

ПРОРЫВЫ ЛЕДНИКОВЫХ И ВНУТРИЛЕДНИКОВЫХ ВОДОЁМОВ В РАЙОНЕ РОССИЙСКОЙ СТАНЦИИ ПРОГРЕСС И ПОЛЕВОЙ БАЗЫ МОЛОДЁЖНАЯ (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА)

А.С. Боронина¹, С.В. Попов², Г.В. Пряхина¹

¹*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, al.b.s@yandex.ru*

²*АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», Санкт-Петербург, Россия*

Для водоёмов, расположенных в районах распространения оледенения, характерны внезапные, порой катастрофические, сбросы озёрных вод. Зачастую, подобные события оказывают негативное влияние на имеющуюся инфраструктуру и становятся причиной гибели людей. К настоящему времени, факт, что прорывы озёр широко распространены в Полярных регионах нашей планеты, является неоспоримым. Одним из первых, кто зарегистрировал прорывной паводок на антарктическом континенте был *Ин Гудвин (Ian Goodwin)*. В его работе [8] отмечается, что впервые резкие опорожнения антарктических ледниковых озёр наблюдались в районе австралийской станции Кейси (Восточная Антарктида). В качестве другого показательного примера, можно привести провал, образовавшийся в районе российской станции Прогресс (п-ов Брокнес, Восточная Антарктида), в результате прорыва ледникового озера и прохождения подледникового паводка [1; 3; 9]. Кроме того, в научных кругах значительное внимание уделяется изучению перетекания вод в системе подледниковых водоёмов в результате образования дренажных каналов стока в леднике [5; 6; 10]. Таким образом, тематика, связанная с прорывами озёр и последующем формированием паводков, всегда была и остается весьма актуальной, поскольку тесно связана с обеспечением безопасности людей и транспортной техники при осуществлении логистических операций, в частности Российской антарктической экспедиции (РАЭ).

Восточная часть полуострова Брокнес, где в сезон 63-ей РАЭ (2017/18 гг.) выполнялся комплекс гидрологических, геофизических и геодезических исследований, располагается на Берегу Ингрид Кристенсен (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида). Одной из характерных особенностей этой территории является наличие развитой гидрографической сети (рис. 1), состоящей из водоёмов, расположенных как на леднике, так и внутри него [7]. Как показал обзор литературных источников, а также результаты рекогносцировочных работ для большинства из них характерны стремительные изменения уровня воды, связанные с разрушением снежно-ледовых естественных плотин.

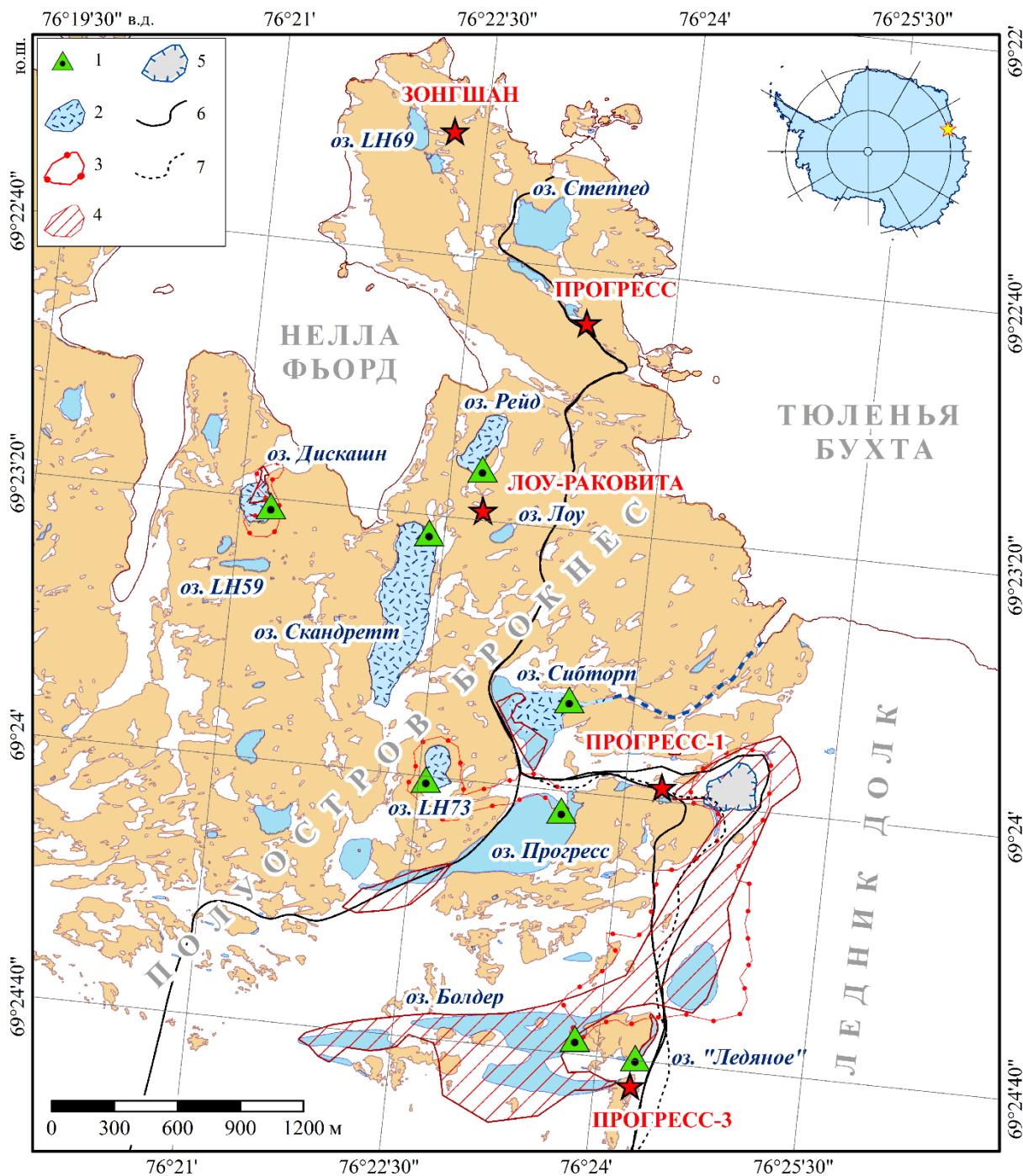


Рисунок 1 – Схема расположения полевых работ.

1 – водомерные посты; 2 – районы батиметрических съёмки; 3 – участки тахеометрических съёмки; 4 – районы георадарного профилирования; 5 – провал в леднике Долк; 6 – действующие дороги; 7 – дорога, участок которой, разрушен провалом. Синяя пунктирная линия – временный ручей из озера Сибторп.

Как правило, ввиду труднодоступности организовать мониторинг за состоянием антарктических водных объектов крайне сложно. По этой причине, для изучения процессов разрушения подпруживающих их перемычек и формирования катастрофических паводков, учёные чаще всего прибегают к математическому моделированию. Исследования, выполненные летом 2017/18 гг., были направлены на изучение

масштабного провала, образовавшегося 30-го января 2017 г. в леднике Долк [9], выявление других потенциально прорывоопасных озёр и сбор необходимой натурной информации для проведения моделирования прорывов водоёмов, расположенных вблизи от инфраструктуры РАЭ. К сожалению, объём настоящей публикации не позволяет подробно осветить все аспекты проделанной работы, однако Авторам представляется целесообразным акцентировать внимание именно на математическом моделировании процесса формирования и развития катастрофического паводка при прорывах озёр различного генезиса.

За основу взята модель, предложенная Ю.Б. Виноградовым [2], в которой дополнительно учтено возможное наличие ледникового покрова над водоёмом. Кроме того, используемая в модели зависимость объёма водной массы от глубины, выражаемая через аппроксимацию степенной функцией заменена на использование реальных значений с цифровой модели рельефа. В качестве основных натурных входных данных при моделировании задавались: грид (регулярная сеть, в узлах которой располагаются некоторые эффективные значения картируемых величин); разница отметок между точками входа в тоннель и выхода из него; его длина; температура воды в озере к моменту формирования прорыва, а также плотность и удельная теплоёмкость материала плотины. В качестве примера предлагается рассмотреть прорывы двух совершенно разных водных объектов: внутрiledникового водоёма, существовавшего на месте нынешнего провала, а также озера Дискашн, расположенного в каменном основании и подпруженного снежно-ледовой естественной плотиной.

Феноменологическое описание процесса формирования провала было подробно изложено в публикации [9] и дополнено материалами полевых исследований в работе [1]. Согласно уточнённым представлениям, его образование происходило в два этапа. Изначально, в результате переполнения котловины тальми водами снежников и ледника, случилось разрушение перемычки на озере Болдер. Благодаря уклону поверхности, поток водных масс моментально, по наледниковым и подледниковым каналам, устремился в сторону полевой базы Прогресс-1, где и начал наполнять ранее стабильный внутрiledниковый водоём. Второй этап связан с прорывом именно последнего и увеличением размеров депрессии до катастрофических. Канала стока из внутрiledникового водоёма найти не удалось. Однако в северо-восточной части провала образовался грот значительных размеров (рис. 2а), который дает основание полагать, что поток, пошедший на формирование паводка, устремился по направлению к заливу Прюдс. При моделировании будем полагать, что в процессе формирования прорыва в придонной части водоёма образуется наклонный канал стока. Грид, послуживший в качестве основы, был получен по результатам тахеометрической съёмки (рис. 2б). Перепад высот составляет 764 м. Серия расчётов гидрографа прорывного паводка проведена для длин тоннелей 764 м, 821 м, 971 м и 1134 м исходя из предположений, что ледник Долк является шельфовым [4]. Температура воды в водоёме

принята равной фазовому переходу, исходя из того, что озеро до прорыва было полностью перекрыто ледником.

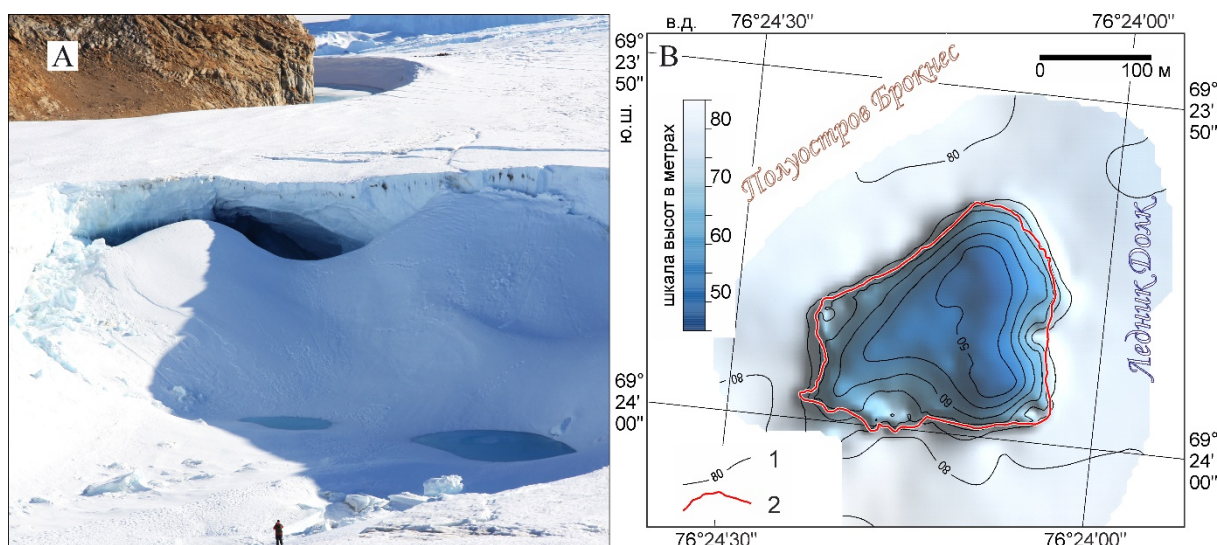


Рисунок 2 – Грот внутри провала через год после его формирования (А), схема высот поверхности ледника (Б).

Фотография (А) выполнена *А.С. Борониной* в январе 2018 г., цифрами на секции (Б) показаны: 1 – изолинии поверхности ледника, сечение изолиний 5 м; 2 – контур провала на 8 января 2018 г.

Исходя из анализов результатов моделирования можно заключить, что гидрографы катастрофического паводка характеризуются сравнительно большой величиной отрицательной асимметрии, свойственной при прорыве озера по внутриледниковому каналу стока. Время от начала истечения воды до прохождения пика увеличивается по мере увеличения длины тоннеля. Наибольшая величина расхода из всех рассматриваемых сценариев прорыва отмечается в первом расчетном случае при длине тоннеля 764 м. Максимум стока достигается через 6 часов 57 минут с момента начала истечения и составляет около $230 \text{ м}^3/\text{с}$. После прохождения пика, поток резко уменьшает свою интенсивность и спустя 7 часов 18 минут, когда из озера спустился весь возможный объём воды, составляющий около 708.7 тыс. куб. м, паводок прекратился. Аналогичная ситуация наблюдается и при других значениях длин тоннеля. Время прохождения катастрофического паводка непосредственно до береговой линии залива Прюдс составляет около 12 часов. Максимальный расход воды достигает своей величины через 11 часов 27 минут от начала прорыва и составляет $141 \text{ м}^3/\text{с}$. Отсутствие натуральных наблюдений во время прохождения прорывного паводка не позволяет оценить правильность рассчитанных значений. Однако, по мнению Авторов, полученные результаты вполне соотносимы с описаниями очевидцев этого события.

Прорыв озера Дискашн, происходил в несколько иных условиях, однако механизм его формирования аналогичен предыдущему. Основываясь на данных, полученных при наблюдениях на водомерном посту, в сезон 63-ей РАЭ, уровень воды в озере понизился на величину равную 0.95 м. При этом в снежнике, подпруживающем водоём, образовался тоннель, размеры которого изменяются в широких пределах. Процесс формирования паводка также было решено оценить посредством адаптированной модели *Ю.Б. Виноградова*. Аналогичным образом, в качестве входной информации в неё задавался объём озера к моменту прорыва, а также конфигурация его котловины, для чего была выполнена тахеометрическая съёмка прибрежной зоны и промеры глубин эхолотом и георадаром. При совмещении полученных данных и известной величине падения отметки поверхности воды была построена схема глубин озера Дискашн до прорыва (рис. 3а). При этом его объём составлял 60.14 тыс. куб. м, при максимальной глубине 4.8 м, и средней глубине около 2.4 м. Длина тоннеля, составила 128 м. Перепад высот на участке между входом в тоннель и выходом из него оценен в 2.17 м. Температура воды принята равной 5°C исходя из результатов наблюдений за температурой приповерхностного слоя на водомерном посту. Мощность льда над озером принята равной нулю.

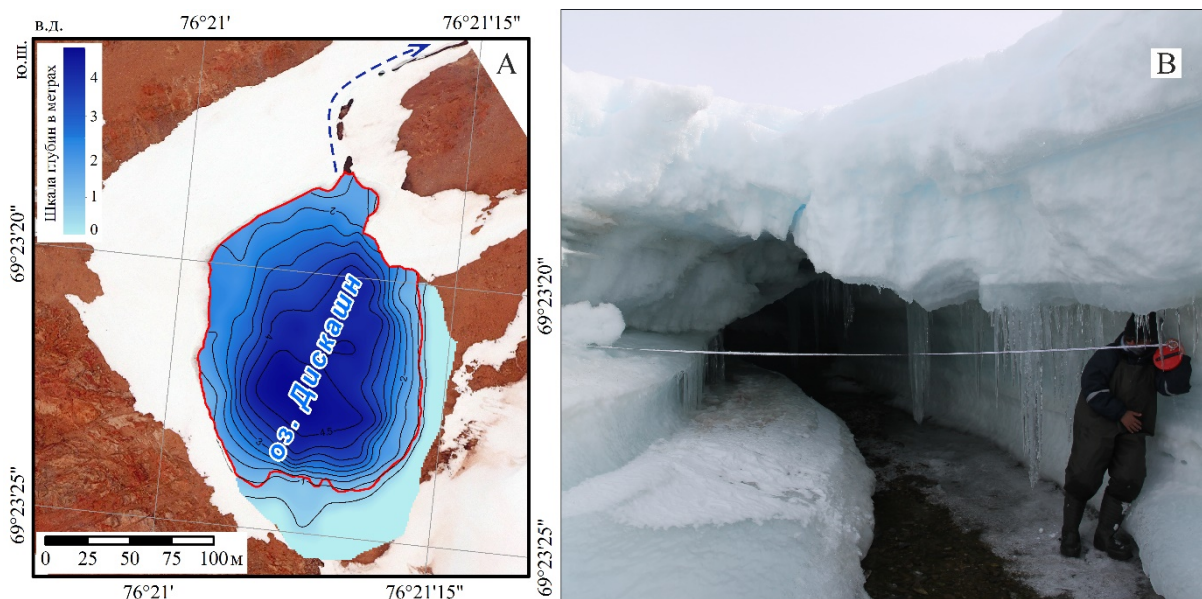


Рисунок 3 – Схема глубин озера Дискашн до прорыва (А); тоннель, образовавшийся в снежнике в результате прорыва озера (Б).

На секции (А) показаны: изобаты с сечением изолиний 0.5 м; красная линия контур озера до прорыва. Фотография (Б) выполнена *С.В. Поповым* в феврале 2018 г.

Согласно полученным данным, можно заметить, что гидрограф характеризуется плавной формой, без резких изменений расхода воды. Максимальный расход оценивается в 1.8 м³/с и достигается через 7 часов

37 минут после начала истечения. Объём воды, пошедший на формирование паводка составляет 26750 м³. Общее время истечения потока в Нелла Фьорд составляет 9 часов 40 минут.

В ходе рекогносцировочного обследования было установлено, что сток озёрных вод по указанному пути происходит довольно часто. На стенках тоннеля отчётливо прослеживаются метки высоких вод, оставленные при протекании потоков различной мощности. В качестве показательного примера можно привести ступенчатую структуру внутри снежника (рис. 3б). Таким образом, было выявлено, что максимальные размеры тоннеля сформировались потоком предыдущих лет, а отток воды нынешнего сезона, вероятно, не носил катастрофического характера. Выдвинутое предположение хорошо подтверждается результатами моделирования.

Приведённые примеры, не единственные случаи возникновения катастрофических сбросов озёрных вод, регистрируемых на территории Антарктиды в течение последних лет. В конце летнего полевого сезона 63-ей РАЭ (январь 2018 г) произошел прорыв водных масс из озера Разливное, расположенного в районе российской полевой базы Молодёжная (рис. 4). Согласно оперативной сводке об основных экспедиционных событиях и операциях РАЭ за период с 18-го по 25-е января 2018 г., опорожнение водоёма началось утром 19-го января и продолжалось вплоть до 23-го января. Мощным потоком, ширина которого составляла около 10 м, было снесено несколько железных опор эстакады. Несомненно, после опорожнения озера, опасность нового прорыва уменьшилась, однако полностью исключать повторение подобных явлений не следует.

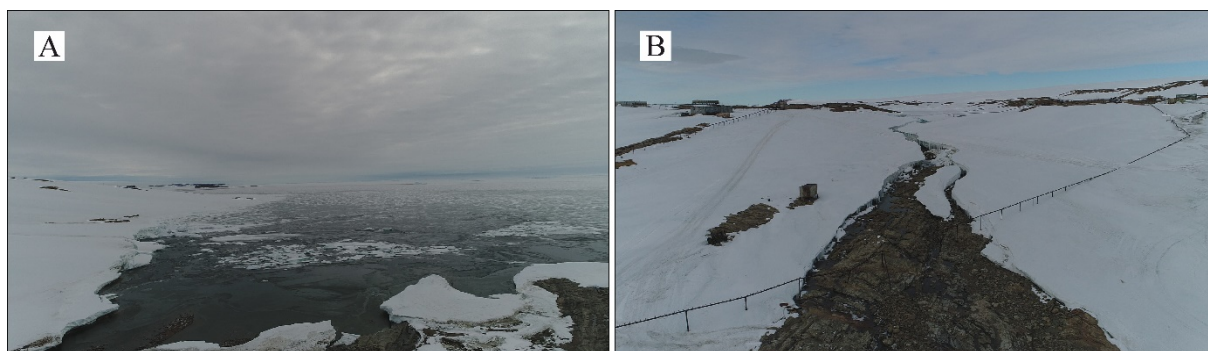


Рисунок 4 – Озеро Разливное после прорыва (А); сформировавшееся русло, по которому происходил сброс озёрных вод (Б).

Фотографии выполнены *А.А. Гайдашовым* в феврале 2018 г.

Таким образом, можно утверждать, что модель, предложенная *Ю.Б. Виноградовым* [2], с внесёнными в неё коррективами применима для изучения процесса формирования прорывных паводков различных масштабов.

Авторы благодарят начальника Белорусской антарктической экспедиции (БАЭ) *А.А. Гайдашова* за предоставленные фото и видео материалы по прорыву озера Разливное, а также начальника станции Прогресс 62-ой РАЭ *А.В. Миракина* за помощь в организации полевых работ отряда.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-05-00421 «Особенности формирования и развития паводков подледниковых водоёмов Антарктиды»).

Литература

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». 2018. С. 854-859.
2. Виноградов Ю.Б. Метод расчета гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера // Селевые потоки. 1976. Сб. 1. С. 138-153.
3. Попов С.В., Боронина А.С., Григорьева С.Д., Суханова А.А., Дешевых Г.А. 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. 2018. №1. С. 24-26.
4. Antarctic Digital Database (ADD), Version 7.0, January 2016. Scientific Committee on Antarctic Research, British Antarctic Survey, Cambridge.
5. Fricker H.A., Scambos T., Bindschadler R., Padman L. An active subglacial water system in West Antarctica mapped from space // Science. 2007. V. 315. P. 1544-1548.
6. Fricker H., Scambos T. Connected subglacial lake activity on lower Mercer and Whillans Ice Streams, West Antarctica, 2003–2008 // J. Glaciol. 2009. V. 55. No 190. P. 303-315.
7. Gillieson D. An environmental history of two freshwater lakes in the Larsemann Hills, Antarctica // Hydrobiologia. 1991. V. 214. No 1. P. 327-331.
8. Goodwin I.D. The nature and origin of a jökulhlaup near Casey Station, Antarctica // J. Glaciol., 1988. Vol. 34. No 116. P. 95-101.
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. V. 57. No 3. P. 427-432.
10. Wingham D.J., Siegert M.J., Shepherd A., Muir A.S. Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes // Nature. 2006. V. 440. No 7087. P. 1033-1036.

BREAKTHROUGHS OF GLACIAL AND INTERGLACIAL LAKES IN THE AREAS OF PROGRESS STATION AND MOLODEZHNA YA FIELD BASE (EAST ANTARCTICA)

A.S. Boronina¹, S.V. Popov², G.V. Pryakhina¹

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg,

Russia, al.b.s@yandex.ru

²Polar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia

The integral hydrological, hydrophysical and geodesy research, which were completed during the 63-th RAE (2017/18). They took place in the eastern part of the Broknes Peninsula (Larsemann Hills, Eastern Antarctica). These research were oriented to the studying of massive flash, that was formed in the Dolk Glacier due to breakthrough of Bolder Lake 30 January 2017. Moreover, the aim of the research was to detect the other risky breakthrough lakes, which are located near RAE infrastructure.

In current work mathematical modelling of the formation and development of catastrophic flood in lakes of different genesis is discussed. Yu. B. Vinogradov's model with some adaptations to the breakthrough conditions in the Antarctic lakes was considered as a basis model. There are examined floods of two contrary water objects are taken as an example. First object is the intraglacial lake, which had existed until the breakthrough was formed. The second one is Discussion Lake, that has rock basin and is impounded by snow-glacial natural dam.

The results of modelling of breakthroughs of studied lakes are following: hydrographs of flood were created; their main special aspect were analyzed; maximal discharge, volume and length of flood were estimated.