

# Прикладные проблемы

УДК 556.5+551.32+551.4

doi: 10.31857/S2076673420040065

## Прорыв озера Прогресс (Восточная Антарктида): подходы к оценке характеристик прорывного паводка

© 2020 г. Г.В. Пряхина<sup>1\*</sup>, А.А. Четверова<sup>1,2</sup>, С.Д. Григорьева<sup>2,1</sup>, А.С. Боронина<sup>1</sup>, С.В. Попов<sup>3,1</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;<sup>2</sup>Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия;<sup>3</sup>Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, Россия

\*g65@mail.ru

## Breakthrough of Lake Progress (East Antarctica): a phenomenological model and approaches to assessing the characteristics of a flash flood

G.V. Pryakhina<sup>1\*</sup>, A.A. Chetverova<sup>1,2</sup>, S.D. Grigorieva<sup>2,1</sup>, A.S. Boronina<sup>1</sup>, S.V. Popov<sup>3,1</sup><sup>1</sup>Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; <sup>2</sup>Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia;<sup>3</sup>Polar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia

\*g65@mail.ru

Received November 21, 2019 / Revised March 17, 2020 / Accepted September 9, 2020

Keywords: Antarctic lakes, East Antarctica, geophysics, hydrograph modeling, hydrology, outburst/breakthrough flood, Progress Station.

### Summary

On January 14, 2019, a breakthrough of water masses occurred on the Lake Progress (the oasis of the Larsemann hills, East Antarctica) with the formation of a flash flood. During the summer field seasons of the 63rd and 64th Russian Antarctic Expeditions (2017–2019), comprehensive hydrological, GPR and geodetic surveys were conducted in this area to ensure the safety of transport operations. The results of field measurements and calculations based on mathematical modeling of the breakthrough flood from the Lake are presented. The purpose of this study was to compare field observations and model calculations of the breakthrough flood and then to verify the existing model of Yu.B. Vinogradov on real data, since detailed observations of breakthrough floods of lakes of the Antarctic oases have not been previously carried out. The results of complex hydrological and geophysical investigations of LH73–Progress–Sibtorp lake system focused on areas where lake outburst are possible (snow-ice dams) made possible to formulate phenomenological model of the outburst process. It was emphasized that the lake water was discharged through a tunnel developed in the snow–ice dam, which subsequently evolved into a real riverbed. The maximum water discharge was formed approximately in 7.5 h after the start of the outflow, and it was estimated  $5.4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  according to the in-situ measurements, and  $4.94 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  – by the model. The calculated volume of the flood is  $76\,320 \text{ m}^3$ . The differences between the model and in-situ measurements are about 9% that can be explained by the fact that the time of water retention by the snow-ice dam is not considered in the model.

**Citation:** Pryakhina G.V., Chetverova A.A., Grigorieva S.D., Boronina A.S., Popov S.V. Breakthrough of Lake Progress (East Antarctica): a phenomenological model and approaches to assessing the characteristics of a flash flood. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020. 60 (4): 613–622. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420040065.

Поступила 21 ноября 2019 г. / После доработки 17 марта 2020 г. / Принята к печати 9 сентября 2020 г.

**Ключевые слова:** Антарктические озёра, Восточная Антарктида, геофизика, гидрология, моделирование гидрографа, прорывной паводок, станция Прогресс.

При исследованиях в 2018/19 г. в районе станции Прогресс (Восточная Антарктида) авторы наблюдали прорыв системы озёр Прогресс–Сибторп. Приводятся феноменологическое описание этого процесса, а также результаты наблюдений и математического моделирования.

### Введение

Водоёмы — характерные элементы ландшафта антарктических оазисов. Особенность их гидрологического режима заключается в формировании прорывных паводков в весенне-летние

сезоны. Как правило, эти явления случаются в период максимального таяния ледников и снежников, талые воды которых служат основным источником питания озёр. В публикациях отечественных и зарубежных исследователей, а также в фондовых материалах Советской антарктиче-

ской экспедиции (САЭ) и Российской антарктической экспедиции (РАЭ) приводятся многочисленные свидетельства подобных случаев. В качестве показательных примеров можно привести катастрофические сбросы водных масс на озёрах оазисов Ширмахера, Тала и холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида) [1–4]. Так, оз. Глубокое, расположенное в непосредственной близости от полевой базы Молодёжная (оазис Тала, Восточная Антарктида), прорывается с периодичностью около 10 лет, что отрицательно влияет на инфраструктуру станций [5]. Для Восточной Антарктиды можно привести и другие примеры прорывоопасных водных объектов, сбрасывающих водные массы практически каждое антарктическое лето [6]. В районе станции Новозазаревская (оазис Ширмахера) для предотвращения переполнения оз. Лагерное сотрудниками РАЭ был оборудован специальный водоотводный канал для обеспечения постоянного оттока водных масс. На оз. Южное в один из летних сезонов начала 1960-х годов уровень воды повысился на 3,5 м, что привело к его опорожнению через снежную перемычку. Озёрная вода хлынула в район тогда ещё строящейся станции. Для её спасения от затопления было решено прорыть обводный канал, который отвёл паводковые воды оз. Южное в другой водоём [1, 7].

Аналогичные процессы наблюдаются и на озёрах п-ова Брокнес (холмы Ларсеманн). В ходе зимовки 48-й РАЭ, 10 ноября 2003 г., из-за разрушения снежно-ледовой перемычки произошёл прорыв вод из оз. Прогресс в оз. Сибторп, в результате которого в снежнике, расположенном между водоёмами, образовались провалы глубиной до 8 м и протяжённостью до 100 м (*не опубликовано*). Подобное событие повторилось и летний полевой сезон 59-й РАЭ (2013/14 г.), когда 1 января 2014 г. резко упал уровень воды в оз. Прогресс в результате разрушения снежно-ледовой перемычки. Сброс продолжался около полутора суток, а уровень снизился на 0,72 м [8]. В сезон 62-й РАЭ (2016/17 г.) залповый перелив воды из оз. Прогресс в оз. Сибторп произошёл 4 января 2017 г. [8]. Согласно оперативной сводке об основных экспедиционных событиях и операциях РАЭ за период с 22 февраля по 1 марта 2018 г., в конце февраля 2018 г. произошёл ещё один резкий сброс вод оз. Прогресс. Поток достигал ширины 4 м и глубины 1,5 м (*не опубликовано*).

Прорывные паводки, формирующиеся при последовательном сбросе водных масс из озёр ЛН73–Прогресс–Сибторп, – причина разрушения снежников, по которым проходит трасса, соединяющая станции Прогресс и Зонгшан с взлётно-посадочной полосой. Ещё один яркий пример – образование обширного провала в районе полевой базы Прогресс-1 на месте внутриледникового озера, которое существовало вплоть до начала 2017 г. По мнению авторов, одна из основных причин его формирования – прорыв оз. Болдер, расположенного поблизости [9]. Кроме того, в центральной части п-ова Брокнес, у западного берега залива Нелла Фьорд располагается система из относительно небольших водоёмов: озёра ЛН59 и Дискашн. При анализе современного картографического материала [10, 11] и рекогносцировочном обследовании в полевые сезоны 63-й и 64-й РАЭ (2017–2019 гг.) авторы обнаружили следы частых прорывов озёр через снежник [12, 13].

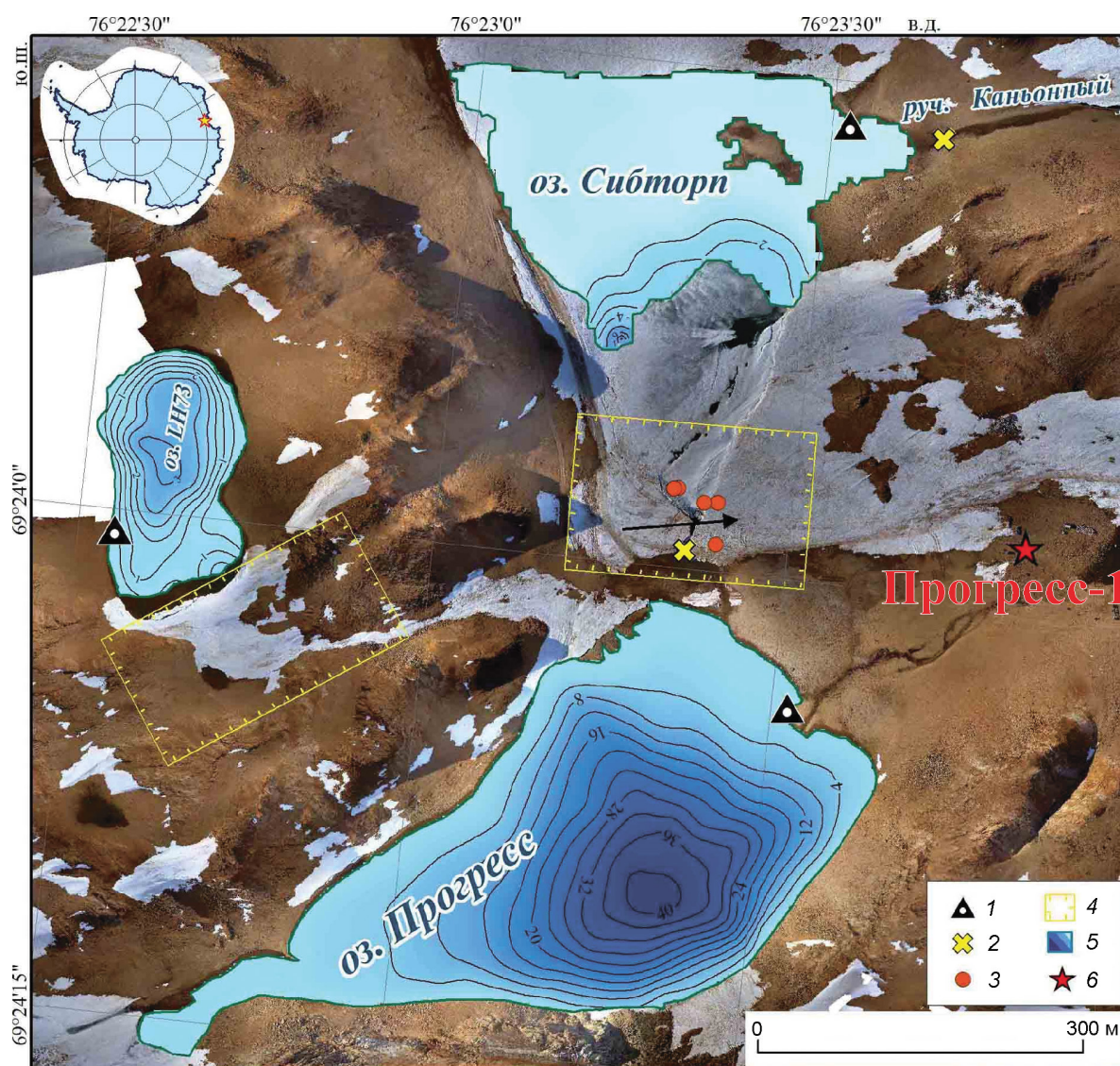
Однако, несмотря на многочисленные свидетельства о происходящих прорывах водных объектов, из-за разных причин (отсутствие водомерной сети на водоёмах оазисов, кратковременность явления, сложность в составлении прогнозов и т.д.) редко удаётся инструментально зафиксировать ход процесса с момента его зарождения до завершающего этапа. Исследователи часто имеют возможность наблюдать либо непосредственно активное прохождение прорывного паводка в виде потоков воды в ледяных каналах или поверхностном слое фирна, либо метки высоких вод на бортах долин, к которым приурочены озёра. Использование математических моделей для расчётов и прогнозов прорывов озёр в этом случае затруднено из-за невозможности верификации результатов моделирования.

При полевых работах в сезон 64-й РАЭ (2018/19 г.) авторы детально описали процесс прорыва оз. Прогресс 14 января 2019 г. через канал, образовавшийся в снежнике, между озёрами Прогресс и Сибторп. Это позволило впервые для прорывных озёр антарктических оазисов сопоставить характеристики прорывных паводков, полученные по материалам наблюдений, с данными математического моделирования. Таким образом, основная цель настоящего исследования – оценка адекватности алгоритма модели, описывающей процесс формирования прорывного паводка применительно к озёрам антарктических оазисов.

### Объекты исследования

Оазис холмы Ларсеманн (Larsemann Hills) располагается в Восточной Антарктиде между холмами Вестфоль (Vestfold Hills) и шельфовым ледником Эймери (Amery Ice Shelf) на юго-восточном берегу залива Прудс (Prydz Bay), Земля Принцессы Елизаветы (Princess Elizabeth Land). Его характерная особенность – обилие озёр, часть из которых образовалась в результате подпруживания тектонических долинных понижений ледниками и

снежниками [1]. Обсуждаемая система водных объектов представлена тремя водоёмами, самое большое и глубокое из которых – оз. Прогресс (рис. 1). По данным батиметрической съёмки 20 января 2019 г. его длина составила 870 м при максимальной ширине 360 м, площади водного зеркала около 115 тыс. м<sup>2</sup> и максимальной измеренной глубине 42 м. К северу от него располагается оз. Сибторп. Его максимальная глубина, зафиксированная во время батиметрической съёмки 2019 г., – 8,3 м [13]. Как правило,



**Рис. 1.** Схема расположения исследуемой системы озёр с указанием состава полевых работ сезона 64-й РАЭ: 1 – водомерные посты; 2 – пункты измерения скоростей течения потока; 3 – пункты бурения; 4 – районы георадарного профилирования; 5 – схема глубин; 6 – полевая база. Стрелкой показано расположение георадарного маршрута

**Fig. 1.** Studied lakes and field work composition during the field season of 64<sup>th</sup> RAE: 1 – water level gauging points; 2 – water velocity gauging points; 3 – drilling points; 4 – areas of georadar profiling; 5 – bathymetric schemes; 6 – field base. The arrow shows the location of the georadar route

за время антарктического лета водоём вскрывается ото льда лишь частично. Максимальные размеры озера были определены только по данным аэрофотосъёмки 8 января 2018 г. Они составляют примерно 650×400 м при площади поверхности 99,58 тыс. м<sup>2</sup> [12]. В восточной части ширина озера существенно уменьшается и оно постепенно переходит в ручей Каньонный, который связывает водоём с бухтой Тюленьей (см. рис. 1). В юго-восточной части водоёма находится снежник, который служит плотиной, подпирающей озёрные воды. Трасса, соединяющая станции Прогресс и Зонгшан со взлётно-посадочной полосой, которая проходит именно в этом месте по снежнику, безусловно попадает в зону риска возможного разрушения.

Третье озеро, имеющее отношение к обсуждаемой системе водных объектов, — LH73. Оно расположено в овальной котловине, в непосредственной близости к озёрам Прогресс и Сибторп, примерно на 50–60 м выше уровня оз. Прогресс. По данным батиметрической съёмки 15 января 2019 г. его длина составляет 230 м при максимальной ширине около 140 м и глубинах до 3,4 м. Площадь акватории LH73 оценивается в 23,82 тыс. м<sup>2</sup> при объёме водной массы около 39,4 тыс. м<sup>3</sup>. Прорыв оз. LH73 обычно происходит через снежно-ледовую перемычку, подпруживающую его с южной стороны, при переполнении озёрной котловины водой. Когда напряжение, оказываемое на перемычку, возрастает, она разрушается, а поток устремляется к оз. Прогресс, выступая в качестве дополнительного триггерного импульса его последующего прорыва. При полевых работах сезона 64-й РАЭ (2018/19 г.) авторы стали свидетелями полного цикла прорыва системы озёр Прогресс–Сибторп. При этом из оз. LH73 в оз. Прогресс наблюдался лишь временный водоток, режим которого не носил катастрофического характера и проходил под снежником, образуя конус выноса в месте впадения в приёмный водоём.

### Материалы и методы полевых работ

В процессе работ, проводимых по обеспечению безопасности транспортного сообщения между базой Прогресс и аэродромом, в сезоны 63-й и 64-й РАЭ (2017–2019 г.) на системе озёр LH73–Прогресс–Сибторп был выполнен комплекс гидрометрических работ и проведена геофизическая съёмка участков возможных прорывов (см. рис. 1). Все по-

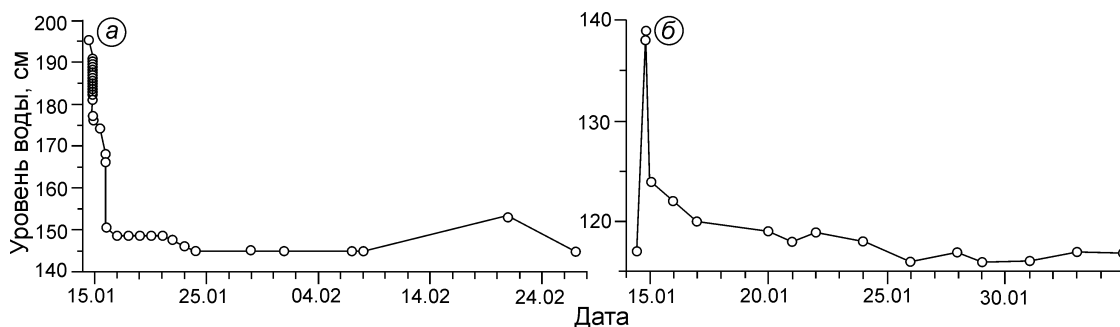
лученные натурные данные легли в основу феноменологического описания произошедшего прорыва и количественной оценки его характеристик.

**Гидрологические методы.** Гидрологические работы предусматривали батиметрическую съёмку озёр Прогресс, Сибторп и LH73 и наблюдения за уровнями воды указанных водоёмов, которые выполняли на временных водомерных постах, а в период прорыва фиксировали через каждые 5 мин. Батиметрическую съёмку озёр проводили с надувной вёсельной лодки Ак-Идель (Россия) с использованием эхолота Echomap Plus42CV (Garmin Ltd., Taiwan). Измерения вели по заранее намеченным маршрутам и выполняли по схеме поперечных галсов и двух продольных профилей в направлении наибольшей протяжённости озера. Точность измерения глубин составила 0,1 м при минимально допустимой глубине 0,3 м. Методика и описание этих исследований подробно изложены в работе [12]. Кроме того, выполнялась тахеометрическая съёмка прибрежных территорий озёр до уровня высоких вод. Для этого использовали электронный тахеометр Trimble M3 DR 5" (Trimble Navigation, Ltd., USA). Методика обработки данных детально приводится в работе [13].

**Геофизические методы.** Георадарные работы вели на частотах 500 и 900 МГц с помощью промышленных приборов Zond 12e-M (RadSys Ltd., Латвия). Полученные данные обрабатывали в программном пакете Prism 2.60 (RadSys Ltd., Латвия), которые включали в себя выполнение стандартных процедур. Планово-высотную привязку вели с помощью DGPS-приёмников EFT M2 GNSS (ООО «Эффективные технологии, Россия»), а в ряде случаев — спутниковыми приёмоиндикаторами Garmin GPSMap 62 и GPSMap64 (Garmin Ltd., США). Георадарную съёмку (см. рис. 1) выполняли по маршрутам, субортогонально пересекающим канал прорыва. Это позволило выявить особенности строения снежно-ледовой перемычки, через которую позже произошёл прорыв озера. Методика и описание этих исследований приведены в работе [14].

### Результаты полевых работ

Натурные наблюдения показывают, что прорыв оз. Прогресс проходил следующим образом. В 11 ч утра 14 января 2019 г. уровень воды в нём



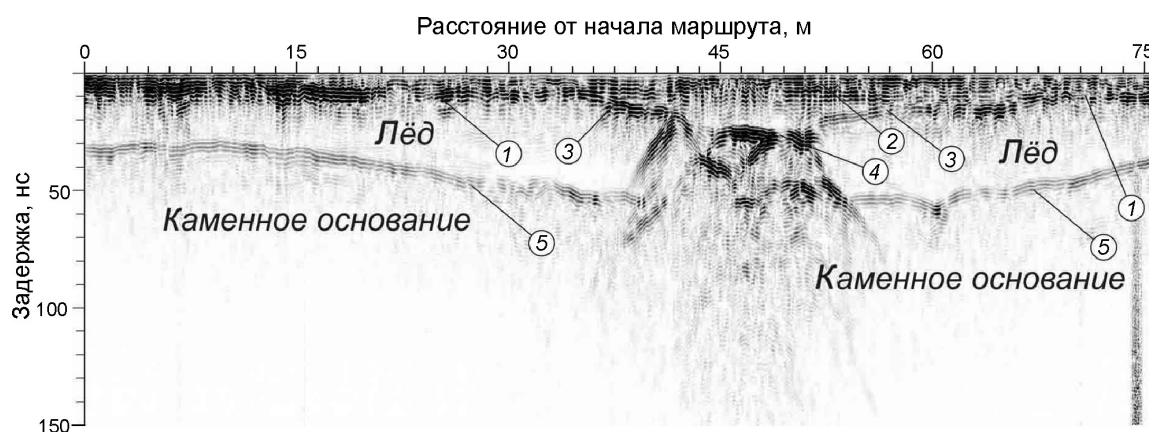
**Рис. 2.** Ход уровня водной поверхности озёр Прогресс (а) и Сибторп (б) во время прохождения прорывного паводка в 2019 г.

**Fig. 2.** Water level of Progress (a) and Sibthorpe (b) lakes during the outburst flood in 2019

начал стремительно падать и за 36 ч понизился на 0,50 м (рис. 2, а). Повышение уровня связанного с ним оз. Сибторп (см. рис. 2, б) происходило примерно в течение 7 часов. Через полтора часа от начала наиболее интенсивной фазы прорыва оз. Прогресс уровень воды в оз. Сибторп достиг так называемого критического значения, после которого произошёл сброс озёрных вод по ручью Каньонный (см. рис. 1). Таким образом, период наблюдений за уровнем воды оз. Сибторп охватил фазы наполнения водоёма и сброски части его объёма в результате прорыва, при этом амплитуда колебания уровня составила 0,22 м (см. рис. 2, б). Как отмечалось ранее, материалы георадарной съёмки позволяют судить о строении снежно-ледовой плотины, через которую произошёл прорыв оз. Прогресс. Один из

наиболее показательных временных георадарных разрезов по профилю PR\_1401\_02 показан на рис. 6. Его положение приведено на рис. 1.

На разрезе (рис. 3) прямая волна, соответствующая дневной поверхности, отсутствует, так как для улучшения его восприятия была проведена горизонтальная фильтрация, позволяющая устранить многочисленные помехи. Однако, поскольку имелись исходные данные, её положение было известно и совмещено с нулём вертикальной оси. Ниже имеется интенсивное отражение 1. Оно сформировано от границы раздела между снегом и льдом. Последний непроницаем для талой воды, проникающей главным образом сквозь снег и скапливающейся на границе со льдом. Это увеличивает коэффициент отражения и, как следствие, усиливает контрастность грани-



**Рис. 3.** Временной георадарный разрез по маршруту, выполненному на снежнике, где образовался проран. Отражение, сформированное границей раздела: 1 – снег–лёд; 2 – снег–фирн; 3 – фирн–лёд; 4 – фирн–каменное основание; 5 – лёд–каменное основание

**Fig. 3.** GPR time-section along a route made on a snowfield where a channel was formed  
Reflections formed by: 1 – snow–ice interface; 2 – snow–firn interface; 3 – firn–ice interface; 4 – firn–bedrock interface; 5 – ice–bedrock interface



цы на временном разрезе. Слой льда, вероятно, мог сформироваться в результате перекристаллизации мелкозернистого снега в крупнокристаллический фирн и глетчерный лёд, быть «инфильтрационным», т.е. образованным за счёт повторного замерзания талой воды, поступающей с поверхности, или иметь смешанное происхождение.

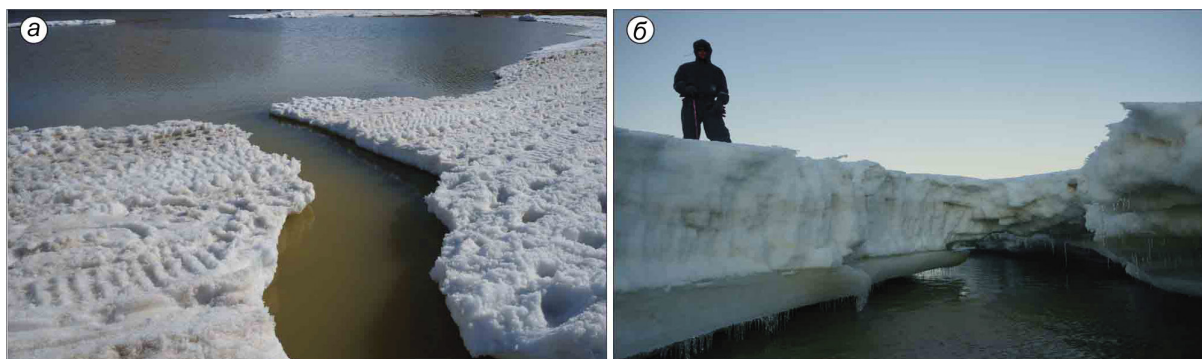
В центральной части разреза отражение 1 переходит в 2. Сверху – по-прежнему снег, но внизу вместо льда, видимо, метаморфизованный снег, т.е. фирн. Он заполнил тоннель, выработанный в леднике озёрной водой за многие годы и заметный в своё время снегом, который с течением времени претерпел трансформацию. Отражение 3 образовано границей между ним и льдом. В правой части оно менее контрастно. Это связано с тем, что талая вода, просочившись сквозь снег и фирн, стекла по наклонной ледяной стенке вниз, скопившись на нижней поверхности 4, увеличив её диэлектрическую контрастность. Диэлектрическая проницаемость между плотным фирном, претерпевшим неоднократный фазовый переход, и льдом незначительна, поэтому и граница 3 в правой части разреза слабоконтрастная. В левой части граница 3 более контрастна. Это связано, вероятно, с наличием талой воды, небольшое количество которой есть на поверхности льда. Границей 5 служит каменное основание, возможно перекрытое маломощными рыхлыми породами, например песком. На это указывают общая окружающая ситуация и отсутствие нижележащих границ. Чем является граница 4 – до конца не ясно. Авторы склоняются к тому, что её нижележащая часть сложена отдельными, возможно, смёрзшимися каменными блоками. Можно также предположить, что канал прорыва представляет собой так называемый «унаследованный» канал, который сформировался в понижении рельефа благодаря тому, что в этом месте происходит концентрация талой воды, стекающей внутри снежника. Накапливаясь, вода создаёт зону, наиболее уязвимую для прорыва.

Данные наблюдений, полученные в полевых условиях, позволили сформулировать феноменологическую модель прорыва оз. Прогресс следующим образом. До начала активного снеготаяния уровень воды в водоёме располагался достаточно низко и непроницаемый для воды лёд, расположенный в нижней части снежника, сдер-

живал водную массу. На справедливость этого утверждения указывают натурные наблюдения. При дальнейшем поступлении талой воды уровень в озере постепенно повышался. Достигнув снежно-фирновой толщи, вода начала медленно проникать в приповерхностный слой снежника, значительно увеличивая его влажность и расширяя зону фильтрации. Температура снега повысилась до температуры фазового перехода, после чего начали образовываться постепенно расширяющиеся микроканалы для стока воды. Самым благоприятным для прорыва участком оказался унаследованный канал стока, заполненный снежно-фирновым материалом, который хорошо прослеживается на георадарном профиле. Именно здесь происходили наиболее интенсивная фильтрация и накопление воды из-за тонких ледяных корок, играющих на первом этапе роль водоупора. Этот процесс длился до момента разрушения корок и быстрого сброса воды в канал. Затем поток устремился по уклону, промывая снежник до каменного основания (рис. 4). При этом расширение канала к концу участка обусловлено уклоном, увеличивающим скорость потока и, следовательно, его энергию.

#### **Расчёт гидрографа прорыва по данным полевых наблюдений и с помощью математической модели**

Характеристики прорывного паводка из оз. Прогресс (гидрограф стока, максимальный расход воды и продолжительность паводка) оценивали на основе данных натурных наблюдений и с использованием математического моделирования. При исследовании *на основе данных натурных наблюдений* для построения гидрографа стока расходы определяли по разности объёмов, рассчитанных на основе данных об измеренных уровнях вытекающей из озера воды, отнесённой ко времени истечения (каждые пять минут). Для этого по материалам полевых работ была составлена батиметрическая кривая (рис. 5). Сложность её построения заключалась в том, что глубины озера были измерены уже после его прорыва, когда уровень воды стал значительно ниже. Для восстановления данных съёмку глубин пришлось дополнить материалами о рельефе прибрежной территории. Цифро-



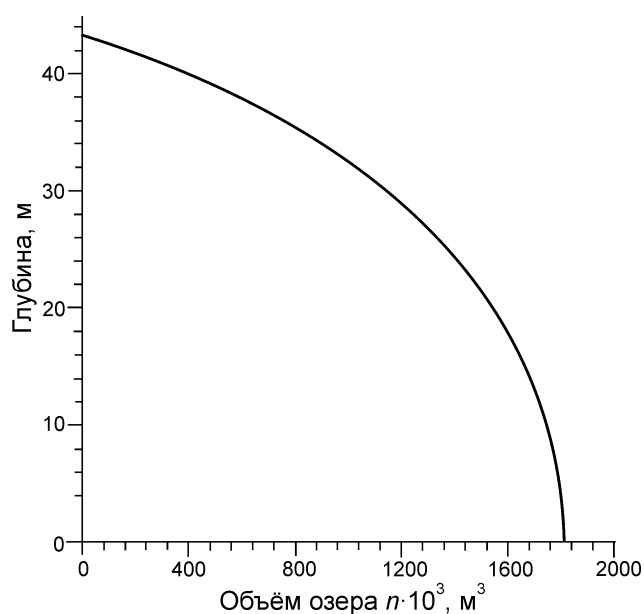
**Рис. 4.** Этапы развития канала прорыва из оз. Прогресс  
**Fig. 4.** Stages of development of outburst channel from Lake Progress

вая модель (грид высот каменного основания) осушившейся придонной части была заимствована из результатов Международного проекта The Reference Elevation Model of Antarctica (REMA) [15]. Затем, в пределах озера, она была заменена постоянным значением, равным абсолютной высоте поверхности акватории после прорыва. После этого из последнего вычитался грид глубин оз. Прогресс. Так удалось построить схему его глубин до прорыва и определить его морфометрические характеристики.

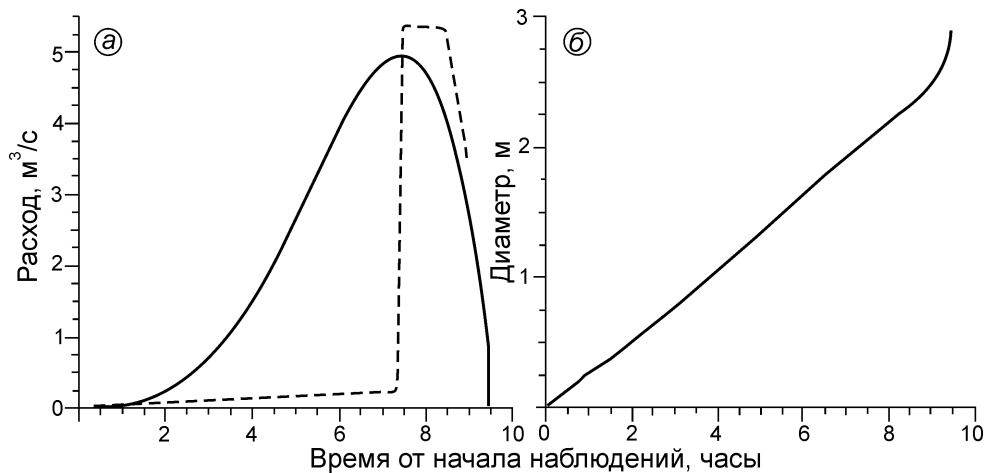
Анализ полученного графика (рис. 6, а) показал, что примерно в течение 7 часов расход воды из озера был незначительным, что, вероятно, соответствует фазе начала активной фильтрации в снежно-фирновую толщу. В этот момент вода удерживалась снежно-фирновой толщей и накапливалась на ледяных прослойках, выполняющих роль водоупора. Затем расход воды резко увеличился, что можно интерпретировать как начало образования сквозного канала. Согласно данным наблюдений, максимальный расход сформировался через 7 ч 30 мин после начала истечения и достиг величины  $5,4 \text{ м}^3/\text{с}$ . Оценить полный объем паводка не удалось, поскольку через 9 часов после его начала, на фазе спада, детальные наблюдения за уровнем пришлось прервать по организационным причинам и возобновить их лишь спустя 11 часов. На этот момент (через 20 часов после начала прорыва) основной объем воды был уже сброшен через выработанный в снежнике тоннель, которой в последующем развился до полноценного русла (см. рис. 4), и наступила стабилизация уровня.

Гидрограф прорывного паводка рассчитывался также с применением математической модели,

предложенной Ю.Б. Виноградовым [16] и адаптированной для водоёмов, перекрытых ледниковым покровом [17]. Модель основана на численном решении системы уравнений, главное из которых описывает преобразование потенциальной энергии воды, обусловленной разностью уровней, в кинетическую энергию движущегося потока и тепловую. Последняя вызвана трением воды о стенки канала, что приводит к таянию и его постепенному расширению. Модель достаточно подробно изложена в работе [17]. Основное преимущество этой модели среди прочих имеющихся расчётных способов [18–21] состоит в том, что входные данные для моделирования можно получить в полевых условиях при выполнении стандартных по-



**Рис. 5.** Батиметрическая кривая оз. Прогресс  
**Fig. 5.** The bathymetric curve of Lake Progress



**Рис. 6.** Гидрографы прорывного паводка, построенные на основании наблюдений за уровнем воды (пунктирная линия) и математической модели (сплошная линия) (а); изменение диаметра канала во времени (б)  
**Fig. 6.** Hydrographs of outburst flood based on water level in-situ measurements (dotted line) and hydrological model (solid line) (a); changing the diameter of the channel over time (b)

левых работ. В качестве исходной информации использованы: батиметрическая схема озера до прорыва, синтезированная в грид; разность отметок между точками входа в тоннель и выхода из него; длина тоннеля; температура воды в озере к моменту формирования прорыва, а также плотность и удельная теплоёмкость материала плотины. Результаты моделирования представлены в виде гидрографа прорывного паводка.

При анализе смоделированного гидрографа можно заметить, что он характеризуется плавной, но асимметричной формой, без резких изменений расхода воды (см. рис. 6, а). Максимальный расход воды составил  $4,94 \text{ м}^3/\text{с}$  и был достигнут через 7 ч 25 мин после начала истечения. Диаметр канала достиг своего максимального значения к моменту окончания прорыва и составил 2,9 м, что хорошо согласуется с наблюдениями (см. рис. 6, б). Рассчитанный объём паводка —  $76\,320 \text{ м}^3$ . Видно, что время прохождения максимального расхода воды в случае смоделированного гидрографа и натурального согласуются между собой. Максимальные величины расходов отличаются друг от друга не более чем на 9%. Различия в объёмах стока и форме гидрографов могут быть объяснены тем, что в модели не учитываются время и объём аккумуляции озёрной воды в снежно-фирновой толще в результате процесса фильтрации. По этой причине на рассчитанном гидрографе наблюдается более быстрое и плавное нарастание значений.

По результатам сравнения модельных и полученных по наблюдённым данным гидрографов напрашивается вывод, что предложенную модель можно использовать для оценочных расчётов характеристик прорывных паводков через снежно-фирновые перемычки. Усовершенствование методики расчёта авторы видят в учёте при моделировании фильтрации озёрной воды в снежно-фирновую толщу. Полученные результаты, по нашему мнению, представляют собой первый шаг к разработке методики прогнозов прорывных явлений и рекомендаций для проведения и организации полевых работ в подобных условиях. Принимая во внимание внезапность самого процесса прорыва и нередко опасность измерения непосредственных расходов воды, на первое место выходят методы моделирования и мониторинга уровенных режимов прорывоопасных озёр оазисов на стационарных постах.

### Заключение

Выполненное исследование позволило впервые инструментально зафиксировать все этапы формирования прорывного паводка — от начала образования прорывного канала до завершения течения по нему. На основе измеренных уровней и расходов воды оценены максимальные расходы и время протекания процесса. Геофизические работы дали возможность судить о



структуре канала и высказать предположение о причинах и месте его формирования. Авторы настоящей работы получили редкую возможность сравнить данные модельных расчётов с результатами наблюдений за прохождением прорывного паводка в условиях Антарктиды. Сопоставление результатов показало, что, несмотря на недоучёт в математической модели процесса первоначального задержания воды снежно-фирновой толщей, она может быть использована для оценочных расчётов.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность своим коллегам Г.А. Дешевых, Е.В. Рыжовой, А.А. Сухановой за помощь в проведении полевых работ; начальнику станции Прогресс А.В. Воевину за помощь в организации полевых исследований; А.В. Миракину за выполнение аэрофо-

тосъёмки; сотрудникам Института наук о Земле СПбГУ М.П. Кашкевич и ООО «ГеофизПоиск» В.И. Кашкевич за предоставленную геофизическую и геодезическую аппаратуру. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00421.

**Acknowledgments.** The authors would like to thank our colleagues G. Deshevych, E. Ryzhova, A. Sukhanova, the chief of the Progress station A. Voevodin and other involved people who supported our fieldwork during the field season; A. Mirakin for air survey of the study area; M. Kashkevich and our colleagues from «GeophysPoisk» and Institute of Earth science SPSU who provided us with hydrological, geophysical and geodetic equipment. The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project № 18-05-00421.

## Литература

1. *Симонов И.М.* Оазисы Восточной Антарктиды. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 176 с.
2. *Александров М.В.* Ландшафтная структура и картирование оазисов Земли Эндерби / Под ред. Е.С. Короткевича. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 152 с.
3. *Сократова И.Н.* Антарктические оазисы. Санкт-Петербург: ААНИИ, 2010. 274 с.
4. *Боронина А.С., Четверова А.А., Попов С.В., Пряхина Г.В.* Обзор потенциально прорывоопасных озёр и последствия прохождения их паводков в районах холмов Тала и Ларсеманн (Восточная Антарктида) // II Всерос. науч.-практ. конф. «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России», 5–7 июня 2019 г. Иркутск, 2019. С. 307–318.
5. *Александров М.В., Козловский А.М.* К исследованию озёр в окрестностях станции Молодёжной // Информ. бюл. САЭ. 1969. № 72. С. 34–40.
6. *Вайгачев А.З.* Прорыв ледяной «плотины» озера Лагерного // Информ. бюл. САЭ. 1965. № 54. С. 58–59.
7. *Аверьянов В.* Наводнение на станции Новолазаревской // Информ. бюл. САЭ. 1965. № 52. С. 53–74.
8. *Дворников Ю.А., Евдокимов А.А.* Научно-технический отчёт по программе гидроэкологических исследований на станции Прогресс в сезонный период 62-й РАЭ. СПб.: Фонды ААНИИ, 2017. 50 с.
9. *Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V.* Vast ice depression in Dalk Gla-

## References

1. *Simonov I.M.* *Oazisy Vostochnoy Antarktidi.* Oases of East Antarctica. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1971: 176 p. [In Russian].
2. *Aleksandrov M.V.* *Landshaftnaya struktura i kartirovanie oazisov Zemli Enderbi.* The landscape structure and mapping of oases of the Earth Enderby. Ed. E.S. Kороткевич. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1985: 152 p. [In Russian].
3. *Sokratova I.N.* *Antarkticheskie oazisy.* Antarctic oases. St. Petersburg: AANII, 2010: 274 p. [In Russian].
4. *Boronina A.S., Chetverova A.A., Popov S.V., Pryakhina G.V.* Overview of potentially outburst lakes and the consequences of floods in the Hills of Tala and Larsemann (East Antarctica). *II Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Sovremennyye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii», 5–7 iyunya 2019 g.* Proc. of the II All-Russian Scientific and Practical Conference «Modern Trends and Prospects for the Development of Hydrometeorology in Russia», June 5–7, 2019. Irkutsk, 2019: 307–318. [In Russian].
5. *Aleksandrov M.V., Kozlovskiy A.M.* On the study of lakes in the vicinity of Molodezhnaya station. *Inform. byull. Sovetskoy antarkticheskoy ekspeditsii.* Inform. bull. Soviet Antarctic expedition. 1969, 72: 34–40. [In Russian].
6. *Vaigachev A.Z.* Outburst of the ice «dam» of Lake Lagernoye. *Inform. byull. Sovetskoy antarkticheskoy ekspeditsii.* Inform. bull. Soviet Antarctic expedition. 1965, 54: 58–59. [In Russian].
7. *Averyanov V.* Flood at Novolazarevskaya station. *Inform. byull. Sovetskoy antarkticheskoy ekspeditsii.* Inform. bull. Soviet Antarctic expedition. 1965, 52: 53–74. [In Russian].
8. *Dvornikov Yu.A., Evdokimov A.A.* *Nauchno-tekhnicheskiiy otchyot po programme gidroekologicheskikh issledovaniy na stantsii Progress v sezonnyi period 62 RAE.* Sci-

- cier, East Antarctica // *Ice and Snow*. 2017. V. 57. № 3. P. 427–432. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-427-432.
10. Antarctic Xiehe Peninsula orthophoto. Scale 1:4000. Heilongjiang Polar Engineering Center of Surveying & Mapping and Heilongjiang Institute of Geomatics Engineering. China, 2006.
  11. Larsemann Hills. Princess Elizabeth Land. Antarctica. Satellite image map. Edition 3. Map number 14241, Scale 1:25 000. Australian Antarctic Division, 2015.
  12. Боронина А.С., Попов С.В., Пряхина Г.В. Гидрологическая характеристика озёр восточной части полуострова Брокнес, холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида // *Лёд и Снег*. 2019. Т. 59. № 1. С. 39–48. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-39-48.
  13. Попов С.В., Боронина А.С. Программное обеспечение для обработки данных тахеометрической съёмки // *Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры*. Наука и образование. Сб. материалов III Всерос. науч.-практ. конф. 6–8 ноября 2019 г. СПб., 2019. С. 258–263.
  14. Григорьева С.Д., Четверова А.А., Рыжова Е.В., Дешевых Г.А., Попов С.В. Гидрологические и геофизические инженерные изыскания в районе станции Прогресс (оазис холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида) в сезон 64-й РАЭ // *Российские полярные исследования*. 2019. № 2. С. 23–28.
  15. Howat I.M., Porter C., Smith B.E., Noh M.-J., Morin P. The reference elevation model of Antarctica // *Cryosphere*. 2019. № 13. P. 665–674. doi: 10.5194/tc-13-665-2019.
  16. Виноградов Ю.Б. Метод расчета гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера // *Селевые потоки*. 1976. Сб. 1. С. 138–153.
  17. Попов С.В., Пряхина Г.В., Боронина А.С. Оценка расхода воды в процессе развития прорывного паводка ледниковых и подледниковых водоёмов // *Криосфера Земли*. 2019. Т. XXIII. № 3. С. 25–32. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2019-3(25-32).
  18. Nye J.F. Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels, and veins // *Journ. of Glaciology*. 1976. V. 17. № 76. P. 181–207.
  19. Björnsson H. Jökulhlaups in Iceland: prediction, characteristics and simulation // *Annals of Glaciology*. 1992. V. 16. P. 95–106. doi: 10.3198/1992AoG16-1-95-106.
  20. Clarke G.K.C. Hydraulics of subglacial outburst floods: New insights from the Spring-Hutter formulation // *Journ. of Glaciology*. 2003. V. 49. № 165. P. 299–314. doi: 10.3189/172756503781830728.
  21. Fowler A.C. Dynamics of subglacial floods // *Proc. Royal Society. A. Mathematical Physics. Engineering Sciences*. 2009. V. 465. № 2106. P. 1809–1828.
  - entific and technical report on the program of hydroecological research at Progress station in the seasonal period of the 62nd RAE. St. Petersburg: AARI Funds, 2017: 50 p. [In Russian].
  9. Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. Vast ice depression in Dalk Glacier, East Antarctica. *Ice and Snow*. 2017, 57 (3): 427–432. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-427-432.
  10. Antarctic Xiehe Peninsula orthophoto. Scale 1:4000. Heilongjiang Polar Engineering Center of Surveying & Mapping and Heilongjiang Institute of Geomatics Engineering. China, 2006.
  11. Larsemann Hills. Princess Elizabeth Land. Antarctica. Satellite image map. Edition 3. Map number 14241, Scale 1:25 000., Australian Antarctic Division, 2015.
  12. Boronina A.S., Popov S.V., Pryakhina G.V. Hydrological characteristics of lakes in the eastern part of the Broknes Peninsula, Larsemann Hills, East Antarctica. *Led i Sneg*. 2019, 59 (1): 39–48. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-39-48.
  13. Popov S., Boronina A. Software for processing data of tachometric survey. *Geodeziya, kartografiya, geoinformatika i kadastry. Nauka i obrazovanie. Sb. materialov III Vseros. nauch.-praktich. konf. 6–8 noyabrya 2019 g.* Software for processing data of tachometric survey. Geodesy, cartography, geoinformatics and cadastre. Abstracts of the III Russian conf. on applied science. November 6–8, 2019. St. Petersburg, 2019. P. 258–263.
  14. Grigoryeva S.D., Chetverova A.A., Ryzhova E.V., Desevych G.A., Popov S.V. Hydrological and geophysical engineering surveys in the vicinity of Progress Station (an oasis on the Larsemann Hills, East Antarctica) in the season of the 64<sup>th</sup> RAE. *Rossiyskie polyarnye issledovaniya*. Russian Polar Research. 2019, 2: 23–28. [In Russian].
  15. Howat I.M., Porter C., Smit B.E., Noh M.-J., Morin P. The Reference Elevation Model of Antarctica. *Cryosphere*. 2019, 13: 665–674.
  16. Vinogradov Yu.B. The method for calculating the flood hydrograph during the break of a lake dammed with glacier. *Selevye Potoki*. Mudflows. 1976, 1: 138–153. [In Russian].
  17. Popov S.V., Pryakhina G.V., Boronina A.S. Estimation of water discharge during development of glacial and subglacial outburst floods. *Earth's Cryosphere*. 2019, XXIII (3): 20–26. doi: 10.21782/EC2541-9994-2019-3(20-26).
  18. Nye J.F. Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels, and veins. *Journ. of Glaciology*. 1976, 17 (76): 181–207.
  19. Björnsson H. Jökulhlaups in Iceland: prediction, characteristics and simulation. *Annals of Glaciology*. 1992, 16: 95–106.
  20. Clarke G.K.C. Hydraulics of subglacial outburst floods: New insights from the Spring-Hutter formulation. *Journ. of Glaciology*. 2003, 49 (165): 299–314.
  21. Fowler A.C. Dynamics of subglacial floods. *Proc. Royal Society. A. Mathematical Physics. Engineering Sciences*. 2009, 465 (2106): 1809–1828.