

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 7th International Conference

Chengdu, China, 23–27 September 2024



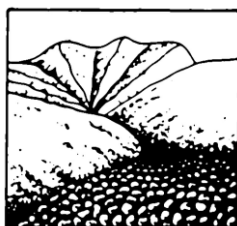
Edited by
S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC
Moscow
2024

СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
7-й Международной конференции

Чэнду, Китай, 23–27 сентября 2024 г.



Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева

ООО «Геомаркетинг»
Москва
2024

泥石流： 灾害、风险、预测、防治

會議記錄

第七届国际会议

中国成都, 2024年9月23日至27日



編輯者

S.S. Chernomorets, K. Hu, K. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC

莫斯科

2024

УДК 551.311.8
ББК 26.823
С29

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). – Ed. by S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva. – Moscow: Geomarketing LLC. 622 p.

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2024. 622 с.

泥石流：灾害、风险、预测、防治。 會議記錄 第七届国际会议. 中国成都。 編輯者 S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva. – 莫斯科: Geomarketing LLC. 622 p.

ISBN 978-5-6050369-6-8

Ответственные редакторы: С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова), К. Ху (Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук), К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Edited by S.S. Chernomorets (Lomonosov Moscow State University), K. Hu (Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS), K.S. Viskhadzhieva (Lomonosov Moscow State University).

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).

Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman's book on Debris Flows (Moscow: Geografgiz, 1951, p. 51).

© Селевая ассоциация

© Debris Flow Association



Прорывы ледниковых озер на примере озера Спартакoвское. Методы изучения и особенности прогнозирования

Л.Н. Улаева

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,
Ulaeva.Liliia@yandex.ru*

Аннотация. В эпоху двадцать первого столетия происходят значительные научные открытия, но при этом неизбежно возникают и новые вызовы, например изменение климата. Таяние ледников вследствие потепления климата одна из основных причин увеличения прорывов ледниковых озер. Подобные ледовые катастрофы являются крайне опасными гидрологическими явлениями, учитывая их нестабильность и сложность прогнозирования, тогда как сам механизм прорыва и его взаимосвязь с изменением внешних климатических условий на сегодняшний день изучены недостаточно. Уникальную возможность для изучения особенностей этих процессов предоставляет озеро Спартакoвское на архипелаге Северная Земля. Применение полученных полевых данных в математическом моделировании может открыть возможности для более точного прогнозирования прорывов озер, как и для лучшего понимания процессов, происходящих под ледниками.

Ключевые слова: *изменение климата, прорыв озера, ледниковое озеро, Jökulhlaup, математическое моделирование, озеро Спартакoвское*

Ссылка для цитирования: Улаева Л.Н. Прорывы ледниковых озер на примере озера Спартакoвское. Методы изучения и особенности прогнозирования. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 517–525.

Glacial lake outbursts: A case of the Spartakovskoe Lake. Study methods and forecasting features

L.N. Ulaeva

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, Ulaeva.Liliia@yandex.ru

Abstract. Significant scientific discoveries are taking place in the era of the twenty-first century, but new challenges, such as climate change, inevitably arise. The melting of glaciers due to climate warming is one of the main reasons for increasing glacial lake outbursts. Such ice catastrophes are extremely dangerous hydrological phenomena, given their instability and complexity of forecasting, whereas the mechanism of glacial lake outburst and its relationship with changes in external climatic conditions have not been sufficiently studied to date. A unique opportunity to study the features of these processes is provided by Spartakovskoe Lake in the Severnaya Zemlya Archipelago. Using of the obtained field data in mathematical modeling may allow opportunities for more accurate prediction of lake outbursts, as well as for a better understanding of the processes occurring under glaciers.

Key words: *climate change, lake outburst, glacial lake, Jökulhlaup, mathematical modeling, Spartakovskoe Lake*

Cite this article: Ulaeva L.N. Glacial lake outbursts: A case of the Spartakovskoe Lake. Study methods and forecasting features. In: Chernomoretz S.S., Hu K., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 517–525.



Введение

Как отмечал Ю.Б. Виноградов в «Этюдах о селевых потоках», «одной из самых крупных ледниково-селевых катастроф является прорыв временно подпруженных ледниками озера. Завальные озера, возникшие в результате обвалов и оползней горной породы, могут существовать десятки, сотни и тысячи лет, хотя и они могут прорваться. Ледяные же плотины, сколь бы мощными они не были, недолговечны. Лед тает, трескается, отдельные его блоки всплывают, и разрушение такой плотины — вопрос времени».

За последние 100 лет глобальное потепление уже привело к повышению средней температуры на нашей планете на 1,4°C, а с 1970 г. ее рост наблюдается гораздо быстрее, чем в любой другой 50-летний период за всю историю наблюдений [IPCC, 2023]. Доклад Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 г. отражает не менее настораживающую картину изменения климата. В нем отмечается практически повсеместное повышение температуры окружающего воздуха относительно климатической нормы, как и рост атмосферных осадков в каждом из сезонов года. Продолжительность залегания снежного покрова в среднем по России зимой 2021/2022 г. также отличается от климатической нормы в меньшую сторону [Росгидромет, 2023].

Антарктика и Арктика наиболее чувствительно реагируют на скорости климатических изменений. Максимальная площадь морского льда в Антарктике в 2023 г. достигла абсолютного рекордно низкого уровня за период наблюдений с 1979 года [WMO, 2023] а состояние арктических льдов можно визуальнo оценить с помощью изменения баланса массы материкового льда (рис. 1).

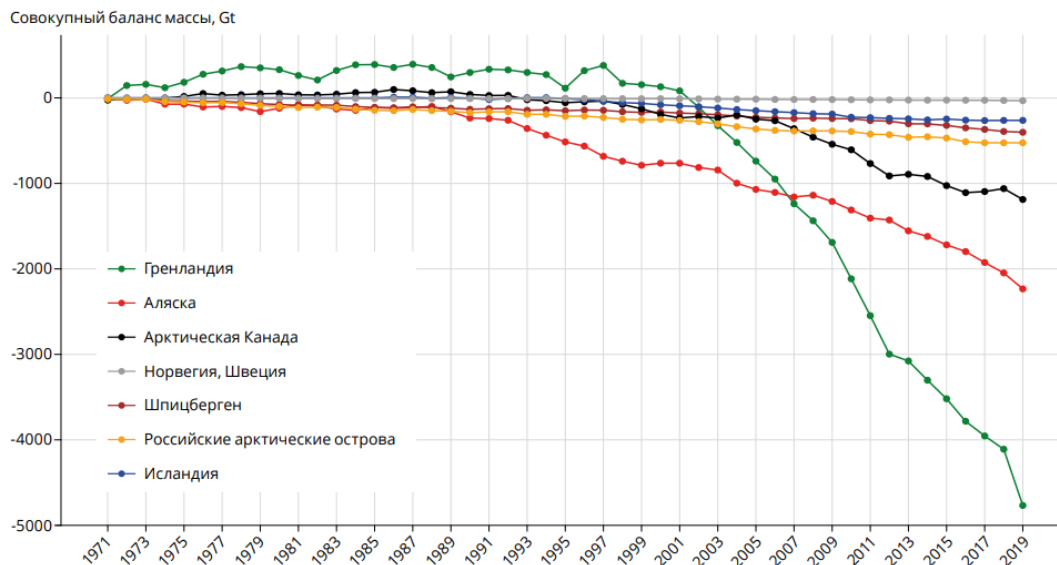


Рис. 1. Изменения баланса массы материкового льда в Арктике [AMAP, 2022]

Аналогичная ситуация наблюдается и на континентах. Ледники, как крайне чувствительные к любым климатическим изменениям системы, отстают в результате придонного и приповерхностного таяния и одно из главных последствий этого процесса – образование озерно-ледниковых комплексов, как новых, так и увеличение площади и объемов уже существующих озер [Кренке, 1987; Черноморец и др., 2003]. Площадь ледников сокращается, активизируются обвальные процессы в ледниковой зоне, ускоряется деградация массивов горной мерзлоты. Все это влияет на динамику ледников и увеличивает количество опасных природных явлений: происходят прорывы ледниковых озер и формирование катастрофических прорывных паводков; сходят



крупные сели на участках, где они ранее в таких объемах не были зафиксированы [Росгидромет, 2023], а также появляются провалы и депрессии в ледниках [Boronina et al., 2021]. Все это несет угрозу для безопасности человеческой деятельности и жизни, а нестабильность и сложность прогнозирования этих событий делает их крайне опасными природными явлениями [Richardson et al., 2000; Понов и др., 2018].

Прорывы ледниковых озер являются одним из главных источников селевой опасности в высокогорных районах. Учитывая скорость таяния ледников и возрастающую интенсивность опасных природных явлений, эти процессы активно изучаются. Помимо решения прикладных задач, изучение процессов, связанных с прорывом ледниковых озер, также крайне важно для фундаментальных научных исследований, поскольку это поможет понять процессы, происходящие под ледниками, эволюцию подледного ландшафта, а также состояние подледниковой среды. Новые знания способны открыть возможности для более точного прогнозирования данных опасных гидрологических явлений.

Однако подобные явления характерны также и для подледниковых озер Антарктиды и ледниково-подпрудных озер Арктики, где, несмотря на малонаселенность этих регионов, могут привести к экономическому ущербу и угрозе человеческим жизням. Например, образовавшийся в 2017 г. внушительный провал в краевой части ледника Долк (Dålk Glacier) в Восточной Антарктиде, который разрушил участок дороги между российской станцией Прогресс и китайской станцией Зонгшан. Учитывая, что это интенсивно используемый участок, данное событие могло привести к человеческим жертвам. Причиной его возникновения был катастрофический прорыв внутриледникового водоема [Sukhanova et al., 2023; Пряхина и др., 2022]. В Исландии прорывные ледниковые паводки, иногда достигающие грандиозных размеров, настолько часты, что являются одним из главных природных явлений, специфических для этого острова [Nye, 1976; Björnsson, 2010]. Последствия прорывов озер, помимо опасности для человеческой жизни и экономического ущерба, отражаются и на окружающей среде. В частности, прорыв озера Спартаковское на острове Большевик архипелага Северная Земля. Его заполнение до максимального предела привело к всплыванию ледниковой плотины, образованной выводным ледником купола Семенова-Тян-Шанского. Это привело к формированию паводка, который по мере своего развития, разрушил плотину [Чернов и др., 2020; Муравьев и др., 2023]. Ввиду того, что прорывы ледникового озера Спартаковское достаточно регулярны, его можно рассматривать в качестве полигона для изучения такого рода процессов.

Прорывы ледниковых озер. Озеро Спартаковское

Прорывы ледниковых озер

Прорыв ледникового озера представляет собой внезапный и мощный сброс большого объема воды из озерной котловины в долину. Факторы, обуславливающие такого рода события, можно подразделить на две основные категории. Первая из них связана с изменениями климата, которые приводят к резкому увеличению притока воды в озеро из-за различных климатических аномалий, таких как повышенная температура или экстремальные осадки. Вторая категория включает в себя геологические и геоморфологические изменения, приводящие к нарушению устойчивости барьера, включая разрушение ледника или подпруживающей плотины, изменение свойств грунтов, а также присутствие вулканических процессов или повышенной сейсмической активности. Особенности рельефа, такие как неустойчивость склонов, особенно при больших уклонах и крутых перепадах высот, также могут быть отнесены к этой группе факторов [Глазовский и др., 2014]. Рассмотрим более подробно механизм прорыва озера через ледовую перемычку вследствие влияния внешних климатических факторов.

В ранних исследованиях отмечалось, что климатические изменения являются одной из основных причин изменения толщины ледника и положения его краевой части.



В свою очередь деградация ледника сказывается на стабильности, уровне и объеме примыкающих к нему ледниковых озер [Evans et al., 1994; Thorarinsson et al., 1939].

С изучением деградации и отступления ледников связано понятие «цикл *jökulhlaup*». *Jökulhlaup* в буквальном переводе с исландского языка означает «Бегающий ледник» – красивое название, однако несущее в себе определение опасного стихийного бедствия. Первоначально это понятие было введено в Исландии для характеристики явлений, связанных с извержениями подледных вулканов на крупнейшем леднике Исландии *Vatnajökull* [Thorarinsson, 1939; Björnsson, 2010]. Территория Исландии является уникальной, сочетая в себе и вулканическую активность, и ледниковый покров над действующими вулканами. При извержении сильное придонное таяние провоцирует резкое увеличение объема воды в ледниковом озере, приводя к катастрофическим прорывам. Эти события и породили новый термин в гляциологии, который далее был принят во многих языках и применяется для описания любого крупного и резкого выброса воды из подледникового озера.

Цикл jökulhlaup предполагает, что опустошение озера происходит в виде цикла повторяющихся прорывов, когда вследствие увеличения объема воды в озере давление, оказываемое на ледниковый барьер, превышает то критическое значение, при котором он оставался относительно стабильным и мог сдерживать оказываемый напор.

Существуют различные способы сброса воды из ледникового озера: перелив через ледовую плотину, разрушение ледовой перемычки из-за избыточного давления, просачивание в снежно-фирновой зоне или по подледниковым полостям и каналам, которые формируются мощным водным потоком при поиске выхода из-под ледниковой массы или флотация льда. Внутренний диссипативный разогрев льда и трение на ложе выступают в качестве дополнительного источника воды в ледниках. Канал выхода расширяется за счет термической и механической эрозии [Björnsson, 2010; Виноградов, 1976], что приводит к развитию внутриледниковой и подледниковой дренажной сети. Если вести речь о всплывании ледовой плотины, как способе прорыва озера, то, согласно работам [Nye, 1976; Thorarinsson, 1939], уровень воды должен подняться до 9/10 ее высоты (это следует из соотношения плотностей льда и воды), что и обеспечивает всплывание ледяной плотины и запускает процесс прорыва.

При прорыве озер через ледовую перемычку, энергия движущейся воды приводит к таянию стенок канала. При этом вследствие деформации льда и разницы между давлением на канал со стороны ледника и водного потока, канал может закрываться, что приводит к прекращению сброса и повторному накоплению объема воды в озерной котловине. В своей работе Дж. Най также подчеркивает, что сброс воды осуществляется преимущественно в одном русле, так как движущая сила воды в прожилках между зернами направлена к озеру, а не от него [Nye, 1976].

Согласно теории Ю.Б. Виноградова, одним из ключевых факторов в процессе прорыва является достаточное количество тепла, выделяемое за счет превышения температуры воды над температурой тающего льда и диссипации энергии водного потока, который движется через незначительный внутриледниковый или подледниковый канал. Это позволяет за относительно короткий промежуток времени выработать туннель, способный обеспечить катастрофический сброс воды из озера [Виноградов, 1976] на него водной массы, что прослеживается во многих указанных гипотезах прорыва.

На первый взгляд вывод о первоочередной значимости изменения внешних климатических факторов, например, температуры окружающего воздуха, на процесс накопления воды в озере достаточно очевиден. Однако следует отметить важность влияния на процесс формирования и прорывов ледниковых озер таких не менее значимых факторов, как толщина ледника и геотермический поток [Pattyn, 2010; Боронина, 2023].



Озеро Спартаковское

К одним из крупнейших ледниково-подпрудных озер Северной полярной области относится уникальное и единственное в своем роде озеро Спартаковское, расположенное на архипелаге Северная Земля и подпруженное ледником Семенова-Тян-Шанского (рис. 2). Длина озера около 5 км, ширина достигает 900 м, глубина у плотины перегораживающего ледника составляет 100 м при отметке уровня воды в озере около 90 м над уровнем моря. Его прорывы характеризуются объемами сброса, превышающие объемы при прорывах в горных регионах в десятки раз, что делает их воздействие на окружающую среду значительным [Чернов, 2020].



Рис. 2. Озеро Спартаковское. Фото: А.С. Парамзин, Д.Ю. Большианов, ААНИИ

Активным изучением этих процессов занимаются сотрудники ААНИИ и ИГ РАН. Первый частичный спуск воды из озера наблюдался в период с 25 по 27 августа 2016 г., далее летом 2017 г. было зафиксировано резкое изменение уровня воды, и последний спуск воды из озера был зафиксирован 22–27 августа 2021 г., когда впервые за время наблюдений произошел полный спуск за 117 часов при приблизительном расходе воды до 2000 м³/с, что сопоставимо со стоком реки Невы [Чернов, 2020]. Ученые установили, что прорыв озера происходит посредством флотации ледяной плотины под действием гидростатических сил, соответственно, основной фактор, запускающий этот процесс – высокий уровень воды в озере. Около 40% площади водосборного бассейна озера Спартаковское занимают ледники и многолетние снежники. Накопление воды в озере происходит в результате таяния ледников Семенова-Тян-Шанского и Войцеховского, поэтому колебание климатических факторов, особенно теплые летние сезоны, имеют первоочередное значение [Чернов, 2020; Муравьев, 2023].

Регулярные сбросы воды в приледниковом озере Спартаковское открывают возможности детального изучения взаимосвязей многочисленных факторов климатических изменений, влияющих на этот процесс, как и последствий таких событий для окружающей среды, включая ответную реакцию на прорыв озера выводного ледника.

Методы изучения и особенности прогнозирования

Методы изучения

Методы изучения ледниковых озер и их прорывов можно разделить на 4 основные блока [Попов и др., 2022; Глазовский, 2014] исследований:

1. Натурные инструментальные исследования, включая дистанционные методы исследований и применение геоинформационных систем и баз данных.
2. Статистические методы анализа.



3. Создание физических моделей прорыва озер.
4. Математическое моделирование.

Сотрудники ААНИИ и ИГ РАН, детально изучая процессы прорыва озера Спартакоское, применяют новейшие методы: анализ спутниковых снимков, лазерную альтиметрию, полевые наблюдения на научно-исследовательском стационаре ААНИИ «Ледовая база «Мыс Баранова», включая метеорологические, аэрологические и геофизические исследования, а также гляциологические работы. Это позволило прийти к важным выводам относительно происходящих процессов, включая характеристики самих прорывов озера.

Дешифрирование спутниковых снимков и обработка ЦМР позволили получить следующие данные о прорыве озера в 2016 г.: максимальный уровень озера, равный $(122,9 \pm 1,0)$ м; площадь озера при максимальном уровне, равная $(6,63 \pm 0,42)$ км²; объем озера, составляющий $(404,3 \pm 21,9)$ млн м³. Минимальная высота ледораздела плотины до спуска озера была около 137 м, ширина около 3 км, что обеспечило ее всплытие при средней плотности льда 0,875 г/см. Расчетная величина стока в водосборном бассейне Спартакоское в зависимости осадков и средней летней температуры варьируется от 37, до 48,0 млн м³. Также в результате расшифровки космических снимков удалось зафиксировать перетекание воды из озера Спартакоское в долину реки Базовой. Однако полевые работы в 2021 г. показали, что сток в долину реки Базовая происходит больше не может, так как уровень воды уже не поднимается до водораздела с бассейном реки Базовая. Неожиданно произошедший в 2021 г. масштабный прорыв озера Спартакоское показал, что изменяющиеся климатические факторы внесли корректировки в прогноз следующего после 2016 г. прорыва озера – в 2024–2025 гг. и он произошел существенно раньше предполагаемого срока. За счет усиления поверхностной абляции на ледниках водосборного бассейна при аномально теплых летних сезонах в 2018–2021 гг., озерная котловина наполнилась водой существенно быстрее, чем в период с 2006 по 2016 гг. [Чернов, 2020]. Согласно выполненным расчетам, сток в озеро за 2020 г. превысил 101 млн м³, что более чем вдвое превышает расчетную величину стока в озеро в период с 2006 по 2016 г. Немало важный фактор, выявленный в ходе исследований и влияющий на прорыв озера – уменьшение размера удерживающей плотины. С 01.08.2016 по 06.08.2021 граница подпруживающей озеро ледяной плотины в центральной части отступила на 350–380 м, что свидетельствует о постепенном ее разрушении [Муравьев, 2023]. Полученные выводы можно объединить предположением, что количество прорывов озера в ближайшем будущем будет увеличиваться.

Безусловно, натурные исследования и дистанционное зондирование имеют немаловажное значение с точки зрения сбора, обработки и мониторинга данных. Однако в значительной степени полученная информация касается уже произошедшего прорыва. Более того, ледниковые озера отличаются своей труднодоступностью для исследований. Поэтому изучение субгляциальных и гляциальных гидрологических процессов невозможно осуществить только прямыми методами. Им на помощь приходит математическое моделирование в сочетании с полученными данными натурных измерений.

В 1970-х гг. были заложены основы для современных моделей катастрофического сброса. В 1972 г. была опубликована работа Ретлисбергера [Röthlisberger, 1972], где подробно описана гидравлическая модель стационарного течения воды в канале. Он предположил, что текущая вода в канале, чтобы оставаться при температуре таяния и соответствующем давлении, должна получать или терять энергию. Модель, представленная в его работе, учитывает помимо особенностей самого канала (длина, радиус, глубина, шероховатость), взаимодействие и взаимное влияние друг на друга давления воды и ее расхода, давления льда на стенки канала, а также зависимость таяния от давления. Однако использование модели Ретлисбергера для каналов в области абляции может привести к значительным ошибкам, так как продолжительность заполнения каналов водой изменчива, как и расход в этой области [Глазовский, 2014].

Однако эта теория послужила отправной точкой для следующей фундаментальной работы в этой области, подробно изложенной в публикации 1976 г. Модель



Ретлисбергера соотносилась к установившемуся течению воды, в то время как Дж. Най предложил модель для описания неустановившегося течения воды в ледниковом наклонном канале, заполненном водой. При этом также учтено плавление стенок канала в связи с трением воды о них, а также описан процесс закрытия каналов за счет деформации пластичного льда. То есть особенность его модели в том, что катастрофичность прорыва может быть объяснена стремительным расширением изначально небольшого канала выхода водного потока за счет плавления стенок, в то время как сокращение объема воды в озере приводит к снижению давления и закрытию канала, останавливая тем самым процесс прорыва [Nye, 1976]. Несмотря на логичность модели, следует отметить, что она все же не учитывает некоторые особенности, которые выявляются в процессе исследований и наблюдений. Например, данная модель не учитывает процессы водной эрозии при формировании паводка и, как следствие, проседание поверхности ложа ледника, а также не способна описать процесс подпитки зарождающихся систем каналов, когда распределение водных потоков первоначально идет в турбулентном подледниковом слое [Flowers et al., 2004; Boronina et al., 2021].

Среди отечественных следует выделить модель Ю.Б. Виноградова, по которой при процессе прорыва за относительно короткий промежуток времени за счет превышения температуры воды над температурой льда и диссипации энергии водного потока в канале, формируется туннель, способный обеспечить катастрофический сброс воды из озера, то есть преобразуются уже существующие каналы стока. В ней отражены два основных явления: увеличение площади поперечного сечения туннеля и падение давления по мере выхода объема воды из озера. Входными данными являются объем озера перед прорывом, начальная температура воды в озере, длина канала, морфометрические данные, а также разница высот между точкой входа и точкой выхода туннеля. Однако расход воды через туннель определяется с помощью эмпирического коэффициента, который несет в себе большое количество неопределенностей и должен оцениваться исходя из наилучшего соответствия модели и действительности [Виноградов, 1976; Боронина и др., 2018]. Помимо этого, в этой модели не учтено наличие ледникового покрова над водной поверхностью. Эта модель получила развитие, и в работе [Evatt et al., 2007] приводится ее описание.

Каждая из исследуемых моделей внесла свой вклад в развитие математического моделирования. Однако для приближения к максимальной точности автору видится применение этих моделей с доработкой под конкретные цели и задачи, стремясь максимально заменить в модели эмпирические вычисления на полевые исследования, что может способствовать уменьшению неопределенности полученных результатов.

Модель Дж. Ная по мнению автора наиболее подходит в качестве основы моделирования процесса прорыва озера Спартаковское, где ключевым моментом является всплытие ледниковой плотины и сброс воды под ледником во фьорд. Высокие уровни озера, зафиксированные при обоих прорывах, способствуют значительному давлению воды, быстрому развитию подледного канала и флотации ледникового барьера, при этом сток происходит даже при падении уровня воды в озере. Модель Ная и объясняет катастрофичность прорыва стремительным расширением изначально небольшого канала выхода водного потока за счет плавления его стенок и баланса давлений со стороны ледника и водного потока. При этом исследования, проведенные сотрудниками ААНИИ и ИГ РАН, показали, что постоянных внутрiledниковых или подледниковых каналов стока в ледяной плотине, образованные выводным ледником купола Семенова-Тян-Шанского, нет. Если бы подобные каналы существовали, прорывов озера, возможно, могло бы и не быть, так как озеро не наполнялось бы выше определенного уровня [Муравьев, 2023]. Модель Дж. Ная описывает процесс так называемого «закрытия каналов» за счет деформации пластичного льда [Nye, 1976], что позволяет накопить значительные объемы воды в озерной котловине.

Такой подход поможет описать развитие процесса прорыва, однако не может описать его начало: процесс формирования самого канала. Как происходит развитие этого канала, особенно в условиях контакта воды со льдом и при значительных расходах воды, какие размеры имеет подледниковый канал на этапе появления – эти вопросы еще



предстоит выяснить в будущих исследованиях. Решение задачи Стефана о таянии на контакте скальных пород и льда за счет процессов тепломассопереноса может восполнить этот недостаток. Подобный опыт моделирования уникален и тем, что позволит получить распределение температуры в толще ледника и воды.

Особенности прогнозирования

Прорыв ледникового озера – сложный природный процесс, зависящий от множества факторов и влияющих на них неопределенностей, поэтому предсказать, когда именно будет прорыв, крайне затруднительно. Интегрированный подход, при котором изучается динамика ледников, гидрогеологические особенности озера, включая постоянный мониторинг уровня воды, а также отслеживается изменение климатических условий, позволяет более точно оценить вероятность прорывов. Математическое моделирование – провести анализ сложных взаимосвязей между различными факторами и более комплексное понимание процессов, особенно если озеро располагается в труднодоступном для регулярного наблюдения месте.

Заключение

Особенности перемещение значительных водных масс с выделением большого количества энергии при прорывах ледниковых озер все еще остаются мало изучены, как и механизмы воздействия климата на районы озерных систем в Антарктиде. Объемы ледниковых озер могут вмещать до сотен миллионов кубометров воды, а внезапность прорыва озера и сложность в прогнозировании делает это явление чрезвычайно опасным. Согласно исследованию, проведенному в 2023 г., около 90 млн человек живет в бассейнах, содержащих ледниковые прорывные озера. Из них более половины приходится на страны с высокой плотностью населения: Индию, Пакистан, Китай, Перу и Бутан [Taylor, 2022]. Увеличение человеческой активности в районах, где существует потенциальная угроза от прорывов ледниковых озер, учитывая значимый ущерб в качестве последствий, делает изучение этой проблемы крайне актуальной в настоящее время. Помимо решения прикладных задач, создание новых более точных моделей важно для изучения субгляциальных процессов в целом.

Благодарности

Автор выражает благодарность доктору геолого-минералогических наук С.В. Попову за помощь в подготовке настоящей статьи.

Список литературы

- Боронина А.С. Оценка факторов, влияющих на процессы формирования и развития подледниковых озер Антарктиды. Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородных ресурсов: Тезисы докладов / II Международная научно-практическая конференция, 2023. С. 86.
- Боронина А.С., Попов С.В., Пряхина Г.В. Моделирование подледниковых паводков на примере катастрофического прорыва водоема в леднике Долк (полуостров Брокнес, Восточная Антарктида) // Сборник докладов международной научной конференции «Третьи Виноградские чтения. Грани гидрологии», г. СПб., 2018. С. 854–859.
- Виноградов Ю.Б. Метод расчета гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера // Селевые потоки, сб. 1, 1976. С. 138–153.
- Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я. Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М. 2014. ГЕОС. 528 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: РОСГИДРОМЕТ, 2023. 104 с.
- Кренке А.Н. Современные ледники и климат // Взаимодействие оледенения с атмосферой и океаном / Под ред. Котляков М.Г., Гросвальд М.Г. 1987. С. 7–33.



- Муравьев А.Я., Чернов Р.А. Прорыв ледниково-подпрудного озера Спартаковское и изменение выводного ледника купола Семенова-Тян-Шанского в 2021 году (Северная Земля) // *Лед и снег*, 2023, том 63, № 1, с. 17–32. [https://doi: 10.31857/S2076673423010118](https://doi.org/10.31857/S2076673423010118).
- Попов С.В., Боронина А.С., Пряхина Г.В., 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 г., С. 512–520.
- Попов С.В., Пряхина Г.В., Боронина А.С., Кашкевич М.П. Математическое моделирование, как основной метод изучения процессов, протекающих в ледниках и подледниковых водоемах Антарктиды // *Сб. материалов IV Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию Государственного учреждения Республиканский центр полярных исследований*. 2022. С. 192–195.
- Черноморец С.С., Тутубалина О.В., Алейников А.А. Новые селеопасные озера у края ледника Башкара на Центральном Кавказе // *Материалы гляциологических исследований*. – 2003. – № 95. – С. 153–160.
- Чернов Р.А., Муравьев А.Я. Природная катастрофа ледниково-подпрудного озера Спартаковское на острове Большевик (Северная Земля) // *Криосфера Земли*, 2020, т. XXIV, № 4, с. 58–68; [https://doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-4](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-4) (58–68).
- AMAP Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts. 2022. – 160 p.
- Boronina A., Popov S., Pryakhina G., Chetverova A., Ryzhova E., Grigoreva S. Formation of a large ice depression on Dâlk Glacier (Larsemann Hills, East Antarctica) caused by the rapid drainage of an englacial cavity // *J. Glaciol.*, 2021, Vol. 67, No 266, P. 1121–1136. [https://doi: 10.1017/jog.2021.58](https://doi.org/10.1017/jog.2021.58).
- Björnsson, H. Jökulhlaups in Iceland: sources, release and drainage // *Megaflooding on Earth and Mars*. 2010. P. 95–106. [https://doi: 10.1017/CBO9780511635632.004](https://doi.org/10.1017/CBO9780511635632.004).
- Evans S.G., Clague J.J. Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments // *Geomorphology*, 1994. Vol. 10. P. 107–128.
- Evatt G.W., Fowler A.C. Cauldron subsidence and subglacial floods // *Ann. Glaciol.*, 2007. Vol. 45. P. 163–168.
- Caroline Taylor, Tom R. Robinson, Stuart Dunning, J. Rachel Carr & Matthew Westoby Glacial Lake outburst floods threaten millions globally, 2022, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36033-x>.
- Nye J.F. Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels, and veins // *J. Glaciol.*, 1976. Vol. 17. No 76. P. 181–207.
- Pattyn F. Antarctic subglacial conditions inferred from a hybrid ice sheet/ice stream model // *Earth and Planetary Science Letters*, 2010. vol. 295. P. 451–461.
- Richardson S.D, Reynolds J.M. An overview of glacial hazards in the Himalayas // *Quatern. Intern.* 2000. Vol. 65/66/ P. 31–47.
- Röthlisberger H. Water pressure in intra- and subglacial channels // *J. Glaciol.*, 1972. Vol. 11. No 62. P. 177–203.
- Sukhanova A.A., Bantsev D.V., Popov S.V., Boronina A.S., Shimanchuk E.V., Polyakov S.P. The current state of Lake Dâlk (Larsemann Hills, East Antarctica) // *Polar Sci.*, 2023, V. 38. P. 101006, [https://doi: 10.1016/j.polar.2023.101006](https://doi.org/10.1016/j.polar.2023.101006).
- Thorarinsson S. Chapter IX. The ice dammed lakes of Iceland with particular reference to their values as indicators of glacier oscillations // *Geografiska Annaler*, 1939. Vol. 21. No. 3–4. P. 216–242.
- Flowers G.E., Björnsson H., Pálsson F., Clarke G.K. A coupled sheet-conduit mechanism for jökulhlaup propagation // *Geophysical research letters*, 2004. Vol. 31. No 5. P. L05401. [https://doi:10.1029/2003GL019088](https://doi.org/10.1029/2003GL019088).
- WMO, 2023: Provisional State of the Global Climate 2023, pp. 13–14.