

## Моделирование подледниковых паводков на примере катастрофического прорыва водоёма в леднике Долк (полуостров Брокнес, Восточная Антарктида)

**Боронина А.С.<sup>1</sup>, Попов С.В.<sup>2</sup>, Пряхина Г.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», Санкт-Петербург

[al.b.s@yandex.ru](mailto:al.b.s@yandex.ru)

**Аннотация:** В ходе летнего полевого сезона 63-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) для изучения провала, образовавшегося в леднике Долк (Dålk Glacier) 30 января 2017 г., и его последствий были выполнены комплексные геодезические, гидрологические и геофизические исследования. Они включали в себя тахеометрическую съёмку, бурение с отбором керна, тепловое глубокое бурение, георадарное профилирование на частотах 150 МГц и 900 МГц, электромагнитные зондирования, выполненные по системе ОГТ, а также гидрологические наблюдения. На основе тахеометрической съёмки, с учётом предварительных результатов георадарных исследований, уточнены морфометрические характеристики провала на момент его образования. Согласно первым представлениям, объём подледникового водоёма, существовавшего до прорыва, составлял около 708690 м<sup>3</sup> при средней глубине 32 м. Без малого спустя год, провал представляет собой каверну размерами 188×250 м средней глубиной около 27 м. Установлено, что за рассматриваемый период времени её площадь изменилась незначительно. Для оценки основных параметров прорыва водоёма в районе ледника Долк за основу принята модель Ю.Б. Виноградова с дополнительным учётом наличия ледникового покрова над водной поверхностью. Построенная цифровая модель провала послужила основой для моделирования. Выполнена серия расчётов гидрографов для длин каналов стока воды 764 м, 821 м, 971 м и 1134 м. Наибольшая величина расхода для рассмотренных сценариев отмечается в первом расчётном случае при длине 764 м. Максимум стока достигается через 4 часа 36 минут с момента начала истечения и составляет 515 м<sup>3</sup>/с. Время прохождения катастрофического паводка до залива Прюдс (Prudz Bay) составляет 7 часов 20 минут. При этом максимальный расход оценивается в 312 м<sup>3</sup>/с.

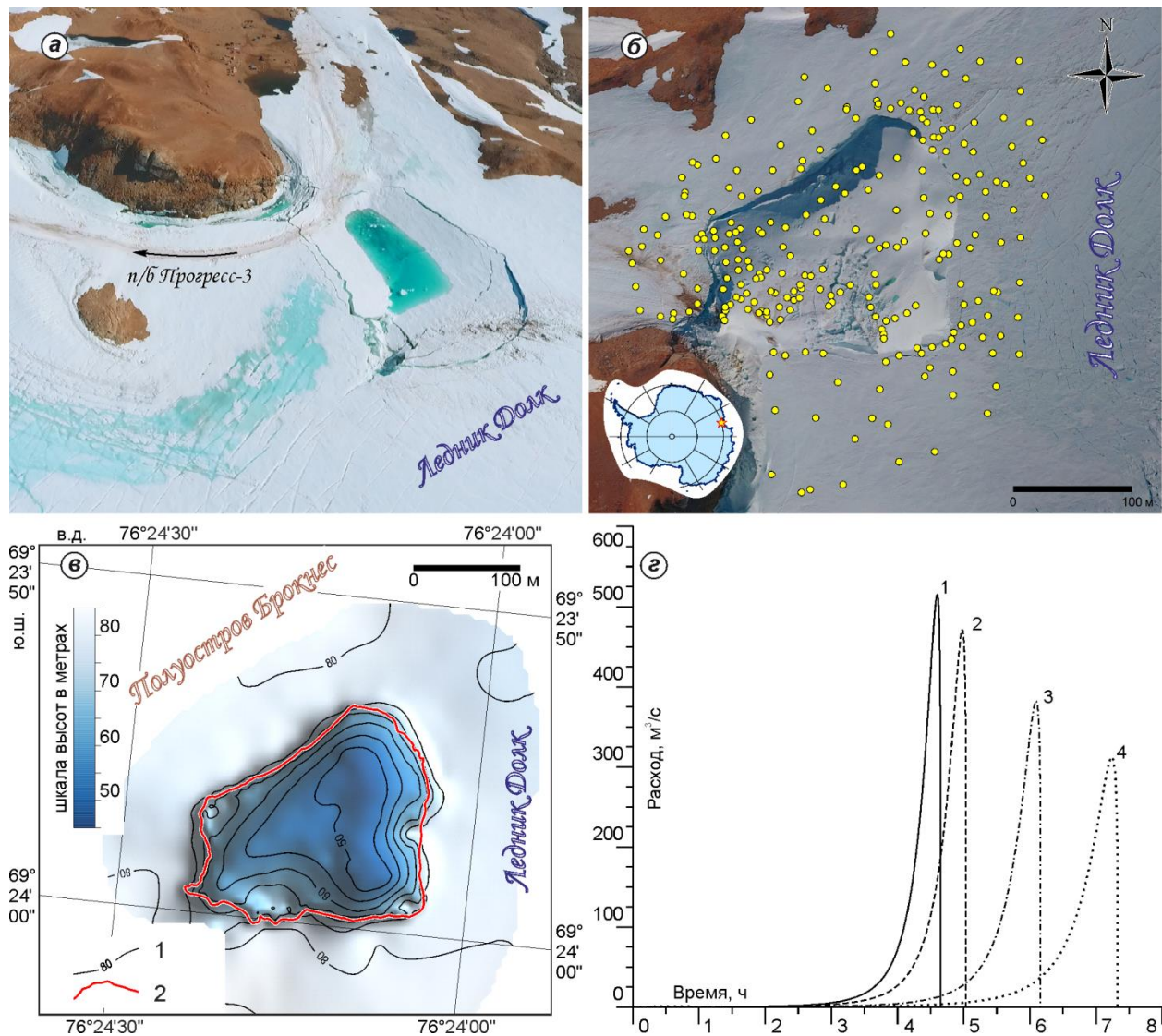
**Ключевые слова:** подледниковые водоёмы, подледниковые паводки, субгляциальная гидрология, субгляциальные процессы, Восточная Антарктида, станция Прогресс

### Введение

В летний период для районов антарктических оазисов, таких, как холмы Ларсеманн (Larsemann Hills), характерно интенсивное приповерхностное таяние снежно-ледового покрова. Это вызвано как положительными или слабо отрицательными температурами воздуха (Gillieson et al., 1990), так и мощной солнечной радиацией, достигающей 1000 мВт/м<sup>2</sup> (Хромов и Петросянц, 2001). При этом всего в нескольких десятках километров, при движении во внутренние районы континента, гляциологическая ситуация резко меняется: здесь развиты уже области *сухого снега* и *просачивания*. В первой из них таяние не происходит даже в летние сезоны, а во второй оно может быть очень слабым, в зависимости от погодных условий, изменяющихся из года в год (Патерсон, 1984).

Снег, выпадающий на хорошо прогретые скалы, интенсивно тает, и вода заполняет отрицательные формы рельефа местности, образуя озёра, которые располагаются не только в каменном основании, но и на поверхности ледника, а также внутри него. Одним подобных водных объектов является подледниковый водоём, расположенный в краевой

части ледника Долк (Dålk Glacier) в полукилометре к востоку от российской полевой базы Прогресс-1 (рис. 1а). Согласно метеорологическим наблюдениям, антарктическим летом 2017 года сложились anomalно тёплые погодные условия (С.В. Гуцин, частное сообщение), что привело к интенсивному приповерхностному таянию сезонного снежного покрова. Поскольку основным источником питания озёр оазиса является поступление в них талой воды, уровень в некоторых из них достиг критической отметки, что вызвало их прорыв. В частности, подобная ситуация сложилась на озере Болдер (Boulder Lake) и ряде других мелких водоёмов (рис. 1а).



**Рис. 1** Провал в леднике Долк и основные результаты моделирования прорывного паводка. Вид провала в момент формирования (а); пункты тахеометрических съёмки (б); схема высот поверхности ледника (в); рассчитанные гидрографы прорывного паводка (г). Кругами показаны пункты тахеометрической съёмки. Цифрами на секции (в) показаны: 1- изолинии поверхности ледника, сечение изолиний 5 м; 2- контур провала на 8 января 2018 г. Цифрами на секции (г) показаны результаты расчетов гидрографов при длинах тоннеля: 1- 764 м; 2- 821 м; 3- 971 м; 4- 1134 м.

Прорыв первого из них был столь значителен, что образовался бурный поток шириной около 3,5 метров (А.В. Миракин, частное сообщение). Волею судеб, вода этих озёр устремилась в подледниковый водоём, расположенный в районе ледника Долк (рис. 1а,б). В момент, когда механические напряжения в озёрной котловине достигли предельных значений, произошел прорыв. Катастрофический паводок повлёк за собой

образование каверны в теле ледника. Кровля над ней не выдержала, и 30-го января 2017 года произошло её обрушение с образованием провала размером около  $183 \times 220$  м и средней глубиной от 20 до 30 м (Popov et al., 2017). Он разрушил участок дороги (рис. 1а), соединяющей российскую станцию Прогресс и китайскую станцию Зонгшан с посадочной площадкой станции Прогресс и пунктом формирования российских и китайских санно-гусеничных походов во внутренние районы Антарктиды. При этом, лишь по счастливому стечению обстоятельств, обошлось без человеческих жертв. К большому сожалению, в ходе летнего полевого сезона 62-й РАЭ никаких гидро-гляциогеофизических исследований, за исключением аэрофотосъёмки, выполнено не было. В связи с этим, все сведения о событиях того времени можно черпать лишь из воспоминаний очевидцев, а также видео- и фотоматериалов, прежде всего, начальника станции *А.В. Миракина*. Предварительные результаты аэрофотосъёмки, которые, на настоящий момент, всё ещё находятся на стадии обработки, изложены в (Popov et al., 2017).

#### **Методика и результаты полевых работ**

В ходе летнего полевого сезона 63-й РАЭ, в период с 4-го января по 3-е февраля 2018 г. с целью изучения образовавшегося провала, его последствий, а также поиска новой объездной дороги, были выполнены обширные комплексные геодезические, гидрологические и геофизические исследования. Они включали в себя тахеометрическую съёмку, бурение с отбором керна, тепловое глубокое бурение, георадарное профилирование на частотах 150 МГц и 900 МГц, электромагнитные зондирования, выполненные по системе ОГТ, а также гидрологические наблюдения. В связи с недавним завершением полевых работ, полученные данные большей частью находятся на стадии обработки.

В ходе тахеометрической съёмки в районе провала выполнено 256 пунктов измерений (рис. 1б), по которым построена цифровая модель поверхности ледника (рис. 1в). В работах использовался тахеометр Trimble M3 DR 5" (Trimble Navigation Ltd, USA). Для увеличения дальности и точности измерений в качестве отражателя применялась призма 1Р. Согласно полученным данным, провал, без малого спустя год с момента образования, представляет собой каверну размерами  $188 \times 250$  м и средней глубиной около 27 м. Фотоматериалы, предоставленные *А.В. Миракиным*, свидетельствуют о том, что в течение зимнего периода её придонная часть была значительно замечена снегом, который сохранился практически в неизменном состоянии вплоть до января 2018 года. Согласно предварительным результатам георадарного профилирования, выполненного внутри каверны, мощность сезонного снежного покрова оценивается приблизительно в 5 м. Из чего можно заключить, что средняя глубина провала на момент его образования составляла 32 м. Это, в целом, согласуется с уточнёнными данными аэрофотосъёмки, выполненной в ходе летнего полевого сезона 62-й РАЭ (*С.С. Пряхин*, частное сообщение).

В силу непредсказуемости прорывных катастрофических паводков, их эффективным методом изучения является математическое моделирование. Его основы, применительно к обсуждаемому явлению, были заложены еще в 1970-х годах. Одна из первых основополагающих работ по данной тематике принадлежит перу *Дж. Ная* (Nye, 1976). В последующие годы был создан ряд других моделей, в которых делается акцент на описание тех, или иных сторон протекания подледниковых паводков (Clarke, 1982; Evatt et al., 2006; Flower, 2009).

Для оценки параметров прорыва водоёма ледника Долк, возьмём за основу модель, предложенную *Ю.Б. Виноградовым* (Виноградов, 1976), и учтём в ней наличие ледникового покрова. Кроме того, используемая в модели аппроксимация зависимости глубины водоёма от его степенной функцией заменена на использование цифровой модели рельефа. Авторы полагают, что при катастрофическом прорыве в придонной части



водоёма, в общем случае, образуется наклонный канал стока. Согласно аэrorадиолокационным данным, полученным в 1990/91 г., мощность ледника Долк на широте провала в среднем составляет 800 м (Попов и Поздеев, 2002; Попов и Киселёв, 2018). По современным представлениям, этот ледник является шельфовым (ADD, 2016). Таким образом, зная среднюю мощность ледника и глубину провала рассчитаем перепад высот между точками входа в тоннель и выхода из него. Серия расчётов гидрографа прорывного паводка проведена для длин тоннелей 764 м, 821 м, 971 м и 1134 м. Предельные значения соответствуют истечению озёрной воды вниз и по кратчайшему расстоянию под шельфовый ледник, а также через ледник Долк до барьера. Поскольку прорыв продолжался до полного опустошения водоёма, то объём воды, пошедший на образование паводка, составляет 708690 м<sup>3</sup>. Приведенное значение получено по данным тахеометрической съёмки с учетом снега, накопившегося в течение года. Сведения о температуре воды отсутствуют, и априорно приняты равными 0°C, исходя из того, что озеро было полностью перекрыто ледником. Расчётные гидрографы стока приведены на рис. 1г.

Анализ результатов моделирования показывает, что гидрографы катастрофического прорыва характеризуются сравнительно большой величиной отрицательной асимметрии, свойственной при прорыве озера по внутрiledниковому каналу стока. Время от начала истечения воды до прохождения пика паводка увеличивается по мере увеличения длины тоннеля. Наибольшая величина расхода из всех рассматриваемых сценариев прорыва отмечается в первом расчётном случае при длине 764 м. Максимум стока достигается через 4 часа 36 минут с момента начала истечения и составляет 515 м<sup>3</sup>/с. После прохождения пика, истечение резко уменьшает свою интенсивность и спустя 4 часа 39 минут, когда из озера спустился весь возможный объём воды, паводок прекратился. Аналогичная ситуация наблюдается и при других значениях длин тоннеля. Форма гидрографа также ассиметричная с пологим подъёмом и резким спадом. Время прохождения катастрофического паводка непосредственно до береговой линии залива Прюдс составляет 7 часов 20 минут. Максимальный расход воды достигает своей величины через 7 часов 13 минут от начала прорыва и составляет 312 м<sup>3</sup>/с. Отсутствие натуральных наблюдений во время прорывного паводка не позволяет оценить правильность рассчитанных значений. Однако, по мнению авторов, полученные результаты вполне соотносимы с описаниями очевидцев этого события.

#### **Основные выводы**

После опорожнения подледникового водоёма опасность нового прорыва в этом районе уменьшилась. Однако, в ходе полевого сезона 63-й РАЭ авторами воочию наблюдалось интенсивное поступление воды в провал. Это указывает на то, что не следует полностью исключать возможность повторного прорыва на рассматриваемом динамичном участке. Понимание механизма перетекания водных масс под ледником является важной фундаментальной задачей, поскольку оно имеет непосредственное отношение к процессам развития подлédного рельефа и подледниковой гидрологической сети. Помимо чисто научного интереса, исследование прорывов подледниковых озёр имеет также и прикладное значение, в силу того, что этот процесс зачастую приводит к значительным разрушениям и человеческим жертвам. Хорошим тому примером является недавний прорыва озера Разливное, расположенного в районе отечественной полевой базы Молодёжная. Согласно оперативной сводке об основных экспедиционных событиях и операциях РАЭ за период с 18 по 25 января 2018 г., опорожнение водоёма произошло 19 января в 8:30 утра по московскому времени. Высота барьера промытого русла достигла 12-15 метров. Ширина потока оценивается примерно в 10 м. Процесс истечения полностью прекратился к 23 января. Под напором воды снесло одну железную опору эстакады и две опоры погнуло, а вся вода вытекла в бухту Опасная. Таким образом, проблема выявления и мониторинга потенциально прорывоопасных ледниковых и

подледниковых водоёмов не перестаёт быть актуальной, поскольку тесно связана с обеспечением безопасности людей и транспортной техники при осуществлении логистических операций.

**Авторы благодарят своих коллег С.Д. Григорьеву, Г.А. Дешевых и А.А. Суханову, а также начальника станции Прогресс 63-й РАЭ А.В. Воеводина и сотрудников станции Р.Р. Латыпова, В.В. Сощенко за помощь в проведении полевых работ; начальника станции Прогресс 62-ой РАЭ А.В. Миракина за предоставление фото и видео материалов, а также за помощь в организации работ отряда; метеоролога станции Прогресс 62-ой РАЭ С.В. Гущина за предоставленные метеорологические данные; сотрудника Института Наук о Земле СПбГУ С.В. Тюрина за предоставленную геодезическую аппаратуру. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00421 А.**

#### Список литературы

- Виноградов Ю.Б. Метод расчета гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера // *Селевые потоки*, сб. 1., 1976: 138-153
- Патерсон У.С.Б. Физика ледников. Пер. с англ. // М.: Мир, 1984: 472 с.
- Попов С.В., Киселев А.В. Отечественные аэрогеофизические исследования на землях Мак-Робертсона, Принцессы Елизаветы и Вильгельма II, Восточная Антарктида // *Криосфера Земли*, XXII, №1., 2018: 3-13
- Попов С.В., Поздеев В.С. Ледниковый покров и коренной рельеф района гор Принс-Чарльз (Восточная Антарктида) // *Материалы гляциол. исслед.*, вып. 93., 2002: 205-214
- Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология: Учебник – 5-е изд., перераб и доп. // М.: Изд-во МГУ, 2001: 528 с.
- Antarctic Digital Database (ADD), Version 7.0, January 2016. Scientific Committee on Antarctic Research, British Antarctic Survey, Cambridge
- Clarke G.K.C. Glacier outburst floods from «Hazar Lake», Yukon Territory, and the problem of flood magnitude prediction // *J. Glaciol.*, vol. 28, No 98., 1982: 3-21
- Evatt G.W., Fowler A.C., Clark C.D., Hulton N.R.J. Subglacial floods beneath ice sheets // *Phil. Trans. R. Soc., Seria A*, No 364., 2006: 1769-1794
- Fowler A.C. Dynamics of subglacial floods // *Proc. Royal Society. A. Mathematical Physics. Engineering Sciences*, vol. 465, No 2106., 2009: 1809-1828
- Gillieson D., Burgess J., Spate A., Cochrane A. An atlas of the lakes of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. ANARE Research Notes // *Antarctic Division Australia*, No 74., 1990: 173 p.
- Nye J.F. Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels, and veins // *J. Glaciol.*, vol. 17, No 76., 1976: 181-207
- 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*, vol. 57, No 3., 2017: 427-432

## Mathematical modelling of the subglacial floods illustrated with the catastrophic outburst reservoir at the Dalk Glacier (Broknes Peninsula, East Antarctica)

***Boronina A.S.<sup>1</sup>, Popov S.V.<sup>2</sup>, Pryakhina G.V.<sup>1</sup>***

*<sup>1</sup>St. Petersburg State University, Saint Petersburg*

*<sup>2</sup>Polar Marine Geosurvey Expedition, Saint Petersburg  
[al.b.s@yandex.ru](mailto:al.b.s@yandex.ru)*

**Abstract:** During the austral summer field season of the 63<sup>rd</sup> Russian Antarctic Expedition complex geodetic, hydrological and geophysical research was performed at the glacial dip which occurred within the Dalk Glacier on January 30, 2017. The research included tacheometric survey, ice core drilling, thermal drilling, GPR sounding at frequencies 150 MHz and 900 MHz, electromagnetic sounding at CDP methodic and hydrological observation. Using the tachometric data and preliminary results of the GPR survey we specified morphometric characteristics of the dip at the moment of its formation. Due to preliminary estimates, the volume of the subglacial reservoir, which existed before the outburst, occurred was 708690 m<sup>3</sup> with the average depth of 32 m. A year after, in January 2018, there is a cavern with size of 188×250 m and the average depth about 27 m. Its area did not change significantly. To evaluate the main parameters of the outburst we used the model of *Yu.B. Vinogradov* complemented with accounting the existence of the ice layer above the water surface. A digital model of the surface of the dip necessary for modeling was achieved with tacheometric survey. Hydrographs for channels with length 764 m, 821 m, 971 m and 1134 m were computed. Maximal water discharge (515 m<sup>3</sup>/s) is observed at the first case (764 m long channel) in 4 hours 36 minutes from the beginning of the effusion. Time of the water propagation to the Prudz Bay is 7 hours 20 minutes with maximal discharge estimated as 312 m<sup>3</sup>/s.

**Keywords:** subglacial reservoirs, subglacial floods, subglacial hydrology, subglacial processes, East Antarctica, Progress station