренную плотину, объем озера, высота низшей точки плотины над урезом воды, амплитуда колебания уровня воды в водоеме и др. (Висхаджиева, Черноморец, 2015; Ерохин, Загинаев, 2020; Петраков, 2008; Торгоев и др., 2013; Richardson and Reynolds, 2000). Для оценки прорывоопасности большого количества озер применяются данные дистанционного зондирования Земли (Agarwal et al., 2016; Rounce et al., 2016). Однако для точного определения ряда критериев (объем водной массы водоема, высота низшей точки плотины над урезом, амплитуда колебания уровня воды и т.д.) не всегда хватает разрешения цифровых моделей рельефа и требуются специальные полевые наблюдения. Использование в этом случае расчетных формул, например, зависимости объема от площади озера (Коновалов и др., 2009) вносит большую погрешность в результат. Так, сравнение рассчитанного объема водоема с результатами, полученными по батиметрической съемке, показало расхождение величин до 216% (Распутина и др., 2021).

Анализ современных научных исследований показал, что много оценок прорывоопасности выполнено для гор Кавказа (Кидяева, 2014), Тянь-Шаня (Благовещенский и др., 2015; Капица и др., 2018; Торгоев и др., 2013), Памира (Наврузшоев, Фазылов, 2022), горных районов Узбекистана (Petrov et al., 2017), Гималаев (Richardson and Reynolds, 2000), Кордильер и Анд (Свирепов и др., 2020). Что касается озер Алтая, расположенных на современных моренах и моренах малого ледникового периода, то они слабо исследованы с точки зрения их прорывоопасности по сравнению с озерами других горных стран. Для территории Горного Алтая практически отсутствуют исследования, посвященные ранжированию моренных озер по степени прорывоопасности. В этой связи цель настоящей работы заключается в оценке прорывоопасности моренных и приледниковых водоемов двух горных массивов Алтая с использованием предложенного интегрального подхода к оценке прорывоопасности, основанного на использовании спутниковой информации и метеорологических данных и учете таких показателей, определение которых возможно без существенных погрешностей. Так как проверку оценок прорывоопасности следует проводить на основе данных полевых исследований озер и экспертных оценок прорывоопасности, то для апробации предложенной интегральной оценки авторы используют данные собственных полевых исследований, выполненных на приледниковых озерах Алтая.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предлагаемый подход представляет собой интегральную оценку степени прорывоопасности озер на основе APIS-методологии (Aggregated Preference Indices System) — агрегированной системы индексов предпочтения, разработанной на базе методологии АСПИД (Анализ и Синтез Показателей при Информационном Дефиците) (Хованов, 2004; Novanov et al., 2009). Такой подход использовался авторами ранее при оценке прорывоопасности озер антарктического оазиса Холмы Ларсеманн (Пряхина и др., 2022).

На первом этапе были выбраны критерии прорывоопасности: 1) тип плотины, 2) тип стока, 3) изменение площади озера за 10 лет, 4) отношение площади оледенения на водосборе к площади озера, 5) сумма положительных температур на границе питания ледника за исследуемый период, 6) коэффициент увлажнения территории на границе питания ледника.

Первые два критерия чаще всего используют при оценке прорывоопасности (Висхаджиева, Черноморец, 2015; Петраков, 2008; Пряхина и др., 2022; Richardson and Reynolds, 2000). Материал, из которого сложены плотины, в наибольшей степени влияет на их устойчивость. Так, например, каровые озера, подпруженные коренными породами, относятся к самым стабильным. Водоемы, подпруженные мореным материалом, не имеющим ни слоистости, ни сортировки (крупные глыбы перемешаны с ледниковыми отложениями разных форм и размеров) являются нестабильными и, соответственно, более прорывоопасными (Ивановский, 1981; Петраков, 2008). Таяние ядер погребенного льда, содержащихся в молодых моренах, также снижает устойчивость подпрудной плотины. Самыми нестабильными являются ледяные плотины, так как в результате таяния в них могут сформироваться каналы, по которым будет происходить сброс озерных вод. Кроме того, высока вероятность всплытия ледовой дамбы (Усупаев и др., 2015). Устойчивость подпрудной плотины также зависит от того, имеет ли водоем сток через постоянное выработанное русло, или в случае большого притока воды будет формироваться перелив воды через гребень дамбы. В первом случае дополнительный объем воды, поступивший в озеро в результате повышенного притока, вызванного интенсивным таянием ледника или прорывом выше расположенного озера, практически не будет задерживаться в озере и стечет через водоток. Во втором — вероятность прорыва в результате размыва подпрудной плотины весьма высока. Также риск прорыва возникает при усиленной фильтрации воды через

тело моренной перемычки. За счет увеличения напора воды и, как следствие, роста скорости фильтрации и эрозии начинается формирование фильтрационного канала — наиболее распространенного триггерного механизма прорывов озер. Третий критерий (“изменение площади озера за 10 лет”), в отличие от наиболее часто используемого при оценках прорывоопасности “объема озера”, легко определяется по данным дистанционного зондирования Земли, также косвенно указывает на степень прорывоопасности (Виноградова и др., 2017). Критерий “отношение площади оледенения на водосборе к площади озера” был выбран, так как от него зависит объем притока воды к водоему и, соответственно, изменение площади и объема последнего. Критерии “сумма положительных температур за исследуемый период на границе питания ледника” и “коэффициент увлажнения территории на границе питания за исследуемый период” отражают метеорологические условия и условия увлажнения исследуемой территории на границе питания ледников, в пределах которой расположены объекты исследования. Экстремальные значения температуры и разное увлажнение могут привести к повышенному притоку воды к озеру, создав таким образом условия для обводнения и размыва моренной перемычки.

Данные по выбранным метеорологическим характеристикам могут быть получены или на ближайшей к объекту исследования метеостанции, или с учетом экстраполяции через региональный температурный градиент к высоте, на которой расположено исследуемое озеро, или с использованием реанализа. Для выполненной интегральной оценки использовались метеорологические характеристики, которые были получены с использованием данных метеостанций и реанализа ERA5 и ERA5-Land (Open-Meteo.com)¹. Коэффициент увлажнения рассчитывался по формуле Н.Н. Иванова (Иванов, 1959; Черноусенко, Хитров, 2019).

На следующем этапе были введены три класса опасности прорыва: первый класс имеет низкую опасность прорыва, второй класс — среднюю, третий — высокую (табл. 1). Градация прорывоопасности является не абсолютной, а относительной, она показывает, какой водоем будет менее или более прорывоопасен относительно других озер при заданных критериях.

Далее были выбраны нормирующие функции: для учета неубывающей (линейной или нелинейной) связи между критерием и оцени-

ваемым свойством используется уравнение (1), а для невозрастающей (линейной или нелинейной) связи между критерием и оцениваемым свойством — уравнение (2). При этом важно, что каждая функция дает также возможность нормировать исходные значения параметров при $x_i \leq \min_i$ и $x_i \geq \max_i$. Поэтому в качестве $\min_i$ и $\max_i$ при формировании шкал рекомендовано задавать не экстремальные значения $\min$ и $\max$, а типичные для региона и масштаба объектов значения.

$$q_i = q_i(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_i \leq \min_i \\ \left(\frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right)^\lambda, & \text{при } \min_i < x_i < \max_i \\ 1, & \text{при } x_i \geq \max_i \end{cases} \quad (1)$$

$$q_i = q_i(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } x_i \leq \min_i \\ \left(\frac{\max_i - x_i}{\max_i - \min_i} \right)^\lambda, & \text{при } \min_i < x_i < \max_i \\ 0, & \text{при } x_i \geq \max_i \end{cases} \quad (2)$$

В формулах (1) и (2): q_i — преобразованное (нормированное) значение критерия; x_i — текущее значение параметра; $\min_i$ — минимальное (фоновое, допустимое, безопасное, предельно-допустимое и т.п.) значение критерия; $\max_i$ — максимальное значение критерия; λ — показатель степени, отражающий возможную нелинейность связи параметров с оцениваемым качеством. Исследователь должен дополнительно выбрать показатель степени λ , определяющий характер и степень выпуклости нормирующей функции $q_i(x_i)$: при $\lambda > 1$ соответствующая нормирующая функция выпукла вниз, а при $\lambda < 1$ — вверх. В нашем случае полагалось, что $\lambda = 1.0$ (линейное приближение функций 1 и 2). Диапазон изменения q_i всегда находится в пределах от 0.0 до 1.0.

На следующем этапе с помощью функций (1) и (2) выполняется нормирование выбранных критериев по всем шкалам прорывоопасности. Значение $q_i = 0$ свидетельствует о низкой степени прорывоопасности озера, а $q_i = 1$ — об очень высокой степени прорывоопасности. Таким образом, исходные критерии прорывоопасности в различных шкалах измерения приводятся к единой безразмерной шкале. После этого над их значениями можно производить математические действия с целью получения интегрального показателя состояния системы (оценки ее прорывоопасности).

¹ Historical Weather API / Open-Meteo.com. <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5-Land%3A+data+documentation> (дата обращения 14.07.2025).

Далее выбирается вид интегрального показателя прорывоопасности $Q(q, p)$. Он зависит не только от нормированных критериев q_i , но и от их значимости, определяемой весовыми коэффициентами p_i , сумма которых должна равняться 1:

$$Q(q_1 \dots q_6; p_1 \dots p_6) = \sum_{i=1}^6 q_i p_i. \quad (3)$$

Следующим этапом является обоснование и выбор весовых коэффициентов p_i . Для задания p_i будем использовать правило:

$$0.0 \leq p_i \leq 1.0 \text{ и } \sum_{i=1}^6 p_i = 1. \quad (4)$$

Основные способы учета веса отдельных критериев в данной работе: 1 — вес всех критериев принимается равным; 2 — вес наиболее важных критериев увеличивается, а вес второстепенных, наоборот, уменьшается; 3 — моделирование весовых множителей с учетом *ннн*-информации (нечисловой, неточной, неполной) о приоритетах оценивания. В данной оценке прорывоопасности используется все три примера возможного учета веса выбранных критериев. В первом случае вес задается одинаковым и определяется формулой $p_i = 1/n$, где n — количество выбранных критериев. Для данного варианта оценки прорывоопасности принято $p_i = 1/6 = 0.167$.

Во втором случае, на основе экспертной оценки, критерии с 1-го по 3-й имеют равный и наибольший вес, так как они в большей степени влияют непосредственно на устойчивость моренной переемычки. Вес этих критериев был задан равным 0.18. Для 4-го критерия вес задавался равным 0.16, а для критериев 5 и 6 вес составил 0.15.

В третьем примере приведен учет нечисловой (порядковой, ординальной) информации при задании весов в виде: $p_1 = p_2 = p_3 > p_4 > p_5 = p_6$. Здесь же иллюстрируется возможность учета неточной (интервальной) информации с помощью задания ограничений по точности при выборе учитываемых вариантов весов ($0.000 \leq p_i \leq 1.000$; сумма весов в каждой комбинации равна 1.000; шаг отсчета веса равен 0.005; в перечень весов включены только результаты с кратностью 0.005 для всех p_i ; ограничение для максимальных значений $p_1 = p_2 = p_3 \leq 0.325$; ограничение для минимальных $p_1 = p_2 = p_3 \geq 0.175$; ограничение для веса малых приоритетов $p_5 \geq 0.005, p_6 \geq 0.005$). Отметим также возможность учета неполной информации о весах, включив в табл. 1 только часть комбинаций. При этом последующие расчеты средних значений и среднеквадратичного отклонения (СКО) будут выполнены только

для строк, которые учтены авторами с учетом ограничений. Это может быть вызвано большим количеством учитываемых комбинаций и повышением требований к точности расчетов. Например, снижение шага отсчета с 0.005 до 0.001 повлечет за собой увеличение количества комбинаций с нескольких десятков до нескольких сотен.

Для определения веса учитываемых характеристик на основе заданных приоритетов и (4), переберем все числа от 0 до 1 с выбранным шагом отсчета и введенными ограничениями.

Выберем на интервале от 0.000 до 1.000 все комбинации весов в соответствии с введенными в варианте 3 ограничениями и запишем их построчно в таблицу (см. табл. 1), в которой каждой строке соответствует своя комбинация весов. После этого рассчитаем среднее значение веса для всех p_i , средние значения СКО для весов. Эта информация будет полезна при сравнении результатов расчета интегральных показателей при разных приоритетах оценивания. Отметим, что такое сравнение следует выполнять не на основе полученных интегральных показателей, рассчитанных при разных приоритетах, а по попаданию в левую или правую границы классов или в середину класса. Это обусловлено необходимостью пересчета оценочной шкалы интегрального показателя при изменении приоритетов.

При заданных ограничениях в табл. 1 вошли 35 комбинаций (вариантов строк) весов. Получим, с округлением до 0.01: $p_1 = p_2 = p_3 = 0.24$; $p_4 = 0.16$; $p_5 = p_6 = 0.06$. Отметим, что при постепенном снятии жестких ограничений, введенных нами в варианте 3, результаты моделирования весов будут приближаться к значениям $p_1 = p_2 = p_3 = 0.25$; $p_4 = 0.15$; $p_5 = p_6 = 0.05$. В целом, на результат будут влиять шаг отсчета весов и нечисловая информация о приоритетах задания весов.

Нетрудно заметить, что разница между p_i во всех трех вариантах невелика и составляет 1.6% для первых трех весовых множителей, 4.1% — для четвертого и примерно 20% — для p_5 и p_6 . Также отметим невысокие значения σ_{p_i} в последнем варианте их задания при разных ограничениях для формирования табл. 1 (первые %). СКО, рассчитанное для всех p_i из варианта с 35 комбинациями, составило с округлением до 0.001 для $\sigma_{p_1} = \sigma_{p_2} = \sigma_{p_3} = 0.047$; $p_4 = 0.060$; $p_5 = p_6 = 0.056$. Важность оценки СКО обусловлена выявлением пределов изменчивости веса отобранных характеристик для будущего планирования учета приоритетов и построения оценочных шкал. Для оценки относительного разброса весовых множителей рассчитаем ко-

Таблица 1. Моделирование веса в соответствии с заданными приоритетами для числового эксперимента на примере оз. Барсово (фрагмент)

№ п/п	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
1	0.175	0.175	0.175	0.165	0.155	0.155
2	0.180	0.180	0.180	0.160	0.150	0.150
3	0.180	0.180	0.180	0.170	0.145	0.145
4	0.185	0.185	0.185	0.175	0.135	0.135
5	0.190	0.190	0.190	0.180	0.125	0.125
6	0.195	0.195	0.195	0.185	0.115	0.115
7	0.200	0.200	0.200	0.190	0.105	0.105
8	0.200	0.200	0.200	0.180	0.110	0.110
9	0.200	0.200	0.200	0.170	0.115	0.115
10	0.200	0.200	0.200	0.160	0.120	0.120
...	...	...	...	...	...	...
25	0.270	0.270	0.270	0.180	0.005	0.005
26	0.280	0.280	0.280	0.150	0.005	0.005
27	0.285	0.285	0.285	0.135	0.005	0.005
28	0.290	0.290	0.290	0.120	0.005	0.005
29	0.295	0.295	0.295	0.105	0.005	0.005
30	0.300	0.300	0.300	0.090	0.005	0.005
31	0.305	0.305	0.305	0.075	0.005	0.005
32	0.310	0.310	0.310	0.060	0.005	0.005
33	0.315	0.315	0.315	0.045	0.005	0.005
34	0.320	0.320	0.320	0.030	0.005	0.005
35	0.325	0.325	0.325	0.015	0.005	0.005
Среднее	0.24	0.24	0.24	0.16	0.06	0.06
СКО	0.047	0.047	0.047	0.060	0.056	0.056

Примечание: $p_1, p_2, \dots, p_6$ – критерии прорывоопасности (см. в тексте).

эффиценты вариации $V_i = (\sigma_i/p_i \times 100\%)$ для каждого из 6 учитываемых факторов: 1. Для $p_1 = p_2 = p_3$: $V_1 = (0.047/0.24) \times 100\% \approx 19.6\%$; 4. Для p_4 : $V_4 = (0.060/0.16) \times 100\% = 37.5\%$; 5. Для $p_5 = p_6$: $V_5 = 0.56/0.06 \times 100\% \approx 93.3\%$. Коэффициент вариации 19.6% указывает на умеренный разброс данных вокруг среднего. Эти три фактора вносят сопоставимый вклад в интегральную оценку и характеризуются относительно высокой надежностью оценок. Коэффициент вариации для p_4 37.5% свидетельствует о существенной нестабильности оценок данного фактора — разброс данных заметно выше, чем у первых трех факторов. Весовой множитель p_4 менее надежен для использования

в интегральной оценке. Коэффициент вариации 93.3%, говорит о крайне высокой степени разброса данных для p_5 и p_6 . Оценки этих факторов крайне ненадежны: фактическое значение может сильно отклоняться от среднего. Три фактора (p_1-p_3) имеют высокий и сопоставимый вес (0.24 каждый), их суммарный вклад составляет 72%. Эти факторы вносят сопоставимый вклад в интегральную оценку и характеризуются относительно высокой надежностью оценок. Четвертый фактор (p_4) вносит 16%, а два последних (p_5, p_6) — по 6% каждый. Однако надежность вклада факторов не пропорциональна их весу: наиболее стабильны факторы с высоким весом, а наименее стабильны — с низким. Вклад этих

факторов в интегральную оценку может быть искажен из-за высокой вариативности. Она может вносить неопределенность в итоговую оценку, несмотря на их малый вес. Отметим, что на полученные результаты повлияли жесткие условия выбора комбинаций с точностью шага отсчета 0.005. Именно в области малых значений весов выявлена сильная вариативность факторов. По-видимому, необходимо снижать этот параметр, например до величины 0.001. Расчеты показали, что это изменяет V_i факторов 5 и 6 до значений около 30%, при этом вариативность первых параметров снижается всего на 1–2%.

Следующим шагом во всех вариантах будет расчет интегральных показателей в соответствии со спецификой варианта (на примере оз. Барсово). Для этого сформируем таблицу вида табл. 1, в которой для всех строк будут рассчитываться значения $Q(q,p) = q_1 \times p_1 + q_2 \times p_2 + q_3 \times p_3 + q_4 \times p_4 + q_5 \times p_5 + q_6 \times p_6$ на основе предварительно рассчитанных значений q_i .

Шкалы для первых двух критериев (тип плотины и тип стока) прорывоопасности задавались равномерными. Отметим, что эти два критерия качественные, и для них задаются интервалы баллов для каждого класса прорывоопасности. Введение балльных интервалов для этих критериев в каждом классе прорывоопасности объясняется особенностью строения морен. Так, морена может содержать в себе погребенный лед, в этом случае устойчивость плотины будет ниже, соответственно, количество баллов — выше. Для критерия “тип стока” характерна такая же ситуация: например, из озера наблюдается постоянный сток через выработанное русло, однако наряду с этим может происходить отток озерных вод по фильтрационным каналам, что увеличивает количество баллов и, соответственно, увеличивает прорывоопасность. Шкала интенсивности изменения площади зеркала озера и шкала для площади оледенения на водосборе, используемые в интегральной оценке прорывоопасности, были основаны на данных, полученных для групп озер, расположенных на территории Алтая, которые находятся на разных стадиях развития: трансгрессивной стадии (увеличение размеров водоема), регрессивной (сокращение размеров озера ввиду потери связи с ледником или прорыв озера) и квазистабильной стадии. Для этих водоемов выполнялись полевые гидрологические наблюдения и оценивалось изменение площадей с использованием данных дистанционного зондирования Земли.

Для апробации предложенной методики были выбраны озера, для которых по материалам полевых исследований авторов ранее была установлена степень прорывоопасности методом экспертной оценки.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В силу того, что современные приледниковые и моренные озера Алтая слабо изучены, для апробации предложенного интегрального подхода использовались водоемы, для которых имеется достаточная информация для оценки критериев прорывоопасности. Были выбраны 8 водоемов Горного Алтая, для которых имелись данные полевых исследований, выполненных авторами, и которые находятся на разных стадиях развития (трансгрессивной, регрессивной и квазистабильной), в том числе среди выбранных озер есть два водоема, которые уже прорывались/спустились. Исследуемые озера имеют различные размеры, находятся в различных климатических условиях: территория Юго-Восточного Алтая (горные массивы Монгун-Тайга, Таван-Богдо-Ола, Цамбагарав) характеризуется более аридным климатом по сравнению с территорией Центрального Алтая (Южно-Чуйский хребет) (рис. 1, табл. 2). Водосборы озер имеют разную оледененность (от 5 до 90%) и разное отношение площади ледника к площади озера (см. табл. 2). Так, оз. Малое отнесено к категории высокой прорывоопасности (Распутина и др., 2021), так как вода с ледника, к которому примыкает озеро, поступает не только поверхностным, но и подземным путем, при этом водоем увеличивается в размерах.

При обследовании оз. Хойнур было установлено, что отток озерных вод осуществляется путем фильтрации через моренную плотину, в которой могут содержаться ядра погребенного льда, таяние которых может привести к ослаблению подпрудной плотины и ее разрушению (Распутина и др., 2021). Однако с 2016 г. это озеро находится в регрессивной стадии развития и активно уменьшается в размерах — ввиду сокращения связи водоема с ледником, что говорит о низкой его прорывоопасности.

Озеро Верхнее представляет собой водоем, расположенный у ледника № 26, в подпруживающей плотине наблюдается врез, через который осуществляется отток озерных вод. Озеро связано с ледником через ручей, который берет начало с этого ледника и впадает в водоем в юго-западной его части. Колебания уровней воды за период наблюдений были незначительными (Распутина и др., 2021). Оледенение на водосборе озера составляет 5.6%. В настоящее время водоем находится в регрессивной стадии развития (с 2016 г. площадь озера начала уменьшаться), что также указывает на сокращение связи водоема с ледником и свидетельствует о низкой прорывоопасности.

Озеро Лагерное является проточным, его плотина частично подпружена скалой, что говорит

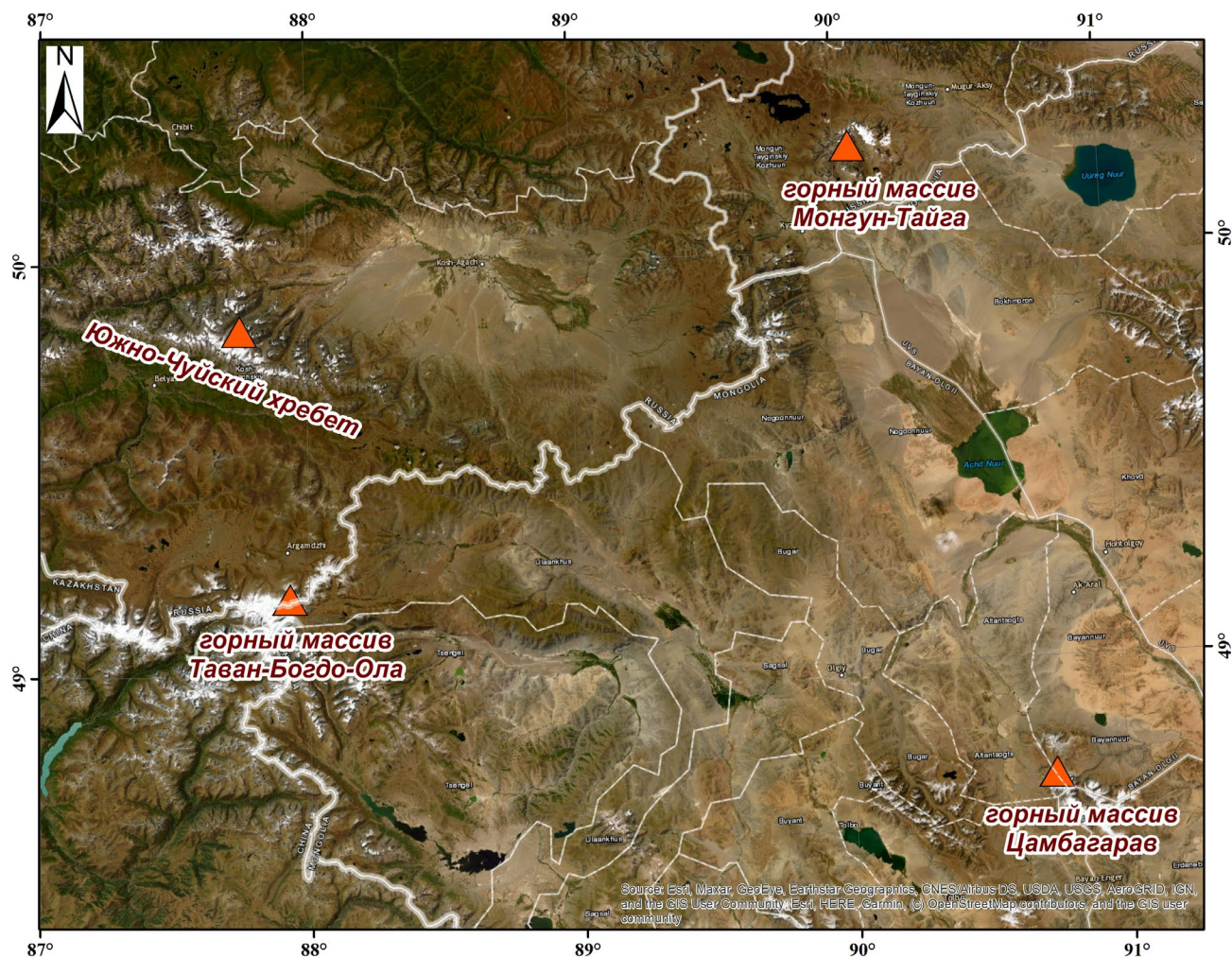


Рис. 1. Схема расположения объектов исследования.

об устойчивости перемычки. Оледенение на водосборе озера составляет около 5.5%, поэтому, ввиду очень слабой связи озера с ледником, водоем практически не изменяется в размерах (Пряхина и др., 2024). Увеличение объема озера может быть вызвано только продолжительными ливневыми осадками, которое приведет к более интенсивному стоку из озера (Распутина и др., 2021).

Озеро Барсово на момент обследования находилось в трансгрессивной стадии развития. Перемычка, подпруживающая оз. Барсово, в северной части относительно пологая и широкая. Сток из озера осуществлялся как поверхностным, так и подземным путем. Помимо этого, в юго-западной части озера было частично подпружено ледником. В статье (Распутина и др., 2022) авторы писали, что дальнейшее отступление ледника приведет к увеличению объема озера и, следовательно, к росту давления воды на подпрудную плотину. В этой ситуации была высока вероятность ослабления и размыва уже существующих фильтрационных каналов и, как следствие, разрушения подпруживающей плоти-

ны, а также формирования прорывного паводка. Это подтвердилось в 2022 г.: с июня по сентябрь произошел спуск оз. Барсово по фильтрационным каналам или по каналам в теле ледника, в результате чего водоем полностью спустился и больше не наполнялся.

Озеро Гачи-Коль находится в трансгрессивной стадии развития и активно увеличивается в размерах. Стоит отметить, что сток воды из озера осуществляется как по фильтрационным каналам, так и путем перелива воды через гребень плотины [когда уровень воды достигает отметки гребня подпрудной плотины (Распутина и др., 2022)]. Поскольку озеро приледниковое, то почти весь водосбор озера покрыт ледником (90%). При интенсивном поступлении притока воды в озеро, переливающаяся через гребень плотины вода может начать разрушать ее, или может произойти увеличение фильтрационного канала. Это приведет к тому, что часть моренной перемычки, которая находится над каналом, может потерять устойчивость и просесть, и вода из озера начнет переливаться через образовав-

Таблица 2. Характеристики объектов исследования

Озеро	Малое	Хойнур	Верхнее	Лагерное	Барсово	Гачи-Коль	Каскад Тамо- женное — Били	Нурган
Горный массив/ хребет	Монгун- Тайга	Монгун- Тайга	Монгун- Тайга	Монгун- Тайга	Таван- Богдо-Ола	Таван- Богдо-Ола	Южно- Чуйский	Цамбагарав
Стадия развития	Транс- грессив- ная	Регрес- сивная	Регрес- сивная	Квазиста- бильная	Трансгрес- сивная — прорыв	Транс- грессив- ная	Квазиста- бильная	Квазиста- бильная — трансгрес- сивная (был прорыв)
Тип водоема	Прилед- никовое	Морен- ное	Морен- ное	Каровое	Приледни- ковое	Прилед- никовое	Моренное	Моренное
Тип пло- тины	Морена	Морена	Морена	Морена/ Скала	Морена/ Лед	Морена	Морена	Морена
Тип стока	Фильтра- ция через плотину	Филь- трация через плотину	Сток по ручью	Сток по ручью	Сток по ручью, фильтра- ция через плотину	Перелив через гребень плотины, фильтра- ция через плотину	Фильтра- ция через плотину	Сток по ру- чью, филь- трация через плотину
Доля оле- денения на водос- боре, %	50	21	5.6	5.5	40	90	25	82
Изме- нение площади зеркала, %/год	Увели- чивается на 17%/ год	Сокра- щается на 4%/ год	Сокра- щается на 2%/ год	Прак- тически не изме- няется в разме- рах	Увели- чивалось на 24%/год, в 2022 г. спустилось	Увели- чивается на 220%/ год	Практиче- ски не из- меняется в размерах	Увели- чивалось на 5.5%/ год — после прорыва сократилась
Отно- шение площади оледе- нения к площади озера	48.4	28.8	5.5	8.5	48.4	24.0	47.5	55.2
Сумма положи- тельных температур на границе питания ледников, °С	381.8	381.8	381.8	381.8	227.1	372.7	510.0	330.7
Кoeffи- циент ув- лажнения территории	237	237	237	237	302	302	438	420

шийся проран. Это свидетельствует о высокой прорывоопасности.

По результатам полевых наблюдений установлено, что моренная перемычка, подпруживающая каскад моренных озер Таможенное — Билли, достаточно высокая и широкая. Также было установлено, что озера в настоящий момент времени находятся в квазистабильном состоянии и практически не изменяются в размерах (Пряхина и др., 2024). В результате притока воды к озерам в случае интенсивного таяния ледника может произойти увеличение объема водной массы озер, и, как следствие, увеличение диаметров фильтрационных каналов, которые находятся внутри моренной перемычки. По ним может произойти спуск озер, но без разрушения плотины, что говорит о средней прорывоопасности.

Озеро Нурган является моренно-подпрудным водоемом, который согласно (Пряхина и др., 2021, 2024) ранее уже прорывался и в настоящее время находится в квазистабильной стадии развития. Отток озерных вод осуществляется по ручью и по фильтрационным каналам. Однако, за последние несколько лет площадь водосбора начала увеличиваться, что свидетельствовало о том, что озеро переходит снова в трансгрессивную стадию развития. Согласно анализу спутниковых снимков Landsat 8–9, а также выполненными авторами полевыми исследованиями, установлено, что в 2023 г. произошло частичное разрушение подпрудной плотины озера в его северо-западной части, где находится поверхностный сток. В результате произошел прорыв озера, и сформировался селевой поток, который размыв долину ручья. Полевыми исследованиями в 2019 г. установлено, что водоем имеет высокую прорывоопасность.

Согласно выбранным критериям исходными данными для интегральной оценки прорывоопасности стали: морфометрические характеристики озер (площадь на момент обследования; изменение площади во времени, полученное с использованием спутниковых снимков Landsat), результаты обследования подпруживающих водоемы плотин, отношение площади оледенения на водосборе к площади озера (определялось с помощью спутниковых снимков). Для оценки влияния метеорологических характеристик на прорывоопасность использовалась информация о суточных температуре воздуха и суммах осадков по ближайшим метеостанциям и данным реанализа ERA5 и ERA5-Land, на основе которых были рассчитаны суммы положительных температур воздуха и коэффициент увлажнения территории (см. табл. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе описанного метода были получены оценочные шкалы и рассчитан интегральный показатель прорывоопасности моренных озер для случая равных и неравных весов критериев (табл. 3).

При расчете интегральной оценки был проведен численный эксперимент расчета интегрального показателя прорывоопасности для оз. Барсово для 35 комбинаций весов. Нормированные значения критериев составили: $q_1 = 1.000$; $q_2 = 0.750$; $q_3 = 1.000$; $q_4 = 0.323$; $q_5 = 0.252$; $q_6 = 0.671$. Было установлено, что интегральный показатель прорывоопасности для выбранного озера изменяется от 0.678 до 0.908, однако остается в пределах одного класса прорывоопасности (класс III высокая, середина класса). Затем было рассчитано среднее значение $Q(q, p)$ и СКО для интегральных показателей. В случае выбора среднего значения весов (см. табл. 1) интегральный показатель прорывоопасности для оз. Барсово с учетом СКО составляет 0.769 ± 0.069 и остается в классе высокой прорывоопасности. Таким образом, в этом случае точность расчета интегральной оценки прорывоопасности составляет 0.069. Коэффициент вариации для интегрального показателя равен 0.0897, или 9%, и указывает на надежность оценки.

Сравнительный анализ результатов оценки прорывоопасности (табл. 4), полученных по балльной методике Д.А. Петракова (2008), по полевым данным и интегральной оценке показал, что для 6 из 8 озер наблюдается совпадение класса прорывоопасности между экспертной оценкой по полевым данным и интегральной оценкой (исключение составили озера Верхнее и Нурган). В частности, оз. Барсово, которое является примером спустившегося озера, по интегральной оценке имеет высокую прорывоопасность, что подтверждает работоспособность предложенного подхода. Озеро Верхнее вошло в категорию низкой прорывоопасности, так как в настоящее время сокращается в размерах и имеет низкую долю оледенения водосбора. Озеро Нурган, согласно интегральной оценке, имеет среднюю прорывоопасность. Такое расхождение можно объяснить тем, что на водосборе озера было обнаружено развитие термокарстовых процессов, которые приводят к разрушению подпрудной плотины озера. В предложенном подходе эти процессы не учитываются, однако в дальнейшем в методику можно включить дополнительные новые критерии.

Результаты балльной оценки в сравнении с экспертной завышают класс прорывоопасности для тех озер, которые в настоящий момент времени находятся на регрессивной и квазиста-

Таблица 3. Классы и оценочные шкалы* для критериев прорывоопасности

Критерий	Классы и оценочные шкалы для критериев прорывоопасности				
	I Низкая	II Средняя	III Высокая	Задание min и max для нормирующих функций	
				min	max
1. Тип плотины	Скала $\frac{0-33}{0-0.33}$	Морена $\frac{33-66}{0.34-0.66}$	Лед $\frac{66-100}{0.67-1}$	0	100
2. Тип стока	Сток через выработанное постоянное русло $\frac{0-33}{0-0.33}$	Сток через дренажную сеть ледника $\frac{33-66}{0.34-0.66}$	Перелив через гребень, фильтрация, piping, нет стока $\frac{66-100}{0.67-1}$	0	100
3. Изменение площади озера во времени, %/год (осредненный за период)	Сокращается или не изменяется во времени. Увеличение на 0–3% $\frac{0-3\%}{0-0.15}$	Увеличение на 3–10% $\frac{3-10\%}{0.15-0.50}$	Увеличение на 10–20% $\frac{10-20\%}{0.50-1}$	0	20
4. Отношение площади оледенения к площади озера	$\frac{0-50}{0-0.33}$	$\frac{50-100}{0.33-0.67}$	$\frac{100-150}{0.67-1}$	0	150
5. Сумма положительных температур на границе питания ледников, °С	$\frac{0-300}{0-0.33}$	$\frac{300-600}{0.33-0.67}$	$\frac{600-900}{0.67-1}$	0	900
6. Коэффициент увлажнения территории	$\frac{0-150}{0-0.33}$	$\frac{150-300}{0.33-0.67}$	$\frac{300-450}{0.67-1}$	0	450
Интегральный показатель прорывоопасности (равные веса критериев)	$\frac{0-0.301}{\Delta = 0.301}$ 0.151	$\frac{0.301-0.640}{\Delta = 0.339}$ 0.471	$\frac{0.640-1}{\Delta = 0.360}$ 0.820		
Интегральный показатель прорывоопасности (неравные веса критериев)	$\frac{0-0.298}{\Delta = 0.298}$ 0.149	$\frac{0.298-0.638}{\Delta = 0.340}$ 0.468	$\frac{0.638-1}{\Delta = 0.362}$ 0.819		
Интегральный показатель прорывоопасности (моделирование весов с учетом неколичественной информации)	$\frac{0-0.287}{\Delta = 0.287}$ 0.144	$\frac{0.287-0.625}{\Delta = 0.338}$ 0.456	$\frac{0.625-1}{\Delta = 0.375}$ 0.813		

Примечания: * в числителе указаны исходные шкалы, в знаменателе — нормированные значения. В шкалах интегральных показателей в числителе указаны границы класса, ниже — Δ — ширина класса, в третьей строке — середина класса.

бильной стадиях развития (Хойнур, Верхнее и Лагерное) и сокращаются или не изменяются в размерах. Интегральная оценка более корректно отражает ситуацию.

В качестве примера для горного массива Монгун-Тайга и Южно-Чуйского хребта с использованием предложенной интегральной методики оценки озера, расположенные на современных

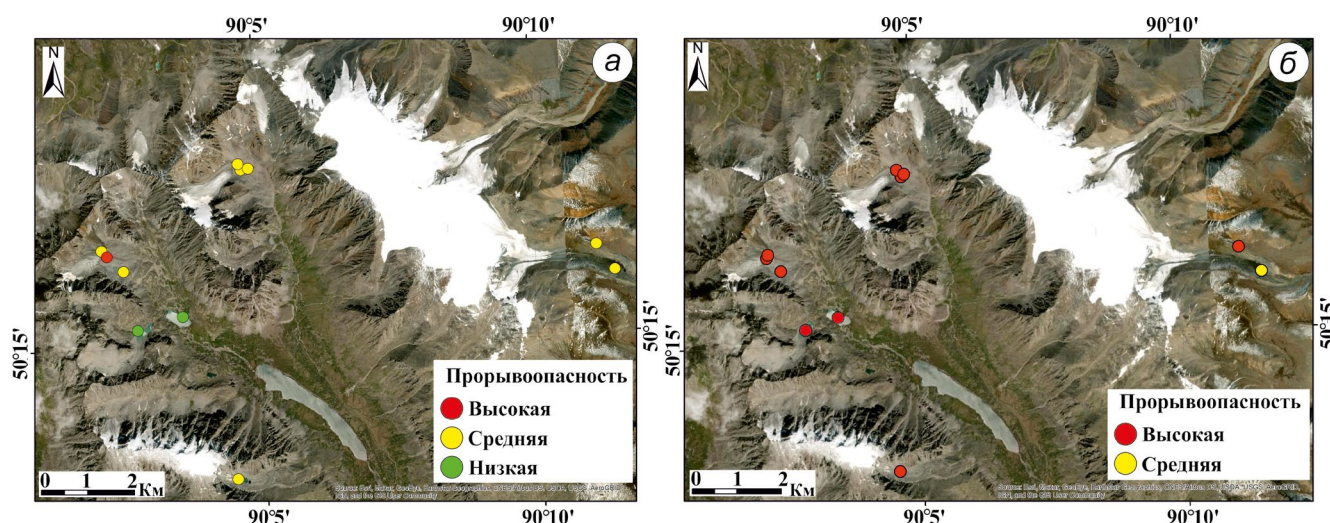
моренах и моренах Малого ледникового периода, были ранжированы по трем классам прорывоопасности, а также составлены картосхемы оценки прорывоопасности (рис. 2а, б рис. 3а, б).

Установлено, что согласно интегральной оценке прорывоопасности на территории горного массива Монгун-Тайга большинство

Таблица 4. Сравнение результатов интегральной оценки прорывоопасности с результатами, полученными с помощью балльной оценки и полевыми данными

Озеро	Степень прорывоопасности, по балльной оценке*	Интегральная оценка (ИПП для равных/неравных весов)	Экспертная оценка
Гачи-Коль (трансгрессивная стадия)	Высокая	Граница высокой и средней прорывоопасности (0.610/0.626)	Высокая
Барсово (произошел прорыв)	Высокая	Высокая (0.667/0.685)	Высокая
Нурган (квазистабильная стадия, переходная в трансгрессивную)	Высокая	Средняя (0.547/0.543)	Высокая
Хойнур (регрессивная стадия)	Высокая	Средняя (0.408/0.407)	Средняя
Верхнее (регрессивная стадия)	Высокая	Низкая (0.273/0.266)	Средняя
Каскад озер Таможенное — Били (квазистабильная стадия)	Средняя	Средняя (0.505/0.492)	Средняя
Малое (трансгрессивная стадия)	Высокая	Высокая (0.640/0.655)	Высокая
Лагерное (квазистабильная стадия)	Высокая	Низкая (0.218/0.206)	Низкая

Примечание: * результаты балльной оценки прорывоопасности для озер Хойнур, Верхнее, Малое и Лагерное приведены в (Распутина и др., 2021).

**Рис. 2.** Картограммы оценки прорывоопасности озер горного массива Монгун-Тайга, полученные по предложенной интегральной оценке (а) и по балльной оценке (б).

озер (8) относятся к категории средней прорывоопасности; два озера — к категории низкой прорывоопасности (озера Лагерное и Верхнее), и одно приледниковое озеро (оз. Малое) имеет высокую прорывоопасность. Согласно балльной оценке прорывоопасности по Д.А. Петракову большая часть озер (10) относятся к высокой прорывоопасности, одно озеро — к категории средней прорывоопасности.

По результатам интегральной оценки озер Южно-Чуйского хребта выявлено, что практически все водоемы относятся к категории средней

прорывоопасности (68 озер). Высокую прорывоопасность имели 4 озера, из которых 2 водоема расположены в долине р. Талдура, на водосборе которой располагается один из крупнейших ледников российского Алтая. Озер, относящихся к категории низкой прорывоопасности, на территории Южно-Чуйского хребта, согласно интегральной оценке, нет. Согласно балльной оценке прорывоопасности большая часть озер имеет среднюю прорывоопасность, а остальные относятся к категории высокой степени прорывоопасности. В категорию средней про-

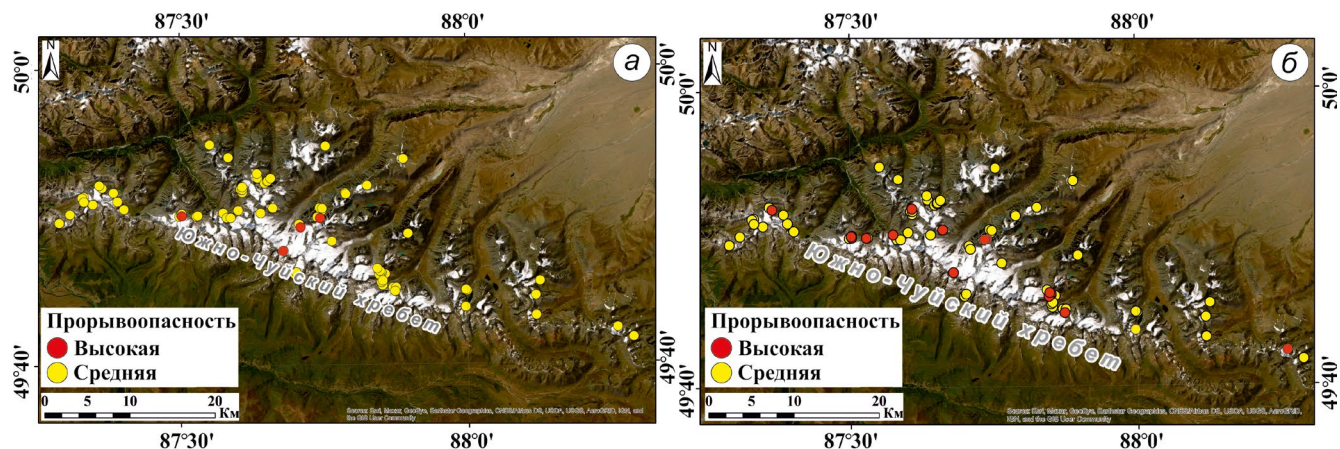


Рис. 3. Картосхемы оценки прорывоопасности озер Южно-Чуйского хребта, полученные по предложенной интегральной оценке (а) и по балльной оценке (б).

рывоопасности в основном входят те моренные и приледниковые озера, которые имеют поверхностный сток и меньший объем (до 100 тыс. м³). Высокую прорывоопасность имеют озера с большим объемом водной массы (больше 100 тыс. м³) и у которых сток осуществляется путем фильтрации через подпруживающую моренную перемычку. Для Южно-Чуйского хребта предложенный авторами интегральный подход и балльная оценка показали схожие результаты (большинство водоемов относится к категории средней прорывоопасности и отсутствуют озера с низкой прорывоопасностью). Однако согласно балльной оценке, водоемов, относящихся к категории высокой прорывоопасности, больше, чем согласно интегральной оценке. По мнению авторов это объясняется тем, что одним из критериев в балльной оценке является объем озера, а так как объем водной массы для неизученных водоемов определить дистанционно невозможно, то он рассчитывался по формуле, приведенной в (Коновалов, 2009), что, вероятно, могло внести погрешности в расчет величины объема.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена оценка прорывоопасности для двух горных массивов (Монгун-Тайга и Южно-Чуйский хребет) Алтая на основе предложенного интегрального подхода к оценке прорывоопасности моренных и приледниковых озер с использованием метода построения композитных индексов на основе территориальных детерминант и на основе балльной оценки. Установлено, что согласно балльной оценке прорывоопасности большая часть озер относится к высокой прорывоопасности, по предложенному интегральному подходу большинство водоемов горного массива Монгун-Тайга имеют среднюю прорывоопасность и только один водоем — высокую прорывоопасность,

два водоема — низкую прорывоопасность. Для Южно-Чуйского хребта расчеты по балльной оценке и интегральному подходу показали, что большинство озер имели категорию средней прорывоопасности и отсутствовали озера с низкой прорывоопасностью. Но согласно балльной оценке, водоемов высокой прорывоопасности больше, чем согласно интегральной оценке. Такое расхождение может быть обусловлено тем, что одним из критериев в балльной оценке является объем озера, который для неизученных водоемов рассчитывался по формуле, что, вероятно, могло внести погрешности в расчет величины объема, и соответственно отразиться на результатах оценки прорывоопасности.

Преимуществом предложенного авторами интегрального подхода является то, что он включает в себя критерии, которые можно оценить дистанционно, а также учитывает метеорологические характеристики, которые значительно влияют на прорывоопасность. Учет *ннн*-информации при задании приоритетов позволил выявить “слабые места” рассмотренных в варианте № 3 приоритетов. Для их преодоления следует: выполнить сценарный анализ (рассчитать интегральную оценку при минимальных, средних и максимальных значениях весов), чтобы оценить диапазон возможного изменения результатов; провести дополнительный анализ факторов 4, 5, 6, чтобы выявить причины высокой вариативности.

Изменение критериев прорывоопасности во времени приводит к тому, что прорывоопасность будет изменяться как от года к году, так и в течение короткого периода времени (часы, дни). В этом случае озера могут перейти как в более низкие классы прорывоопасности, так и в более высокие. Включение в перечень критериев метеорологических характеристик (сумма положительных температур воздуха и коэффициент

увлажнения территории на границе питания) позволяет оценить влияние метеорологической ситуации на прорывоопасность. Сравнительный анализ степени прорывоопасности, полученной по предложенному подходу, показал лучшую сходимость с результатами экспертной оценки, выполненной по данным полевых исследований, в отличие от результатов, полученных с использованием балльной оценки. Это указывает на перспективность предложенного подхода.

Предложенная интегральная оценка прорывоопасности может быть улучшена добавлением в нее дополнительных критериев прорывоопасности (например, учета термокарстовых процессов в теле подпрудной плотины), что позволит более точно определять категорию прорывоопасности озер. Такая оценка может быть использована для анализа водоемов других горных стран. Однако отметим, что шкалы для критериев, отражающих метеорологические условия, следует разрабатывать для конкретной горной страны. В целом предложенный интегральный подход показал свою работоспособность, его можно использовать для адаптации исследуемого района к изменениям климата и связанными с ними опасными гидрологическими явлениями.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Настоящее исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 22-67-00020 “Изменения климата, ледников и ландшафтов Алтая в прошлом, настоящем и будущем как основа модели адаптации населения внутриконтинентальных горных районов Евразии к климатообусловленным изменениям среды”.

FUNDING

This study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 22-67-00020 “Changes in Climate, Glaciers and Landscapes of Altai in the Past, Present and Future as the Basis for a Model of Adaptation of the Population of Inland Mountainous Regions of Eurasia to Climate-Induced Environmental Changes.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Благовещенский В.П., Каница В.В., Касаткин Н.Е.* Оценка опасности прорыва приледниковых озер в Иле Алатау (Казахстан) // Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире (Геориск — 2015), 12–14 мая 2015 г. Матер. 9-й Международ. научно-практич. конф. Т. 1. Научный Совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: РУДН, 2015. С. 120–125.
- Виноградова Т.А., Казаков Н.А., Виноградов А.Ю., Генсиоровский Ю.В., Пряхина Г.В.* Опасные гидрологические явления (краткий конспект лекций). СПб.: Знак, 2017. 128 с.
- Висхаджиева К.С., Черноморец С.С.* Оценка опасности развития катастрофических процессов при прорыве ледниковых озер в горах Центральной Азии // Геоморфологические ресурсы и геоморфологическая безопасность: от теории к практике: всерос. конф. “VII Шукинские чтения”, Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, 18–21 мая 2015 г. Матер. конф. М.: МАКС Пресс, 2015. С. 60–63.
- Ерохин С.А., Загинаев В.В.* Тенденции прорывоопасности в развитии горных озер Киргизстана // Труды 6-й Международ. конф. “Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита”. Т. 1. Душанбе: ООО “Промоушн”, 2020. С. 194–207.
- Иванов Н.Н.* Пояса континентальности земного шара // Изв. ВГО. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1959. Т. 91. Вып. 5. С. 410–423.
- Ивановский Л.Н.* Гляциальная геоморфология гор (на примере Сибири и Дальнего Востока). Новосибирск: Изд-во Наука, 1981. 178 с.
- Капица В., Шахгеданова М., Усманова З., Северский И., Благовещенский В., Касаткин Н., Мишенин В., Ребров Ю., Голенко А.* Ледниковые озера Иле (Зайлийского) Алатау: состояние, современные изменения, вероятные риски // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 5-й Международ. конф. Тбилиси, Грузия, 1–5 октября 2018 г. Тбилиси: Изд-во “Универсал”, 2018. С. 357–366.
- Кидяева В.М.* Оценка потенциальной опасности при прорывах горных озер. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М., 2014. 30 с.
- Коновалов В.Г.* Дистанционный мониторинг прорывоопасных озер на Памире // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 4. С. 80–89.
- Наврузшоев Х.Д., Фазылов А.Р.* Дистанционный мониторинг прорывоопасных ледниковых озер бассейна реки Гунт (Таджикистан) // Наука и инновация. Таджикский национальный университет. Серия геологических и технических наук. 2022. № 1. С. 41–49.
- Петраков Д.А.* Селевая опасность ледниковых озер и оценка вероятности их прорыва // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды междунар. конф., Пятигорск, 22–29 сентября 2008 г. Пятигорск: Ин-т “Севкавгипроводхоз”, 2008. С. 309–312.
- Пряхина Г.В., Кашкевич М.П., Попов С.В., Распутин В.А., Боронина А.С., Ганюшкин Д.А., Агатов А.Р., Непон Р.К.* Формирование и развитие моренного (приледникового) озера Нурган, Северо-Западная Монголия // Криосфера Земли. 2021. Т. 25. № 4. С. 26–35.

- Пряхина Г.В., Дмитриев В.В., Четверова А.А., Осипова Т.Н., Огурцов А.Н., Акилов Е.В. Оценка прорывоопасности озер антарктических оазисов с использованием композитных индексов на основе территориальных детерминант // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2022. Т. 28. № 2. С. 552–566.
- Пряхина Г.В., Распутина В.А., Зеленикина Е.С., Банцев Д.В., Крыжановская А.Э. Особенности гидрологического режима приледниковых моренных озер Алтая // Лёд и Снег. 2024. Т. 64. № 2. С. 202–212.
- Распутина В.А., Ганюшкин Д.А., Банцев Д.В., Пряхина Г.В., Вуглинский В.С., Свиридов С.С., Панин Н.А., Волкова Д.Д., Николаев М.Р., Сыроежко Е.В. Оценка прорывоопасности малоизученных озер массива Монгун-Тайга // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. Науки о Земле. 2021. Т. 66. Вып. 3. С. 487–509.
- Торгоев И.А., Алёшин Ю.Г., Ерохин С.А. Эволюция ледниково-озерного комплекса Петрова (Тянь-Шань) и оценка риска его прорывоопасности // Лёд и Снег. 2013. № 2. С. 137–144.
- Усупов Ш.Э., Молдобеков Б.Д., Усупов Р.А., Шакиров А.Э., Орунбаев С.Ж., Дудашивили А.С., Кальметьева З.А., Коноков Т., Мамбеталиев Э., Шаршебаев А., Серенков А., Жусупова К. Комплексное зондирование ледника Энилчек у озера Мерцбахера в верховье бассейна реки Сары-Джаз Кыргызстана // Научные исследования в Кыргызской Республике. 2015. № 1. С. 51–70.
- Хованов К.Н. Комплекс алгоритмов генерации композиций для построения систем поддержки принятия решений. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. СПб.: Санкт-Петербургский ин-т информатики и автоматизации РАН, 2004. 18 с.
- Черноусенко Г.И., Хитров Н.Б. Изменение климата в зоне распространения засоленных почв криоаридных регионов на юге восточной Сибири // Экосистемы: экология и динамика. 2019. Т. 3. № 3. С. 5–57.
- Aggarwal A., Jain S.K., Lohani A.K., Jain N. Glacial lake outburst flood risk assessment using combined approaches of remote sensing, GIS and dam break modelling // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2016. Vol. 7. № 1. P. 18–37.
- Hovanov N., Hovanov K., Yudaeva M. Multicriteria estimation of probabilities on basis of expert non-numeric, non-exact and non-complete knowledge // European J. of Operational Research. 2009. Vol. 195. № 3. P. 857–863.
- Petrov M.A., Sabitov T.Y., Tomashevskaya I.G., Glazirin G.E., Chernomoretz S.S., Savernyuk E.A., Tutubalina O.V., Petrakov D.A., Sokolov L.S., Dokukin M.D., Mountrakis G., Ruiz-Villanueva V., Stoffel M. Glacial lake inventory and lake outburst potential in Uzbekistan // Science of The Total Environment. 2017. Vol. 592. P. 228–242.
- Richardson S.D., Reynolds J.M. An overview of glacial hazards in the Himalayas // Quat. Int. 2000. Vol. 65–66. P. 31–47.
- Rounce D.R., McKinney D.C., Lala J.M., Byers A.C., Watson C.S. A new remote hazard and risk assessment framework for glacial lakes in the Nepal Himalaya // Hydrology and Earth System Science. 2016. Vol. 20. P. 3455–3475.

Integral Assessment of the Outburst Hazard of Moraine Lakes in the Altai Mountains

V. A. Rasputina^{a,*}, G. V. Pryakhina^a, V. V. Dmitriev^a, and D. A. Ganyushkin^a

^aSt. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*e-mail: lerasputina88@gmail.com

One of the tasks associated with monitoring periglacial and moraine lakes is to assess their outburst hazard. For an accurate determination of a number of criteria that are often used in existing outburst hazard assessments, such as the lake volume, the height of the lowest point of the dam above the water line, the amplitude of water level fluctuations, etc., the resolution of digital elevation models is not always sufficient and special field observations are required. This article proposes a new approach to the integrated assessment of the outburst hazard of lakes using the method of constructing composite indices based on territorial determinants. The advantage of the developed integrated assessment of outburst hazard is that it includes criteria that can be assessed remotely and also takes into account meteorological characteristics that significantly affect outburst hazard. The use of an aggregated system of preference indices, developed on the basis of the ASPID methodology, made it possible to demonstrate the consideration of non-numeric, inaccurate, incomplete information for setting weighting coefficients and finding integral indicators with an assessment of the accuracy of their calculation. The inclusion of meteorological characteristics in the list of criteria (the sum of positive air temperatures and the moisture coefficient of the territory at the feeding boundary) makes it possible to assess the impact of the meteorological situation of each year on the outburst hazard. To test the proposed integrated assessment, lakes were selected for which the degree of outburst hazard was previously established by the expert assessment method based on the authors' field research materials. The comparative analysis of the degree of outburst hazard of lakes obtained using the developed approach showed good convergence with the results of the expert assessment of outburst hazard performed on the data of field studies, which indicates the efficiency of the proposed approach.

Keywords: moraine lakes, periglacial lakes, lake outbursts, outburst hazard, Altai, methodology of outburst hazard

REFERENCES

- Aggarwal A., Jain S.K., Lohani A.K., Jain N. Glacial lake outburst flood risk assessment using combined approaches of remote sensing, GIS and dam break modelling. *Geomat. Nat. Hazards Risk*, 2016, vol. 7, no. 1, pp. 18–37.
- Blagoveshchenskii V.P., Kapitsa V.V., Kasatkin N.E. Assessment of the hazard of glacial lake outbursts in Ile Alatau (Kazakhstan). In *Analiz, prognoz i upravlenie prirodnymi riskami v sovremennom mire (Georisk — 2015), 12–14 maya 2015 g. Materialy 9 Mezhdun. nauchn.-prakt. konf. Tom 1* [Analysis, Forecast and Management of Natural Risks in the Modern World (Georisk — 2015), May 12–14, 2015. Proc. of the 9th Int. Sci. and Pract. Conf. Vol. 1]. Moscow: RUDN, 2015, pp. 120–125. (In Russ.).
- Chernousenko G.I., Khitrov N.B. Climate change in the zone of distribution of salted soils of cryoaride regions in South of East Siberia. *Ekosist. Ekol. Dinam.*, 2019, vol. 3, no. 3, pp. 5–57. (In Russ.).
- Erokhin S.A., Zaginaev V.V. Trends in outburst hazard in the development of mountain lakes in Kargyzstan. In *Trudy 6 Mezhdun. konf. "Selevyte potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita". Tom 1* [Proc. of the 6th Int. Conf. "Mudflows: Disasters, Risk, Forecast, Protection". Vol. 1]. Dushanbe: LLC "Promotion", 2020, pp. 194–207. (In Russ.).
- Hovanov K.N. A set of algorithms for generating compositions for constructing decision support systems. *Abstract of Cand. Sci. (Techn. Sci.) Dissertation*. St. Petersburg: St. Petersburg Institute of Informatics and Automation RAS., 2004. 18 p.
- Hovanov N., Hovanov K., Yudaeva M. Multicriteria estimation of probabilities on basis of expert non-numeric, non-exact and non-complete knowledge. *Eur. J. Oper. Res.*, 2009, vol. 195, no. 3, pp. 857–863.
- Ivanov N.N. Continental belts of the Earth. *Izv. VGO*, 1959, vol. 91, no. 5, pp. 410–423. (In Russ.).
- Ivanovskii L.N. *Glyatsial'naya geomorfologiya gor* [Glacial Geomorphology of Mountains (Case Studies of Siberia and the Far East)]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1981. 178 p.
- Kapitsa V., Shakhgedanova M., Usmanova Z., Sever-skii I., Blagoveshchenskii V., Kasatkin N., Mishenin V., Rebrov YU., Golenko A. Glacial lakes in the Ile (Zailiiskiy) Alatau: current state, observed changes and potential risks. In *Selevyte potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita. Trudy 5 Mezhdun. konf. Tbilisi, Gruzziya, 01–05 oktyabrya 2018 goda*. [Mudflows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proc. of the 5th Int. Conf. Tbilisi, Georgia, October 1–5, 2018]. Tbilisi: Universal Publ., 2018, pp. 357–366. (In Russ.).

- Kidyayeva V.M. Assessment of potential hazards during mountain lake outbursts. *Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow, 2014. 30 p.
- Konovalov V.G. Remote sensing monitoring of the outburst hazardous lakes in Pamir. *Kriosf. Zemli*, 2009, vol. 13, no. 4, pp. 80–89. (In Russ.).
- Navruzshoev H.D., Fazylov A.R. Remote monitoring of breakthrough glacial lakes of the Gunt river basin (Tajikistan). *Sci. Innov. Tajik Nat. Univ., Ser. Geol. Techn. Sci.*, 2022, no. 1, pp. 41–49. (In Russ.).
- Petrakov D.A. Mudflow hazard of glacial lakes and assessment of the probability of their outburst. In *Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita, trudy mezhdunar. konf., Pyatigorsk, 22–29 sentyabrya 2008 g.* [Mudflows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proc. of Int. Conf., Pyatigorsk, September 22–29, 2008]. Pyatigorsk: Institute “Sevkavgiroprovodkhoz”, 2008, pp. 309–312. (In Russ.).
- Petrov M.A., Sabitov T.Y., Tomashevskaya I.G., Glazirin G.E., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A., Tutubalina O.V., Petrakov D.A., Sokolov L.S., Dokukin M.D., Mountrakis G., Ruiz-Villanueva V., Stoffel M. Glacial lake inventory and lake outburst potential in Uzbekistan. *Sci. Total Environ.*, 2017, vol. 592, pp. 228–242.
- Pryakhina G.V., Kashkevich M.P., Popov S.V., Rasputina V.A., Boronina A.S., Ganyushkin D.A., Agatova A.R., Nepop R.K. Formation and evolution of moraine-dammed (periglacial) Lake Nurgan, Northwestern Mongolia. *Kriosf. Zemli*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 26–35. (In Russ.).
- Pryakhina G.V., Dmitriev V.V., Chetverova A.A., Osipova T.N., Ogurtsov A.N., Akilov E.V. Assessment of the explosion hazard of the Antarctic oasis lake using a composite index based on territorial determinants. *InterCarto. InterGIS*, 2022, vol. 28, no. 2, pp. 552–566. (In Russ.).
- Pryakhina G.V., Rasputina V.A., Zelepukina E.S., Bantsev D.V., Kryzhanovskaya A.E. Characteristics of the hydrological regime of the periglacial moraine lakes in the Altai. *Led Sneg*, 2024, vol. 64, no. 2, pp. 202–212. (In Russ.).
- Rasputina V.A., Ganyushkin D.A., Bancev D.V., Pryakhina G.V., Vuglinskij V.S., Svirepov S.S., Panyutin N.A., Volkova D.D., Nikolaev M.R., Syroezhko E.V. Outburst hazard of little-studied lakes assessment at the Mongun-Taiga massif. *Vestn. S.-Peterb. Univ. Nauki Zemle*, 2021, vol. 66, no. 3, pp. 487–509. (In Russ.).
- Richardson S.D., Reynolds J.M. An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quat. Int.*, 2000, vol. 65–66, pp. 31–47.
- Rounce D.R., McKinney D.C., Lala J.M., Byers A.C., Watson C.S. A new remote hazard and risk assessment framework for glacial lakes in the Nepal Himalaya. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2016, vol. 20, pp. 3455–3475.
- Torgoev I.A., Alyoshin YU.G., Erohin S.A. Development of Petrov glacial-lake system (Tien Shan) and outburst risk assessment. *Led Sneg*, 2013, no. 2, pp. 137–144. (In Russ.).
- Usupaev Sh.E., Moldobekov B.D., Usubaliev R.A., Shakirov A.E., Orunbaev S.Zh., Dudashvili A.S., Kal'met'eva Z.A., Konokov T., Mambetaliev E., Sharshebaev A., Serenkov A., Zhushupova K. Integrated sensing of the Inylchek glacier by the Mertzbacher lake in the upper Sary-Djaz river basin In Kyrgyzstan. *Nauch. Issled. Kyrgyz. Resp.*, 2015, no. 1, pp. 51–70. (In Russ.).
- Vinogradova T.A., Kazakov N.A., Vinogradov A.Yu., Gensiorovskii Yu.V., Pryakhina G.V. *Opasnye gidrologicheskie yavleniya (kratkii konspekt lektsii)* [Hazardous Hydrological Phenomena (Brief Lecture Notes)]. St. Petersburg: Znak Publ., 2017. 128 p.
- Viskikhadzhieva K.S., Chernomorets S.S. Assessment of the danger of the development of catastrophic processes during the outburst of glacial lakes in the mountains of Central Asia. In *Geomorfologicheskie resursy i geomorfologicheskaya bezopasnost': ot teorii k praktike: vseross. konf. "VII Skchukinskie chteniya"*, Moskva, MGU imeni M.V. Lomonosova, 18–21 maya 2015 g. [Geomorphological Resources and Geomorphological Safety: From Theory to Practice. All-Russian conf. “7th Shchukin Readings”, Moscow, Lomonosov Moscow State University, May 18–21, 2015]. Moscow: MAKSPress Publ., 2015, pp. 60–63. (In Russ.).