

Г.В. Пряхина¹, В.В. Дмитриев², А.А. Четверова^{3,4}, Т.Н. Осипова⁵, А.Н. Огурцов⁶,
Е.В. Акилов⁷

ОЦЕНКА ПРОРЫВООПАСНОСТИ ОЗЕР АНТАРКТИЧЕСКИХ ОАЗИСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИТНЫХ ИНДЕКСОВ НА ОСНОВЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ДЕТЕРМИНАНТ

АННОТАЦИЯ

Прорывы озер относятся к опасным для человека гидрометеорологическим явлениям. Они происходят в результате разрушения подпруживающей их снежно-ледяной или земляной дамб и наиболее характерны для озер горных и полярных регионов, в том числе широко распространены на водоемах антарктических оазисов. Методы оценки прорывоопасности, которые традиционно используются для озер криолитозоны (методы мониторинга, покомпонентного анализа, балльные оценки и т.д.) часто завышают степень прорывоопасности по сравнению с реальной ситуацией. В статье представлен первый опыт использования метода построения композитных индексов на основе территориальных детерминант для оценки прорывоопасности озер. Прорывоопасность озер с использованием композитного индекса была оценена на примере водоемов, расположенных на территории оазиса Холмы Ларсеманн (п-ов Брокнес, Восточная Антарктида). Материалами исследования послужили данные полевых исследований на водных объектах оазиса, полученные в результате собственных исследований авторов, а также из архивных материалов предыдущих исследований в рамках Российской Антарктической экспедиции (РАЭ) в 2008–2021 гг., объединенные в единую базу данных PAULAS. Проведенные расчеты показали, что результаты в целом согласуются с данными фактических наблюдений. Полученные результаты были визуализированы путем составления карт-схем, где помимо степени прорывоопасности нанесены наиболее уязвимые в отношении прорывов озер участки трасс, соединяющих зимовочные станции с аэродромом. Интервалы изменения большей части рассмотренных критериев определялись экспертным способом из опыта исследователей и их понимания протекания природных процессов. В дальнейшем авторами предполагается уточнение и дополнение списка критериев. Тем не менее, в условиях дефицита данных непосредственных наблюдений за уровнями воды, рассмотренный метод может быть использован для оценки прорывоопасности малоизученных и неизученных водоемов не только антарктических оазисов, но и высокогорных приледниковых озер.

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, ВО 10-я линия, д. 33–35, 199178, Санкт-Петербург, Россия; *e-mail*: g.pryahina@spbu.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, ВО 10-я линия, д. 33–35, 199178, Санкт-Петербург, Россия; *e-mail*: v.dmitriev@spbu.ru

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, ВО 10-я линия, д. 33–35, 199178, Санкт-Петербург, Россия; *e-mail*: a.chetverova@gmail.com

⁴ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга, 38, Санкт-Петербург, 199397, Санкт-Петербург, Россия; *e-mail*: a.chetverova@gmail.com

⁵ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, ВО 10-я линия, д. 33–35, 199178, Санкт-Петербург, Россия; *e-mail*: osipovat@mail.ru

⁶ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле СПбГУ, ВО 10-я линия, д. 33–35, 199178, Санкт-Петербург, Россия; *e-mail*: aogurcov@yandex.ru

⁷ Государственный гидрологический институт, ВО 2-я линия, д. 23, 199178, Санкт-Петербург, Россия; *e-mail*: akilov.evg@yandex.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прорывные озера, ледниковые озера, природные опасности, Антарктида, композитные индексы

Galina V. Pryakhina¹, Vasily V. Dmitriev², Antonina A. Chetverova^{3,4}, Tatiana N. Osipova⁵, Aleksandr N. Ogurtsov⁶, Evgeniy V. Akilov⁷

**ASSESSMENT OF THE EXPLOSION HAZARD
OF THE ANTARCTIC OASIS LAKE USING A COMPOSITE INDEX
BASED ON TERRITORIAL DETERMINANTS**

ABSTRACT

Lake outbursts floods is belonging to the hydrometeorological hazards. They occur as a result of destruction of snow-ice or earth dams and are most typical for lakes of alpine and polar regions. Glacial lakes outbursts floods (GLOF) are widely spread on water bodies of Antarctic oases. Methods for GLOF's hazard assessment include monitoring, component analysis, point-by-point estimates, etc.) often overestimate the degree of the GLOF's hazard compare to the real situation. The article presents the first experience of using the method of constructing composite indices (CI) based on territorial determinants for assessing the GLOF's hazard. The case study of using of CI on water bodies located in the Larsemann Hills Oasis (Brocknes Peninsula, East Antarctica) is presented in the article. The study is based on the in-cito data obtained by the authors and the archival materials of the Russian Antarctic Expedition (RAE) in 2008–2021, collected in the PAULAS database. The calculations of CI show that the results are generally consistent with the in-cito measurements. The results are presented as maps showing the degree of GLOF's hazard and the most vulnerable sections of the routes connecting wintering stations to the airfield. The intervals of changes for most of the considered criteria, used for CI calculation, were determined by expert method, and, therefore, largely depended on the experience of researchers and their understanding of the natural processes. The future studies will be supposed to refine and possibly supplement the list of criteria. Nevertheless, in the conditions of shortage of water level field measurements, the considered method can be used to assess the GLOF's hazard of poorly studied and unstudied water bodies not only of Antarctic oases, but also of high-mountain glacial lakes.

KEYWORDS: GLOF's hazards, lake outbursts, glacial lakes, Antarctica, composite indices

¹ Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, VO 10-line, 33–35, 199178, St. Petersburg, Russia; *e-mail:* g.pryakhina@spbu.ru

² Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, VO 10-line, 33–35, 199178, St. Petersburg, Russia; *e-mail:* v.dmitriev@spbu.ru

³ Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, VO 10-line, 33–35, 199178, St. Petersburg, Russia; *e-mail:* a.chetverova@gmail.com

⁴ Arctic and Antarctic Research Institute, Bering str., 38, 199397, St. Petersburg, Russia; *e-mail:* a.chetverova@gmail.com

⁵ Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, VO 10-line, 33–35, 199178, St. Petersburg, Russia; *e-mail:* osipovat@mail.ru

⁶ Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, VO 10-line, 33–35, 199178, St. Petersburg, Russia; *e-mail:* aogurcov@yandex.ru

⁷ State Hydrological Institute, VO 2-line, 23, 199178, St. Petersburg, Russia; *e-mail:* akilov.evg@yandex.ru

ВВЕДЕНИЕ

Природные опасности – это явления, которые могут представлять собой серьезную угрозу для людей, инфраструктуры, экономики и окружающей природной среды и приводить к бедствиям. Масштабы бедствий, вызванные природными опасностями, часто зависят от человеческой деятельности, результат которой может усугубить или уменьшить как вероятность их наступления, так и нанесенный ими ущерб. Например, правильность принятых решений о строительстве поселений, логистических путей, использовании природных ресурсов, получении необходимой информации о характере и пространственно-временных особенностях природных опасностей и т.д. – могут существенно снизить масштабы бедствий и наносимый ими ущерб.

Характер природных опасностей зависит от причин их возникновения, которые могут иметь геологический, гидрометеорологический, биологический и др. характер. Гидрометеорологические опасности чаще всего связаны с такими явлениями как наводнения, засухи (опустынивания), лавины, ураганы, вызывающие штормовые нагоны и повышение уровня воды на водных объектах, а также прорывы горных и ледниковых озер, приводящие к затоплению близлежащих территорий и прочим, связанным с этим, последствиям. Прорывы озер происходят в результате разрушения подпруживающей ледяной или земляной дамбы. Прорывные явления наиболее характерны для озер горных и полярных регионов, в том числе широко распространены на водоемах антарктических оазисов. Прорывы антарктических озер фиксируются с середины прошлого века в оазисах: Холмы Ларсеманн, Ширмахера, Унтер-Зее, Молодежный, Вечерний, Вестфолль, Бангера и др. [Боронина, 2022]. Особенно опасными являются прорывы озер, расположенных недалеко от полярных станций и объектов их инфраструктуры. Так, например, в результате периодических прорывов озера Прогресс (оазис Холмы Ларсеманн) происходит размыв и затопление участка дороги, соединяющей объекты инфраструктуры российской антарктической станции «Прогресс». Кроме того, прорыв крупного подледникового озера Долк в 2017 г. послужил причиной обрушения ледниковой кровли, в результате чего был разрушен другой участок трассы.

Оценка прорывоопасности таких водоемов проводится для того, чтобы определить способность (или неспособность) природных систем сохранять свои свойства, параметры режимов без нарушения функций жизнеобеспечения человека и негативных воздействий на биоту геосистем. Необходимость развития методов и подходов к оценке прорывоопасности обусловлена, во-первых, потребностью получения системной оценки возникновения прорывных явлений в природе, факторов, их вызывающих, а также условий и обстоятельств их возникновения; во-вторых, необходимостью совершенствования методов диагностики и мониторинга водных систем и объектов.

Для оценки прорывоопасности озер криолитозоны традиционно используются методы мониторинга, покомпонентного анализа, различные балльные оценки, методы ДЗЗ, разноаспектные визуализации на основе ГИС и компьютерного картографирования [Reynolds, 2003; Huggel et al., 2004], которые позволяют выделять опасные объекты и выявлять возможность их прорывоопасности. На различных этапах исследования часто используются методы ДЗЗ, так как с их помощью можно изучить необходимые характеристики труднодоступных объектов [Черноморец и др., 2018]. Как показал опыт авторов, методы балльной оценки применимы на начальных этапах исследования и позволяют на основе прямых и косвенных характеристик рекогносцировочно оценить прорывоопасность озер. Так, например, при сравнении с данными проведенных полевых исследований на озерно-гляциальных комплексах Алтая выяснилось, что предварительные расчеты по одному из таких методов существенно завышали класс прорывоопасности исследованных озер [Пряхина и др., 2021].

Понятие «прорывоопасность» отнесено авторами к эмерджентным (интегративным) свойствам природных и природно-технических систем, характеризующим степень опасности для окружающей среды и общества сочетания условий, обстоятельств, факторов, вызывающих прорывные явления. Такие опасные явления зависят от ряда причин, каждая из которых по-разному (прямо, косвенно, опосредованно и др.) влияет на процесс, но лишь в совокупности эти причины приводят к негативному воздействию на окружающую природную и социальную среды. Сила воздействия факторов меняется во времени и в пространстве в связи с изменением гидрометеорологических условий, что усложняет задачу исследователям при расстановке приоритетов и выявлении роли отдельных причин прорывоопасности. Действия человека на фоне влияния естественных факторов природной среды могут вызвать триггерный эффект в изменении режимов функционирования систем, что еще в большей степени затрудняет изучение прорывоопасности. Оценка сочетания факторов на основе моделирования по типу Л-моделей или М-моделей (или ЛМ-моделей) часто бывает затруднительна. В связи со сказанным, степень такого воздействия предлагается впервые характеризовать с использованием композитных индексов прорывоопасности на основе выделения территориальных детерминант и АСПИД-моделей интегральной оценки прорывоопасности [Дмитриев и др., 2020].

Таким образом, целью данной работы явилась оценка прорывоопасности озер антарктического оазиса Холмы Ларсеман с использованием АСПИД-метода построения композитных индексов на основе территориальных детерминант, отобранных для выполнения интегральной оценки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика оценки прорывоопасности озер с использованием композитного индекса на основе территориальных детерминант

На первом этапе исследования была разработана оценочная классификация прорывоопасности по совокупности отобранных критериев, слабо коррелирующих между собой. Для этого были введены классы от I к V: первый класс является минимально опасным, а пятый класс – максимально опасным для прорыва. В классификации для каждого признака были заданы левая и правая границы для всех классов прорывоопасности. Для 4-х из 7-ми критериев, характеризующих изучаемое свойство, были введены 100-бальные шкалы оценки, для остальных критериев диапазоны оценочных шкал были выбраны с учетом региональных значений характеристик.

За оценочные критерии приняты следующие характеристики: тип плотины, характер стока через плотину, каскадность, частота повторяемости прорывов, инфраструктура поселений в зоне воздействия, сумма активных температур (сумма температур воздуха выше 0 °С) за теплый период (ноябрь – февраль), сумма осадков за теплый период (ноябрь – февраль) и за предшествующий ему холодный период (март – октябрь).

Обоснование выбора критериев (с 1-ого по 5-й) и их включение в данный перечень обусловлено анализом публикаций по соответствующей тематике [Виноградов, 1977; Зимницкий, 2005; Григорьева и др., 2018; Черноморец и др., 2018; Боронина, 2022; Clague et al., 1994] и опытом авторов¹ в исследовании озер антарктических оазисов. Выбор характеристик № 6 и 7 обусловлен необходимостью учесть климатические особенности оазиса, где максимальное количество осадков выпадает в холодный период года. Выпадение и аккумуляция твердых осадков, их таяние в теплый период влияют на изменение уровня

¹ Отчет об исследованиях по лимнологии в Оазисе Бангера в период 32-й сезонной САЭ. Фонды ААНИИ. Л., 1987. 74 с. Отчет о работе станции «Прогресс», 48 РАЭ. Фонды ААНИИ, № О-3553. СПб., 2004. 204 с.

воды в озерах, в то же время сумма осадков за период таяния и за предшествующий ему холодный период могут значительно изменяться от года к году, тем самым увеличивая или уменьшая степень прорывоопасности (рис. 1а).

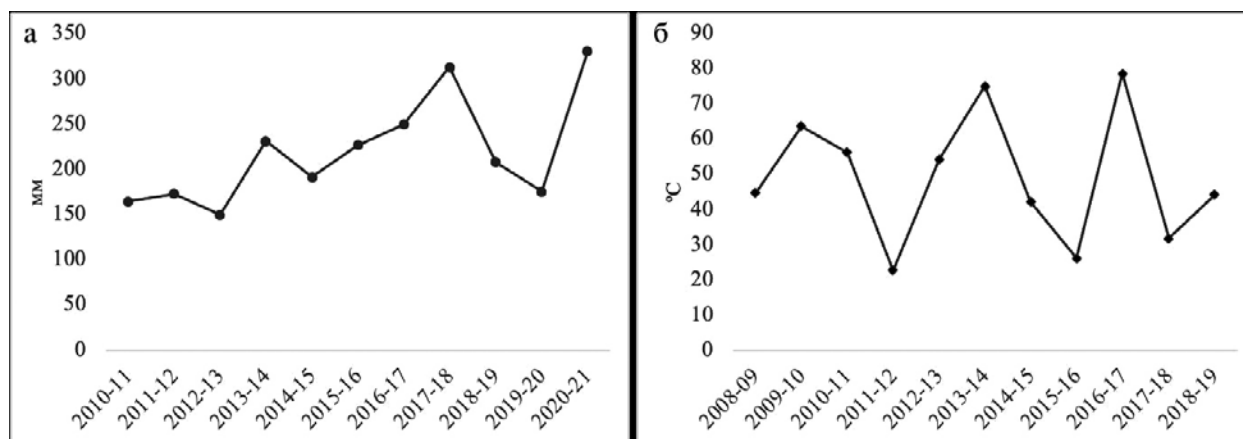


Рис. 1. Межгодовое изменение количества осадков (а) и суммы активных температур (б) на ст. «Прогресс»

Fig. 1. Annual changes in precipitation (a) and the sum of active temperatures (b) at “Progress” polar station

Известно, что ведущими факторами таяния являются температура воздуха и солнечная радиация. Продолжительность периода с положительной температурой воздуха определяет период таяния. На ст. «Прогресс» период таяния изменяется от года к году и характеризуется отсутствием устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С. За весь исследуемый период только в сезон 2016–2017 гг. наблюдались положительные температуры 30 дней подряд, в январе 2014 г. – 17 дней подряд. Суммы активных температур за теплый период имеют ярко выраженный межгодовой ход (рис. 1б) и их значения изменяются от 22,6 °С до 78, 6 °С.

На втором этапе выбраны нормирующие функции для учета неубывающей нелинейной связи между параметром и оцениваемым свойством (1) и невозрастающей нелинейной связи между параметром и оцениваемым свойством (2). При этом важно, что каждая функция дает возможность учета при оценке значений $x_i \leq \min$ и $x_i \geq \max$. Поэтому в качестве \min и \max при формировании шкал нами рекомендовано задавать не экстремальные значения \min и \max , а типичные для региона и масштаба объектов значения.

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

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

В формулах (1) и (2): q_i – преобразованное (нормированное) значение характеристики; 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. В нашем случае полагалось, что $\lambda = 1,0$ (линейное приближение функций 1 и 2, оправданное на первом этапе исследований). Диапазон изменения q_i всегда находится в пределах от 0,0 до 1,0.

На следующем этапе было выполнено нормирование критериев по всем шкалам с учетом вида связи критерия со степенью прорывоопасности (см. табл. 1) при условии, что 0,0 характеризует минимальное значение прорывоопасности, а 1,0 – максимальное.

Затем был выбран вид интегрального показателя (сумма нормированных значений характеристик, взятых со своим весом).

$$\text{ИПП}(q_1, \dots, q_7; w_1, \dots, w_7) = \sum_{i=1}^7 q_i w_i, \quad (3)$$

где q_i – преобразованное (нормированное) значение характеристики, w_i – вес параметра в сводной оценке.

Решение проблемы выбора весов (приоритетов) в оценочных исследованиях является важной частью работы. Чаще всего «вес» вводится без какого-либо четкого обоснования. Применяются следующие способы учета веса отдельных критериев: 1 – вес всех критериев принимается равным; 2 – вес наиболее важных параметров увеличивается или вес второстепенных показателей уменьшается в условное число раз; 3 – вес определяется с помощью мнений экспертов; 4 – вес каждого показателя определяется с помощью дополнительных расчетов. В нашем случае, при равенстве весов исходных параметров, вес определяется простой формулой $w_i = 1/n$, где n – количество критериев.

АСПИД-методология позволяет работать с учетом экспертной (качественной) информации о весах (I): например, ординальная (порядковая) информация OI учитывает, что вес одного параметра больше другого: $OI = \{w_r > w_s, w_u = w_v, \dots, r, s, u, v \in \{1, \dots, m\}\}$; интервальная информация учитывает дополнительно, что вес находится в некотором интервале значений от a до b : $II = \{0 \leq a_i \leq w_i \leq b_i \leq 1, i \in (1, \dots, m)\}$ и т.д. В итоге мы можем учитывать неполную, неточную, нечисловую информацию (т.н. ннн-информация) о всех приоритетах: $I = OI + II$. Далее исследователь организует перебор всех значений от 0,0 до 1,0 с заданной точностью (например, 0,001), для которых учитывается вся информация о весах. После этого все полученные комбинации усредняются для нахождения средних значений w_i , или, что предпочтительнее, рассчитываются значения ИПП при каждой комбинации весов и осредняются сами ИПП. В последнем случае появляется возможность оценить точность расчетов ИП.

Для задания w_i использовалось правило: $0,0 \leq w_i \leq 1,0$ и $\sum_{i=1}^m w_i = 1,0$. В нашем случае рассматривались несколько вариантов задания весов. В статье приведены два варианта: 1-й – равенство весов параметров $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = w_6 = w_7$ ($w_i = 1/7$). Во 2-м варианте равный приоритет отдавался первым четырем параметрам, а вес параметров 5–7 убывал от 4-го к 7-му: $w_1 > w_2 > w_3 > w_4 > w_5 > w_6 > w_7$. В этом варианте $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 0,16$; $w_5 = 0,14$; $w_6 = 0,12$; $w_7 = 0,10$.

Далее выполняется осреднение показателей для левых и правых границ каждого класса по совокупности всех характеристик и, таким образом, получается итоговая оценочная шкала интегрального показателя прорывоопасности ИПП.

Объекты исследования

Прорывоопасность озер с использованием композитного индекса была оценена на примере водоемов, расположенных на территории оазиса Холмы Ларсеманн (п-ов Брокнес, Восточная Антарктида). Материалами исследования послужили данные полевых работ на водных объектах оазиса, полученные в результате собственных исследований авторов, а также из архивных материалов Российской Антарктической экспедиции (РАЭ) в 2018–2020 гг., объединенные в единую базу данных PAULAS¹.

Данные о состоянии исследуемых водоемов включали: рекогносцировочное обследование водосборных территорий и их частей, занятых объектами инфраструктуры, гидроморфометрические параметры, результаты батиметрической съемки озер, результаты наблюдений за характеристиками сезонного режима озер, обследования подпруживающих перемычек. Кроме того, для оценки влияния факторов окружающей среды использовались данные гидрометеорологической станции, расположенной в оазисе, о суточной температуре воздуха за период с 2008 г. по 2019 г. и сумме осадков за период с 2010 г. по 2021 г.

Для исследования и апробации предложенного метода были выбраны пять озер, расположенных в районе Российской Антарктической станции «Прогресс»: оз. Прогресс, оз. Ледяное (рабочее название), оз. Дискашн, LH-73 и оз. Лоу (Сара Тарн). Если для первых четырех озер прорывы фиксировались, то пятое – оз. Лоу (Сара Тарн) – водоем оазиса с заведомо низкой вероятностью прорыва – был выбран для формирования более широкого диапазона оценочных шкал для критериев.

Исследуемые прорывные озера имеют достаточно продолжительные ряды наблюдений, необходимые для анализа, отражают гидрологические особенности региона, а также характеризуются различной периодичностью наступления прорывных явлений. Последние происходят вследствие нарушения целостности снежно-ледовой стенки дамбы, что приводит сначала к фильтрации озерной воды через стенку, а затем к формированию канала стока с резким падением уровня воды в прорывном водоеме.

Озеро Прогресс – одно из самых глубоких и больших по площади озер оазиса, и в период антарктического лета оно не всегда полностью освобождается от ледяного покрова. Водоем также является частью каскада, состоящего из трех озер, соединяющихся между собой временными сезонными водотоками: оз. LH-73, оз. Прогресс, оз. Сибторп (водоемы приведены в последовательности расположения от самого высокого к низкому). Таким образом, прорыв одного из озер каскада является триггерным импульсом для прорыва остальных. Прорывные явления на озере наблюдаются с периодичностью 1 раз в 1–2 года и могут привести к разрушению дороги, соединяющей объекты зимовочной станции с аэродромом.

Озеро LH-73 расположено в восточной части полуострова Брокнес в овальной котловине, в непосредственной близости к озерам Прогресс и Сибторп, примерно на 50–60 м выше уровня оз. Прогресс. Это небольшой водоем, площадью около 30 тыс. м², средней глубиной около 1,6 м (по данным полевых работ 06.02.2020). Водоем был отнесен к категории потенциально прорывоопасных: в южной части котловины присутствует характерное понижение рельефа, перекрытое снежником со стороны озера. Известно, что последний прорыв произошел в марте 2017 г., в течение зимовочного периода 62-й РАЭ, и сопровождался

¹ Акилов Е.В., Четверова А.А., Пряхина Г.В. База данных для полярных и горных прорывных озер: озера антарктических оазисов и Алтая (PAULAS). Свидетельство о регистрации базы данных № 2021622983, 16.12.2021. Заявка № 2021622897 от 07.12.2021.

разрушением снежно-ледовой перемычки, подпруживающей его в южной части, и разгрузкой водных масс через ущелье по направлению к оз. Прогресс. Прохождение прорывного паводка затрагивает участок трассы, что в контексте обеспечения безопасности транспортных операций обуславливает практическую необходимость оценки и прогноза прорывоопасности данного водоема.

Другая система озер, находящаяся на пути к аэродрому, – это система, образованная двумя водоемами, расположенными на леднике – оз. Болдер и оз. Ледяное. Озеро Ледяное получило рабочее название во время сезонных работ 64-й РАЭ. Исходя из проведенных на ней полевых сезонных наблюдений, оба водоема очень редко освобождаются от ледяного покрова. Переполнение оз. Болдер приводит к формированию фильтрационного, а затем и свободного потока в сторону оз. Ледяное, что, в свою очередь, становится причиной прорыва последнего. Прорывные явления на данной системе озер случаются с периодичностью раз в 3–4 года.

В центральной части полуострова Брокнес, у западного берега залива Нелла Фьорд, располагается еще одна система из относительно небольших водоемов – оз. LN59 и оз. Дискашн. Водоемы ежегодно освобождаются от ледяного покрова. При анализе космических снимков, а также во время проведения рекогносцировочного обследования, были обнаружены следы их частых прорывов. Прорыв оз. LN59 осуществляется через тоннель, сформировавшийся в достаточно мощной ледяной стенке. На стенках тоннеля отчетливо прослеживаются метки высоких вод, оставленные при протекании потоков различной мощности. По мнению авторов, прорыв оз. Дискашн может быть спровоцирован как прорывом вышележащего озера LN59, так и происходить без триггера. По данным наблюдений и полевых отчетов, прорывы озера Дискашн происходят ежегодно [Боронина, 2022].

Озеро Лоу (озеро Сара Тарн) – малый бессточный ледниковый водоем, расположенный в каменном основании. Озеро ежегодно освобождается ото льда. Сезонные колебания уровня воды в нем по данным сезонных наблюдений составляют от 8 до 18 см.

Таким образом, выбранные для исследования озера отражают весь диапазон значений характеристик, включенных в оценочную классификацию.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе изложенного в предыдущих разделах подхода были получены оценочные шкалы и рассчитан интегральный показатель прорывоопасности (ИПП) для случаев равных и неравных весов (табл. 1). Анализируя результаты, отметим, что изменение приоритетов, при количестве показателей близких к 10, не сильно повлияло на итоговую оценочную шкалу ИПП. По-видимому, при меньшем количестве параметров этот эффект выражен сильнее, а при большем, – еще слабее. Поэтому задание равновесности параметров (вариант 1) для дальнейших расчетов в нашем случае вполне оправдано.

Табл. 1. Классы и оценочные шкалы для критериев прорывоопасности
 Table 1. Classes and rating scales for criteria of GLOF's hazard

Название критерия	Классы и оценочные шкалы для критериев прорывоопасности						
	I Низкая	II Ниже средней	III Средняя	IV Выше средней	V Высокая	min	max
1. Тип плотины	Скальные породы <u>0–10</u> 0–0,100	Моренная <u>10–30</u> 0,100–0,300	Моренная с ледяными включениями <u>30–60</u> 0,300–0,600	Ледяная <u>60–85</u> 0,600–0,850	Снежно-фирновая <u>85–100</u> 0,850–1,000	0	100
2. Тип стока, балл	Сток через постоянное русло <u>0–10</u> 0–0,100	Сток через дренажную систему <u>10–40</u> 0,100–0,400	Фильтрация <u>40–60</u> 0,400–0,600	Сток по поверхности плотины <u>60–80</u> 0,600–0,800	Нет стока <u>80–100</u> 0,800–1,000	0	100
3. Каскадность, балл	Одинокое озеро <u>0–5</u> 0–0,050	Верхнее озеро каскада <u>5–10</u> 0,050–0,100	Нижнее озеро проточного каскада из 2-х озер <u>10–20</u> 0,100–0,200	Нижнее озеро непроточного каскада из 2-х озер <u>20–60</u> 0,200–0,600	Нижние озера каскада из 3-х и более водоемов <u>60–100</u> 0,600–1,000	0	100
4. Частота повторяемости прорывов (кол-во прорывов/кол-во лет)	Один раз в 20–10 лет <u>1/20–1/10</u> 0–0,053	Один раз в 10–5 лет <u>1/10–1/5</u> 0,053–0,158	Один раз в 5–3 года <u>1/5–1/3</u> 0,158–0,298	Один раз в 3–2 года <u>1/3–1/2</u> 0,298–0,474	Один раз в 2–1 год <u>1/2–1,0</u> 0,474–1,000	0,05	1,0
5. Инфраструктура поселений в зоне воздействия, балл	Отсутствует <u>0–5</u> 0–0,05	Одинокое объекты инфраструктуры <u>5–15</u> 0,05–0,150	Законсервированные объекты <u>15–30</u> 0,150–0,300	Трассы, соединяющие объекты с др. <u>30–60</u> 0,300–0,600	Присутствуют объекты и поселения <u>60–100</u> 0,600–1,000	0	100
6. Сумма активных температур, $t^{\circ}\text{C}$	<u>5–30</u> 0–0,210	<u>30–55</u> 0,210–0,420	<u>55–75</u> 0,420–0,588	<u>75–100</u> 0,588–0,798	<u>100–124</u> 0,798–1,000	5	124
7. Сумма осадков за холодный период, мм	<u>100–170</u> 0–0,198	<u>170–240</u> 0,198–0,395	<u>240–310</u> 0,395–0,593	<u>310–380</u> 0,593–0,791	<u>380–454</u> 0,791–1,000	100	454
Интегральный показатель прорывоопасности (ИПП), (вариант 1)	<u>0–0,109</u> $\Delta=0,106$ (0,056)	<u>0,109–0,275</u> $\Delta=0,162$ (0,185)	<u>0,275–0,454</u> $\Delta=0,182$ (0,348)	<u>0,454–0,702</u> $\Delta=0,254$ (0,560)	<u>0,702–1,000</u> $\Delta=0,296$ (0,841)		
Интегральный показатель прорывоопасности (ИПП) (вариант 2)	<u>0–0,100</u> $\Delta=0,109$ (0,052)	<u>0,100–0,264</u> $\Delta=0,168$ (0,178)	<u>0,264–0,443</u> $\Delta=0,185$ (0,342)	<u>0,443–0,694</u> $\Delta=0,254$ (0,556)	<u>0,694–1,000</u> $\Delta=0,284$ (0,840)		

Примечание. В знаменателе приведена разница между правой и левой границами класса, в скобках указано среднее значение ИПП для класса.

Исследуемые озера были ранжированы по первым 5-ти выделенным критериям прорывоопасности (табл. 2).

Табл. 2. Характеристики исследуемых озер согласно выделенным критериям прорывоопасности

Table 2. Characteristics of the studied lakes according to the selected criteria of GLOF's hazard

Водоем	1 Тип плотины	2 Тип стока	3 Каскадность	4 Частота повторяемости прорывов (прорывов/лет)	5 Инфраструктура поселений в зоне воздействия
Прогресс	Снежно-фирновая	Нет стока	Второе озеро каскада	Один раз в 1–2 года	Трасса, соединяющая станции «Прогресс» и «Зонгшан» с аэродромом
Дискашн	Снежно-фирновая	Нет стока	Нижнее озеро непроточного каскада из 2-х озер	Один раз в 1–2 года	Отсутствует
Ледяное	Ледяная	Нет стока	Нижнее озеро непроточного каскада из 2-х озер	Один раз в 3–5 лет	Трасса, соединяющая станции «Прогресс» и «Зонгшан» с аэродромом
ЛН-73	Снежно-фирновая	Нет стока	Верхнее озеро каскада	Один раз в 3–5 лет	Трасса, соединяющая станции «Прогресс» и «Зонгшан» с аэродромом
Лоу	Скальные породы	Фильтрация	Одинокое озеро	Один раз в 10–20 лет	Отсутствует

Основываясь на интервалах изменения значений 6-го и 7-го критериев, характеризующих возможные метеорологические условия теплого периода года, когда возможен прорыв, было выбрано 3 расчетных сценария: при минимальных значениях (сценарий № 1), при близких к средним (сценарий № 2) и при максимальных значениях (сценарий № 3) сумм осадков и активных температур воздуха теплого периода. Из таблицы № 3 видно, что увеличение в сценариях № 2 и № 3 количества осадков и активных температур воздуха способствует росту потенциальной прорывоопасности всех типов озер. При этом, наблюдались ли в реальности прорывы озера или нет, зависит от ряда других факторов и от количества наблюдений.

Результаты интегральной оценки прорывоопасности (табл. 3) показали следующее: озера, имеющие частую периодичность прорывов (Прогресс, Дискашн), по величине ИПП попадают в IV–V классы прорывоопасности, а в случае сценария с наиболее высокими осадками и температурой – в самый высокий – V класс. Несмотря на то, что оз. Дискашн прорывается ежегодно, а оз. Прогресс не каждый год, оба они оказываются в одних и тех же классах прорывоопасности с некоторой разницей в значениях ИПП.

Табл. 3. Результаты интегральной оценки прорывоопасности озер
 Table 3. Results of the integral assessment of GLOF's hazard

Название озер		1 сценарий	2 сценарий	3 сценарий
Прогресс	1	0,493 ±0,121	0,586 ±0,104	0,710 ±0,128
	2	IVл	IVп	Vл
	3	0,372–0,614	0,482–0,690	0,582–0,838
	4	IIIп–IVп	IVл–IVп	IVп–Vс
Дискашн	1	0,540 ±0,156	0,647 ±0,129	0,771 ±0,140
	2	IVл	IVп	Vл
	3	0,384–0,696	0,518–0,776	0,631–0,911
	4	IIIп–IVп	IVл–Vл	IVп–Vп
Ледяное	1	0,435 ±0,103	0,541 ±0,081	0,666 ±0,118
	2	IIIп	IVл	IVп
	3	0,332–0,538	0,460–0,622	0,548–0,784
	4	IIIл–IVл	IVл–IVп	IVл–Vл
ЛН-73	1	0,347 ±0,125	0,304 ±0,111	0,428 ±0,172
	2	IIIс	IIIл	IVл
	3	0,222–0,472	0,193–0,415	0,256–0,600
	4	IIп–IVл	IIл–IIIп	IIп–IVп
Лоу	1	0,111 ±0,059	0,218 ±0,106	0,343 ±0,179
	2	IIл	IIIл	IIIс
	3	0,052–0,170	0,112–0,324	0,164–0,522
	4	Iл–IIл	IIл–IIIл	IIл–IVл

Примечание. В первой строке приведена точность оценки ИПП (жирным шрифтом выделено среднее значение ИПП); во второй строке – класс для среднего значения ИПП с указанием близости к левой (л), правой (п) границам класса или к его середине (с); в третьей строке указаны минимальное и максимальное значения ИПП для данного разброса; в четвертой строке – классы для минимального и максимального значения ИПП с указанием близости к границам класса.

А вот прорыв озера Ледяное происходит только в случае прорыва вышележащего озера Болдер, и с более продолжительными интервалами (2–3 года), чем у первой группы озер. Лишь в периоды достаточно теплых сезонов его ИПП переходит из класса водоемов со средней прорывоопасностью (IIIп класс) в класс прорывоопасности выше средней (IV л), а в сценарии № 3 – в IV п класс. Озеро ЛН-73 так же, как и Ледяное, прорывается не каждый год, накапливая объем в течении нескольких лет по совокупности факторов. Это подтверждается возможностью его попадания в разные годы во II–III классы или во II–IV классы в сценарии № 3. Такая же ситуация с непрорывающимся озером Лоу, расположенном в скальном основании. Оно в первом сценарии соответствует классам низкой прорывоопасности (Iл–IIл), но в случае самого «теплого» сценария попадает в IIл–IVл классы прорывоопасности, что характеризует его потенциальную способность к образованию прорывов. Полученные результаты были визуализированы в среде ArcGIS путем составления карт-схем, где помимо степени прорывоопасности, нанесены наиболее уязвимые в отношении прорывов озер участки территорий оазисов, в том числе трасс, соединяющих зимовочные станции с аэродромом (рис. 2).

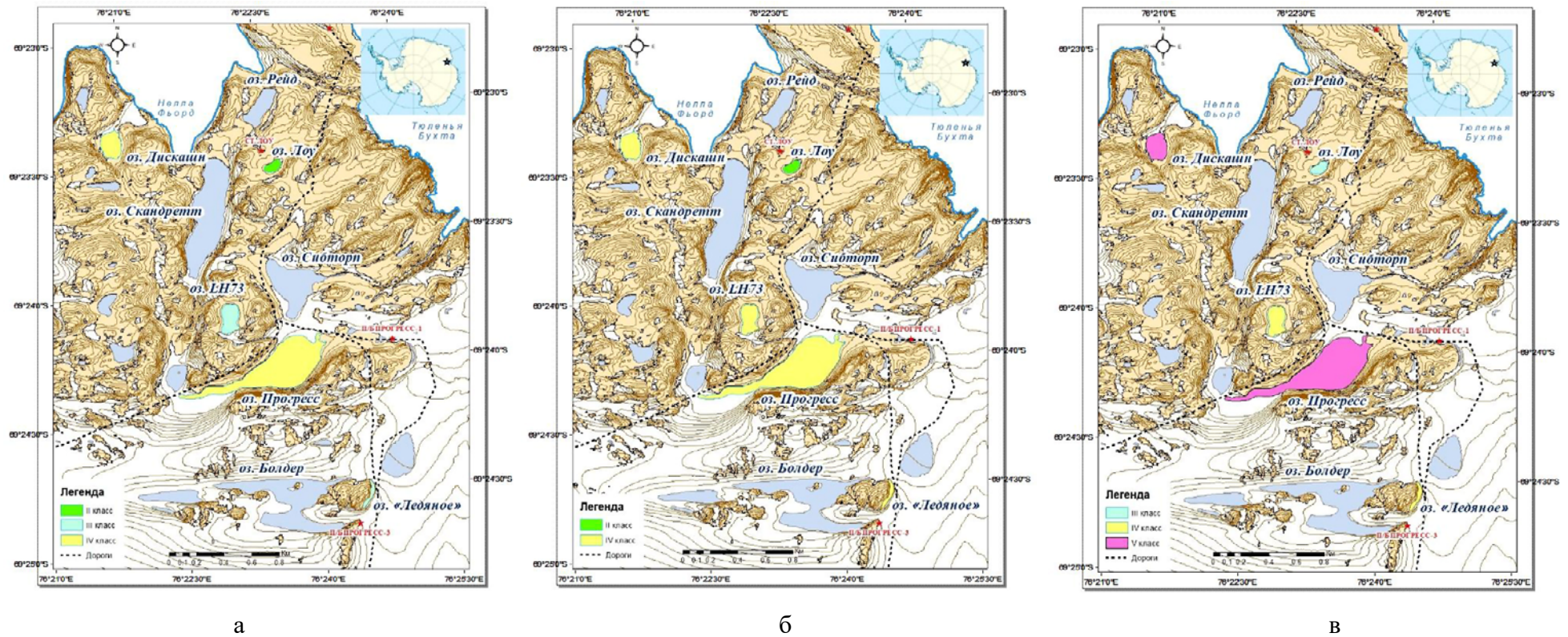


Рис. 2. Градация прорывоопасности озер при сценариях:
а – № 1 «холодного» летнего сезона; б – № 2 «среднего» летнего сезона; в – № 3 «теплого» летнего сезона

Fig. 2. GLOF's hazard assessment variation under the scenarios:
a – № 1 “cold” summer season; b – № 2 “average” summer season; c – № 3 “warm” summer season

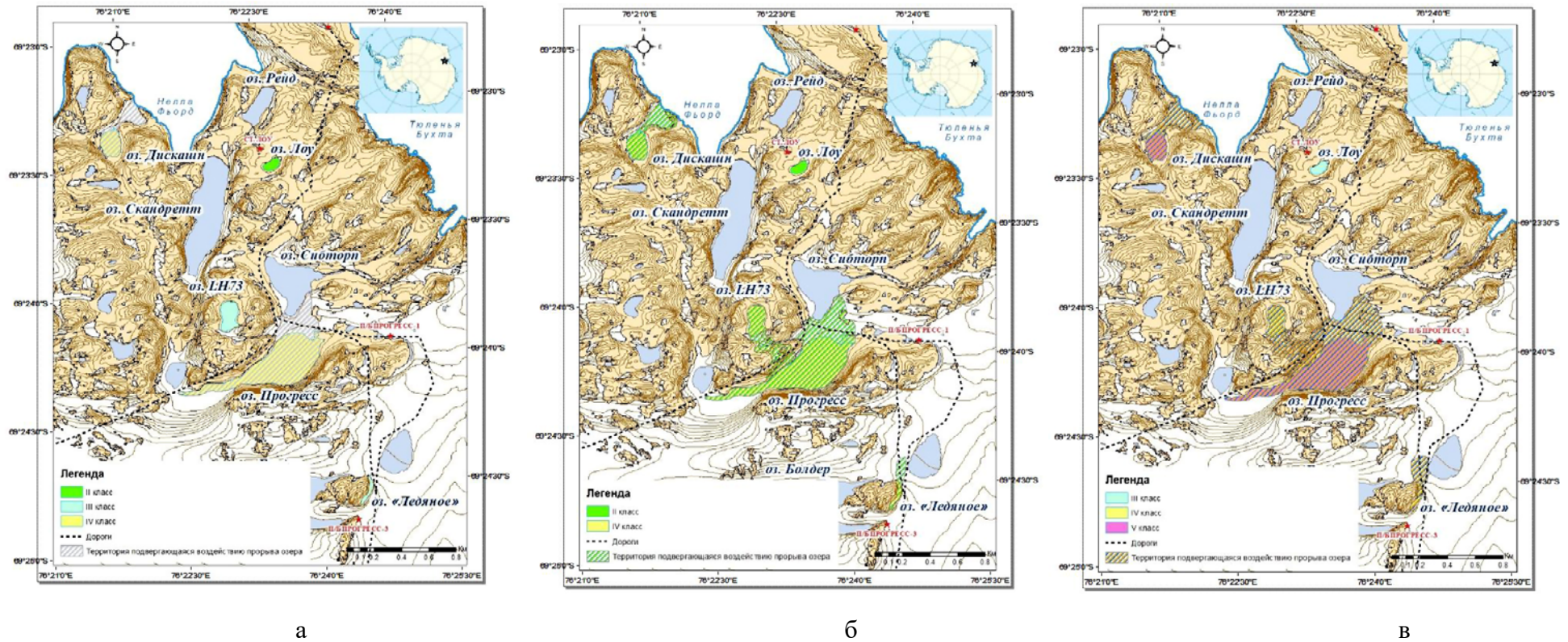


Рис. 3. Территория, подверженная опасности при прорывах при сценариях:
а – № 1 «холодного» летнего сезона; б – № 2 «среднего» летнего сезона; в – № 3 «теплого» летнего сезона

Fig. 3. The territory exposed to the hazard under the scenarios;
а – № 1 “cold” summer season; б – № 2 “average” summer season; в – № 3 “warm” summer season

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен первый опыт использования метода построения композитных индексов на основе территориальных детерминант для оценки прорывоопасности озер антарктического оазиса Холмы Ларсеман. Проведенные расчеты показали, что результаты в целом согласуются с данными фактических наблюдений. Вместе с этим, отметим, что интервалы изменения большей части рассмотренных критериев определялись экспертным способом, а следовательно, во многом зависели от опыта исследователя и его понимания протекания природных процессов. В дальнейшем авторами предполагается уточнение, а возможно и дополнение, списка критериев. Тем не менее, в условиях дефицита данных непосредственных наблюдений за уровнями воды, рассмотренный метод может быть использован для классификации прорывоопасности малоизученных и неизученных водоемов не только антарктических оазисов, но и высокогорных приледниковых озер. Полученные расчеты и составленные на их основе карты-схемы могут быть использованы для принятия решений по логистическим операциям, выполняемым Российской Антарктической экспедицией.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00343 А «Выявление особенностей протекания процесса прорывов озер оазисов Антарктиды на основе данных полевых исследований и математического моделирования».

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was supported by RFBR within the framework of the project No. 20-05-00343 A “Identification of the main features of outbursts at the lakes of Antarctic oases based on the fieldwork data and mathematical modeling”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Боронина А.С.* Крупные прорывы озер антарктических оазисов: обобщение современных знаний. Лед и снег. 2022. Т. 62. № 1. С. 141–160. DOI: 10.31857/S2076673422010122.
2. *Виноградов Ю.Б.* Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. 154 с.
3. *Григорьева С.Д., Суханова А.А., Тюрин С.В.* Прорывы ледниковых и подледниковых озер в районе антарктической станции «Прогресс», Восточная Антарктида, в 2017–2018 гг. Труды 5-й международной конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». Тбилиси. Грузия, 2018.
4. *Дмитриев В.В., Огурцов А.Н., Седова С.А., Алексеева А.А., Байжанова К.К., Грига С.А., Кислина А.Е.* Интегральная оценка устойчивости наземных ландшафтов: от балльных оценок к композитным индексам на основе территориальных детерминант. Успехи современного естествознания. 2020. № 2. С. 45–53. DOI: 10.17513/use.37330.
5. *Зимницкий А.В.* Приледниковые озера Большого Кавказа: новые направления исследований. Вестник КрОРГО. 2005. С. 64–72.
6. *Пряхина Г.В., Кашкевич М.П., Попов С.В., Распутина В.А., Боронина А.С., Ганюшкин Д.А., Агатова А.Р., Непон Р.К.* Формирование и развитие моренного (приледникового) озера Нурган, северо-западная Монголия. Криосфера Земли. 2021. Т. 25. № 4. С. 26–35. DOI: 10.15372/KZ20210403.
7. *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., Савенюк Е.А., Смирнов А.М. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года. Криосфера Земли. 2018. Том XXII. № 2. С. 70–80.

8. *Clague J.J., Evans S.G.* Formation and failure of natural dams in the Canadian Cordillera. Geological Survey of Canada. Bulletin 464. Ottawa, 1994. 35 p.
9. *Huggel C., Haeberli W., Käab A., Bieri D., Richardson S.* Assessment procedures for glacial hazards in the Swiss Alps. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 41. No. 6. 2004. P. 1068–1083. DOI: 10.1139/t04-053.
10. *Reynolds J.M.* (ed.). Development of glacial hazard and risk minimization protocol in rural environment. Report No. R7816. Reynolds Geo-Sciences LTD. UK. 2003. 36 p.

REFERENCES

1. *Boronina A.S.* Large outbursts of lakes in the Antarctic oases: generalization of modern knowledge. Ice and snow. 2022. Vol. 62. No. 1. P. 141–160. DOI: 10.31857/S2076673422010122 (in Russian).
2. *Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Aleinikov A.A., Bekkiev M.Y., Viskhadzhieva K.S., Dokukin M.D., Kalov R.H., Kidyaeva V.M., Krylenko V.V., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Rets E.P., Savenyuk E.A., Smirnov A.M.* The outburst of Bashkara glacier lake (Central Caucasus, Russia) on September 1, 2017. Earth's cryosphere. 2018. Volume XXII. No. 2. P. 70–80 (in Russian).
3. *Clague J.J., Evans S.G.* Formation and failure of natural dams in the Canadian Cordillera. Geological Survey of Canada. Bulletin 464. Ottawa, 1994. 35 p.
4. *Dmitriev V.V., Ogurtsov A.N., Sedova S.A., Alekseeva A.A., Baizhanova K.K., Griga S.A., Kislina A.E.* Integral assessment of the stability of terrestrial landscapes: from scores to composite indices based on territorial determinants. Successes of modern natural science. 2020. No. 2. P. 45–53. DOI: 10.17513/use.37330 (in Russian).
5. *Grigoreva S.D., Sukhanova A.A., Tyurin S.V.* Outbursts of glacial and subglacial lakes in the area of the Progress Antarctic station, East Antarctica, in 2017–2018. Proceedings of the 5th international conference “Debris flows: catastrophes, risk, forecast, protection”. Tbilisi. Georgia, 2018 (in Russian).
6. *Huggel C., Haeberli W., Käab A., Bieri D., Richardson S.* Assessment procedures for glacial hazards in the Swiss Alps. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 41. No. 6. 2004. P. 1068–1083. DOI: 10.1139/t04-053.
7. *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 development of the moraine (periglacial) lake Nurgan, northwestern Mongolia. Earth's cryosphere. 2021. Vol. 25. No. 4. P. 26–35. DOI: 10.15372/KZ20210403 (in Russian).
8. *Reynolds J.M.* (ed.). Development of glacial hazard and risk minimization protocol in rural environment. Report No. R7816. Reynolds Geo-Sciences LTD. UK. 2003. 36 p.
9. *Vinogradov Y.B.* Glacial outburst floods and mudflows. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 154 p. (in Russian).
10. *Zimnitsky A.V.* Glacial lakes of the Greater Caucasus: new directions of research. Bulletin KrORGO. 2005. P. 64–72 (in Russian).