

Прикладные проблемы

УДК 550.837.76

doi: 10.31857/S2076673421020089

Строение снежно-ледовых перемычек прорывных озёр полуострова Брокнес (оазис Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида) по данным георадиолокации

© 2021 г. С.Д. Григорьева^{1*,2}, Э.Р. Киньябаева^{1,2}, М.Р. Кузнецова¹, С.В. Попов^{3,1}, М.П. Кашкевич¹¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;²Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия;³Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, Россия

*grigoreva.svetl@gmail.com

Structure of snow-ice dams of the outburst lakes in the Broknes Peninsula (Larsemann Hills, East Antarctica) based on ground-penetrating radar data

S.D. Grigoreva^{1*,2}, E.R. Kiniabaeva^{1,2}, M.R. Kuznetsova¹, S.V. Popov^{3,1}, M.P. Kashkevich¹¹Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; ²Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia;³Polar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia

*grigoreva.svetl@gmail.com

Received August 23, 2020 / Revised December 6, 2020 / Accepted March 19, 2021

Keywords: *Broknes Peninsula, East Antarctica, ground-penetrating radar, Larsemann Hills, outburst floods.*

Summary

During the summer field season of the 65th Russian Antarctic Expedition a research aimed at studying the structure of the snow-ice dams of the Lakes Progress and Discussion (Larsemann Hills, East Antarctica), which are characterized with annual outburst floods, was carried out. Survey was performed using ground-penetrating radar sounding complemented with non-core drilling and analysis of the aerial photo data acquired with unmanned aerial vehicle during the last field seasons. The results show that location of the waterways, which occur during the outbursts of the both lakes, does not change significantly year in year out and fits a linear depression in basement topography under the dam and a following flexure of the ice layer. During the winter period, the opened channels are being filled with snow, and thereby a natural softened zone is being formed. Further outburst flood propagates mainly within this zone. Monitoring survey of the snow-ice dam of the Progress Lake during the summer period showed that destruction of the dam does not happen rapidly when the outburst takes place, but begins a few weeks before it with gradual filtration within the snow layer.

Citation: Grigoreva S.D., Kiniabaeva E.R., Kuznetsova M.R., Popov S.V., Kashkevich M.P. Structure of snow-ice dams of the outburst lakes in the Broknes Peninsula (Larsemann Hills, East Antarctica) based on ground-penetrating radar data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021. 61 (2): 291–300 [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421020089.

Поступила 23 августа 2020 г. / После доработки 6 декабря 2020 г. / Принята к печати 19 марта 2021 г.

Ключевые слова: *Восточная Антарктида, георадарное профилирование, полуостров Брокнес, прорывные паводки, Холмы Ларсеманн.*

Приведены результаты изучения строения снежно-ледовых перемычек прорывоопасных озёр Прогресс и Дискашн (оазис Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида), выполненные методом георадиолокации. Дополнительно проведены бескерновое механическое бурение и аэрофотосъёмка с использованием беспилотного летательного аппарата. На примере изученных водоёмов установлены основные геолого-гляциологические тенденции формирования прорывных паводков ледниковых озёр.

Введение

Одна из отличительных физико-географических черт полуострова Брокнес (оазис Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида) — наличие многочисленных пресноводных водоёмов, среди которых в особую группу входит ряд озёр, характеризующихся периодическими прорывными

паводками [1]. Как правило, они подпружены естественными снежно-ледовыми плотинами. При переполнении водоёма и повышении напряжения на перемычку происходит её полное или частичное разрушение, что вызывает стремительную разгрузку озёрных вод через сформированный таким образом канал стока. Среди примеров таких явлений, известных в пределах

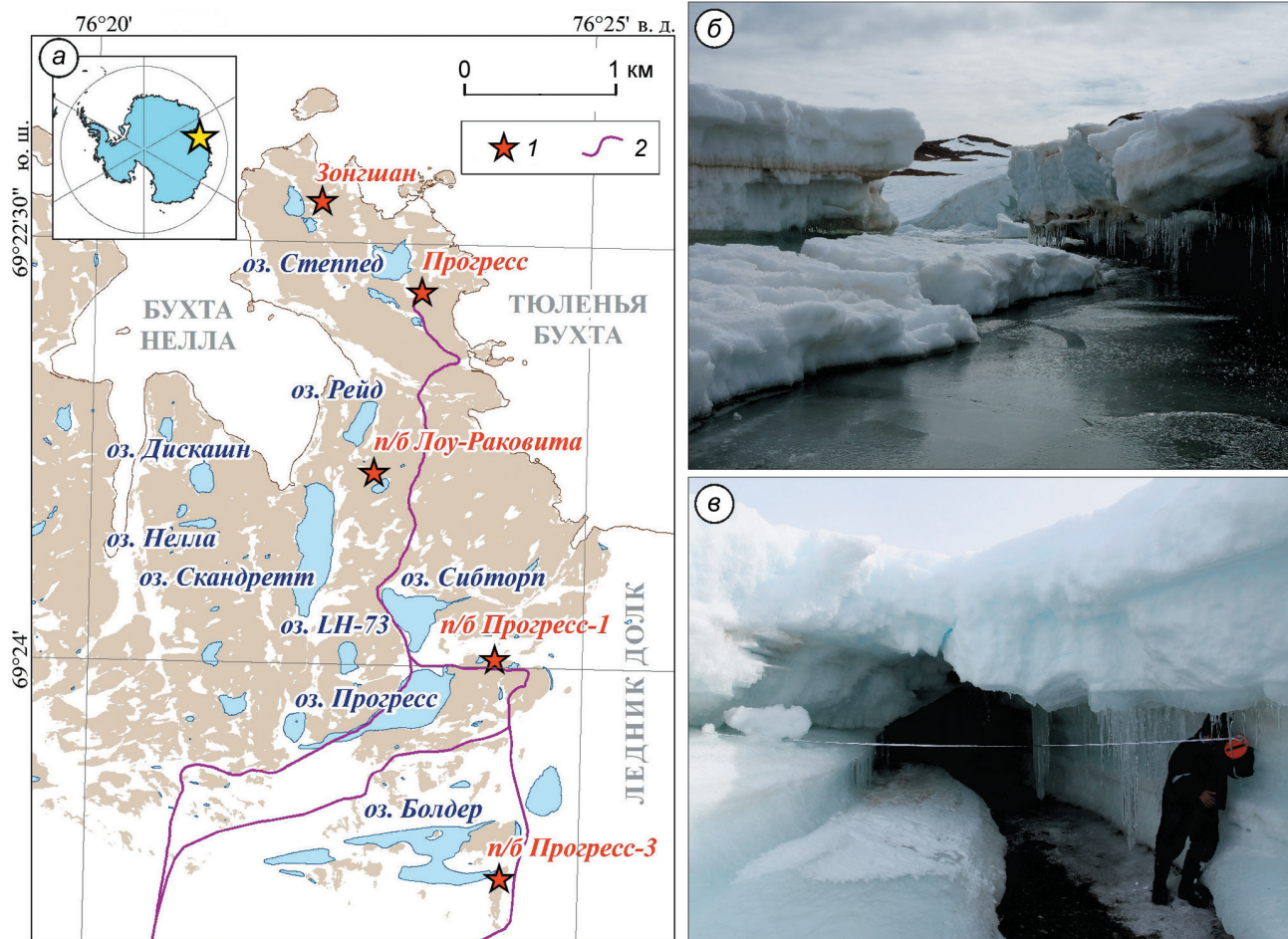


Рис. 1. Характеристика участка работ в восточной части полуострова Брокнес: *a* – обзорная схема [3]; *б* – канал прорыва оз. Прогресс (15 января 2019 г., фото А.А. Четверовой); *в* – канал прорыва оз. Дискашн (24 января 2018 г., фото С.В. Попова). 1 – полярные станции и полевые базы; 2 – трассы движения транспортной техники

Fig. 1. Characteristics of the area of investigations at the eastern part of the Broknes Peninsula *a* – location scheme [3]; *б* – outburst channel of the Progress Lake (15th January, 2019, photo by A.A. Chetverova); *в* – outburst channel of the Lake Discussion (24th January 2018, photo by S.V. Popov). 1 – polar stations and field camps; 2 – logistic routes

оазиса Холмы Ларсеманн, можно отметить формирование провала в западной части ледника Долк, образовавшегося 30 января 2017 г. в результате прорыва внутрiledникового водоёма и разрушившего участок трассы, соединяющей Российскую антарктическую станцию Прогресс с аэродромом и пунктом формирования санно-гусеничных походов во внутренние районы Антарктиды [2, 3]. Из озёр восточной части п-ова Брокнес ежегодные прорывные паводки отмечаются на озёрах Прогресс, Нелла и Дискашн, а более редкие и нерегулярные – на озёрах Болдер, ЛН-73, Скандретт, Рейд (рис. 1).

Возможные катастрофические последствия прорывов ледниковых водоёмов делают

их опасными для расположенных поблизости объектов инфраструктуры полярных станций. Многолетние наблюдения позволяют установить водоёмы, которым свойственны прорывные паводки, однако полностью исключить хозяйственную деятельность на участках, прилегающих к ним, нельзя. Так, в районе станции Прогресс возможность организации транспортных маршрутов значительно ограничена расчленённым рельефом местности. Для обеспечения безопасности логистических операций вблизи опасных гидрологических объектов ведётся комплекс мониторинговых мероприятий, которые включают в себя использование гидрологических методов, а также регулярное геофи-

зическое обследование состояния снежно-ледовых плотин прорывных водоёмов [4].

В ходе работ летнего полевого сезона 65-й Российской антарктической экспедиции (2019/20 г.) с помощью георадиолокационного профилирования были обследованы снежно-ледовые перемычки озёр Прогресс и Дискашн, паводки которых наблюдались авторами в течение летних периодов 2017/18 и 2018/19 гг. (см. рис. 1, б, в). Геофизические работы были направлены на решение двух основных задач: 1) изучение внутреннего строения (вещественного состава, морфологии слоистых сред) снежно-ледовых перемычек и выявление их геоморфологических особенностей, способствующих развитию прорывных каналов; 2) оценка изменений, происходящих в теле снежно-ледовых перемычек в течение летнего периода.

Методика работ

Планирование сети наблюдений при обследовании снежно-ледовых перемычек озёр Прогресс и Дискашн велось с учётом материалов, полученных в ходе предыдущих полевых сезонов [2, 5, 6]. Согласно им, последний прорыв оз. Прогресс произошёл 14 января 2019 г., оз. Дискашн – в период с декабря по 12 января 2019 г. (не наблюдались авторами). Благодаря данным аэрофотосъёмки, выполненных в феврале 2019 г. (сезон 64-й РАЭ) при помощи беспилотного летательного аппарата, установлено положение каналов стока, сформированных в ходе паводков обоих озёр. К началу полевых работ 65-й РАЭ они были занесены снегом и не наблюдались с поверхности.

Поскольку по снежно-ледовой плотине оз. *Прогресс* проходит трасса движения транспортной техники, интенсивно используемая в летнее время, работы на этом участке в первую очередь были направлены на обеспечение безопасности логистических операций. Для этого георадарное профилирование выполняли с периодичностью один раз в три недели – с начала ноября по конец декабря 2019 г. Работы проводили по одной и той же сети рядовых маршрутов, ортогональных положению прошлогоднего канала стока и дополненных двумя секущими профилями. Съёмку вели с помощью георадара Zond 12e (RadSys, Латвия) с антен-

ным блоком 900 МГц; плано-высотная привязка наблюдений обеспечивалась совместным применением штатного одометра георадара и DGPS-комплекса EFT (ООО «Эффективные технологии», Россия).

Оз. *Дискашн* расположено на удалении от объектов инфраструктуры РАЭ, и его прорывы не угрожают выполнению транспортных операций, поэтому необходимости мониторинговых мероприятий в пределах этого участка нет. Геофизические работы на нём проводили, как и на оз. Прогресс, с использованием аналогичного комплекса аппаратуры, но только один раз – в начале ноября 2019 г. На обоих объектах георадарные съёмки, выполненные в ноябре 2019 г., были дополнены механическим бескерновым бурением с промером мощностей снега и льда.

Георадиолокационные данные обеих съёмок обрабатывали по стандартной методике, предусматривающей: а) первичную оценку качества материалов; б) выбор профиля усиления; в) горизонтальную фильтрацию, направленную на подавление интенсивной прямой волны; г) частотную фильтрацию; д) пересчёт временных разрезов в глубинные с применением послойного алгоритма учёта скоростных параметров сред.

Значения относительной диэлектрической проницаемости определяли методом подбора с учётом данных бурения. Подбранное значение считалось корректным, если мощность соответствующей толщи, определяемая по данным георадиолокации при этом значении, совпадала с мощностью, измеренной в этой же точке профиля при буровых работах. Определённые таким образом относительные диэлектрические проницаемости на участках работ составили 1,4 ед. для снега и 3,05 ед. для льда. Оценки их плотности можно получить по формуле, выведенной А. Коваксом [7]: $\epsilon = (1 + 0,845\rho)^2$. Согласно приведённому соотношению, плотность снега для изученных участков составляет 210 кг/м³, что отвечает сухому метелевому снегу [8], а льда – 883 кг/м³ – значение, характерное для пресного льда с хаотической ориентировкой кристаллов [9].

Геофизические работы дополняли аэрофотосъёмкой, выполненной с применением беспилотного летательного аппарата самолётного типа ZALA 421-08M (ООО «ЦСТ», Россия). Это позволило визуально зафиксировать изменения, происходящие на участках работ по мере напол-

нения озёр, формирования и развития их прорывных паводков, произошедших в сезон б5-й РАЭ 19 декабря 2019 г. на оз. Дискашн и 6 января 2020 г. на оз. Прогресс.

Строение снежно-ледовых перемычек озёр Прогресс и Дискашн

Озеро Прогресс. Примеры георадарных разрезов, отражающие основные черты строения снежно-ледовой перемычки оз. Прогресс, показаны на рис. 2. На рис. 2, а, б приводятся данные, полученные по одному и тому же маршруту съёмки 5 ноября 2019 г. и 24 декабря 2019 г. соответственно. На разрезах отчётливо прослежи-

ваются границы снега и льда (1 на рис. 2, а, б), льда и скального основания (2 на рис. 2, а, б). К участку профиля, отвечающему положению прошлогоднего канала стока озёрных вод (3 на рис. 2, а, б), приурочен прогиб, выраженный в рельефе коренных пород и толще льда и засыпанный снегом. Его границы, а также кровля и придонная часть канала маркируются интенсивными дифрагированными волнами (4 на рис. 2, а, б). Мощность снега вдоль профиля варьирует от 0,5 до 4 м в ноябре и от 0 до 3 м в конце декабря, достигая максимальных значений в пределах прошлогоднего канала, при этом мощность льда за период наблюдений существенно не меняется. На рис. 2, б отражены изменения, происходящие в теле снежно-ледовой перемычки в лет-

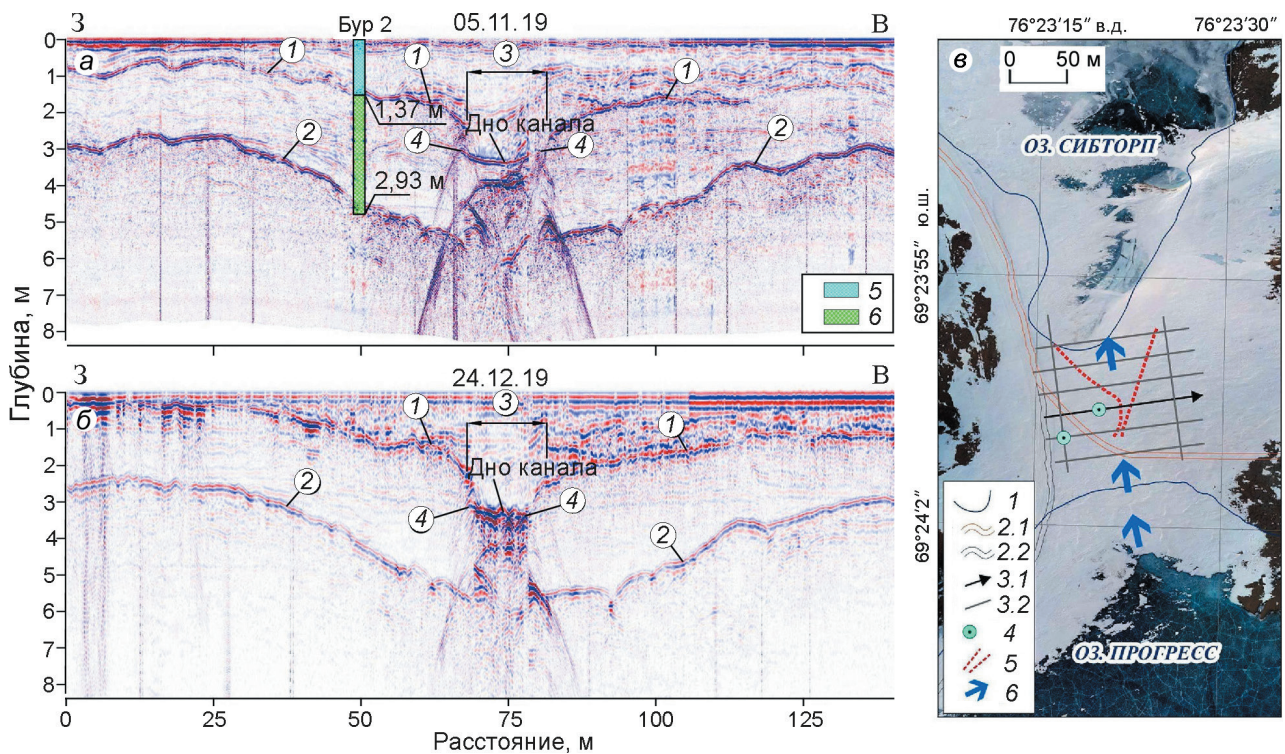


Рис. 2. Пример глубинного георадарного разреза перемычки оз. Прогресс: а – 5 ноября 2019 г.; б – 24 декабря 2019 г.; в – схема выполненных работ; обозначения к а, б: 1 – граница снега и льда; 2 – граница льда и скальных пород; 3 – положение прошлогоднего канала стока; 4 – дифрагированные волны от стенок прошлогоднего канала; обозначения к а: 5 – снег; 6 – лёд; обозначения к в: 1 – контуры озёр [3]; 2 – трассы движения транспортной техники (2.1 – всесезонная, 2.2 – зимняя); 3 – георадарные профили (3.1 – профиль, показанный на рис. а, б; 3.2 – все остальные); 4 – пункты механического бурения; 5 – положение прошлогоднего канала стока по данным аэрофотосъёмки; 6 – направление перетока водных масс при прорыве

Fig. 2. An example of GPR section of the snow-ice dam of the Progress Lake: а – 5th November, 2019; б – 24th December, 2019; в – survey scheme; legend for а, б: 1 – boundary between snow and ice; 2 – boundary between ice and rock; 3 – location of the last year’s waterway; 4 – diffracted waves formed with the walls of the last year’s channel; legend for а: 5 – snow; 6 – ice; legend for в: 1 – coastlines of the lakes [3]; 2 – logistic routes (2.1 – whole-year, 2.2 – winter); 3 – GPR lines (3.1 – the one showed at the sections а, б; 3.2 – all other GPR lines); 4 – points of non-core drilling; 5 – last year’s waterway due to aerial photo data; 6 – direction of water flow during the outburst

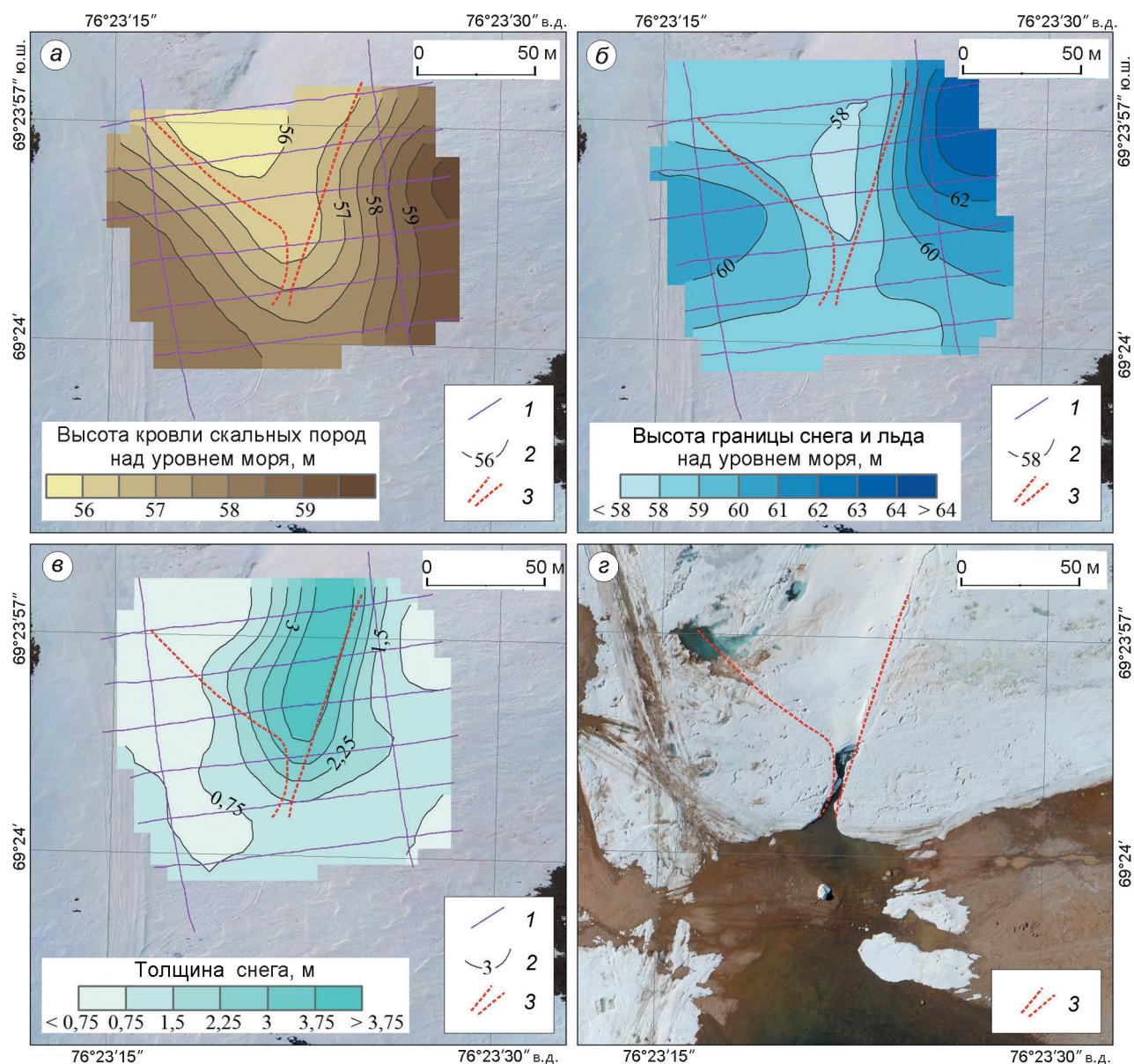


Рис. 3. Строение перемычки оз. Прогресс по данным георадиолокации:

a – высота кровли скальных пород над уровнем моря, м; *б* – высота границы снега и льда над уровнем моря, м; *в* – толщина снега, м; *г* – ортофотоплан участка на 10 января 2020 г.; 1 – георадарные профили; 2 – изолинии целевого параметра; 3 – положение прошлогоднего канала стока

Fig. 3. Structure of the dam of the Progress Lake on GPR data:

a – altitude of the bed top above sea level, m; *б* – altitude of the snow-ice boundary above sea level, m; *в* – snow thickness, m; *г* – aerial photo taken on 10th January, 2020; 1 – GPR lines; 2 – contours of the target values; 3 – location of the last year's waterway

ний период. В частности, по данным 24 декабря 2019 г. отмечается интенсивная обводнённость границы снега и льда на участке профиля, отвечающем положению прошлогоднего канала. В пользу этого свидетельствует увеличение амплитуды отражённой электромагнитной волны. Кроме того, граница становится менее контрастной и разрешённой по вертикали. Следова-

но, можно предположить, что фильтрация водных масс через перемычку происходила ещё за две недели до прохождения прорывного паводка, однако разрушения её тогда не произошло.

По результатам георадарной съёмки в ноябре 2019 г. построены схемы, отражающие строение снежно-ледовой плотины на начало летнего периода (рис. 3). Согласно им, в пределах ис-

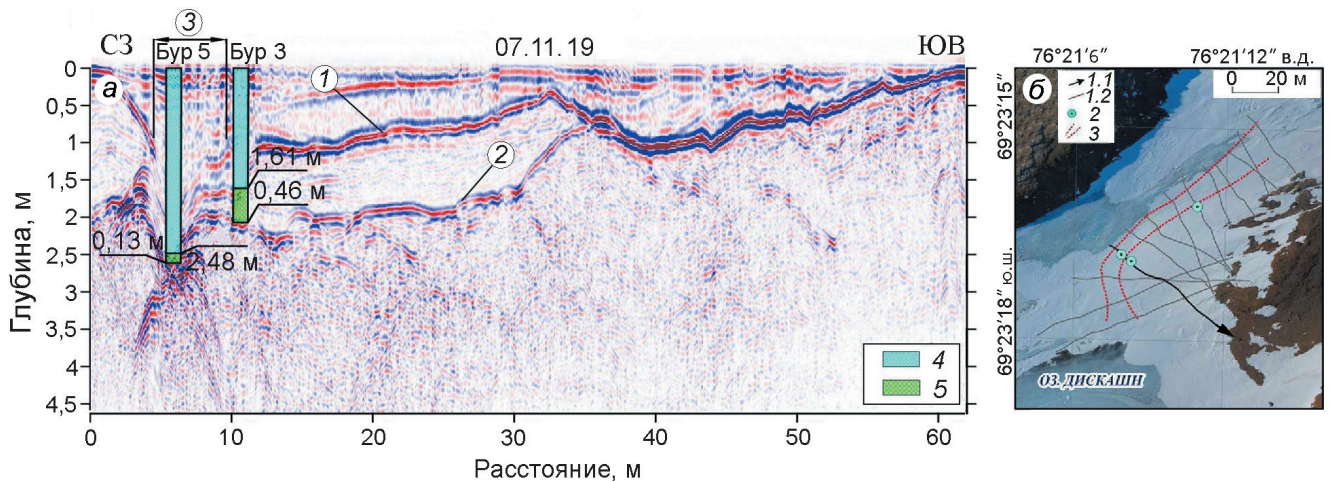


Рис. 4. Пример глубинного георадарного разреза перемычки оз. Дискашн:

a – глубинный георадарный разрез; *б* – схема выполненных работ;

обозначения к секции *a*: 1 – граница снега и льда; 2 – граница льда и скальных пород; 3 – положение прошлогоднего канала стока; 4 – снег; 5 – лёд; обозначения к секции *б*: 1 – георадарные профили (1.1 – профиль, показанный на рис. *a*; 1.2 – все остальные); 2 – пункты механического бурения; 3 – положение прошлогоднего канала стока по данным аэрофотосъёмки

Fig. 4. An example of GPR section of the snow-ice dam of the Lake Discussion

a – GPR section, 2019; *б* – survey scheme;

legend for *a*: 1 – boundary between snow and ice; 2 – boundary between ice and rock; 3 – location of the last year’s waterway; 4 – snow; 5 – ice; legend for *б*: 1 – GPR lines (1.1 – the one showed at the Fig. *a*; 1.2 – all other GPR lines); 2 – points of non-core drilling; 3 – last year’s waterway due to aerial photo data

следуемого участка развита пологая депрессия в рельефе коренных пород (см. рис. 3, *a*), общий уклон которой направлен от оз. Прогресс в сторону оз. Сибторп, а перепад абсолютных высот над уровнем моря составляет около 4 м. Понижению скальной котловины отвечает вытянутый прогиб в поверхностном слое льда (см. рис. 3, *б*), в пределах которого отмечается максимальное снегонакопление (см. рис. 3, *в*). Сопоставление полученных материалов с данными аэрофотосъёмки, выполненных в сезон 64-й РАЭ, позволило установить, что прошлогодний канал стока приурочен именно к локальному понижению в рельефе коренных пород и ледовой толщи (3 на рис. 3).

В течение сезонных работ 65-й РАЭ после прорыва оз. Прогресс, произошедшего 6 января 2020 г., была проведена аэрофотосъёмка площади исследования с использованием беспилотного летательного аппарата. Дешифрирование фотографий показало, что конфигурация и положение канала стока озёрных вод, сформировавшегося в 2020 г., точно совпадают с таковыми для прошлогоднего канала (см. рис. 3, *г*). Таким образом, в ходе катастрофических паводков оз. Прогресс направление перетока водных масс

каждый год остаётся неизменным, будучи продиктованным геолого-гляциологическими характеристиками участка работ.

Озеро Дискашн. Снежно-ледовая перемычка также характеризуется простым трёхслойным строением (рис. 4). Толща снега, мощность которой достигает 2,48 м, в северо-западной части профиля подстилается слоем льда, однако на расстоянии 35 м от начала профиля (см. рис. 4, *a*) ледовая пачка выклинивается и далее к юго-востоку снег залегает на скальном основании. Как и в случае оз. Прогресс, прошлогодний прорывной канал приурочен к отчётливому прогибу в кровле коренных пород и толще льда. Это отмечается и на схемах строения перемычки (рис. 5): положение предыдущего канала стока озёрных вод, имеющего неправильную изогнутую форму, отвечает узкой депрессии в рельефе кровли скального основания (см. рис. 5, *a*) и соответствующему понижению в кровле ледяной пачки (см. рис. 5, *б*), при этом в его пределах наблюдаются максимальные для участка мощности снега. Его форму в точности повторяет канал, образовавшийся при прорыве оз. Дискашн в сезон 65-й РАЭ и зафиксированный при помощи аэрофотосъёмки (см. рис. 5, *г*).

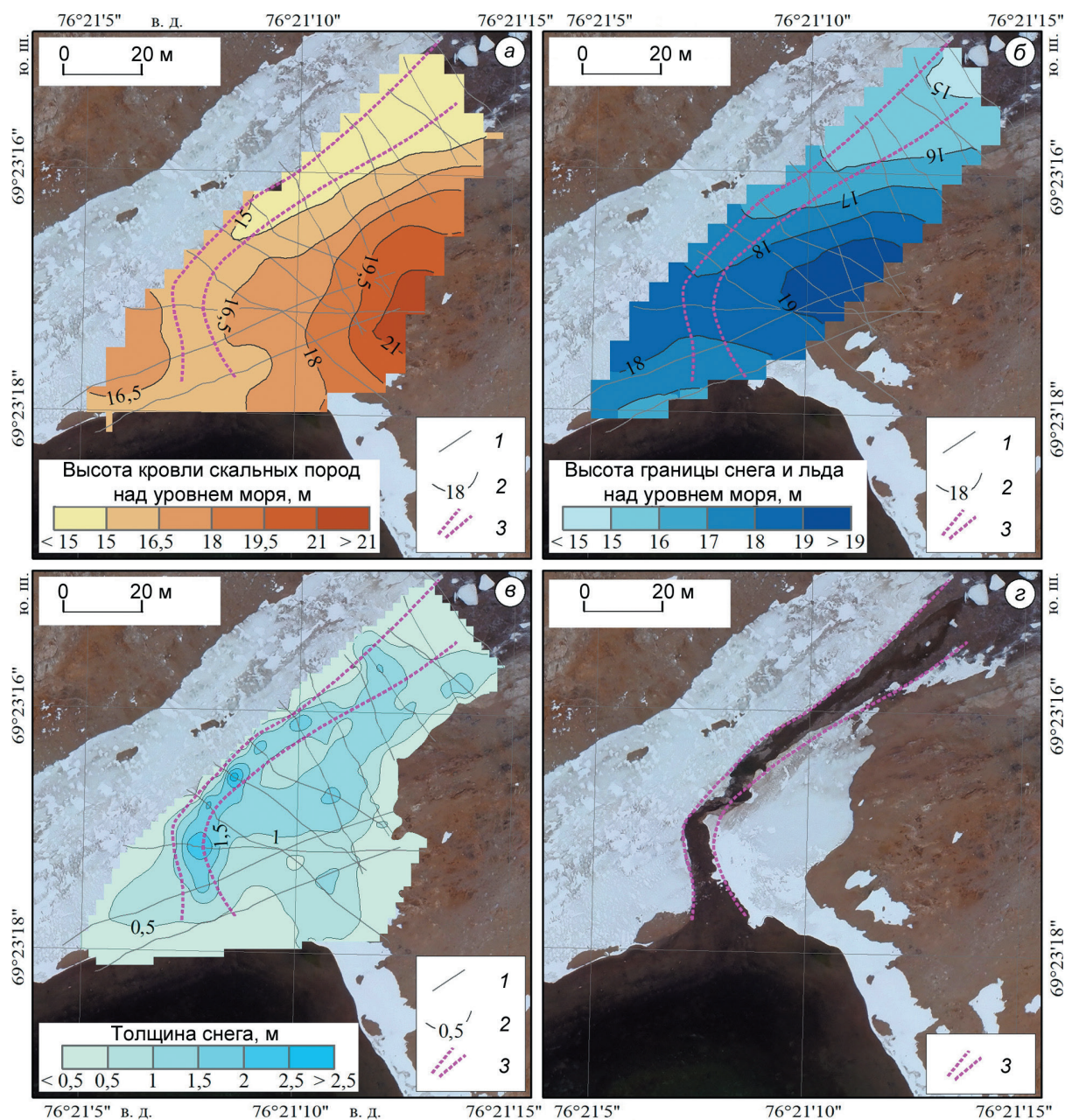


Рис. 5. Строение перемычки оз. Дискашн по данным георадиолокации:

a – высота кровли скальных пород над уровнем моря, м; *б* – высота границы снега и льда над уровнем моря, м; *в* – толщина снега, м; *г* – ортофотоплан участка на 7 февраля 2020 г.; 1 – георадарные профили; 2 – изолинии целевого параметра; 3 – положение прошлогоднего канала стока

Fig. 5. Structure of the dam of the Lake Discussion on GPR data.

a – altitude of the bed top above sea level, m; *b* – altitude of the snow-ice boundary above sea level, m; *v* – snow depth, m; *z* – aerial photo taken on 7th February, 2020; 1 – GPR lines; 2 – contours of the target values; 3 – location of the last year's waterway

Обсуждение

Механизм прорыва озёр, подпруженных снежно-ледовыми перемычками, на сегодняшний день изучен недостаточно. Несмотря на то, что значительных результатов в этом направ-

лении достигли различные научные школы, применяющие методы физического [10, 11] и математического [10, 12] моделирования, до настоящего времени важным этапом исследования катастрофических природных процессов остаются детальные натурные наблюдения. Озёра

Прогресс и Дискашн, рассматриваемые в данной работе, представляют собой своего рода эталонные объекты, изучая которые можно установить основные закономерности развития и протекания прорывных паводков, часто имеющих гораздо более разрушительный характер.

Многолетние наблюдения за прорывами этих водоёмов показали, что положение и форма каналов стока, формирующихся при прохождении паводков, из года в год сохраняются практически неизменными — наиболее чётко это устанавливается с помощью анализа площадных ортофотоснимков разных лет. Основной фактор, определяющий положение прорывных каналов, — геолого-гляциологические особенности строения перемычек, подпруживающих озёра. Последние, согласно данным георадиолокации, характеризуются достаточно простым разрезом: скальное основание перекрывается толщей льда, выше которой залегает снежный слой. Преимущественное направление перетока водных масс при прорывах обоих озёр приурочено к линейному прогибу в рельефе коренных пород под перемычкой, которому отвечает понижение кровли ледяной пачки.

Полученные результаты хорошо соотносятся с натурными наблюдениями за эволюцией площадей исследования в течение полевого сезона. Как на оз. Прогресс, так и на оз. Дискашн в первые часы прорывного паводка канал стока представляет собой частично закрытый тоннель в теле перемычки. Фрагментарно над ним сохраняются снежные мосты; дно канала ледяное, т.е. переток водных масс вначале происходит по кровле толщи льда. В течение одного—двух дней после начала прорыва поток достигает скального основания и происходит полное обрушение снежных пластов. Дальнейшая разгрузка озёрных вод происходит по открытому руслу с грунтовым дном и продолжается в слабоинтенсивном режиме до окончания летнего периода. С наступлением зимы этот водоток перемерзает, а канал полностью засыпается снегом. Именно такая картина — тонкий (первые десятки сантиметров) слой льда, перекрытый снежной толщей, мощность которой достигает нескольких метров, — наблюдается на участках георадарных профилей, отвечающих положению прошлогодних прорывных каналов.

Один из ключевых моментов, важных для понимания процесса развития катастрофических паводков, заключается в ответе на вопрос, как

происходит разрушение снежно-ледовой перемычки — стремительно во время начала прорыва или постепенно в течение длительного периода времени, предшествующего сбросу озёрных вод. Результаты мониторинговых геофизических работ, выполненных в рамках проведённого исследования, скорее свидетельствуют в пользу второго варианта. Прорыв оз. Прогресс в течение сезонного периода 65-й РАЭ произошёл 6 января 2020 г. Сопоставление материалов георадарных съёмок, выполненных 5 ноября и 24 декабря 2019 г., указывает на то, что к концу декабря граница снега и льда на участке, отвечающем положению прошлогоднего (и, как установлено позже, будущего) канала стока была интенсивно обводнена. Это позволяет предположить, что уже за две недели до прохождения прорывного паводка происходила постепенная фильтрация вод оз. Прогресс через снежный слой — наименее плотный и наиболее проницаемый. Подтверждение этой гипотезы потребует дополнительных исследований, в частности, бурения с отбором керна и последующего определения влажности снежной толщи в разрезе перемычки.

Заключение

Результаты георадарных работ, выполненных в сезон 65-й Российской антарктической экспедиции и дополненных натурными наблюдениями и материалами аэрофотосъёмки разных лет, позволили установить основные закономерности в строении снежно-ледовых перемычек и формировании каналов стока прорывных водоёмов на примере озёр Прогресс и Дискашн. Показано, что положение путей разгрузки водных масс в ходе паводков в целом остаётся неизменным при каждом прорыве и отвечает линейным понижениям в кровле скальных пород и толще льда. Формирующиеся каждый год прорывные каналы в течение зимнего периода засыпаются снегом, и таким образом создаётся естественная ослабленная зона, по которой в дальнейшем развивается следующий паводок. Согласно предварительным данным, стремительной разгрузке озёрных вод предшествует продолжительная фильтрация, происходящая со стороны прорывающегося водоёма через толщу снега и способствующая постепенному разрушению перемычки. Полученные результаты представляют

интерес как с позиций фундаментальной науки, так и с учётом прикладных аспектов изучения катастрофических паводков ледниковых озёр.

Методика, описанная в настоящей работе, применима для выполнения рекогносцировочных работ по оценке безопасности объектов инфраструктуры полярных станций, расположенных вблизи потенциально прорывоопасных озёр. Она позволяет установить геолого-гляциологические характеристики участка, способствующие развитию паводка. Кроме того, проведение георадарной съёмки в режиме мониторинга даёт возможность своевременно установить наличие фильтрационного потока в теле снежно-ледовой перемычки, эффективно дополняя гидрологические работы (прежде всего мониторинг уровня режима водоёма) и позволяя на феноменологическом уровне перейти к задаче прогнозирования вероятности прорывного паводка.

Благодарности. Авторы выражают благодарность своим коллегам по 65-й Российской антарктиче-

ской экспедиции А.В. Миракину, А.В. Семёнову, И.Б. Хохрякову за помощь в проведении полевых исследований. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-05-00421 «Особенности формирования и развития паводков подледниковых водоёмов Антарктиды» и № 20-05-00343 «Выявление особенностей протекания процесса прорывов озёр оазисов Антарктиды на основе данных полевых исследований и математического моделирования».

Acknowledgements. The authors are grateful to their colleagues during the 65th Russian Antarctic Expedition A.V. Mirakin, A.V. Semionov, I.B. Khokhriakov for their assistance in the field investigations. The research was supported by RFBR within the framework of the projects № 18-05-00421 «Characteristics of formation and evolution of the outburst floods of Antarctic subglacial reservoirs» and № 20-05-00343 «Identification of the main features of outbursts at the lakes of Antarctic oases based on the fieldwork data and mathematical modeling».

Литература

1. Боронина А.С., Попов С.В., Прякина 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.
2. Попов С.В., Боронина А.С., Прякина Г.В., Григорьева С.Д., Суханова А.А., Тюрин С.В. Прорывы ледниковых и подледниковых озёр в районе Холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида) в 2017–2018 гг. // Геориск. 2018. Т. XII. № 3. С. 56–67.
3. Larsemann Hills. Princess Elizabeth Land. Antarctica. Satellite image map. Edition 3. Map number 14241, scale. 1:25 000. Australian Antarctic Division, 2015.
4. Grigoreva S.D., Ryzhova E.V., Chetverova A.A., Deshevukh G.A., Popov S.V., Kashkevich M.P., Pryakhina G.V. Geophysical surveys on the outburst of Progress Lake (Larsemann Hills, East Antarctica) in the field season of the 64th Russian Antarctic Expedition // Abstracts volume of the International Conference: «Solving the puzzles from cryosphere». April 15–18, 2019, Puschino, Russia.
5. 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.

References

1. 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. Ice and Snow*. 2019, 56 (1): 39–48. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-39-48. [In Russian].
2. Popov S.V., Boronina A.S., Priakhina G.V., Grigoreva S.D., Sukhanova A.A., Tyurin S.V. Proryvy lednikovyykh i podlednikovyykh ozyor v raione Kholmov Larsemann (Vostochnaya Antarktida) v 2017–2018 gg. Outbursts of glacial and subglacial lakes at the area of the Larsemann Hills (East Antarctica) in 2017–2018. *Georisk*. 2018, XII (3): 56–67. [In Russian].
3. Larsemann Hills. Princess Elizabeth Land. Antarctica. Satellite image map. Edition 3. Map number 14241, scale 1: 25 000. Australian Antarctic Division, 2015.
4. Grigoreva S.D., Ryzhova E.V., Chetverova A.A., Deshevukh G.A., Popov S.V., Kashkevich M.P., Pryakhina G.V. Geophysical surveys on the outburst of Progress Lake (Larsemann Hills, East Antarctica) in the field season of the 64th Russian Antarctic Expedition. Abstracts volume of the International Conference: «Solving the puzzles from cryosphere». April 15–18, 2019, Puschino, Russia.
5. Grigoreva S.D., Chetverova A.A., Ryzhova E.V., Deshevukh G.A., Popov S.V. *Gidrologicheskie i geofizicheskie inzhenernye izyskaniia v raione stantsii Progress (oasis Holmy Larsemann, Vostochnaya Antarktida) v sezon 64-I RAÉ*. Hydrological and geophysical investigations at the area of the Progress Station (Larsemann Hills, East Antarctica) during the field season of the 64th RAÉ. *Rossiiskie Polyarnye Issledovaniia*. Russian Polar Research. 2019, 2: 23–28. [In Russian].
6. Popov S.V., Boronina A.S., Grigoreva S.D., Sukhanova A.A., Deshevukh G.A. *Gidrologicheskie, glytsio-geofizicheskie i*

6. 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.
7. Covacs A., Gow A.J., Morey R.M. A reassessment of the in-situ dielectric constants of polar firn // GREEL Report 93-26. 1993. 22 p.
8. Красс М.С., Мерзликін В.Г. Радиационная теплофизика снега и льда. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 261 с.
9. Войтковский К.Ф. Основы гляциологии. М.: Наука, 1999. 255 с.
10. Виноградов Ю.Б. Метод расчета гидрографа паводка при прорыве подпруженного ледником озера // Селевые потоки. 1976. № 1. С. 138–153.
11. Кавецкий С.П. Об искусственном воспроизведении селей в природных условиях // Селевые потоки и меры борьбы с ними. М., 1957, С. 200–205.
12. 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.
- geodezicheskie inzhenernye izyskaniya v vostochnoy chasti poluostrova Broknes (Vostochnaya Antarktida, raion stantsii Progress) v sezon 63-y RAE. Hydrological, glacio-geophysical and geodesic engineering investigations at the eastern part of the Broknes Peninsula (East Antarctica, area of the Progress Station) during the field season of the 63rd RAE. *Rossiyskie Polyarnye Issledovaniya*. Russian Polar Research. 2018, 1: 24–26. [In Russian].
7. Covacs A., Gow A.J., Morey R.M. A reassessment of the in-situ dielectric constants of polar firn. GREEL Report 93-26. 1993: 22 p.
8. Krass M.S., Merzlikin V.G. *Radiatsionnaya teplofizika snega i lda*. Radiative thermal physics of ice and snow. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1990: 261 p. [In Russian].
9. Voitkovskiy K.F. *Osnovy glyatsiologii*. Basics of glaciology. Moscow: Nauka, 1999: 255 p. [In Russian].
10. 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].
11. Kavetskiy S.P. On the artificial creation of mudflows in natural conditions. *Selevye potoki i mery borby s nimi*. In the book: Mudflows and ways of fighting with them. Moscow, 1957: 200–205. [In Russian].
12. Popov S.V., Priakhina G.V., Boronina A.S. *Otsenka raskhoda vody v protsesse razvitiya proryvnogo pavodka lednikovoykh i podlednikovoykh vodoyemov*. Estimation of water outflow during the progress of an outburst flood of glacial and subglacial reservoirs. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2019, XXIII (3): 25–32. [In Russian].