

Прикладные проблемы

УДК 551.324

doi: 10.31857/S2076673420010030

Геофизические изыскания в районе станции Прогресс, Восточная Антарктида, в сезон 63-й РАЭ (2017/18 г.)

© 2020 г. А.А. Суханова^{1*}, С.В. Попов^{2,1}, А.С. Боронина¹, С.Д. Григорьева¹, М.П. Кашкевич¹¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;²Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, Россия

*suhanova.anastassiya@yandex.ru

Geophysical surveys in the vicinity of the Progress station, East Antarctica, performed during the 63rd RAE season (2017/18)

A.A. Sukhanova^{1*}, S.V. Popov^{2,1}, A.S. Boronina¹, S.D. Grigorieva¹, M.P. Kashkevich¹¹Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia; ²Polar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia

*suhanova.anastassiya@yandex.ru

Received February 25, 2018 / Revised May 31, 2019 / Accepted September 19, 2019

Keywords: East Antarctica, GPR profiling, ice crevasses, outburst flood, Progress Station, transport operations.

Summary

In recent years, when organizing works of the Russian Antarctic Expedition (RAE), considerable attention is given to the safety of logistics operations carried out at Russian stations and field bases. The main factors that threaten polar explorers are extensive systems of cracks and water breakthroughs, confined to the marginal, the most dynamic part of the outlet glaciers, in the area of which the most part of stations are located. One example of the impact of these processes on transport communications in Antarctica is the breakthrough of an intraglacial reservoir in the Dolk glacier near the station Progress (Larsemann Hills, Eastern Antarctica) in the season of the 62nd RAE (2016/17). The outburst resulted in the formation of a huge hole in the glacier body and an extensive system of cracks directed towards its flanks. This took place on the part of the route connecting the Progress Station with the point of organization the sledge-tractor train marches to inner regions of the Antarctic continent. Thus, this destroyed the transport links between these points. That is why during the seasonal works of the 63rd RAE (2017/18) geophysical surveys were carried out around the hole by means of the GPR profiling for the purpose to find the best way and organize a new all-season route. The GPR soundings performed at frequencies of 900 and 150 MHz, made possible to fix numerous cracks and large volumes of melt water accumulations in the near-surface part of the ice layer. The analysis of the obtained time sections and the assessment of the depths of cracks and watered areas did show that the detected objects in the glacier body were not dangerous for advancing of the sledge-caterpillar equipment passing by the hole. These surveys allowed planning the optimal new route, after which it was rolled up and put into operation. The logistical connection between the station and the airfield has been restored. Until the end of the field season, the new all-season route was actively used for transportation.

Citation: Sukhanova A.A., Popov S.V., Boronina A.S., Grigorieva S.D., Kashkevich M.P. Geophysical surveys in the vicinity of the Progress Station, East Antarctica, performed during the 63rd RAE season (2017/18). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020. 60 (1): 149–160. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420010030.

Поступила 25 февраля 2019 г. / После доработки 31 мая 2019 г. / Принята к печати 19 сентября 2019 г.

Ключевые слова: Восточная Антарктида, георадиолокационное профилирование, ледниковые трещины, прорывной паводок, станция Прогресс, транспортные операции.

Представлены результаты исследований в районе Холмов Ларсеманн на участке ледника Долк в поисках безопасного места для организации новой всепогодной трассы с целью возобновления транспортного сообщения между станцией Прогресс, аэродромом и пунктом формирования санно-гусеничных походов, прерванного в результате образования провала в леднике Долк.

Введение

Один из важнейших факторов функционирования отечественных станций в Антарктиде — организация логистических операций между ос-

новными объектами инфраструктуры Российской антарктической экспедиции (РАЭ). В первую очередь это касается тех станций, которые расположены в прибрежной зоне материка, где ледники очень динамичны и на них возникают обширные

зоны трещин. Подобное наблюдается в районе станций Мирный и Прогресс [1]. С 2007/08 г. на последней формируются санно-гусеничные походы, до этого базировавшиеся на станции Мирный. Походы – основной способ обеспечения внутриконтинентальной станции Восток. Поэтому безопасность трассы Прогресс–Восток – одна из главных задач, которая тесным образом связана с изучением динамики ледника, определяющей процесс формирования и развития трещин. В настоящее время пристальное внимание уделяется также водоёмам, расположенным вблизи объектов инфраструктуры РАЭ и находящимся близко от снежников и ледников. Нередко в тёплое время года водоёмы переполняются в результате интенсивного приповерхностного таяния снежного покрова или циркуляции водотоков в теле ледника, что иногда вызывает катастрофические прорывные паводки [2, 3]. Своевременное их выявление и возможность прогнозирования подобных опасных процессов способны предотвратить экономический ущерб и сохранить человеческие жизни.

Подобные изыскания выполняются с помощью георадарных исследований, которые достаточно информативны и просты в исполнении. Этот метод успешно применяется в РАЭ с 2013 г. для всестороннего изучения приповерхностной части ледников и позволяет выявлять зоны трещин при организации и мониторинге взлётно-посадочных полос, а также трассы следования санно-гусеничных походов [1]. К подобным инженерным изысканиям можно отнести и георадарные работы, выполненные в 2017/18 г. в районе станции Прогресс. Эти работы носили уникальный характер, так как изучались не только ледниковые трещины, но и обширная депрессия в теле ледника Долк, связанная с прорывом внутриледникового водоёма [4].

Задача геофизических исследований

Прорыв внутриледникового озера произошёл 30 января 2017 г. вблизи российской станции Прогресс (холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида), в западной части ледника Долк. В результате прорыва образовался огромный провал размером 183 × 220 м [4] и у его бортов сформировалась система трещин (рис. 1). Как раз здесь проходил участок трассы, соединяющий станцию Про-

гресс с аэродромом и пунктом формирования санно-гусеничных походов, поэтому транспортное сообщение между ними было нарушено. Для возобновления коммуникации между этими пунктами были организованы новые варианты трасс, в частности для движения транспорта в зимнее время была организована новая дорога, которая пересекала узкую юго-западную часть озера Прогресс. Однако отсутствие какой-либо информации о глубинах озера ставило под вопрос безопасность передвижения транспорта по этому пути в летнее время, когда происходит интенсивное приповерхностное таяние ледяного покрова.

В период антарктического лета санно-гусеничная техника стала передвигаться по новому варианту трассы: в районе полевой базы «Прогресс-1», через скальные склоны, с западной стороны провала (рис. 2, а). Однако на этом пути были значительные уклоны рельефа, нередко достигающие 35–40° и опасные для гусеничной техники. Кроме того, отдельные участки этого пути были с каменистым покрытием, что представляло опасность для ходовой части санно-гусеничной техники. Поэтому летом 2017/18 г. необходимо было выполнить геофизические изыскания в районе полевой базы Прогресс-1 для организации новой всепогодной трассы.

Характеристика района исследований

Рекогносцировочные работы были выполнены в западной части ледника Долк и в окрестностях полевой базы «Прогресс-1». На основе визуальной оценки местности и фотоснимков был сделан вывод о непригодности окружающих скальных массивов для проезда по ним санно-гусеничной техники, поэтому самым подходящим участком для организации всепогодной трассы сочли обход провала в западной части ледника Долк.

Ледник Долк, согласно [5], можно считать шельфовым. Косвенно на это указывают и материалы аэрорадиолокационного профилирования, выполненного в этом районе в сезон 32-й САЭ [6]. Движение ледника Долк очень нестабильно, и в краевой части он подвержен активному разрушению [7]. Крупное разрушение ледника, по словам очевидцев, произошло в 2015/16 г.; тогда огромные айсберги, отколовшиеся от ледника, заполнили залив Долк (см.

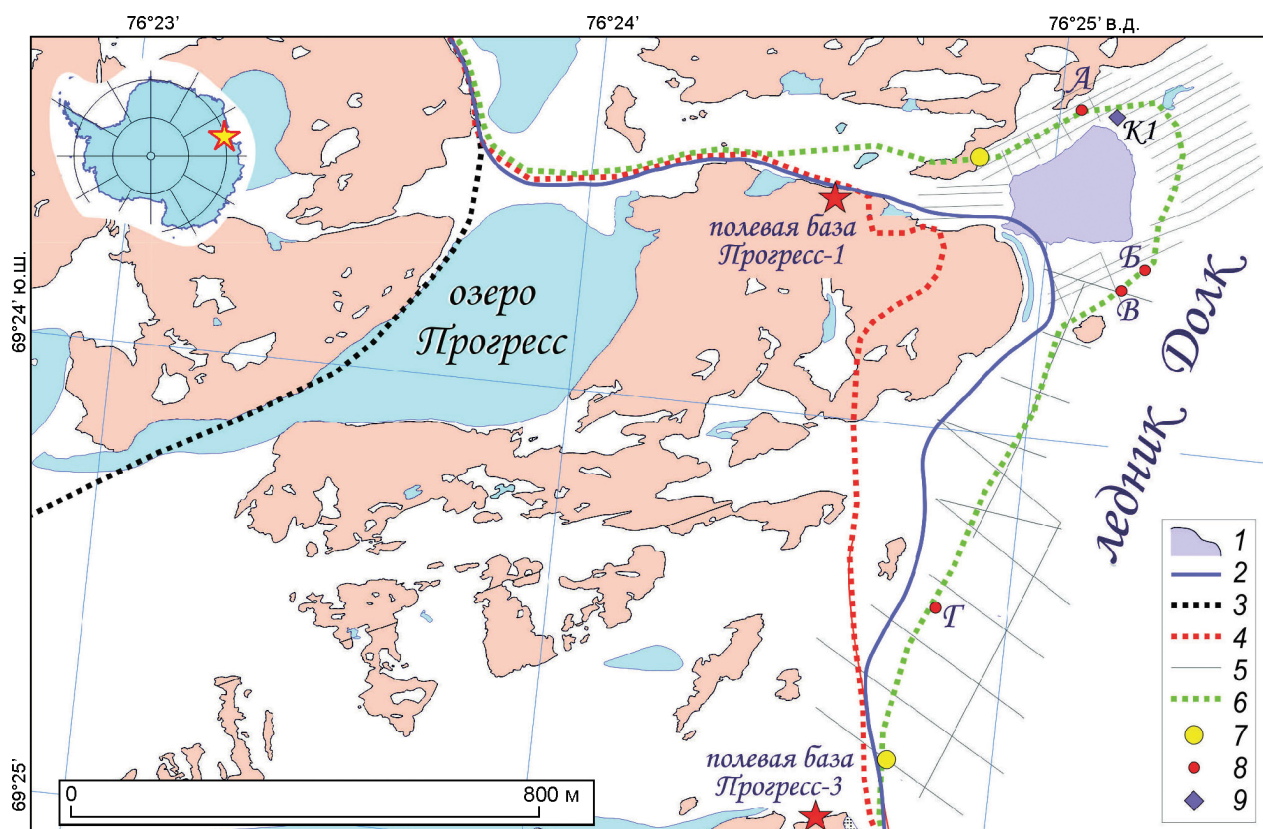


Рис. 1. Организация новой трассы после образования провала:

1 – контур провала; 2 – старая трасса, разрушенная провалом; 3 – зимняя трасса через юго-западную часть озера Прогресс; 4 – летняя трасса через скальные склоны; 5 – положение георадарных маршрутов в обход провала; 6 – новая трасса в обход провала; 7 – начало и конец георадарного маршрута, выполненного по участку новой трассы; 8 – участки георадарных маршрутов АБ и ВГ; 9 – пункт отбора керна К1

Fig. 1. The organization of the new route after the formation of the dip:

1 – boundary of the dip; 2 – the old route, which was destroyed by the dip; 3 – winter corridor through the southwestern part of the Progress lake; 4 – summer route through the rocky slopes; 5 – GPR profiles; 6 – new route across the dip; 7 – the beginning and the ending of the GPR profile, which was implemented along the new route; 8 – AB and BG fragments of GPR profile; 9 – drilling site K1

рис. 2, б). Подобные ледники характеризуются многочисленными зонами трещин (см. рис. 2, в), в одной из которых и произошёл этот провал.

На участке между провалом и полевой базой Прогресс-3 (см. рис. 1) также отмечены обширные обводнённые поверхности ледника Долк, генезис которых до конца не ясен. Формирование подобных водных скоплений может быть связано с процессами интенсивного приповерхностного таяния ледника в тёплые периоды антарктического лета. На участке от полевой базы Прогресс-3 до самого провала эти образования имеют вытянутое простираение (см. рис. 2, г). Можно предположить, что такие обводнённые зоны могли быть связаны с приповерхностным каналом, осложнённым системой неглубоких трещин, по которым воды из прорвавшихся

близлежащих озёр текли по направлению к внутриледниковому озеру в леднике Долк.

Таким образом, к основным объектам в теле ледника, влияющим на безопасность передвижения техники, относятся трещины и водные скопления в приповерхностной части ледниковой толщи. Поэтому основная задача геофизических исследований заключается в том, чтобы выявить наиболее значимые неоднородности в теле ледника и оценить степень их безопасности для проезда здесь санно-гусеничного транспорта. К опасным трещинам были отнесены разрывные нарушения шириной более 1 м с перекрывающим снежным мостом толщиной менее 1 м. Обводнённые участки определялись как безопасные, если их мощность была меньше высоты ходовой части гусеничной техники от дневной поверхности, т.е. не более 1 м.

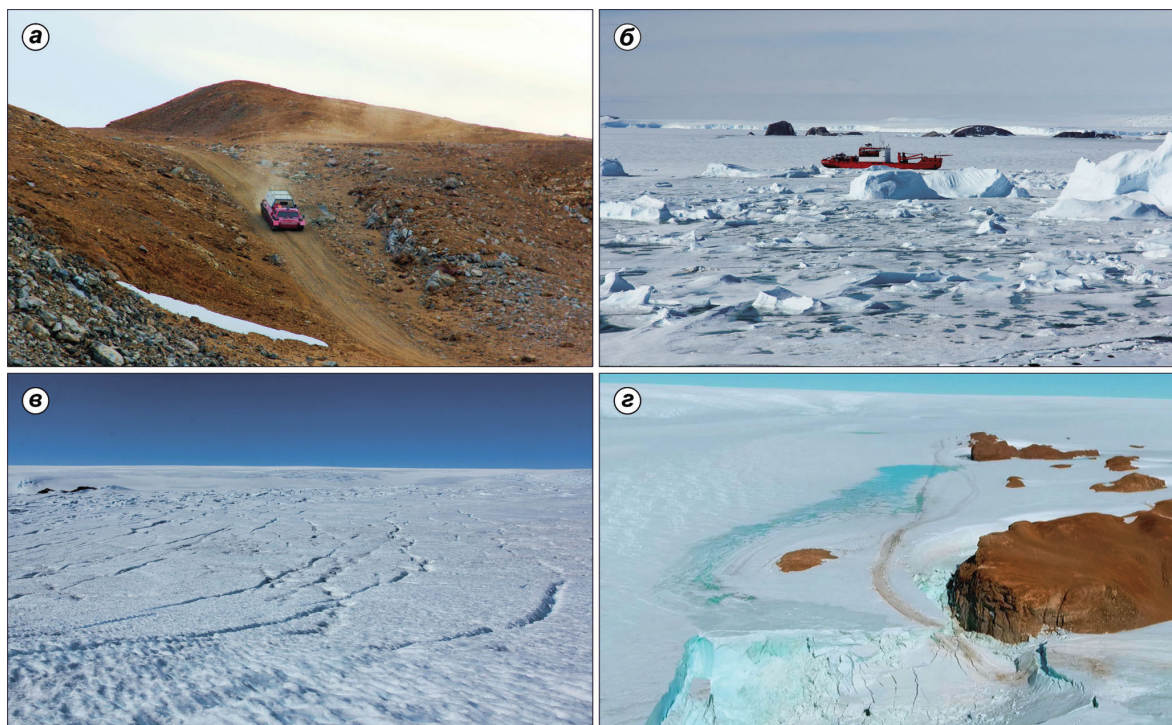


Рис. 2. Характер местности, на которой проводились инженерные изыскания:

a – трасса через скальные массивы; *б* – айсберги, заполняющие залив Долк; *в* – обширная система трещин в теле ледника Долк; *з* – скопление воды под снежным покровом между полевыми базами Прогресс-1 и Прогресс-3

Fig. 2. The character of the area, where engineering surveys were carried out:

a – route through the rocky arrays; *b* – icebergs, which fill the Dål̄k bay; *v* – the wide crevasse area in the Dål̄k Glacier; *z* – water bodies under the snow between stations Progress-1 and Progress-3 field bases

Методика выполнения полевых работ

В ходе геофизических работ была выполнена георадиолокационная съёмка при помощи георадаров ОКО-2 (ООО «Логические системы», Россия). Зондирование выполняли на частоте 150 МГц. Использовали также георадар GSSI SIR-3000 (Geophysical Survey Systems Inc., USA) с частотой зондирующих импульсов 900 МГц. Плановую привязку выполняли приёмоиндикатором Garmin GPSMap 64st. Сеть профилей геофизические исследования приведена на рис. 1.

Основная трудность при интерпретации радиолокационных и георадарных данных связана с определением кинематической модели среды для корректного пересчёта временного разреза в глубинный. Для её построения использовались данные, полученные по результатам кернового бурения в районе провала (см. рис. 1). Бурение велось с помощью механического бура Kovacs (Kovacs Enterprises, USA). Диаметр скважины составил 17 см, диаметр образца – 14 см, глубина бурения –

5 м. Полученный керн распиливали на отдельные образцы длиной 20 см. Температуру каждого образца определяли с помощью электронного термометра WT-1 (China) с погрешностью измерений $\pm 0,1$ °C. Чтобы избежать температурных изменений керна под воздействием окружающей среды температуру образцов измеряли сразу после отбора. Для этого в каждом образце высверливали отверстие глубиной около 6 см и в него полностью погружали щуп термометра. Измерение проводили в среднем через две минуты. При измерении массы использовали электронные весы WH-805 (China) с погрешностью измерений ± 1 г.

Характеристика временных георадарных разрезов

На основании результатов съёмки, а также визуальной оценки характера трещиноватости и обводнённости местности была намечена возможная конфигурация новой трассы. По ней был выполнен георадарный маршрут на частоте 150 МГц для под-

тверждения его безопасности. Для более удобного рассмотрения разреза его поделили на два участка — АБ и ВГ, расположение которых показано на рис. 1.

На рис. 3, а представлен фрагмент АБ георадарного маршрута, выполненного по пути следования новой трассы. На протяжении всего участка контрастно выделяется отражение 1, связанное с прямой волной. Далее, в левой части разреза наблюдается отражение 2, соответствующее сигналу, отражённому от скального основания. Эта граница довольно быстро исчезает за пределами окна регистрации, что объясняется значительными уклонами рельефа скального основания не только на дневной поверхности, но и под снежно-ледовой толщей. Кроме того, в начале участка фиксируется отражение 3, связанное с границей между снежно-фирновой толщей и льдом и исчезающее на расстоянии примерно 250 м от начала маршрута. Это показывает, что все неоднородности и нарушения, в частности трещины, формирующиеся в большом количестве вокруг провала, образуются непосредственно в теле ледника за счёт напряжений сжатия—растяжения, вызванных течением льда. Поэтому большинство трещин имеет вертикальные стенки, что на георадарных разрезах отражается в виде дифрагированных волн 4 и 5, образующихся в результате отражений от стенок трещин и располагающихся друг под другом в виде вертикальных линий (см. рис. 3, б, в). Отметим, что контрастность отражений от трещин на волновом поле визуально отличается. Это связано с тем, что часть трещин вокруг провала заполнена талой водой, за счёт чего существенно повышается диэлектрическая проницаемость и, как следствие, увеличивается интенсивность отражений от стенок трещин, сопровождающаяся многочисленными реверберациями 6. В увеличенном масштабе они представлены на рис. 3, г.

При анализе отражений, полученных от трещин, видно, что ширина последних в среднем не превышает 0,6 м. Подобные выводы о размерах трещин подтверждаются и на основании рекогносцировочного обследования участка проводимых работ. Поскольку большинство нарушений в ледниках в летний период лишено снежных мостов, можно подробно изучить их морфологию. Ширина трещин варьирует в пределах 0,5–0,6 м и считается относительно небольшой по сравнению с размером ходовой части используемой гусеничной техники. На представленном фрагменте георадарного маршрута не обнаружены ка-

кие-либо полости или каналы, которые могли бы привести к формированию провалов, подобных тому, который образовался в теле ледника Долк.

Как уже отмечалось, на исследуемой территории опасными могут считаться также скопления талых водных масс в приповерхностной части ледника Долк, особенно между полевыми базами Прогресс-1 и Прогресс-3. По информации, полученной от сотрудников станции Прогресс, такие скопления ежегодно образуются в наиболее тёплые периоды. Не стало исключением и антарктическое лето 2017/18 г., поэтому при геофизических исследованиях этому участку уделялось особое внимание. Природа этих скоплений до конца не ясна. Исходя из предположения, что образование таких обводнённых зон могло быть связано с циркуляцией прорывных водотоков в приповерхностной части ледниковой толщи, можно при помощи георадарной съёмки на этом участке попытаться установить основные черты строения верхней части ледника и морфометрические характеристики самих обводнённых зон.

Фрагмент разреза ВГ соответствует именно этому участку трассы (см. рис. 3, д). На протяжении всего разреза прослеживается интенсивное отражение 1, связанное с зондирующим импульсом (прямая волна). Как и на разрезе АБ, на небольшом участке маршрута прослеживается отражение 3 от незначительного по мощности снежно-фирнового слоя. Его утолщение по сравнению с остальной частью разреза, видимо, связано с заметным уклоном рельефа в этом месте, что способствует повышенной аккумуляции снега. В левой части разреза фиксируется также интенсивная граница 2, связанная с отражением импульсов источника от каменистого основания. Интересно, что прослеживается она не на всю глубину разреза, как на участке АБ. Вероятно, это объясняется тем, что уклоны скальных массивов, залегающие глубже задержки 200 нс, значительны. Электромагнитная волна отражается от каменистого основания под некоторым углом к вертикали, что не позволяет зарегистрировать сигнал на поверхности.

Наиболее интересные на этом участке — интенсивные отражения 7 и 8, связанные именно с водными скоплениями. Визуально на разрезе выявленные зоны отличаются друг от друга. Контрастные отражения 7 вызваны прохождением электромагнитной волны в трещиноватой среде, что подтверждается наличием дифрагированных

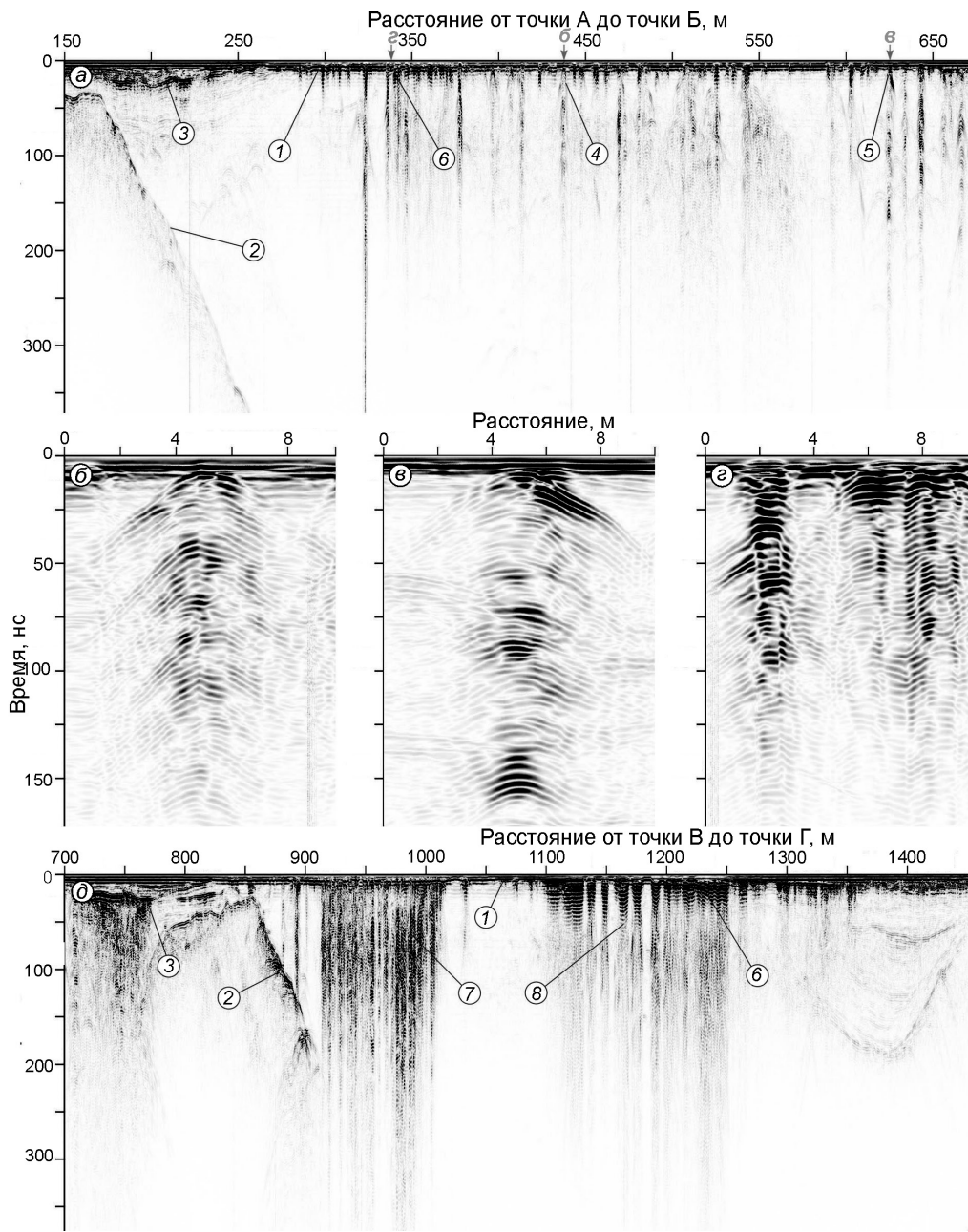


Рис. 3. Временной георадарный разрез, выполненный по пути следования новой всепогодной трассы: *a* – фрагмент АБ; *б-в* – укрупнённые фрагменты временного разреза с трещинами, помеченные теми же буквами на секции *a*; *д* – фрагмент ВГ. 1 – прямая волна; 2 – отражение от скальных пород; 3 – граница между снежно-фирновой толщей и льдом; 4, 5 – дифрагированные волны, образованные от стенок трещин; 6 – реверберации; 7 – водные скопления, развитые по трещинам; 8 – водные скопления в приповерхностной части ледника

Fig. 3. GPR time-section along new all-seasonal way: *a* – AB fragment; *б-в* – enlarged fragments of GPR time-section, marked by the same letters; *д* – BG fragment. 1 – direct wave; 2 – reflections from the rocks; 3 – reflection from the boundary between snow-firn layer and ice; 4, 5 – diffracted waves from the walls of crevasses; 6 – reverberations; 7 – water accumulation in the crevasses; 8 – water accumulation in the near-surface part of the glacier

волн, располагающихся друг под другом и образующих на волновом поле характерные для трещин отражения. Отражения 8 вызваны скоплениями водных масс в приповерхностной части ледниковой толщи. Об этом свидетельствуют и многочисленные реверберации б, сопровождающие скопления, что указывает на их малую мощность и, как следствие, на многократное переотражение электромагнитной волны в небольшом водном пропластке. О характере трещиноватости этой зоны судить сложно, так как волновое поле на разрезе зашумлено кратными волнами, перебивающими

ми полезный отражённый сигнал. Однако непрерывность отражённого сигнала 8 и кратных волн б показывает, что в этом месте водные скопления представляют собой некие пустоты в приповерхностной части ледника Долк, заполненные водой.

Выбор кинематической модели среды

Для оценки глубины простираения в ледниковой среде выявленных трещин и водных скоплений необходима скоростная модель среды, позволяю-

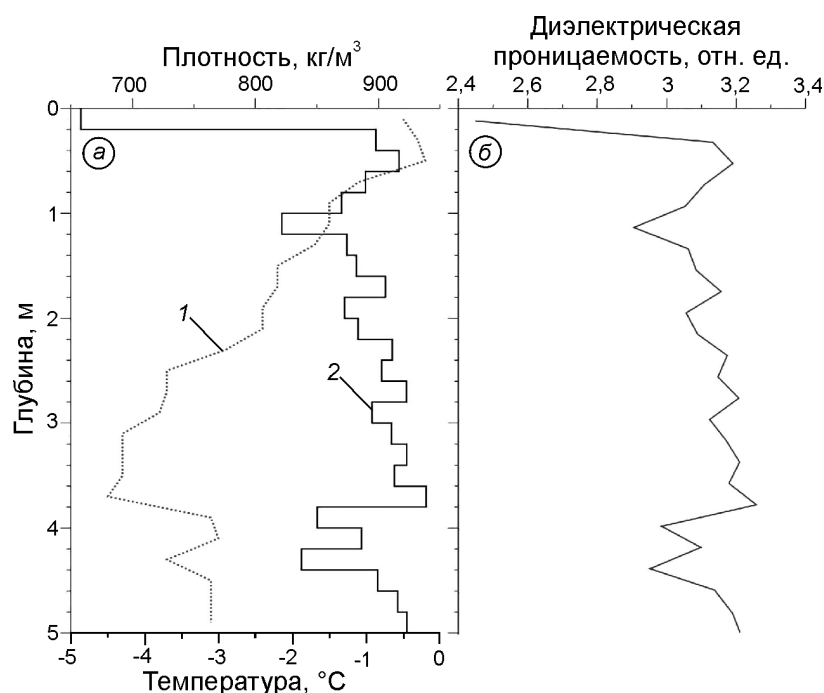


Рис. 4. Профили плотности, температуры и диэлектрической проницаемости керна К1:

a – профили: 1 – температуры; 2 – плотности; *б* – профиль диэлектрической проницаемости

Fig. 4. Ice core K1 density, temperature and permittivity:

a – profiles of: 1 – temperature; 2 – density; *б* – permittivity of the ice core

щая перейти от временного разреза к глубинному. В рамках георадарных исследований за характеристику кинематических свойств среды отвечает диэлектрическая проницаемость. По данным работ, выполненных в сезон 63-й РАЭ, изучено изменение диэлектрической проницаемости на основании скоростных моделей, полученных двумя способами: по данным кернового бурения в районе провала и по результатам анализа дифрагированных волн, образованных от стенок трещин вокруг провала.

Определение скоростной модели при помощи исследования керна основывается на эмпирической зависимости между скоростью распространения электромагнитных волн и плотностью исследуемой среды. Впервые опыт таких расчётов был представлен в работах В.А. Камминга и Дж.Д.К. Робина во второй половине XX в. [8, 9]. В дальнейшем подобные исследования проводили как за рубежом [10, 11], так и в нашей стране [12]. Спустя десятилетия, полученные результаты не теряют своей актуальности и применяются в комплексных геофизических и гляциологических исследованиях как в Арктике [13, 14], так и в Антарктиде.

Авторами настоящей работы был изучен керн К1, полученный в ходе гляциологических исследований в районе провала (см. рис. 1). Как уже отмечалось, для каждого образца керна длиной 20 см определялись температура и плотность, что позволило построить плотностной и температурный

профили по мере увеличения глубины (рис. 4, *a*). Значение температуры льда на разных глубинах изменяется от $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, и, согласно [15], для такого диапазона температур при расчёте относительной диэлектрической проницаемости можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\varepsilon = (1 + 0,857\rho)^2, \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, отн. ед.; ρ – плотность, кг/м³.

Получившийся, исходя из расчётов по соотношению (1), профиль диэлектрической проницаемости по керну К1 представлен на рис. 4, *б*. Видно, что значения претерпевают резкий скачок на первых 40 см разреза в пределах от 2,4 до 3,1 отн. ед. Причина в том, что верхняя часть керна представляет собой снег, находящийся на начальной стадии фирнизации. Поэтому более низкая плотность и, как следствие, пониженная диэлектрическая проницаемость снега связаны с тем, что поры в снежной толще заполнены воздухом. Полученные значения отвечают данным уже опубликованных исследований [12, 15]. Оставшаяся часть керна, судя по результатам стратиграфического описания, представляет собой лёд, здесь значения варьируют в интервале 2,98–3,25 отн. ед. Разброс значений обусловлен наличием линз с пониженной плотностью и слоёв льда с пузырьками воздуха, что несколько уменьшает диэлектрическую проницаемость. Мак-

симальные значения отвечают керновым прослоям с отсутствием каких-либо включений и пустот.

В предположении, что ниже первых 40 см начинается монолитный лёд, и на основе расчёта ϵ (см. рис. 4, б) значение диэлектрической проницаемости можно принять равным 3,13 отн. ед. Верхней же части разреза соответствует наибольший градиент диэлектрической проницаемости по сравнению с остальной частью отобранного керна; среднее значение на этом участке можно принять равным 2,72 отн. ед.

Не менее информативен способ получения данных о скоростях распространения электромагнитных волн на основе определения диэлектрической проницаемости по годографам дифрагированных волн [16–18]. На примере трещин на рис. 3, б, в было показано, что если обнаруживаются объекты, меньшие по размеру или соизмеримые с длиной волны зондирующего импульса, то при электромагнитном облучении георадаром эти объекты становятся источниками вторичных волн. На временных разрезах отражения от таких источников будут проявляться в виде дифрагированных волн, в вершине которых и находится зондируемый объект. Это позволяет рассчитать скорость распространения волн в среде выше объекта дифракций, а также глубину, на которой он располагается [17, 18]. В случае большого числа таких объектов на определённом участке исследования можно рассчитать скорость по всем имеющимся годографам.

Практически все маршруты георадарной съёмки на этом участке вели в обход провала (см. рис. 1), но в зоне распространения обширной системы трещин прибрежной части ледника Долк. В качестве примера на рис. 5, а приведён один из временных разрезов, полученных при георадиолокационном профилировании в зоне трещин. Последние довольно контрастно выделяются на разрезах, образуя многочисленные дифрагированные волны, что позволило на основании полученных годографов рассчитать значения диэлектрической проницаемости (см. рис. 5, б–г). Выявленные на разрезах дифрагированные волны приурочены к верхней части разреза и расположены в пределах первого метра от дневной поверхности. Появилась возможность рассчитать значения диэлектрической проницаемости по 280 годографам дифрагированных волн. По полученным данным построена схема диэлектрической проницаемости в верхней части ледникового покрова на террито-

рии в обход провала (см. рис. 5, д). Гридирование выполнялось при помощи программы Surfer 15.5 (Golden Software Inc., USA) методом Kriging. Параметры для создания грида выбирались с учётом масштаба съёмки и требуемой детальности схемы: радиус осреднения выбран равным 25 м, что соизмеримо с расстоянием между рядовыми маршрутами; расстояние между узлами сетки равно 5 м.

Как следует из представленной схемы, значения диэлектрической проницаемости изменяются от 2 до 3,34 отн. ед. и имеют некоторую закономерность в распределении по участку работ. В северо-западной части провала, в относительной близости от скальных массивов, диэлектрическая проницаемость достигает наименьших значений, что связано со снежным покрытием ледниковой толщи в этой части. В восточной части наблюдается тенденция к увеличению диэлектрической проницаемости, что, скорее всего, характеризуется отсутствием здесь снежного покрова и проведением зондирования непосредственно в ледяной среде. Кроме того, на кинематические свойства среды, преимущественно в восточной части провала, влияет большое количество талой воды, перемещающейся по системе трещин и скапливающейся в некоторых из них. Поэтому значения несколько возрастают. Отметим, что простираение этого обводнённого участка в восточной части имеет направление с юга на север, в сторону залива Долк, что также согласуется с визуальными наблюдениями за течением потоков талых вод в этом районе.

Исходя из того, что полученные по годографам значения ϵ соответствуют кинематической модели для первого метра ледниковой среды, при переходе от временного разреза к глубинному следует воспользоваться средним эффективным значением диэлектрической проницаемости, равным в данном случае 2,78 отн. ед. Это значение соответствует информации из литературных источников [15] и согласуется с эффективным значением ϵ по результатам статистического анализа (см. рис. 5, д).

При сопоставлении результатов скоростного анализа, выполненного по двум разным кинематическим моделям, установлено, что при переходе от временных георадарных разрезов к глубинным для первого метра среды необходимо воспользоваться значением диэлектрической проницаемости, равным 2,75 отн. ед. Указанное ϵ было рассчитано как среднее между тем значением, которое получилось при анализе керна (2,72 отн. ед.), и тем, кото-

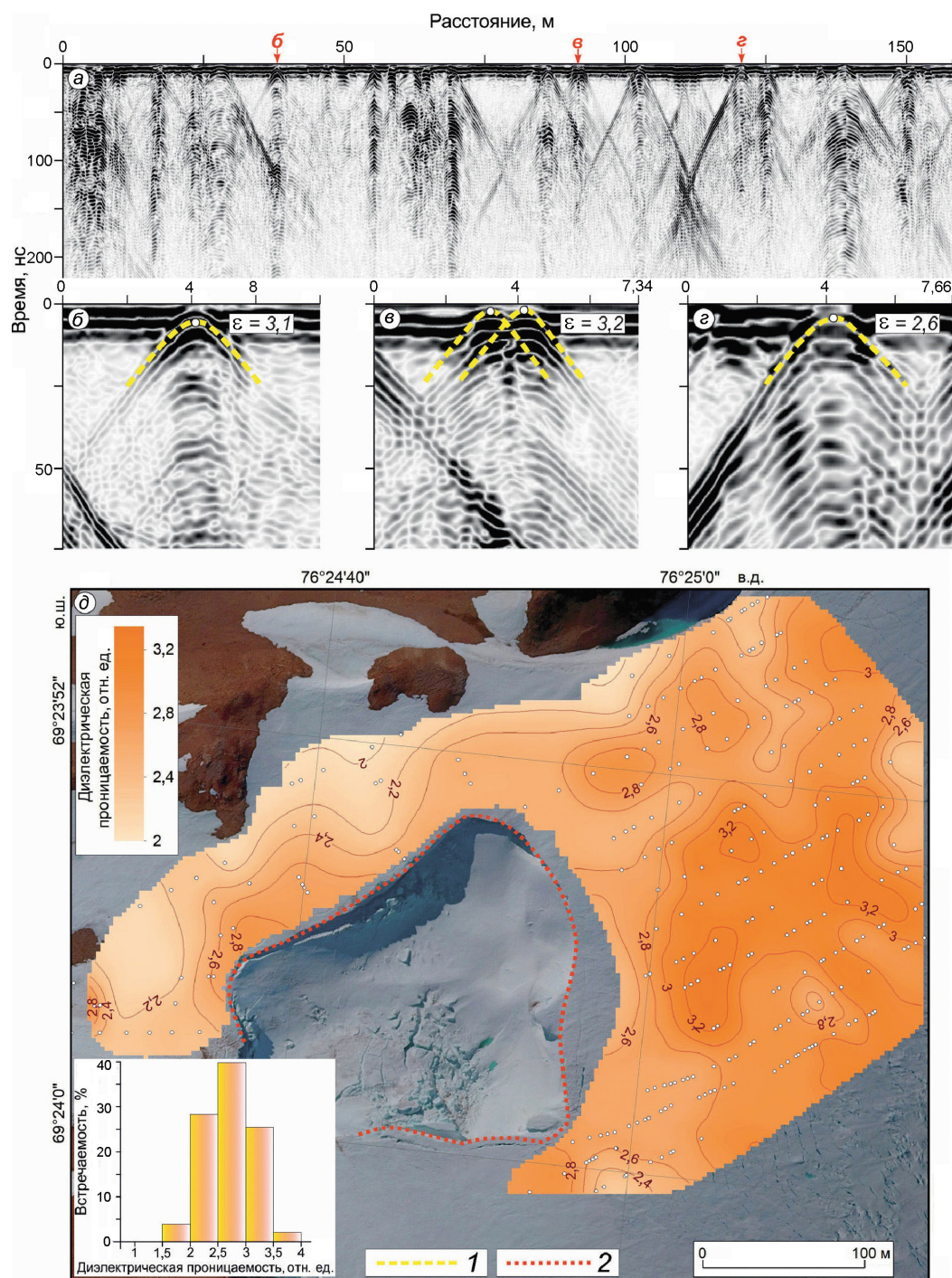


Рис. 5. Георадиолокационное профилирование в районе провала:

a – фрагмент георадиолокационного маршрута, выполненного в зоне трещин ледника Долк; *б–г* – укрупнённые фрагменты временного разреза с трещинами, помеченные теми же буквами на секции *a*; *д* – схема диэлектрической проницаемости в пределах первого метра толщи ледника в районе провала. Сечение изолиний – 0,2 ед. Точками в секции *д* обозначены трещины, по которым осуществлялся расчёт диэлектрической проницаемости. 1 – годографы дифрагированных волн; 2 – контур провала. На врезке показана гистограмма распределения диэлектрической проницаемости по годографам дифрагированных волн

Fig. 5. GPR investigations in the dip area:

a – the fragment of the GPR time-section, which was registered in the dip area; *б–г* – enlarged fragments of GPR time-section, marked by the same letters; *д* – the glacier permittivity within the uppermost (1st meter) part of the glacier structure in the dip area. The contour interval is 0.2 units. The dots marked the crevasses, which used for calculations. 1 – hodographs of diffracted waves; 2 – boundary of the dip. Scattering of the permittivity is demonstrated in the insert

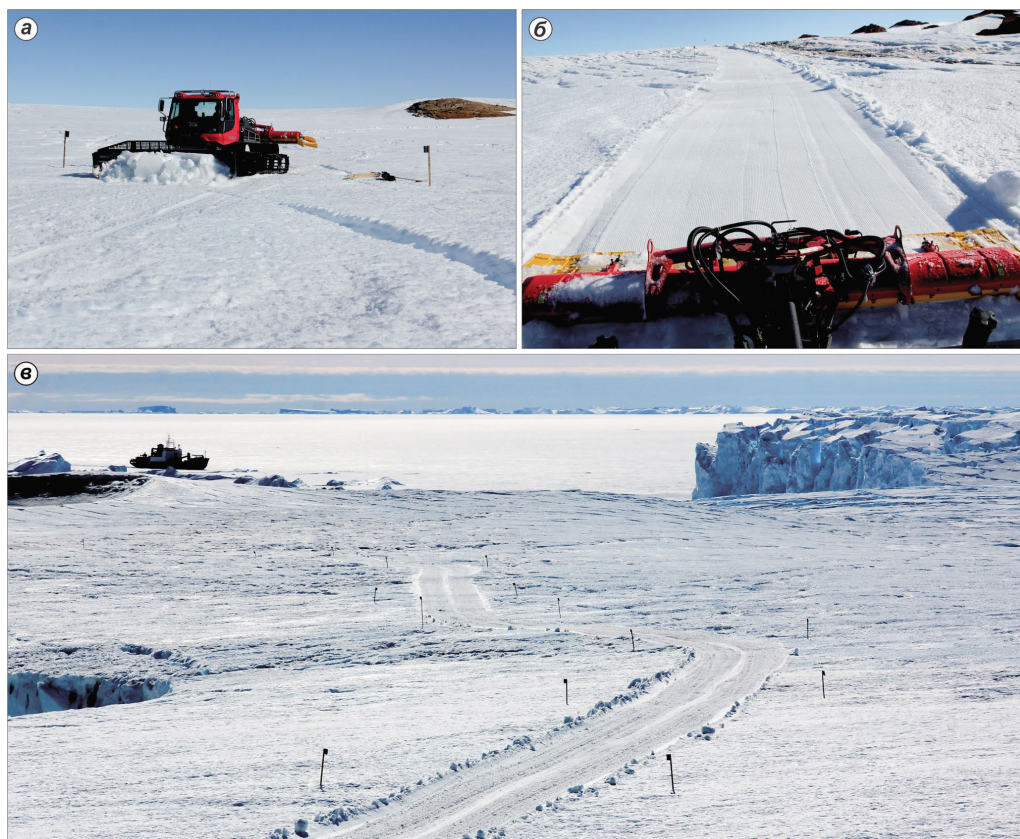


Рис. 6. Организация всепогодной трассы в районе провала:

a, б – укатка трассы при помощи санно-гусеничной техники; *в* – общий вид на трассу по завершении работ. Фотографии выполнены С.В. Поповым 23 января 2018 г. (*a, б*) и 3 февраля 2018 г. (*в*)

Fig. 6. Formation of all-season trace in the dip area:

a, б – making the road smooth; *в* – common view after the finishing of the work. Photos by S.V. Popov, January 23, 2018 (*a, б*) and February 3, 2018 (*в*)

рое было определено на основании обсчёта годовых дифрагированных волн (2,78 отн. ед.). Для определения глубин расположения объектов ниже первого метра от дневной поверхности, исходя из результатов плотностного анализа керна К1, использовано значение $\epsilon = 3,13$ отн. ед.

Оценка безопасности района исследований

На основе полученных значений диэлектрической проницаемости можно определить глубину трещин, пересекающих основную трассу, а также обводнённых участков, описанных ранее как водные скопления в приповерхностной части ледника. Глубина трещин на *участке АБ* в основном варьирует от 1 до 15 м. Однако при столь больших значениях глубин ширина трещин, как уже отмечалось, не превышает 0,6 м. Поэтому все

трещины на участке в обход провала можно отнести к категории безопасных, а сам участок считать пригодным для проведения транспортных операций. Толщина водных скоплений на *участке ВГ* достигает 1 м. Это не представляет большой опасности для используемых на станции транспортных средств, но может затруднить и замедлить их передвижение. Поэтому новую всепогодную дорогу было решено проложить в обход обводнённого участка (см. рис. 1).

По итогам выполненных геофизических работ намечен маршрут новой безопасной трассы в обход провала. Трещины, пересекающие дорогу, были забучены снегом, а трасса была укатана специализированной техникой и сдана в эксплуатацию (рис. 6). До окончания сезонных работ, а также в первые месяцы зимовочной экспедиции 2018 г. передвижение санно-гусеничной техники происходило именно по этой трассе.

Заключение

Геофизические изыскания в полевой сезон 2017/18 г. имели важное прикладное значение для обеспечения безопасности логистических операций в районе российской станции Прогресс. Выполненный комплекс инженерных исследований позволил восстановить сообщение между важнейшими пунктами инфраструктуры Российской антарктической экспедиции и найти наиболее оптимальный участок для организации новой всесезонной трассы. В дальнейшем планируется мониторинг укатанной дороги для выявления опасных объектов в теле ледника, что, при наличии последних, позволит оперативно скорректировать пути проезда санно-гусеничной техники.

Подобные исследования показывают эффективность применения геофизических методов для инженерных изысканий в районах отечественных антарктических станций. Метод георадиолокационного профилирования — достаточно простой с точки зрения реализации в полевых условиях — доказывает свою высокую информативность и точность, особенно при работе на ледниках. Успешный опыт проведения подобных изысканий [1], а также описанное в настоящей работе исследование на станции Прогресс позволяет сделать вывод, что георадиолокация может стать одним из ведущих методов органи-

зации и мониторинга состояния основных логистических объектов инфраструктуры РАЭ.

Благодарности. Авторы выражают благодарность своему коллеге, сотруднику гляцио-геофизического отряда 63-й РАЭ Г.А. Дешевых за помощь в проведении полевых работ; начальнику станции Прогресс 62-й РАЭ А.В. Миракину за помощь в организации выполненных работ и предоставление фотоматериалов; сотрудникам станции Прогресс 62-й РАЭ и начальнику станции Прогресс 63-й РАЭ А.В. Воевдину за помощь в организации выполненных работ; Институту наук о Земле СПбГУ и ООО «ГеофизПоиск» за предоставленную геофизическую аппаратуру. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00421.

Acknowledgments. The authors are grateful to their colleague G.A. Deshevykh for assistance in carrying out of the field work; to the head of the Progress Station of the 62nd RAE, A.V. Mirakin for assistance in the organization of performed works and the provision of photographic materials; to the staff of Progress Station of the 62nd RAE and the head of Progress Station of the 63rd RAE A.V. Voevodin for assistance during the work organization; Institute of Earth Sciences of St. Petersburg State University and «GeofizPoisk» for providing the geophysical equipment. The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project № 18-05-00421.

Литература

1. Попов С.В., Поляков С.П. Георадарное лоцирование трещин в районе российских антарктических станций Прогресс и Мирный (Восточная Антарктида) в сезон 2014/15 года // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 1. С. 90–98.
2. Вайгачев А.З. Прорыв ледяной плотины озера Лагерного // Информ. бюл. Советской антарктич. экспедиции. 1965. № 54. С. 58.
3. Попов С.В., Боронина А.С., Прякина Г.В., Григорьева С.Д., Суханова А.А., Тюрин С.В. Прорывы ледниковых и подледниковых озер в районе холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида), в 2017–2018 гг. // Геориск. 2018. Вып. XII. № 3. С. 56–67.
4. Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. Vast ice depression in Dalk Glacier, East Antarctica // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 427–432. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-427-432.
5. Antarctic Digital Database (ADD), Version 7.0, January 2016. Scientific Committee on Antarctic Research, British Antarctic Survey, Cambridge.
6. Попов С.В., Киселев А.В. Отечественные аэро-геофизические исследования на землях Мак-

References

1. Popov S.V., Polyakov S.P. Ground-penetrating radar sounding of the ice crevasses in the area of the Russian Stations Progress and Mirny (East Antarctica) during the field season of 2014/15. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2016, XX (1): 90–98. [In Russian].
2. Vaigachev A.Z. Breakthrough of ice dump of Lagernoye lake. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii*. Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1965, 54: 58. [In Russian].
3. Popov S.V., Boronina A.S., Pryakhina G.V., Grigoreva S.D., Sukhanova A.A., Tyurin S.V. Breakthroughs of glacial and subglacial lakes at the Larsemann Hills (East Antarctica) in 2017–2018. *Georisk. Georisk*. 2018, XII (3): 56–67. [In Russian].
4. Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. Vast ice depression in Dalk Glacier, East Antarctica. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017, 57 (3): 427–432. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-427-432
5. Antarctic Digital Database (ADD), Version 7.0, January 2016. Scientific Committee on Antarctic Research, British Antarctic Survey, Cambridge.

- Робертсона, Принцессы Елизаветы и Вильгельма II, Восточная Антарктида // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 1. С. 3–13. doi: 10.21782/KZ 1560-7496-2018-1(3-13).
7. *Войтковский К.Ф.* Основы гляциологии. М.: Наука, 1999. 256 с.
 8. *Cumming W.A.* The dielectric properties of ice and snow at 3.2 centimeters // Journ. of Applied Physics. 1952. V. 23. № 7. P. 768–773. doi: 10.1063/1.1702299.
 9. *Robin G.D.Q.* Velocity of radio waves in ice by means of a bore-hole interferometric technique // Journ. of Glaciology. 1975. V. 15. № 73. P. 151–159. doi: 10.2017/s00221443000034341.
 10. *Kovacs A., Gow A.J., Morey R.M.* The in-situ dielectric constant of polar firn revisited // Cold Regions Science and Technology. 1995. V. 23. P. 245–256.
 11. *Tiuri M., Sihvola A., Nyfors E., Hallikaiken M.* The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies // IEEE Journ. of Oceanic Engineering. 1984. V. 9. № 5. P. 377–382. doi: 10.1109/JOE.1984.1145645.
 12. *Котляков В.М., Мачерет Ю.Я., Сосновский А.В., Глазовский А.Ф.* Скорость распространения радиоволн в сухом и влажном снежном покрове // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 45–56. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-45-56.
 13. *Winther J.-G., Bruland O., Sand K., Killingtveit A., Marechal D.* Snow accumulation distribution on Spitsbergen, Svalbard, in 1997 // Polar Research. 1998. V. 17. № 2. P. 155–164. doi: 10.1111/j.1751-8369.1998.tb00269.x.
 14. *Лаврентьев И.И., Кутузов С.С., Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я., Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А., Г.А. Черняков.* Толщина снежного покрова на леднике Восточный Гренфьорд (Шпицберген) // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 1. С. 5–20. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-5-20.
 15. *Мачерет Ю.Я.* Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
 16. *Понов С.В.* Определение диэлектрической проницаемости по годографам дифрагированных волн в рамках модели наклонно-слоистой среды // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 3. С. 83–87. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(83-87).
 17. *Владов М.Л., Старовойтов А.В.* Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ, 2004. 153 с.
 18. *Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я.* Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М.: ГЕОС, 2014. 528 с.
 6. *Popov S.V., Kiselev A.V.* Russian airborne geophysical investigations of Mac. Robertson, Princess Elizabeth and Wilhelm II Lands, East Antarctica. *Kriosfera Zemli.* Earth's Cryosphere. 2018, XXII (1): 3–13. doi: 10.21782/EC2541-9994-2018-1(3-13). [In Russian].
 7. *Voitkovskiy K.F.* *Osnovy glyatsiologii.* Fundamentals of glaciology. Moscow: Nauka, 1999: 255 p. [In Russian].
 8. *Cumming W.A.* The dielectric properties of ice and snow at 3.2 centimeters. Journ. of Applied Physics. 1952, 23 (7): 768–773. doi: 10.1063/1.1702299.
 9. *Robin G.D.Q.* Velocity of radio waves in ice by means of a bore-hole interferometric technique. Journ. of Glaciology. 1975, 15 (73): 151–159.
 10. *Kovacs A., Gow A.J., Morey R.M.* The in-situ dielectric constant of polar firn revisited. Cold Regions Science and Technology. 1995, 23: 245–256.
 11. *Tiuri M., Sihvola A., Nyfors E., Hallikaiken M.* The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies. IEEE Journ. of Oceanic Engineering. 1984, 9 (5): 377–382. doi: 10.1109/JOE.1984.1145645.
 12. *Kotlyakov V.M., Macheret Y.Y., Sosnovsky A.V., Glazovsky A.F.* Speed of radio wave propagation in dry and wet snow. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2017, 57 (1): 45–56. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-45-56. [In Russian].
 13. *Winther J.G., Bruland O., Sand K., Killingtveit A., Marechal D.* Snow accumulation distribution on Spitsbergen, Svalbard, in 1997. Polar Research. 1998, 17 (2): 155–164. doi: 10.1111/j.1751-8369.1998.tb00269.x.
 14. *Lavrentiev I.I., Kutuzov S.S., Glazovsky A.F., Macheret Y.Y., Osokin N.I., Sosnovsky A.V., Chernov R.A., Cherniakov G.A.* Snow thickness on Austre Grønfyordbreen, Svalbard, from radar measurements and standard snow surveys. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2018, 58 (1): 5–20. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-5-20. [In Russian].
 15. *Macheret Y.Y.* *Radiozondirovanie lednikov.* Radio echosounding of glaciers. Moscow: Nauchny Mir, 2006: 392 p. [In Russian].
 16. *Popov S.V.* Determination of dielectric permittivity from diffraction traveltimes curves within a dipping-layer model. *Kriosfera Zemli.* Earth's Cryosphere. 2017, XXI (3): 75–79. doi: 10.21782/EC2541-9994-2017-3(75-79).
 17. *Vladov M.L., Starovoytov A.V.* *Vvedenie v georadiolokatsiyu.* Introduction to GPR. Moscow: MSU, 2004: 153 p. [In Russian].
 18. *Glazovsky A.F., Macheret Y.Y.* *Voda v lednikah. Metody i rezultaty geofizicheskikh i distantsionnykh issledovaniy.* Water in glaciers. Methods and results of geophysical and remote sensing studies. Moscow: GEOS, 2014: 528 p. [In Russian].

Подписано в печать 31.01.2020 г. Дата выхода в свет 28.02.2020 г. Формат 60 × 88^{1/8} Цифровая печать
Усл.печ.л. 19.0 Уч.-изд.л. 19.0 Бум.л. 10.0 Тираж 80 экз. Договорная цена Заказ 2868

Учредители: Российская академия наук, Русское географическое общество

Воспроизведено по заказу Русского географического общества
в 000 «ИКЦ «АКАДЕМКНИГА», 109028 Москва, Подкопаевский пер., 5, мезонин 1, к. 2
Оригинал-макет подготовлен в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт географии Российской академии наук

16+ Отпечатано в типографии «Book Jet» (ИП Коняхин А.В.), 390005, г. Рязань, ул. Пушкина, 18, тел. (4912) 466-151