

## ПОСЛЕДСТВИЯ ПРОРЫВА ОЗЕРА БОЛДЕР (ХОЛМЫ ЛАРСЕМАНН, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА)

**Попов С.В.**

*д. г.-м. н., ведущий геофизик  
Антарктической геофизической  
партии; старший преподаватель  
кафедры Гидрологии суши  
Института наук о Земле  
Санкт-Петербургского  
государственного университета*

**Пряхина Г.В.**

*к. г. н., доцент, заведующая  
кафедры Гидрологии суши  
Института наук о Земле  
Санкт-Петербургского  
государственного университета*

**Боронина А.С.**

*студентка магистратуры  
Института наук о Земле  
Санкт-Петербургского  
государственного университета*

Прорывы ледниковых озёр являются достаточно распространённым явлением. Они хорошо известны своими весьма плачевными последствиями: мощными селевыми потоками, сметающими всё на своём пути, принося разрушения и унося человеческие жизни. Они постоянно происходят в горах, и их количество с каждым годом растёт, причиной чему являются климатические изменения, связанные с Глобальным потеплением. В частности, прорыв озера Башкара [Черноморец и др., 2018] привёл к катастрофическим послед-

ствиям (рис. 1) для районов Приэльбрусья, которые наблюдали Авторы, в ходе полевых гидрологических и гляцио-геофизических работ лета 2018 г.

Прорывы подледниковых водоёмов известны, главным образом, узкому кругу

специалистов, которые профессионально занимаются данной тематикой. Это связано с тем, что их последствия большей частью скрыты под ледником и выявляются лишь дистанционными методами. Классическим примером



Рис. 1. Фотография, иллюстрирующая прохождение селевого потока, образовавшегося в процессе прорыва озера Башкара (Приэльбрусье)  
Фото Д.П. Соколовой, июнь 2018 г.

служит работа [Wingham et al., 2006]. В ней излагаются результаты многолетних спутниковых измерений высот поверхности ледника в районе подлёдного жёлоба Адвенче (Adventure subglacial trench, Земля Уилкса, Восточная Антарктида), где имеется несколько подледниковых водоёмов. Анализ полученных данных показал, что в период с середины 1996 г. по середину 1998 г. поверхность ледника над одним из них локально просела примерно на 4 м, в то время как над тремя другими, расположенными ниже, поднялась примерно от одного метра до трёх для разных водоёмов. Объяснением этого феномена стало предположение о том, что под влиянием каких-то причин произошёл прорыв одного из озёр. Вода устремилась вниз по уклону подлёдного рельефа, в сторону других водоёмов. Одновременно с этим поверхность ледника над опорожнённым водоёмом просела, а над другими, которые наполнились водой, поднялась. Вариации высот поверхности ледника были незначительными, однако точности существующей аппаратуры хватило для их выявления. На сегодняшний день в Антарктиде известно более четырёх сотен подледниковых водоёмов [Wright and Siegert, 2011], часть которых была открыта и отечественными специалистами [Попов и Черноглазов, 2006; Попов и Масолов, 2007; Попов и др., 2012; Попов и Попков, 2015; Попов и Лунев, 2016]. Естественно, среди них наверняка есть немало потенциально прорывоопасных, а, возможно, и недавно прорвавшихся, как водоёмы в районе подлёдного жёлоба Адвенче. На рисунке 2 представлена наиболее современная на настоящий момент схема высот подлёдного рельефа Антарктиды с нанесёнными подледниковыми водоёмами.

Но бывают и трагические исключения. Самые масштабные прорывы подледниковых водоёмов известны в Исландии. Именно здесь возник термин, характеризующий резкий сброс воды из подлёдных или приледниковых озёр «*jökulhlaup*», который в настоящее время получил широкое распространение в научной литературе. Здесь расположен один из крупнейших ледников Европы, Ватнайёкудль (Vatnajökull). Его площадь составляет более 8000 кв. км. Край ледника, ориентированный в сторону атлантического побережья, распадается на множество больших и малых языков, к которым приурочены прорывающиеся озёра. Сам ледник подвергается усиленному тепловому потоку Земли и подлёдным вулканическим извержениям. Под Ватнайёкудль имеется периодически опорожняющееся озеро Гримсвётн (Grímsvötn), прорывы

вы которого описаны в монографии [Björnsson 1988]. Накопление воды в нём происходит в основном из-за интенсивного донного таяния, вызванного повышенным тепловым потоком Земли, ввиду того, что остров располагается в пределах рифтовой зоны. Прорывы носят периодический характер с интервалом от 5 до 10 лет [Fowler, 2009]. В ряде случаев катастрофические паводки достигали поистине грандиозных размеров: максимальные расходы воды превышали 40 тыс. куб. м/с [Björnsson 2002]. В результате одного из них образовался селевой поток, который в 1996 г. разрушил мост (см. рис. 3) на участке единственной дороги, кольцом опоясывающей остров, которая соединяет все его основные населённые пункты.

В январе 2017 года, впервые за период наблюдений, произошло аналогичное

Рис. 2. Рельеф каменной поверхности Антарктиды по результатам проекта BEDMAP2 (по [Fretwell et al., 2013], с изменениями)

- 1 — береговая линия и границы шельфовых ледников по [ADD, 2016]; 2 — горные выходы по [ADD, 2016]; 3 — подледниковые водоёмы по [Wright and Siegert, 2011; Попов и др., 2012].  
 Буквенные сокращения: AAB — Австрало-антарктическая котловина; AF — Африка; AO — Атлантический океан; AP — Антарктический полуостров; AR — хребет Астрид; AS — море Амундсена; AST — желоб Адвенчер; ASB — подлёдный бассейн Аврора; AU — Австралия; BS — море Беллинсгаузена; BSH — возвышенность Бельжика; CPS — море Содружества; CMS — море Космонавтов; DDS — море Дюрвиля; DS — море Дейвиса; DML — Земля Королевы Мод; EM — горы Элсуерта; GLM — горы Голицына; GR — хребет Гуннерус; GRM — горы Гров; GSM — подлёдные горы Гамбурцева; HR — хребет Хеймефронт; IO — Индийский океан; KE — горы Кирван; KM — горы Крауль; KPL — плато Кергелен; KSM — подлёдные горы Комсомольские; LD — жёлоб Ламберта; LS — море Лазарева; MHM — горы Мюлиг-Хофман; MS — море Моусона; NM — горы Нейпир; PCM — горы Принс-Чарльз; PM — горы Пенсакола; PO — Тихий океан; PSB — подлёдный бассейн Полярный; RLS — море Рисер-Ларсена; RS — море Росса; RSH — возвышенность Резольюшан; SA — Южная Америка; SM — горы Сёр-Роннана; SO — Южный океан; SR — хребет Шеклтона; SSB — равнина Шмидта; SSM — подлёдные горы Серлапова; TAM — Трансантарктические горы; TM — горы Террон; VB — котловина Восток; VSB — котловина Винсенс; VSH — Восточная равнина; VSM — подлёдные горы Вернадского; WS — море Уэдделла; WSB — котловина Уилкса; YM — горы Ямато





Рис. 3. Фрагмент моста в районе Skeiðarásandur (Южная Исландия), разрушенного селевым потоком, оставленный в качестве памятника.  
Фото С.В. Попова, июнь 2006 г.

масштабное катастрофическое событие и в Восточной Антарктиде, в районе холмов Ларсеманн (Земля Принцессы Елизаветы). В западной части ледника Долк (Dálk Glacier), на участке дороги, соединяющей российскую станцию Прогресс и китайскую станцию Зонгшан с аэродромом и пунктом формирования российских и китайских санногусеничных походов во внутренние районы Восточной Антарктиды, в частности на станцию Восток, образовался провал (рис. 4). Его размер составляет 183×220 м, глубина 20–30 м, а приблизительный объём образовавшейся каверны оценивается в 803 тыс. куб. м [Popov et al., 2017]. В ходе полевого сезона эта дорога эксплуатируется достаточно интенсивно, и лишь по чистой

случайности обошлось без человеческих жертв.

Как же образовался этот провал? Для выяснения этого в сезон 63-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ, 2017/18 г.) в этом районе выполнялись комплексные мультидисциплинарные научно-прикладные исследования, включающие буровые, гляциологические, геодезические, гидрологические и геофизические работы. Они выполнялись отрядом, состоящим из сотрудников АО «ПМГРЭ», ФГБУ «ААНИИ», а также студентов кафедр Гидрологии суши и Геофизики Института Наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета.

В ходе этих масштабных работ был воссоздан процесс образования про-

вала [Боронина и др., 2018]. К югу от него имеется ледниковое озеро Болдер (рис. 5). Антарктическое лето 2016/17 г. выдалось более тёплым, чем раньше. Это привело к тому, что уровень воды в озере Болдер стал повышаться ввиду интенсивного таяния окружающих ледников и снежников. Переполнение озера, в конечном итоге, послужило причиной его прорыва. Талая вода устремилась частично по поверхности ледника Долк, но большая часть внутри него, по внутриледниковым каналам и трещинам. К этому времени в западной части ледника Долк имелся либо подледниковый, либо внутриледниковый водоём. На это указывают результаты георадарных исследований, выполненных в сезон 58-й РАЭ (2012/13 г.) в этом районе [Попов и Эберляйн, 2014]. Воды озера Болдер начали его переполнять. В конечном итоге, когда механические напряжения в котловине водоёма достигли предельных значений, произошёл его прорыв и вытекание воды через ледник в залив Прюдс. Математическое моделирование показало, что максимальный расход при этом мог достигать значений 250 м<sup>3</sup>/с, что сопоставимо с такими реками, как Потомак в США, Тибр в Италии и Тулома в России. В результате опустошения водоёма в его кровле начали нарастать напряжения. Как показали результаты работ 63-й РАЭ, он был перекрыт ледником мощностью примерно пяти метров. При таком соотношении мощности и линейных размеров напряжения ледяной кровли достигли предельных значений, и она начала разрушаться. При этом, согласно имеющимся кино- и фотоматериалам, водоём ещё до конца не опорожнился. Однако через некоторое время истечение воды прекратилось, и обломки кровли упали на его дно (рис. 4).



▲ Рис. 4. Схема полуострова Брокнес (холмы Ларсеманн) (а) и внутриледниковый водоём до прорыва (б) и после (в)

На секции (а) чёрной сплошной линией показана новая трасса, принятая в эксплуатацию по результатам работ 63-ей РАЭ. На секции (б) синей пунктирной линией показано предположительное положение подледникового водоёма. На секциях (а,б) чёрной пунктирной линией показана дорога, функционирующая до просадки ледника. Фотографии А.В. Миркина, выполненные в январе (а) и марте (б) 2017 г.

Рис. 5. Гидрографическая система, связывающая озеро Болдер и внутриледниковый водоём, существовавший на месте провала. Фото А.В. Миркина, январь 2017 г.



Образовавшийся провал разрушил участок дороги, представляющей исключительную важность как для авиационных операций, так и для обеспечения российской внутриконтинентальной станции Восток. В связи с этим, в ходе полевых работ 63-й РАЭ, помимо изучения провала, выполнялись работы, связанные с поиском безопасного пути в обход него, поскольку иные варианты отсутствовали. Для этого в кратчайшие сроки были проведены обширные инженерно-изыскательские работы, и 19 января 2018 года путь был найден, а 23 января были закончены работы по

подготовке, укатке и обвеховке новой трассы (рис. 6), а на следующий день началась её эксплуатация [Суханова и др., 2018].

Таким образом, в ходе летнего полевого сезона 63-й РАЭ (2017/18 г.) были проведены важные научно-производственные работы, которые позволили сделать ещё один шаг к пониманию субгляциальных гидрологических процессов, а также осуществить мероприятия, направленные на обеспечение безопасности транспортных операций Российской антарктической экспедиции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боронина А.С., Попов С.В., Пряхина Г.В. Моделирование подледниковых паводков на примере катастрофического прорыва водоёма в леднике Долк (полуостров Брокнес, Восточная Антарктида) // Сборник докладов международной научной конференции «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии». 2018. С. 854–859.
2. Попов С.В., Лунев П.И. Результаты современных отечественных наземных радиолокационных исследований во внутренних районах Восточной Антарктиды // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. Т. 107. № 1. С. 19–27.

*Авторы благодарят начальников станции Прогресс А.В. Миракина и А.В. Воеводина, а также её сотрудников А.А. Коняева, Р.Р. Латыпова, В.В. Соценко и А.В. Теплякова за помощь в проведении работ; 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, а также 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 водоемов Антарктиды».*

3. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Отечественные сейсмические, радиолокационные и сейсмологические исследования подледникового озера Восток // Лёд и снег. 2012. № 4 (120). С. 31–38.
4. Попов С.В., Попков А.М. Сейсморадиолокационные исследования района подледникового озера Пионерское, Восточная Антарктида // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 2. С. 107–113.
5. Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Об открытии подледникового озера в районе станции Пионерская (Восточная Антарктида) // Материалы гляциол. исслед. 2006. вып. 100. С. 165–167.
6. Попов С.В., Эберляйн Л. Опыт применения георадара для изучения строения снежно-фирновой толщи и грунта Восточной Антарктиды // Лед и Снег. 2014. № 4 (128). С. 95–106.
7. Суханова А.А., Попов С.В., Григорьева С.Д. Инженерные изыскания, направленные на организацию всесезонной трассы в районе российской станции Прогресс, Восточная Антарктида, в сезон 63-й РАЭ (2017/18 г.) // Сборник докладов международной научной конференции «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии». 2018. С. 797–800.
8. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М., Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли. 2018. Том XXII. № 2. С. 70–80.
9. Antarctic Digital Database (ADD), Version 7.0, January 2016. Scientific Committee on Antarctic Research, British Antarctic Survey, Cambridge.
10. Björnsson H. Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland // Glob. Planet. Change. 2002. Vol. 35. No 3-4. P. 255–271.
11. Björnsson H. Hydrology of ice caps in volcanic regions // Reykjavík. Soc. Sci. Isl. University of Iceland. 45. 1988. 139 p.
12. Fowler A.C. Dynamics of subglacial floods // Proc. Royal Society. A. Mathematical Physics. Engineering Sciences. 2009. Vol. 465. No 2106. P. 1809–1828.
13. Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G., Bamber J.L., Barrand N.E., Bell R., Bianchi C., Bingham R.G., Blankenship D.D., Casassa G., Catania G., Callens D., Conway H., Cook A.J., Corr H.F.J., Damaske D., Damm V., Ferraccioli F., Forsberg R., Fujita S., Gim Y., Gogineni P., Griggs J.A., Hindmarsh R.C.A., Holmlund P., Holt J.W., Jacobel R.W., Jenkins A., Jokat W., Jordan T., King E.C., Kohler J., Krabill W., Riger-Kusk M., Langley K.A., Leitchenkov G., Leuschen C., Luyendyk B.P., Matsuoka K., Mouginot J., Nitsche F.O., Nogi Y., Nost O.A., Popov S.V., Rignot E., Rippin D.M., Rivera A., Roberts J., Ross N., Siegert M.J., Smith A.M., Steinhage D., Studinger M., Sun B., Tinto B.K., Welch B.C., Wilson D., Young D.A., Xiangbin C., Zirizzotti A. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica // The Cryosphere. 2013, Vol. 7. P. 375–393. doi:10.5194/tc-7-375-2013
14. Popov S.V., Masolov V.N. Forty-seven new subglacial lakes in the 0–110°E sector of East Antarctica // J. Glaciol. 2007. Vol. 53. No. 181. P. 289–297.
15. Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. Vast ice depression in Dälk Glacier, East Antarctica // Ice and Snow. 2017. Vol. 57. No 3. P. 427–432.
16. Wingham D.J., Siegert M.J., Shepherd A., Muir A.S. Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes // Nature. 2006. Vol. 440. No 7087. P. 1033–1036.
17. Wright A., Siegert M.J. The identification and physiographical setting of Antarctic subglacial lakes: an update based on recent geophysical data for Subglacial Antarctic Aquatic Environments // Subglacial Antarctic Aquatic Environments (M. Siegert, C. Kennicutt, B. Bindshadler, eds.). AGU Geophysical Monograph 192. Washington DC, 2011. P. 9–26.