### DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference

Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018



Editors S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili

Publishing House "Universal" Tbilisi 2018

## СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды 5-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 1-5 октября 2018 г.



Ответственные редакторы С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили

> Издательство Универсал Тбилиси 2018

# <mark>ღვარცოფები:</mark> კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა

### მე–5 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები

თბილისი, საქართველო, 1–5 ოქტომბერი, 2018



რედაქტორები ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი

გამომცემლობა "უნივერსალი" თბილისი 2018 УДК 551.311.8 ББК 26.823

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 5-й Международной конференции. Тбилиси, Грузия, 1-5 октября 2018 г. – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили. – Тбилиси: Универсал, 2018, 671 с.

**Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection.** Proceedings of the 5th International Conference. Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018. – Ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili. – Tbilisi: Publishing House "Universal", 2018, 671 p.

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა. მე–5 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, საქართველო, 1–5 ოქტომბერი, 2018. გამომცემლობა "უნივერსალი", თბილისი 2018, 671 გვ. პასუხისმგებელი რედაქტორები ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი.

Ответственные редакторы С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили Edited by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili

Верстка: С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева, Е.А. Савернюк Page-proofs: S.S. Chernomorets, K.S. Viskhadzhieva, E.A. Savernyuk

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).

ISBN 978-9941-26-283-8

- © Селевая ассоциация
- © Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета
- © Debris Flow Association
- © Ts. Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University
- © ღვარცოფების ასოციაცია
- © საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტი

# Прорывы ледниковых и подледниковых озёр в районе антарктической станции Прогресс, Восточная Антарктида, в 2017 - 2018 гг.

С.В. Попов<sup>1</sup>, А.С. Боронина<sup>2</sup>, Г.В. Пряхина<sup>2</sup>, С.Д. Григорьева<sup>2</sup>, А.А. Суханова<sup>2</sup>, С.В. Тюрин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «ПМГРЭ», г. Санкт-Петербург, Россия, spopov67@yandex.ru <sup>2</sup>Институт наук о Земле СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Особенностью восточной части полуострова Брокнес (район станции Прогресс, Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида) является наличие развитой гидрографической сети, состоящей из водоёмов, большинство которых мелководны. Для их изучения в начале 2018 г. был выполнен обширный комплекс гидрологических, геодезических, геофизических и гляциологических исследований. Для озёр характерны резкие сбросы воды, сопровождающиеся формированием прорывных паводков. В частности, прорыв озера Болдер 30-го января 2017 г. привёл к образованию обширного провала в леднике Долк размером 180 м×220 м глубиной около 30 м, который разрушил дорогу на аэродром и в пункт формирования санногусеничных походов во внутренние районы Антарктиды. Озёра Прогресс, Скандретт и LH73, расположенные поблизости от инфраструктуры Российской антарктической экспедиции, также характеризуются периодическими прорывами. В частности, 22-го января 2018 г. произошёл прорыв озера Дискашн. Уровень водной поверхности понизился на 0.95 м. На основе данных полевых наблюдений выполнены оценочные расчеты гидрографа прорывного паводка.

Восточная Антарктида, станция Прогресс, холмы Ларсеманн, полуостров Брокнес, опасные гидрологические явления

#### Outbursts of glacial and subglacial lakes at the area of the Progress station, East Antarctica, in 2017-2018

#### S.V. Popov<sup>1</sup>, A.S. Boronina<sup>2</sup>, G.V. Pryakhina<sup>2</sup>, S.D. Grigoreva<sup>2</sup>, A.A. Sukhanova<sup>2</sup>, S.V. Tyurin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Polar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia, spopov67@yandex.ru <sup>2</sup>Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia.

One of the main features of the Brokness peninsula (area of the Progress station, Princess Elisabeth Land, East Antarctica) is the presence of a well-developed hydrographic network which includes mostly shallow reservoirs. To explore them, a complex of hydrological, geodetic, geophysical and glaciological investigations was performed in the beginning of 2018. The lakes a characterized by accidental water discharges complemented with catastrophic floods. In particular, the outburst of the Boulder Lake on 30th January 2017 formed within the Dålk glacier of a wide depression with size of 180×220 meters and depth of 30 meters. The depression destroyed a part of the route to the airdrome of the Progress station and the point of formation of the logistic traverses to the interior areas of Antarctica. Lakes Progress, Scandrett and LH73 situated next to the infrastructure objects of the Russian Antarctic Expedition are also characterized by periodical spontaneous outbursts. On yJanuary 22, 2018, an outburst of the Discussion Lake happened. Its water level

decreased by 0.95 m. Based on the field data, estimate calculations of the outburst hydrograph were made.

East Antarctica, Progress station, Larsemann Hills, Brokness peninsula, dangerous hydrological phenomena

#### Введение

Холмы Ларсеманн располагаются в Восточной Антарктиде на Земле Принцессы Елизаветы на юго-восточном берегу залива Прюдс. Этот район представляет собой территорию, большей частью свободной ото льда, и состоящую из множества мелких и двух наиболее крупных полуостровов Сторнес и Брокнес. К юго-востоку от последнего располагается выводной ледник Долк. Первые сведения о нём были получены в ходе Антарктической экспедиции, организованной в 1935 году норвежцем Ларсом Кристенсеном [*Трёшников, 1963*]. Однако активное развитие инфраструктуры началось лишь во второй половине 1980-х годов. В настоящий момент здесь располагаются три зимовочных станции: российская Прогресс, китайская Зонгшан и индийская Бхарати. Кроме того, имеется ряд полевых баз.

Ландшафт оазиса представляет собой цепь холмов абсолютной высотой до 162 м. Рельеф характеризуется значительным расчленением. Его отрицательные формы, как правило, заполнены водными массами, образующими развитую гидрографическую сеть. Большинство водоёмов характеризуются глубиной до 5 м. Наиболее крупными и значимыми в гидрологическом аспекте являются озёра Прогресс, Скандретт, Сибторп, Болдер, Степпед, Рейд, Дискашн, LH73 и LH69 (рис. 1). Первые два оцениваются как самые глубокие на полуострове Брокнес (45 и 18 м соответственно) [Gillieson et al., 1990]. Поверхность озёр перекрыта льдом в течение всего зимнего сезона, и освобождается от него лишь на короткий летний период. Дневная температура воздуха в летний сезон (декабрь-февраль) как правило положительная, порой достигая +10°С. Средние температуры воздуха в зимний период составляют около -18°С [Gillieson, 1991].

Для ледниковых и подледниковых водоёмов характерны так называемые прорывные паводки. Они происходят по достижении некоторого критического уровня воды, после которого ледяные стенки не выдерживают нагрузки и разрушаются. Последнее приводит к резкому сбросу водной массы через каналы стока, формирующиеся в наиболее ослабленных зонах. Подобные явления характерны, как для арктических регионов нашей планеты, в частности Исландии, так и для районов Антарктиды [Goodwin, 1988; Björnsson, 1998, 2002; Fricker et al., 2007; Pattyn, 2013]. Практически ежегодные прорывные паводки регистрируются и на озёрах холмов Ларсеманн: LH73, Скандретт, Рейд, Прогресс и Дискашн. В настоящей работе излагаются основные результаты полевых исследований, выполненных в восточной части полуострова Брокнес в сезон 63-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) и направленных, в частности, на изучение прорывов ледниковых и подледниковых водоёмов.



Рис. 1. Схема расположения полевых работ; 1- водомерные посты; 2- пункты отбора проб на гидрохимический анализ; 3- пункты механического бурения с отбором керна; 4- пункты теплового бурения; 5- районы батиметрических съёмок; 6- участки тахеометрических съёмок; 7- районы георадарного профилирования; 8- провал в леднике Долк; 9- действующие дороги; 10- дорога, участок которой, разрушен провалом. Синей пунктирной линий отображен временный ручей из озера Сибторп

#### Изучение прорыва подледникового водоёма в леднике Долк

Работы летнего полевого сезона 63-й РАЭ выполнялись в период с 24 декабря 2017 г. по 3 февраля 2018 г., и включали в себя широкий комплекс научных исследований: гляциологические, георадарные, геодезические и гидрологические работы, а также керновое и тепловое бурение (рис. 1).

Основным объектом изучения был провал, образовавшийся 30-го января 2017 года в западной части ледника Долк (рис.1, рис. 2а). На тот момент, согласно материалам аэрофотосъёмки, он представлял собой обширную депрессию размером 183×220 м с глубиной, достигающей 43 м [*Popov et al., 2017*]. Согласно уточнённым данным, её площадь, маркируемая по бровке, составила 31900 кв. м и практически не изменилась через год, к моменту начала полевых работ.



Рис. 2. Депрессия, образованная в западной части ледника Долк (а), и гроты внутри неё (б, в) Фотографии выполнены: а - Миракиным А.В., 2017 г.; б, в - Борониной А.С., 2018 г.

Образовавшийся провал полностью разрушил участок трассы, соединяющей отечественную станцию Прогресс с аэродромом и пунктом формирования санногусеничных походов на станцию Восток (рис. 2а). К счастью, это происшествие обошлось без человеческих жертв, однако транспортное сообщение между важнейшими пунктами инфраструктуры было нарушено. Таким образом, в ходе полевых работ предстояло выбрать новый путь, и организовать дорогу, взамен разрушенной. Поставленная задача была решена, и 23-го января 2018 г. новая трасса начала функционировать [Попов и др., 2018; Sukhanova et al., 2018].

Визуальное обследование депрессии показало, что придонная поверхность провала рельефная, сформированная ледяными глыбами и припорошенная сезонным снегом. Стенки провала крутые, порой вертикальные. Западный склон провала относительно пологий. Внутри депрессии было обнаружено два грота, образованных в результате стока прорвавшейся воды. Первый из них, высотой около 20 м и шириной до 40 м расположен в северной части (рис. 26). Второй грот (рис. 2в) расположен в восточной части депрессии. Оценить его действительные размеры не представляется возможным, поскольку, после обрушения кровли поверхности, тоннель перекрыло глыбами льда и снега. По предварительным оценкам, в отдельных местах его высота достигает 4 м.

Работы 2017–2018 гг. показали, что провал образовался в результате прорыва озера Болдер, расположенного к северу от отечественной полевой базы Прогресс-3 (рис. 1). Озерные во́ды устремились по направлению к заливу по леднику Долк, проникли в него, и образовали мощный внутриледный поток. Частично он наблюдался на поверхности ледника (рис. 2а). В месте расположения будущего провала находился водоём, который, насколько можно судить, ни разу не освобождался ото льда на памяти сезонного и зимовочного состава станции Прогресс, а также австралийских исследователей.

Во́ды озера Болдер начали переполнять указанный внутриледниковый водоём. В конечном итоге, когда механические напряжения в озёрной котловине достигли предельных значений, ледяные стенки не выдержали, и начали разрушаться, что привело к истечению воды и последующему образованию гротов (рис. 2 б, в). Кровля образовавшейся каверны не выдержала, и произошло её обрушение с образованием грандиозного по масштабам провала (рис. 1, рис. 2а).

На участке между озером Болдер и провалом была произведена тахеометрическая съёмка (рис. 1). В работах использовался тахеометр Trimble M3 DR 5" (Trimble Navigation Ltd, USA). Для увеличения дальности и точности измерений, в качестве отражателя применялась призма 1Р, позволяющая производить измерения на расстояниях до 5 км от прибора. Передвижение между пикетами осуществлялось пешим порядком. Абсолютные высотные отметки пунктов стояния тахеометра определялись методом барометрического нивелирования. Для этого измерялось атмосферное давление Р<sub>1</sub> в некотором пункте опорной геодезической сети, высотное положение которого определено с высокой точностью. Затем измерялось давление Р2 в пунктах стояния Вычисление превышений h произволилось по тахеометра. сокрашённой барометрической формуле М.В. Певцова [Справочник геодезиста, 1985].

$$h = N \left( 1 + \alpha t_m \right) \lg \frac{P_1}{P_2}$$

где а - температурный коэффициент объемного расширения воздуха, равный 0.003665°С-1 (1/273°С-1); t<sub>m</sub> - средняя температура воздуха; константа *N* принимается равной 18470. Атмосферное давление определялось одним и тем же прибором, спутниковым приёмоиндикатором Garmin GPSmap 64st (Garmin Ltd., Taiwan), поэтому между измерениями имелся некоторый промежуток времени. Изменение атмосферного давления за этот период учитывалось данными, регистрируемыми на баропосту (метеостанция станции Прогресс). Ближайшим к району работ пунктом опорной геодезической сети является специально изготовленный пилон, расположенный в пункте с координатами x=2302553.573 м, y=554489.041 м в системе UTMS 43. Это соответствует географическим координатам 69.380847608802° ю.ш. и 76.386542423309° в.д. Его высота составляет 64.419 м над поверхностью эллипсоида WGS 84 (Д.В. Фёдоров, частное сообщение). Схема высот поверхности ледника, полученная по 460 пунктам измерений, приводится на рис. 3.





Рис. 3. Схема высот поверхности ледника, линии тока ледника и расчётное положение подлёдной реки; 1- изогипсы высот поверхности ледника в метрах; 2- пункты измерений; 3- провал в леднике Долк; 4- расчётное положение линий тока ледника; 5- расчётное положение подлёдной реки.

На основе представленной схемы построены линии тока ледника, которые показаны там же. Методика их расчёта изложена в работе [Попов, 2017]. По линиям тока построено положение русла подлёдной реки. Его сопоставление с фотоматериалами, выполненными в 2017 г (рис. 2а), показывает полное соответствие расчётной модели и наблюдений.

Кроме того, в этом же районе выполнялось георадарное профилирование (рис. 1). Этот сравнительно молодой геофизический метод является весьма эффективным

способом изучения приповерхностной части ледника, в частности обнаружения трещин, пустот и неоднородностей [Daniels, 2004; Jol, 2009; Попов и Эберляйн, 2014; Попов и Поляков, 2016; Попов и др., 2017]. Работы выполнялась приборами ОКО-2 (ООО «Логистические системы», Россия) с частотой зондирующих импульсов 150 МГц и GSSI с системным блоком SIR-3000 (GSSI Inc., USA) с частотой зондирующих импульсов 900 МГц. Плановая привязка осуществлялась с помощью приёмоиндикатора Garmin GPSMap 62 (Garmin Ltd., Taiwan) [Grigoreva et al., 2018].

Георадарное профилирование на частоте 900 МГц было выполнено в районе расчётного положения подлёдной реки. На рис. 4 приведён временной георадарный разрез. На нём отчётливо наблюдается прямая волна 1, а также отражения 2 и 3, сформированные приповерхностной и придонной частями тоннеля, который образовался в процессе прорыва озера Болдер. Значительная интенсивность и наличие выраженной дифрагированной волны 4, свидетельствуют о том, что на момент выполнения съёмки тоннель частично заполнен талой водой.



Рис. 4. Временной георадарный разрез, пересекающий тоннель, образованный в процессе прорыва озера Болдер; 1- прямая волна; 2- отражение от верхней части подлёдного тоннеля; 3- отражение от придонной части подлёдного тоннеля; 4- дифрагированная волна.

#### Заключение

Объём настоящей публикации, к сожалению, не позволяет осветить все аспекты проделанной работы. За бортом осталось обсуждение результатов кернового и теплового бурения, минерализации водоёмов, а также более детальное обсуждение георадарных данных. Тем не менее, даже представленные материалы убедительно показали процесс формирования подледникового паводка. При этом именно комплексный подход к решению поставленной задачи позволил получить значимые научные результаты.

Аналогичные, но не столь масштабные процессы происходят и под антарктическим ледником. Во всяком случае, проседание его поверхности над одними подледниковыми водоёмами, и её повышение над соседними, документально зафиксировано по данным спутниковой альтиметрии. Объяснением этого процесса является перетекание воды из первого во вторые [Wingham et al., 2006; Fricker et al., 2007; Fricker & Scambos, 2009]. Таким образом, изучение провала в районе ледника Долк способствует лучшему пониманию процессов формирования И развития катастрофических подледниковых паводков, и тесно связано с вопросами фундаментальных научных исследований в полярных регионах нашей планеты.

Озёра Прогресс, Скандретт, Дискашн и LH73, расположенные поблизости от инфраструктуры РАЭ, также характеризуются периодическими прорывами. Поэтому помимо изучения провала, также был выполнен аналогичный комплекс работ, направленный на их изучение. Авторам сопутствовала удача, 22-го января 2018 г. произошёл прорыв озера Дискашн. Уровень водной поверхности понизился примерно на 0.95 м. Отток озерных вод происходил через тоннель, образовавшийся в снежнике. На основе данных полевых наблюдений выполнены оценочные расчёты гидрографа

прорывного паводка, согласно которым истечение воды происходило в течение 7 часов, с максимальным расходом около 3 м<sup>3</sup>/с.

Представленные в настоящей работе результаты носят предварительный характер. Для более полного понимания процессов, которые привели к образованию прорыва некогда существовавшего внутриледникового водоёма, требуется продолжение исследований этого природного феномена, что и предполагается выполнить в предстоящий полевой сезон.

Авторы благодарят начальников станции Прогресс А.В. Миракина и А.В. Воеводина, а также её сотрудников А.А. Коняева, Р.Р. Латыпова, В.В. Сощенко и А.В. Теплякова за помощь в проведении работ; А.В. Миракина за предоставление фотоматериалов; С.В. Гущина за предоставленные метеорологические данные; генерального директора ООО «ГеофизПоиск» В.И. Кашкевич и сотрудников кафедр геофизики и гидрологии суши Института наук о Земле СПБГУ А.М. Белова, М.П. Кашкевич, Т.В. Паршину и А.А. Четверову за предоставленную геофизическую и гидрологическую аппаратуру и помощь в её подготовке к полевому сезону. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00421 «Особенности формирования и развития паводков подледниковых водоёмов Антарктиды».

#### Список литературы

- Попов С.В., Боронина А.С., Григорьева С.Д., Суханова А.А., Дешевых Г.А. (2018). Гидрологические, гляцио-геофизические и геодезические инженерные изыскания в восточной части полуострова Брокнес (Восточная Антарктида, район станции Прогресс) в сезон 63-й РАЭ. Российские полярные исследования, 1: 24-26.
- Попов С.В. (2017). Методика расчета линий тока земной поверхности, их использование в субляциальной геоморфологии и моделировании экзарационных процессов (на примере района Земли Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида). Геоморфология, 1: 46-54.
- Попов С.В., Поляков С.П. (2016). Георадарное лоцирование трещин в районе российских антарктических станций Прогресс и Мирный (Восточная Антарктида) в сезон 2014/15 года. Криосфера Земли, XX(1): 90-98.
- Попов С.В., Поляков С.П., Пряхин С.С., Мартьянов В.Л., Лукин В.В. (2017). Строение верхней части ледника в районе планируемой взлётно-посадочной полосы станции Мирный, Восточная Антарктида (по материалам работ 2014/15 года). Криосфера Земли, XXI(1): 73-84.
- Попов С.В., Эберляйн Л. (2014). Опыт применения георадара для изучения строения снежнофирновой толщи и грунта Восточной Антарктиды. Лёд и Снег, 4(128): 95-106.
- Справочник геодезиста (1985). В 2-х книгах. Кн. 2. Ред. Большаков В.Д., Левчук Г.П. М.: Недра, 440 с.
- Трёшников А.Ф. (1963). История открытия и исследования Антарктиды. М.: Географгиз, 460 с.
- Björnsson H. (1998). Hydrological characteristics of the drainage system beneath a surging glacier. Nature, 395: 771-774.
- Björnsson H. (2002). Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland. Glob. Planet. Change, 35(3-4): 255-271.
- Daniels D. (2004). Ground Penetrating Radar. 2nd edition. IEE Radar, Sonar and Navigation series 15. New York: The Institution of Electrical Engineering, 761 p.
- Fricker H., Scambos T. (2009). Connected subglacial lake activity on lower Mercer and Whillans Ice Streams, West Antarctica, 2003–2008. J. Glaciol., 55(190): 303-315.
- Fricker H.A., Scambos T., Bindschadler R., Padman L. (2007). An active subglacial water system in West Antarctica mapped from space. Science, 315: 1544-1548.
- Gillieson D. (1991). An environmental history of two freshwater lakes in the Larsemann Hills, Antarctica. Hydrobiologia, 214(1): 327-331.
- Gillieson D., Burgess J., Spate A., Cochrane A. (1990). An atlas of the lakes of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. Australian National Antarctic Research Expeditions, Antarctic Division Australia, Kingston, Tasmania, 173 p.
- Goodwin I.D. (1988). The nature and origin of a jökulhlaup near Casey Station, Antarctica. J. Glaciol., 34(116): 95-101.
- Grigoreva S., Boronina A., Sukhanova A., Popov S., Kashkevich M., Kashkevich V., Martianov V., Lukin V. (2018). Subglacial flood investigations at the Dålk glacier area, Larsemann Hills, East

Antarctica, on the data collected in 2017/2018 field season. Abstracts of 27th International Polar Conference, Rostock, Germany, 25-29 March 2018, p. 74.

Jol H.M. (2009). Ground penetrating radar: Theory and applications. Elsevier, 543 p.

- Pattyn F. (2013). Antarctic subglacial lake discharges. Antarctic Subglacial Aquatic Environments, AGU, 27-44.
- Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. (2017). Vast ice depression in Dålk Glacier, East Antarctica. Ice and Snow, 2017, 57(3): 427-432.
- Sukhanova A., Grigoreva S., Boronina A., Popov S., Kashkevich M., Kashkevich V., Martianov V., Lukin V. (2018). Geophysical survey for safety reasons at the Progress-Vostok logistic traverse, East Antartica. Abstracts of 27th International Polar Conference, Rostock, Germany, 25-29 March 2018, p. 178.
- Wingham D.J., Siegert M.J., Shepherd A., Muir A.S. (2006). Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes. Nature, 2006, 440(7087): 1033-1036.