

Гидрологические исследования прорывных озер антарктических оазисов

Г. В. Пряхина*, А. С. Боронина*,
С. В. Попов***, А. А. Четверова***

Представлены результаты детальных гидрологических исследований в ходе полевых работ 2017—2019 гг., выполненных в районе оазиса Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида. Рассмотрены особенности гидрологического режима озер этого района и характеристики гидрографов прорывных паводков, возникающих в результате сброса озерных вод через каналы в снежно-ледяных перемычках. Полученные с помощью математического моделирования расчетные гидрографы в целом не противоречат физической сущности процесса формирования прорывных паводков.

Ключевые слова: Восточная Антарктида, гидрология, прорывы озер, математическое моделирование.

Введение

Неотъемлемой частью ландшафтов антарктических оазисов являются водоемы, гидрологический режим которых формируется в зависимости от их генезиса, морфометрии и климатических условий. Несмотря на то что оазисы занимают не более 0,3% площади Антарктиды, для них характерно наличие озер с различными особенностями гидрологического режима: ежегодно вскрывающихся ото льда во время летнего сезона, сохраняющих ледяной покров в течение всего года, озер прибрежной зоны, сообщающихся с морскими водами, и т. д. В краевых частях ледников в непосредственной близости к оазисам имеются внутриледниковые водоемы, наличие и положение которых может быть определено либо в результате геофизической съемки, либо по следам их прорывов в виде обрушения кровли ледника. Многие водоемы примыкают непосредственно к ледникам или многолетним снежникам таким образом, что один из бортов озерной котловины выполняет роль подпруживающей снежно-ледяной плотины. В этих случаях особенностью их гидрологического режима является резкое понижение уровня воды в результате сброса озерных вод через каналы в снежно-ледяных перемычках. В этом процессе могут участвовать как одиночные водоемы, так и системы озер, прорыв одного из которых является

* Санкт-Петербургский государственный университет; e-mail: g65@mail.ru (Пряхина Галина Валентиновна).

** Полярная морская геологоразведочная экспедиция.

*** Арктический и антарктический научно-исследовательский институт.

импульсом для прорыва всей системы. Часто подобные явления имеют катастрофический характер и приводят к нарушению функционирования транспортно-логистических систем зимовочных станций. В качестве примера можно привести прорыв внутриледникового озера в январе 2017 г. в районе станции Прогресс (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида). Образовавшийся при этом паводок разрушил дорогу, соединяющую отечественную и зарубежную станции с аэродромом [15]. В конце января 2018 г. в другом районе континента случился аналогичный прорыв системы озер Разливное и Глубокое, которые располагаются в непосредственной близости от отечественной полевой базы Молодежная (Земля Эндерби, Восточная Антарктида). Несмотря на то что паводок имел меньший масштаб, проходящим потоком было снесено несколько металлических опор эстакады [3]. Кроме того, важно упомянуть о прорывах озер, расположенных на территории оазиса Ширмахера (Земля Королевы Мод, Восточная Антарктида), с которыми исследователи столкнулись при строительстве станции Новолазаревская в середине XX в. [1].

Необходимость детального изучения прорывных паводков диктуется современными изменениями климата, на фоне которых по всей планете растет число опасных гидрологических явлений разного рода, в том числе опасных прорывных явлений в Антарктиде, приносящих значительный урон инфраструктуре зимовочных станций и полевых баз. В настоящей работе представлены основные результаты двухлетних исследований прорывных озер п-ова Брокнес (район станции Прогресс, Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида). Рассмотрены особенности их гидрологического режима и характеристики гидрографов прорывных паводков, полученные на основе математического моделирования.

Современное представление об антарктических прорывных паводках

Гидрологические исследования водоемов и водотоков оазисов до недавнего времени были посвящены определению их морфометрических и гидрохимических характеристик, о чем свидетельствуют до сих пор не опубликованные архивные материалы Советской антарктической экспедиции и Российской антарктической экспедиции (РАЭ), а также работы отечественных и зарубежных исследователей. Также проводились наблюдения за уровнем, ледовым и термическим режимами озер [6, 8—10, 13, 14]. Сток на временных водотоках и ручьях измерялся в рамках балансовых исследований ледников. Такого рода работы выполнялись на озерах оазисов Ширмахера (Земля Королевы Мод), Бангера (Земля Уилкса) и Тала (Земля Эндерби). Упоминания о случаях прорыва водоемов имеются в фондовых материалах Арктического и Антарктического научно-исследовательского института, научно-технических отчетах и информационных бюллетенях САЭ и РАЭ, но имеют скорее характер информационных сообщений. Насколько известно авторам, описаний особенностей протекания процесса прорыва, оценок его влияния на изменение окружающего ландшафта и степени ущерба инфраструктуре, исследований, посвященных разработке системы оценок прорывоопасности водных объектов, систематизации прорывоопасных озер оазисов Восточной Антарктиды по меха-

низмам прорыва, выяснению основных причин цикличности прорывов озер и выявлению тенденции изменения их характера, в настоящее время нет. Постоянный мониторинг на прорывоопасных водоемах также не проводится. Исключением стали гидрологические работы, организованные на следующий год после катастрофического прорыва вод оз. Глубокое близ антарктической станции Новолазаревская в январе 1969 г. [7]. Тем не менее детальные исследования, направленные на понимание причин и механизмов формирования прорывных паводков, а также на оценку их характеристик, впервые были начаты именно на водоемах п-ова Брокнес в период проведения комплексных работ 63-й РАЭ (2017—2018 гг.) по обеспечению безопасности логистических операций [2]. Поводом послужило образование провала на трассе, соединяющей станцию Прогресс и аэродром, в результате прорыва внутриледникового озера с последующим обрушением кровли ледника. Еще до начала полевых работ авторами была сформулирована феноменологическая модель этого события [11], которая для своего подтверждения требовала проведения как полевых измерений, так и теоретических исследований с использованием математической модели, описывающей процесс формирования гидрографа прорывного паводка.

Исследования в районе оазиса Холмы Ларсеманн

Оазис Холмы Ларсеманн представляет собой район, большей частью свободный от ледникового покрова и состоящий из множества мелких (около 130) и двух наиболее крупных полуостровов Сторнес и Брокнес. Общая площадь территории составляет около 50 км², на юге ограничена склоном Восточно-Антарктического покровного ледника, а на юго-западе — ледником Долк.

Характерной особенностью оазиса Холмы Ларсеманн является наличие развитой гидрографической сети (более 150 пресных озер). В частности, на п-ове Брокнес имеется обширная система водных объектов, приуроченных к отрицательным формам рельефа [14].

В качестве исследуемых объектов были выбраны озера Прогресс, Сибторп, Дискашн, LH73, LH59, Рейд, Скандретт, Болдер, Ледяное и Степпед, расположенные вблизи российской станции Прогресс. Они имеют разные морфометрические характеристики, типы уровня и ледового режимов, а также отличия в источниках питания (рис. 1).

В состав экспедиционных работ входило оборудование гидрологических постов на восьми озерах оазиса, наблюдение за уровнем воды, измерение расходов воды, батиметрическая съемка, обследование каналов, через которые осуществлялся сток из озер. Методика гидрологических полевых исследований подробно изложена в публикациях [2, 5]. Для определения глубин на озерах, полностью или частично покрытых льдом, применялось бурение, а также георадиолокационное профилирование [5].

Несмотря на многочисленные свидетельства о происходящих прорывах водных объектов, в силу разных причин (отсутствия водомерной сети на водоемах оазисов, кратковременности явления, сложности составления прогнозов и т. д.) редко удается инструментально зафиксировать протекание процесса от его зарождения до завершающего этапа. Поэтому для изучения формирования прорывного паводка метод математического моде-



Рис. 1. Схема района проведения гидрологических работ (п-ов Брокнес, Восточная Антарктида).

1 — водомерные посты; 2 — пункты отбора проб на гидрохимический анализ; 3 — пункты измерений скорости течения потока; 4 — районы выполнения батиметрических съемок; 5 — районы выполнения тахеометрических съемок; 6 — провал в леднике Долк.

лирования часто является единственным способом, позволяющим оценить гидрологические характеристики прорывного паводка (объем паводка, время прохождения, максимальный расход воды). Имеется множество математических моделей, описывающих формирование и развитие прорывных паводков. Среди них можно выделить модель, предложенную Ю. Б. Виноградовым для прорывов озер, расположенных на поверхности ледника и временно запруженных снежно-ледяными перемычками [4]. Модель основана на численном решении системы, состоящей из уравнения неразрывности и закона сохранения энергии. Кроме того, в ней описывается посте-

пенное протаивание канала во льду при протекании через него воды. Ее преимущество перед остальными заключается в том, что входную информацию и параметры можно получить при выполнении полевых работ, не прибегая к расчетам по эмпирическим соотношениям. В качестве основных входных данных для выполнения расчета задаются батиметрическая схема озера, температура воды в водоеме перед прорывом, длина тоннеля, перепад высоты между его началом и концом. Таким образом, использовать модель без данных полевых исследований затруднительно, поэтому состав полевых работ по изучению прорывных озер был специально ориентирован на получение данных, которые в дальнейшем использовались в качестве входной информации при моделировании. Для условий Антарктиды авторы учли возможное наличие ледникового покрова над водоемом, адаптировав эту модель с целью изучения процессов, происходящих в случае гипотетических прорывов подледниковых водоемов и внутриледниковых полостей, заполненных водными массами. Кроме того, используемая в модели зависимость объема водной массы от глубины, выражаемая через аппроксимацию степенной функцией, заменена на реальные значения, взятые с цифровой модели рельефа [12].

Анализ результатов наблюдений за уровнями воды в течение полевых сезонов 63-й и 64-й РАЭ (2017—2019 гг.) позволил определить основные закономерности формирования режима озер п-ова Брокнес. Выяснено, что для большинства водоемов в весенне-летний период характерно увеличение уровня за счет поступления талой воды от сезонного снега, снежников и ледников, а в случае прорыва озерных вод через тоннели в снежно-ледяных перемычках или стока по ручьям — резкое его понижение. Однако сроки наступления, временной интервал (от нескольких часов до нескольких суток) и цикличность (от ежегодно повторяющихся до неперiodичных) прохождения прорывных паводков для каждого водоема определяются особенностями его морфометрии, морфологии, а также метеорологическими условиями конкретного года. Далеко не все озера в период двухлетней работы сезонных отрядов (конец декабря — конец февраля) прошли полный цикл заполнения озерной котловины до критического уровня и дальнейшей ее разгрузки посредством прорыва. В частности, в период работы 63-й РАЭ (2017—2018 гг.) удалось проследить полный цикл заполнения и прорыва оз. Дискашн (рис. 2а), а в период работы 64-й РАЭ (2018—2019 гг.) — заполнения и разгрузки оз. Прогресс (рис. 2б). В те же временные сроки другие озера находились на разных стадиях цикла. В частности, на оз. Скандретт 31 декабря 2017 г. было зафиксировано резкое понижение уровня воды (рис. 2в) в результате разрушения снежника в северо-восточной части водоема, а на оз. Дискашн это событие случилось только в середине января следующего года. Середина января 2019 г. ознаменовалась прорывом оз. Прогресс. Наполнение озерной котловины до критического уровня происходило до 14 января, после чего произошел его прорыв через снежник. При этом оз. Болдер, расположенное в непосредственной близости к леднику Долк, находилось в стадии повышения уровня воды с середины января до конца февраля 2019 г. (рис. 2г).

Согласно характеру изменений уровня воды в озерах, благодаря рекогносцировочным обследованиям каналов стока и личным сообщениям сотрудников станции Прогресс удалось выявить, что большинство озер п-ова Брокнес в отдельные годы гидравлически связаны между собой. Та-

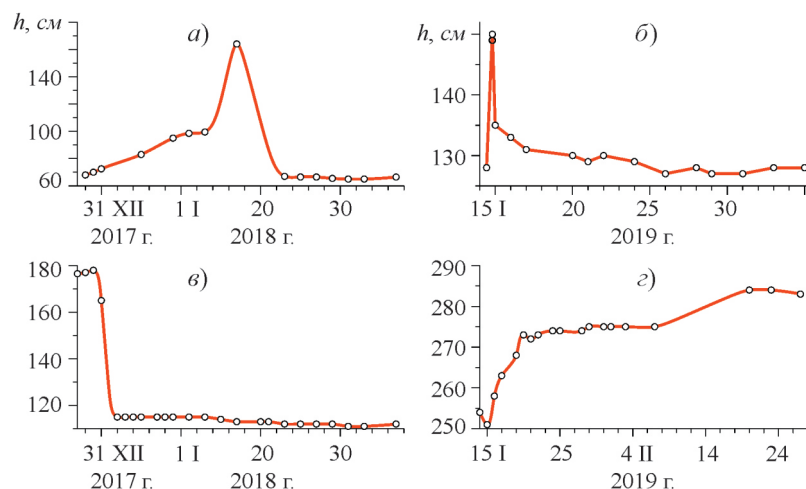


Рис. 2. Суточный ход уровня воды над нулем графика для озер: а) Дискашн (63-я РАЭ); б) Прогресс (64-я РАЭ); в) Скандретт (63-я РАЭ); з) Болдер (64-я РАЭ).

ким образом формируются системы водных объектов, прорыв одного из которых является триггером для остальных. Так взаимодействуют озера LN73 — Прогресс — Сибторп, а также LN59 — Дискашн и Болдер — Ледяное — внутриледниковый водоем в районе ледника Долк. Авторы полагают, что это далеко не полный перечень объектов, особенно если в формировании таких систем участвуют внутриледниковые водоемы, выявление которых визуальное невозможно и требует специальных исследований.

По результатам промерных работ на озерах были построены батиметрические схемы [2] и определены морфометрические характеристики ряда озер оазиса на момент съемки (см. таблицу). Следующим шагом станет подготовка схем геоморфологического содержания, которые отражают интенсивность и направленность экзогенных процессов, ведущим фактором которых выступает водная эрозия.

В качестве примера авторы приводят результаты моделирования, выполненного для двух озер, разных по морфометрическим характеристикам и цикличности прорывов: Прогресс и Дискашн. Последнее расположено в центральной части п-ова Брокнес, у западного берега Нелла Фьорд. Оно интересно ежегодными прорывами в результате быстрого переполнения котловины талыми водами снежников, находящихся на водосборной территории исследуемого водоема. Дополнительно приток в водоем осуществляется по ручью, берущему начало из озера LN59. Прорыв оз. Дискашн 22 января 2018 г. происходил по тоннелю, образованному в снежно-ледяной перемычке, подпруживающей водоем. Наибольшая высота тоннеля составляла 3 м при ширине более 8 м и длине 128 м. Поскольку к середине антарктического лета водоем практически полностью вскрылся от льда, то его наличие при моделировании не учитывалось. Перепад высоты на участке между входом в тоннель и выходом из него составил 2,17 м. Температура воды принята равной 5°C исходя из результатов наблюдений за температурой приповерхностного слоя на водомерном посту. Результаты расчета

**Морфометрические характеристики озер в районе станции Прогресс
(Восточная Антарктида, Холмы Ларсеманн)**

Озеро	Площадь, m^2	Объем, m^3	Длина	Ширина	Глубина	$h_{абс}$
			м			
Степпед	44440	51030	290	240	2,2/5,3	18,86
Рейд	35530	40450	330	145	1,1/3,5	44,82
Скандретт	157920	1490700	890	240	9,4/17,6	31,15
Дискашн	24270	60140	220	140	2,5/4,8	17,64
Сибторп	56720	37835	430	250	0,7/8,3	72,30
LN73	23820	39400	230	140	1,7/3,2	99,65
Прогресс	125730	1526750	665	330	12,1/42,5	72,60

Примечание. Приведено максимальное значение ширины озера, для глубины — ее среднее (числитель) и максимальное (знаменатель) значение; $h_{абс}$ — абсолютная отметка поверхности воды на момент съемки.

(рис. 3) показали, что максимальный расход воды составил $1,8 \text{ м}^3/\text{с}$ и был достигнут через 7 ч 37 мин после начала истечения. Объем воды паводка составил 26 750 м^3 при общем времени истечения потока в Нелла Фьорд 9 ч 40 мин.

Особенность режима оз. Прогресс, одного из самых больших и глубоких озер п-ова Брокнес, заключается в том, что за время антарктического лета водоем не всегда вскрывается ото льда полностью. Кроме того, озеро является частью гидрологической системы, результатом прорыва которой может стать разрушение транспортного сообщения зимовочных станций с аэродромом. В связи с этим трудно переоценить необходимость мониторинга характеристик прорывных паводков, формирующихся в данной системе. При моделировании длина тоннеля, образованного при прорыве в снежнике, принималась равной 150 м с перепадом высоты на участке около 1 м. Температура воды принята равной 8°C исходя из результатов наблюдений за температурой приповерхностного слоя на водомерном посту перед прорывом. Результаты моделирования (см. рис. 3) показали, что гидрограф характеризуется плавной, но асимметричной формой без резких скачков значений расходов воды. Максимальный расход воды составил $3,6 \text{ м}^3/\text{с}$ и был достигнут через 9 ч после начала истечения. Общее время истечения составило около 13 ч, а объем воды паводка — 76 320 м^3 .

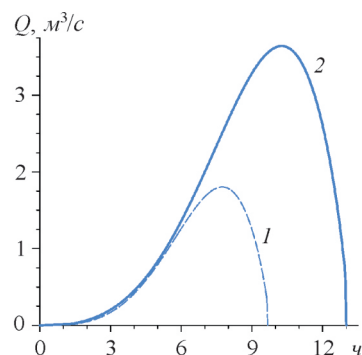


Рис. 3. Рассчитанные гидрографы прорывного паводка на озерах Дискашн (1) и Прогресс (2).

В целом представленные модельные гидрографы характеризуются постепенным нарастанием значений расходов воды в период разрушения перемычки и формирования тоннеля стока и быстрым спадом после достижения максимального значения, что не противоречит физической сущности процесса. Моделирование в обоих случаях осуществлялось в рамках модели, описанной в работе [12].

Заключение

В ходе исследований рассмотрены озера оазиса Холмы Ларсеманн, имеющие разные морфометрические характеристики и условия формирования прорывов. Анализ полученных полевых данных позволил выявить важную особенность их гидрологического режима — разгрузку озерных вод в весенне-летний период через тоннели в снежно-ледяных перемычках. В зависимости от морфологии, морфометрических характеристик озерных котловин, ледового и термического режимов конкретного года прорывы характеризуются разными временным интервалом и цикличностью.

Результаты математического моделирования показали, что в целом расчетные гидрографы не противоречат физической сущности процесса формирования прорывных паводков и модель может быть использована для оценочных расчетов максимальных расходов, объемов и времени прохождения паводка в отсутствие непосредственных наблюдений за стоком.

В условиях изменения климата для обеспечения безопасности инфраструктуры станций крайне актуальным становится мониторинг прорывоопасных водоемов, составной частью которого должны быть не только комплексные экспедиционные исследования, но и модельные расчеты при различных сценариях развития процесса прорыва. Авторы полагают, что процесс формирования прорывных паводков озер Холмов Ларсеманн схож с формированием этого явления и на других оазисах Восточной Антарктиды, что делает этот район эталонным объектом по изучению прорывных озер и отработке методов физического и математического моделирования для оценок характеристик данного явления.

Авторы признательны сотрудникам ООО “Геофизпоиск” В. И. Кашкевич, Н. Е. Романовой, А. Л. Борисику; сотрудникам СПбГУ М. П. Кашкевич, С. В. Тюрину, А. М. Белову, К. В. Титову за предоставленную аппаратуру и помощь в подготовке к полевым работам; сотрудникам ААНИИ А. В. Миракину, Г. А. Дешевых, а также студентам и аспирантам СПбГУ С. Д. Григорьевой, А. А. Сухановой за помощь в работе.

Научное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00421.

Литература

- 1. Аверьянов В.** Наводнение на станции Новолазаревской. — Информ. бюллетень Советской антарктической экспедиции, 1965, № 52, с. 73—74.
- 2. Боронина А. С., Попов С. В., Пряхина Г. В.** Гидрологическая характеристика озер восточной части полуострова Брокнес, холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида. — Лед и снег, 2019, т. 59, № 1, с. 39—48; doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-39-48.
- 3. Боронина А. С., Четверова А. А., Попов С. В., Пряхина Г. В.** Обзор потенциально прорывоопасных озер и последствия прохождения их паводков в районах холмов Тала и Ларсеманн (Восточная Антарктида). /В сб.: II Всероссийская научно-практическая конференция “Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России”, 5—7 июня 2019 г., Иркутск, с. 307—318.
- 4. Виноградов Ю. Б.** Метод расчета гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера. — Селевые потоки, 1976, сб. 1, с. 138—153.

5. Григорьева С. Д., Рыжова Е. В., Попов С. В., Кашкевич М. П., Кашкевич В. И. Строение приповерхностной части ледника в районе бухты Тала (Восточная Антарктида) по результатам георадарных работ сезона 2018/19 г. — Проблемы Арктики и Антарктики, 2019, т. 65, № 2, с. 201—211.
6. Кауп Э. Б. Водоемы оазиса Ширмахера. Общая характеристика, температурный и радиолокационный режим. — Информ. бюллетень САЭ, 1981, № 102, с. 75—84.
7. Клоков В. Д. 15-я Советская антарктическая экспедиция. Отчет о гляцио-гидрологических работах в районе ст. Молодежная в сезон 1969—1970 гг. — Фонды ААНИИ, 1970, № 0-1790, 34 с.
8. Клоков В. Д. Прорыв вод из озера Глубокого на станции Молодежной. — Информ. бюллетень САЭ, 1969, № 72, с. 68—72.
9. Кручинин Ю. А., Симонов И. М. Новый тип озер в Антарктиде. — Информ. бюллетень САЭ, 1967, № 66, с. 12—17.
10. Лоопман А. А. Новые данные о режиме озер оазиса Ширмахера. /В сб.: Двадцать девятая советская антарктическая экспедиция: Зимовочные исследования 1983—1985 гг.: Общее описание и научные результаты (Труды САЭ, т. 87). Под ред. Л. В. Булатова. — Л., Гидрометеиздат, 1990, с. 106—126.
11. 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 холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида) в 2017—2018 гг. — Гео-риск, 2018, т. XII, № 3, с. 56—67.
12. Попов С. В., Пряхина Г. В., Боронина А. С. Оценка расхода воды в процессе развития прорывного паводка ледниковых и подледниковых водоемов. — Криосфера Земли, 2019, т. 23, № 3 (95), с. 25—32.
13. Byrd R. E. Our Navy explores Antarctica. — Nat. Geogr. Mag., 1947, vol. 92, No. 4, pp. 429—522.
14. Gillieson D. S. An environmental history of two freshwater lakes in the Larsemann Hills, Antarctica. — Hydrobiologia, 1991, vol. 214, No. 1, pp. 327—331.
15. Popov S. V., Pryakhin S. S., Bliakharskii D. P., Pryakhina G. V., and Tyurin S. V. Vast ice depression in Dalk Glacier, East Antarctica. — Ice and Snow, 2017, vol. 57, No. 3, pp. 427—432; doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-427-432.

Поступила в редакцию 7 X 2019 г., после доработки 30 X 2019 г., принята к публикации 31 X 2019 г.

HYDROLOGICAL STUDIES OF LAKE OUTBURSTS IN THE ANTARCTIC OASES

G. V. Pryakhina, A. S. Boronina,
S. V. Popov, and A. A. Chetverova

The results of detailed hydrological field studies in 2017–2019 in the area of the Larsemann Hills, East Antarctica are presented. The features of the hydrological regime of lakes in this area and the characteristics of hydrographs of outburst floods resulting from the lake water discharge through channels in the snow-ice dams are analyzed. The hydrographs calculated by the mathematical modeling do not generally contradict the physical essence of the process of formation of outburst floods.