

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА

УДК 550.837.76

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-201-211

СТРОЕНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЧАСТИ ЛЕДНИКА В РАЙОНЕ БУХТЫ ТАЛА (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОРАДАРНЫХ РАБОТ СЕЗОНА 2018/19 г.

С.Д. ГРИГОРЬЕВА^{1*}, Е.В. РЫЖОВА², С.В. ПОПОВ^{3,1},
М.П. КАШКЕВИЧ¹, В.И. КАШКЕВИЧ²

¹ — Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² — ООО «Геофизпоиск», Санкт-Петербург, Россия

³ — АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», Санкт-Петербург, Россия

*grigoreva.svetl@gmail.com

STRUCTURE OF THE NEAR-SURFACE PART OF THE GLACIER IN THE THALA BAY AREA (EAST ANTARCTICA) BASED ON 2018/2019 GROUND-PENETRATING RADAR SURVEY

S.D. GRIGOREVA^{1*}, E.V. RYZHOVA², S.V. POPOV^{3,1},
M.P. KASHKEVICH¹, V.I. KASHKEVICH²

¹ — Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

² — LLC “Geophyspoisk”, St. Petersburg, Russia

³ — JSC “Polar Marine Geosurvey Expedition”, St. Petersburg, Russia

*grigoreva.svetl@gmail.com

Received May, 16, 2019

Accepted June, 25, 2019

Keywords: crevasses, ground-penetrating radar, Larsemann Hills, Progress station.

Summary

The paper discusses the results of the ground-penetrating radar (GPR) survey carried out in February 2019 in the area of Thala Bay (Larsemann Hills, East Antarctica). Thala Bay is one of the strategic facilities of the Russian Antarctic Expedition (RAE) in the Progress station area as since 2019 heavy cargo has been unloaded here intended for the construction of new facilities at the Vostok station. Transportation of goods to the point of formation of logistic traverses takes place on ice tracks, whose safety must be evaluated taking into account the expanded system of crevasses. In addition, the current track is characterized by a significant slope of the terrain, which also complicates the relocation of heavy equipment.

Citation: Grigoreva S.D., Ryzhova E.V., Popov S.V., Kashkevich M.P., Kashkevich V.I. Structure of the near-surface part of the glacier at the area of the Thala Bay (East Antarctica) from ground-penetrating radar survey of field season 2018/19. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 2: 201–211. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-201-211.

In February 2019, a GPR survey was carried out within the Thala Bay area to assess the possibility of organizing an alternative section of the route within it. According to the visual observations, this area was characterized by an extensive system of crevasses, the width of which at the surface reached 20-30 cm, and the prevailing longitudinal direction coincided with the direction of the route. The task of the geophysical survey was to map the crevasses not identified by visual inspection and to determine their morphology. According to the GPR data, it was shown that the crevasses within the site are located to the firn layer and are characterized by an irregular shape, significantly expanding at the deeper levels and reaching a width of 6 m. The results of the survey are illustrated with the scheme of the firn thickness which shows location of the crevasses. According to the recommendations of the authors, the section of the glacier is suitable for operation provided the glaciological situation using the GPR method is monitored annually.

Поступила 16 мая 2019 г.

Принята к печати 25 июня 2019 г.

Ключевые слова: георадиолокация, станция Прогресс, трещины, Холмы Ларсеманн.

В настоящей работе обсуждаются результаты георадиолокационных исследований, выполненных в районе российской антарктической станции Прогресс (оазис Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида) в сезон 64-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) в 2018/19 г. Изыскания проводились с целью оценки безопасности участка ледника в районе пункта разгрузки судов в бухте Тала для проложения в его пределах трассы передвижения тяжелой санно-гусеничной техники. По итогам георадарного профилирования в пределах исследуемого района выявлена сеть трещин, развитых в снежно-фирновой толще и достигающих максимальной ширины 6 м. Результаты работ проиллюстрированы схемой мощности снежно-фирновой толщи по участку работ и их распространения по состоянию на февраль 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Бухта Тала, расположенная в западной части оазиса Холмы Ларсеманн (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида), является одним из важных логистических пунктов РАЭ при работах научно-экспедиционных судов (НЭС) в районе станции Прогресс. Начиная с сезона 64-й экспедиции (2018/19 г.) здесь выполняются операции по выгрузке на морской лед и последующей доставке в район пункта формирования санно-гусеничного похода тяжелых грузов, предназначенных для строительства новых зданий станции Восток. Инженерные изыскания в районе бухты Тала являются необходимым условием обеспечения безопасной разгрузки научно-экспедиционных судов и транспортировки грузов на станцию Восток, сопровождая, таким образом, задачи строительства новой станции, определенные Правительством Российской Федерации в «Стратегии развития деятельности Российской Федерации в Антарктике на период до 2020 года и на более отдаленную перспективу».

Сообщение между пунктом разгрузки НЭС (рис. 1, *a*) и районом станции осуществляется по участку ледника, где имеются трещины, морфология и пространственное развитие которых на начало 2019 г. оставались неясными. Визуальные наблюдения позволили выявить лишь небольшое количество таких объектов, а также установить, что их простирание совпадает с направлением участка трассы. Таким образом, имеется вероятность прохождения трассы по трещине, что представляет значительную угрозу при передвижении по ней тяжелой санно-гусеничной техники. Существенным недостатком действующей трассы, соединяющей район бухты Тала и пункт формирования санно-гусеничных походов (рис. 1, *b*), является также боковой уклон поверхности ледника, достигающий 10° и способный вызвать проскальзывание тяжелогруженной техники и саней. Прикладной задачей выполненными

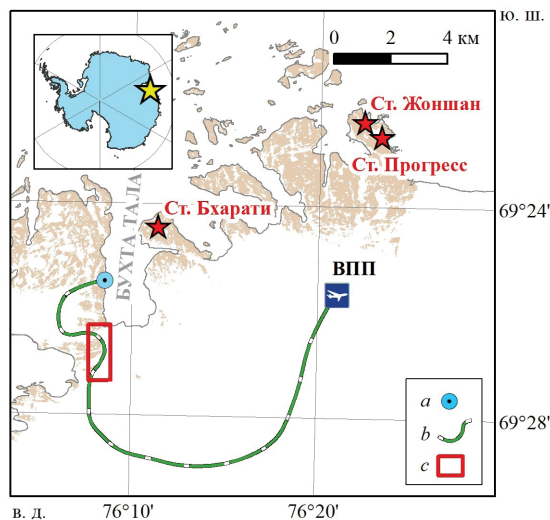


Рис. 1. Положение участка работ.

a — пункт разгрузки российских судов, *b* — трасса движения тяжелой техники, *c* — границы участка работ. ВПП — взлетно-посадочная полоса

Fig. 1. Location of the area of investigations.

a — discharge point of Russian vessels, *b* — logistic route, *c* — survey area

изысканий являлась оценка безопасности участка ледника, расположенного восточнее действующей трассы и характеризующегося пологим рельефом, для возможности проложения в его пределах альтернативной дороги.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, выявление трещин в приповерхностной части ледника, а также оценка мощности перекрывающих их снежных мостов и описание внутреннего строения могут успешно осуществляться при помощи георадиолокации [1–8]. Основными преимуществами метода являются его высокая эффективность, быстрота, экономичность и относительная простота реализации.

Для оценки безопасности логистических операций в районе бухты Тала в сезон 64-й РАЭ участок ледника, предполагаемый для проложения альтернативной трассы, был покрыт георадарной съемкой, дополненной высокоточными геодезическими измерениями (рис. 1, *c*). Полученные результаты и их интерпретация излагаются в настоящей работе.

МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ

Полевые геофизические работы проводились с использованием георадара Zond-12e (Radar Systems, Inc, Латвия) с антенным блоком АБ-900 (частота зондирующих импульсов 900 МГц). Планово-высотная привязка осуществлялась при помощи DGPS-приемников EFT-M2 (ООО «Эффективные технологии», Россия), а также штатного датчика перемещения георадара. Точность определения плановых координат составила менее 10 см, что вполне соответствует поставленным задачам.

Исследования выполнялись в два основных этапа. На первом, рекогносцировочном, был выполнен продольный георадарный профиль, проложенный субпараллельно действующей трассе по направлению север — юг (рис. 2, *a*).

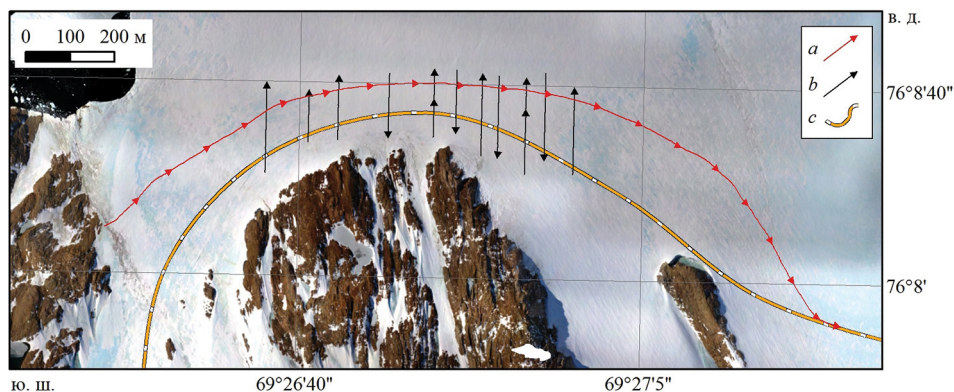


Рис. 2. Схема фактического материала.

a — георадарный профиль первого этапа работ, *b* — георадарные профили второго этапа работ, *c* — трасса следования тяжелой техники

Fig. 2. Scheme of the field survey.

a — GPR line of the first stage of survey, *b* — GPR lines of the second stage of survey, *c* — logistic route

Ширина большинства трещин, наблюдаемых визуально, у поверхности не превышала 30 см (рис. 3), однако для оценки безопасности участка требовалось определить их геометрические параметры на глубине, выявить трещины, не выраженные визуально, а также определить мощность перекрывающих их снежных мостов.

Для этого на втором этапе работ были проложены секущие георадарные профили, ориентированные по линии запад-восток и приблизительно ортогональные как направлению трассы, так и преобладающему простиранию трещин (рис. 2, *b*). Межпрофильное расстояние на втором этапе съемки составило 100 м. Полевые геофизические работы сопровождались натурными наблюдениями, в рамках которых было вскрыто и описано пять трещин, три из них выявлены по данным георадиолокации и располагались на выполненных профилях.

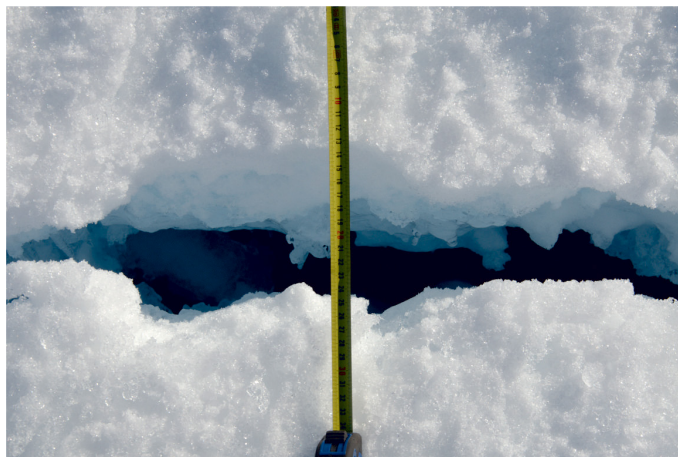


Рис. 3. Пример трещины, характерной для участка работ (вид с поверхности)

Fig. 3. Example of the crevasse typical for the area of investigations (surface view)

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Обработка георадарных данных осуществлялась с использованием компьютерной программы Prism 2.60 (Radar Systems, Inc., Латвия) по стандартному графу обработки. Он включает в себя корректировку длин профилей (в случае необходимости), горизонтальную фильтрацию (процедура *Background removal*) и выбор профиля усиления. Кроме того, для корректного пересчета временного разреза в глубинный требуется кинематическая (скоростная) модель среды. Ее можно получить четырьмя основными способами: (1) использовать табличные или расчетные значения, (2) выполнить специализированные работы ОГТ [9], (3) выполнить моделирование, предпочтительнее в рамках модели наклонно-слоистой среды по годографам дифрагированных волн от неоднородностей [10], или (4) на основе какой-либо априорной информации, например по данным бурения.

Первый способ применяется при практическом отсутствии информации. Второй — самый лучший, поскольку исследователь гарантированно получает годографы от одних и тех же границ, поэтому нет нужды выяснять, как они соотносятся между собой на временных разрезах. Однако метод ОГТ требует порой значительных временных затрат и наличия раздвижных антенн, которых в сезон 64-й РАЭ у исполнителей не было. Третий способ хорош при наличии большого количества трещин, поскольку позволяет провести статистическую обработку данных. Но, с другой стороны, этот метод является действенным лишь в том случае, если дифрагированные волны характеризуются наличием длинных ветвей гиперболических отражений. Без этого нет реальной возможности достичь высокой точности, принципиально отличной от того, что можно получить, используя табличные данные. Последний из названных способов хорош лишь в том случае, если имеется однозначная идентификация выявляемых границ по керну и временному разрезу. Опыт авторов показывает, что соотнесение слоев внутри ледника и снежно-фирновой толщи не всегда однозначно, в отличие от границы с каменным основанием или водой.

К сожалению, в обсуждаемом районе бурение по организационным причинам не проводилось: у исполнителей было совсем немного времени для работы. Анализ полученных данных показал, что ветви дифрагированных волн, сформированных от трещин, достаточно короткие и расчеты по ним дадут большую погрешность. Поэтому исполнители вынуждены были использовать данные по бурению, несмотря на то, что они были получены примерно в десяти километрах от района работ.

На леднике в районе отечественной станции Прогресс выполнялось бурение. Там же проводилось и георадарное профилирование. Соотнесение мощности снежно-фирновой толщи по данным бурения с задержкой отражённого сигнала по материалам георадарных работ позволило получить среднюю диэлектрическую проницаемость снежно-фирновой толщи. Она составила 2,8 единиц, что соответствует средней скорости распространения электромагнитных волн в среде 179,4 м/мкс. Это значение и было использовано при пересчетах временных георадарных разрезов в глубинные. Столь высокое значение для диэлектрической проницаемости снежно-фирновой толщи объясняется наличием в ней свободной талой воды [11–16], к которому приводит интенсивное приповерхностное таяние.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные материалы показали, что в пределах участка работ имеется развитая система трещин, локализованных в снежно-фирновой толще, характеризующаяся широтным простиранием. Характерный пример полученного в ходе полевых

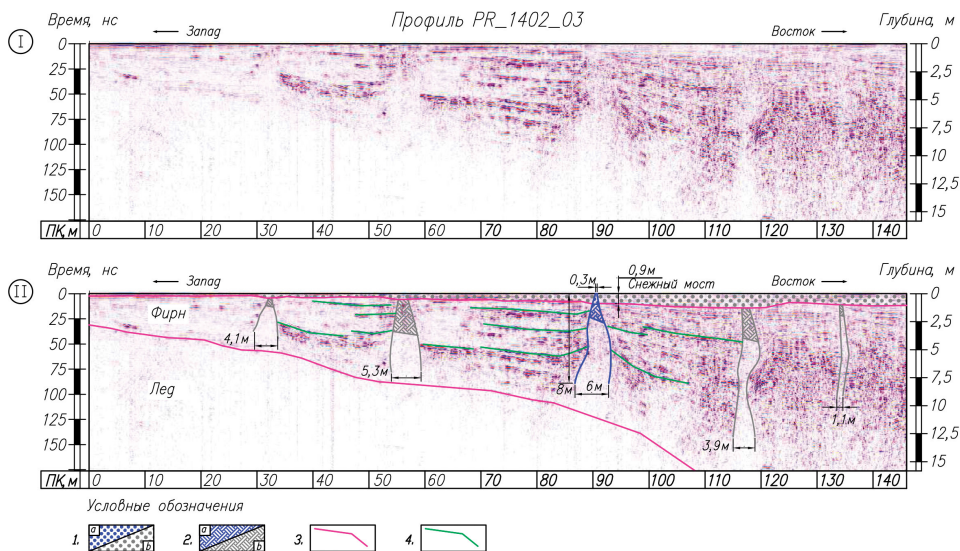


Рис. 4. Пример георадарного разреза по участку работ (профиль ПР_1402_03)

I — неинтерпретированный профиль, II — интерпретированный профиль; 1 — снег (a — данные, заверенные визуально, b — данные георадиолокации), 2 — зона ледяных наростов, вызванных сезонным таянием (a — данные, заверенные визуально, b — данные георадиолокации), 3 — граница фирна и льда, 4 — внутрифирновые границы

Fig. 4. An example of GPR section for the area of investigations (line PR_1402_03)

I — non-interpreted section, II — interpreted section; 1 — snow (a —from visual observations, b —from GPR data), 2 — zone of ice build-ups formed during the season melting (a — visual observations, b — due to GPR data), 3 — firn-ice boundary, 4 — intrafirn boundaries

работ временного георадарного разреза, дополненного шкалой глубин, приводится на рис. 4. Интерпретация выполнялась в соответствии с современными подходами к анализу строения приповерхностной части ледников по данным георадиолокации [1, 4, 9, 12].

На временном разрезе отчетливо прослеживаются границы между снегом и фирном, а также фирном и льдом (рис. 4-II, 3), при этом мощность снежно-фирновой толщи возрастает от 2,5 м в начале профиля до 15 м и более далее пункта ПК108. В ее пределах развиты пять крупных трещин, одна из которых (показана синим цветом) в ходе заверочных работ визуально наблюдалась на протяжении 10 м. Она имеет юг-юго-восточное простирание, характерное для обсуждаемого участка ледника. Ширина трещины у поверхности варьирует от 0,2 до 0,4 м; мощность моста составляет в среднем 1 м (рис. 4-II, 1), при этом верхние 0,2–0,3 м сложены рыхлым сезонным снегом. Стенки трещины рельефные, практически с самой поверхности она резко расширяется, в разрезе имея каплеобразную форму. Характерной особенностью, важной для учета впоследствии при обработке данных георадиолокации, является наличие на нижней кромке моста и стенках трещины большого количества ледяных наростов, сформированных в процессе сезонного таяния. Их присутствие создает дополнительные отражения на георадарных разрезах (рис. 4-II, 2), что при отсутствии априорной информации может привести к значительному завышению оценки мощности снежного (снежно-фирнового) моста.

Ширина описанной трещины по данным георадиолокации достигает 6 м, однако эта величина незначительно превышает истинное значение вследствие того, что георадарный профиль пересекал ее не строго вкрест простираения. Угол между направлением маршрута и простираением трещины, измеренный по карте, составил 68° , что означает необходимость учета поправочного коэффициента (косинуса угла, равного 0,927):

$$l_{\text{ист}} = 0,927 \cdot l_{\text{рад}}$$

где $l_{\text{ист}}$ — истинная ширина трещины, $l_{\text{рад}}$ — ширина трещины по данным георадиолокации.

С учетом поправочного коэффициента максимальная ширина наблюдаемой входе полевых работ трещины составляет 5,56 м, а остальных трещин (слева направо) 3,8 м, 4,9 м, 3,6 м, 1 м.

Трещина, описанная выше, наряду с другими, наблюдаемыми авторами в ходе заверочного маршрута, может рассматриваться в качестве эталонного объекта при интерпретации данных георадиолокации на данном участке. На разрезе (рис. 4) отчетливо видно, что ее строение схоже со строением остальных трещин, визуальная оценка которых в полевых условиях не производилась. Все они характеризуются неровной формой стенок и тенденцией к расширению при увеличении глубины. Наличие в теле ледника пустот подчеркивается резкими разрывами границ, прослеживаемых внутри снежно-фирновой толщи (рис. 4-II, 4).

Георадарные данные позволяют выявлять не только объекты в теле ледника как таковые, но и определять их конфигурацию [1, 2, 4, 6, 7, 14]. Большие перспективы открывает математическое моделирование, в частности с использованием некоммерческой компьютерной программы grgMax [17]. Интерпретация георадарных данных достаточно сложный процесс, требующий не только опыта, но и понимания основ распространения электромагнитных волн. В целом пустоты в теле ледника отмечаются на временном георадарном разрезе полным или частичным отсутствием целевых границ. При этом область временного разреза, соответствующая внутренней части широкой

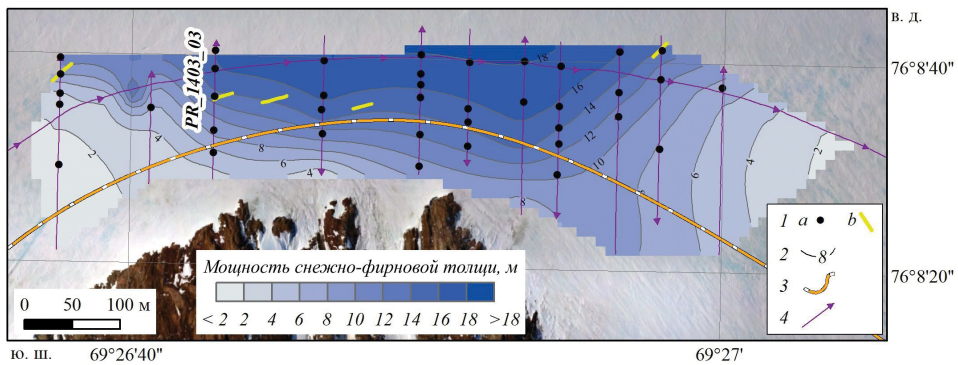


Рис. 5. Схема интерпретации геофизических данных.

1 — трещины (a — по данным георадиолокации, b — наблюдаемые визуально), 2 — изолинии мощности снежно-фирновой толщи; сечение изопакит 2 м, 3 — положение трассы, 4 — георадарные профили

Fig. 5. Interpretation scheme of geophysical data.

1 — crevasses (a — due to GPR data, b — observed visually), 2 — contours of snow-firn layer thickness; isopachs drawn at each 2 m, 3 — location of the logistic route, 4 — GPR profiles

трещины, может содержать какие-то отражения, в частности дифрагированные волны, сформированные от рефлекторов, расположенных в стороне от маршрута.

По результатам обработки материалов съемки была построена итоговая схема мощности снежно-фирновой толщи и положения трещин, установленного по данным георадиолокации (рис. 5, *1а*), а также визуально (рис. 5, *1б*). Мощность снежно-фирновой толщи на исследованном участке варьирует от 0 до более 18 м. Она увеличивается в восточном направлении. Согласно полученным данным, большая часть трещин приурочена именно к участкам наибольшей мощности снежно-фирновой толщи. Достаточно большое межпрофильное расстояние (100 м между секущими профилями) не позволило выявить положение отдельных трещин между соседними профилями, однако их ориентировка была установлена благодаря визуальным наблюдениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам съемки методом георадиолокации, выполненной в сезон 64-й РАЭ в районе бухты Тала, было установлено наличие в пределах участка обширной системы трещин, развитых в толще фирна и характеризующихся сложным внутренним строением. Практически все они обладают каплевидной формой в разрезе с рельефными стенками. Ширина трещин порой превышает 5,5 м на глубинах около 7 м. Мощность снежных мостов, их перекрывающих, составляет в среднем 1 м, при этом нижняя их кромка зачастую покрыта слоем ледяных образований, вызванных сезонным таянием и создающих ложные отражения на георадарных разрезах. Неправильная трактовка этого слоя способна привести к некорректной интерпретации данных без дополнительных натуральных наблюдений. Мощность снежно-фирновой толщи в пределах участка работ составляет от 0 м в его северной и южной частях до более 18 м на востоке.

Несмотря на то, что по результатам обработки данных была составлена схема трещин, необходимо принимать во внимание тот факт, что ледник является динамичной системой и при возобновлении движения по участку в сезон 65-й РАЭ (2019/20 г.) обстановка может измениться вследствие его течения. Тем не менее выполненные исследования заложили важную методическую базу для дальнейших изысканий, направленных на обеспечение безопасности логистических операций в районе бухты Тала. Так, установлено преобладающее простирание трещин и описана их морфология, выявлены специфические черты их строения, важные при интерпретации георадарных данных. Безопасная эксплуатация участка ледника в дальнейшем возможна после проведения оперативной георадарной съемки, выявления нового положения трещин и проложения участка трассы с учетом опасных факторов.

Отдельным вопросом является создание скоростной модели среды для более корректного пересчета временного разреза в глубинный. Для внутренних районов Антарктиды, где температуры воздуха не бывают положительными, имеются эмпирические соотношения между диэлектрической проницаемостью и плотностью [9, 13, 16]. В прибрежной части континента интенсивное приповерхностное таяние приводит к наличию свободной талой воды. Даже малая ее часть приводит к увеличению диэлектрической проницаемости, вне зависимости от плотности [9, 13], что на практике не поддается учету. Это приводит к сложностям в определении скоростной модели среды. Лучшим способом решения этой проблемы, безусловно, является применение метода ОГТ [9,14].

Благодарности. Авторы работы благодарят своих коллег по 64-й Российской антарктической экспедиции Г.А. Дешевых, А.В. Миракина, А.Н. Николаева, А.А. Четверову за помощь в выполнении полевых работ, а также ООО «Геофизпоиск» за предоставленную геофизическую и геодезическую аппаратуру, уважаемого рецензента за критические и конструктивные замечания, учет которых улучшил настоящую статью. Работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00421.

Acknowledgments. The authors are grateful to their colleagues in the 64th Russian Antarctic expedition G.A. Desevykh, A.V. Mirakin, A.N. Nikolaev, A.A. Chetverova for the help in performance of field works, and also to LLC Geofizpoisk for the provided geophysical and geodetic equipment. This scientific work was executed at financial support of RFBR, research project No. 18-05-00421.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Попов С.В., Эберляйн Л. Опыт применения георадара для изучения строения снежно-фирновой толщи и грунта Восточной Антарктиды // Лед и Снег. 2014. Т. 54. № 4. С. 95–106.
3. Annan A.P. GPR – History, Trends, and Future Developments // Subsurface Sensing Technologies and Applications. 2002. V. 3. № 4. P. 253–270. doi:10.1023/A:1020657129590.
4. Arcone S.A., Delaney A.J. GPR images of hidden crevasses in Antarctica // Proceedings of 8th Int. Conference on Ground Penetrating Radar. Gold Coast, Australia. SPIE. 2000. V. 4084. P. 760–765. doi:10.1117/12.383512.
5. Eder K., Reidler C., Mayer C., Leopold M. Crevasse detection in Alpine areas using ground penetrating radar as a component for a mountain guide system // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2008. V. XXXVII. Part B8. P. 837–841.
6. Singh K.K., Negi H.S., Ganju A., Kulkarni A. V., Kumar A., Mishra V.D., Kumar S. Crevasses detection in Himalayan glaciers using ground-penetrating radar // Current Science. 2013. V. 105. № 9. P. 1288–1295.
7. Zamora R., Casassa G., Rivera A., Ordenes F., Neira G., Araya L., Mella R., Bunster C. Crevasse detection in glaciers of southern Chile and Antarctica by means of ground penetrating radar // IAHS Processings. 2005. V. 318. P. 153–162.
8. 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». СПб.: Научное издание, 2018. С. 797–800.
9. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
10. Попов 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).
11. Войтковский К.Ф. Основы гляциологии. М.: Наука, 1999. 256 с.
12. Cuffey K.M., Paterson W.S.B. The physics of glaciers. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2010. 693 p.
13. Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я. Вода в ледниках: Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М.: ГЕОС, 2014. 528 с.

14. Попов С.В., Поляков С.П., Пряхин С.С., Мартыянов В.Л., Лукин В.В. Строение верхней части ледника в районе планируемой взлетно-посадочной полосы станции Мирный, Восточная Антарктида (по материалам работ 2014/15 года) // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 1. С. 73–84. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(73-84).
15. Looyenga H. Dielectric constants of heterogeneous mixture // Physica. 1965. V. 31. № 3. P. 401–406.
16. Котляков В.М., Мачерет Ю.Я., Сосновский А.В., Глазовский А.Ф. Скорость распространения радиоволн в сухом и влажном снежном покрове // Лед и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 45–56. doi: org/10.15356/2076-6734-2017-1-45-56.
17. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar // Comput. Phys. Commun. 2016. V. 209. P. 163–170. doi:10.1016/j.cpc.2016.08.020.

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. Earth's Cryosphere. 2016, XX, 1: 82–90.
2. Popov S.V., Eberlein L. Investigation of snow-firn thickness and ground in the East Antarctica by means of geophysical radar. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 54, 4: 95–106. [In Russian].
3. Annan A.P. GPR – History, Trends, and Future Developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*. 2002, 3, 4: 253–270. doi:10.1023/A:1020657129590.
4. Arcone S.A., Delaney A.J. GPR images of hidden crevasses in Antarctica. *Proceedings of 8th Int. Conference on Ground Penetrating Radar*. Gold Coast, Australia. SPIE. 2000, 4084: 760–765. doi:10.1117/12.383512.
5. Eder K., Reidler C., Mayer C., Leopold M. Crevasse detection in Alpine areas using ground penetrating radar as a component for a mountain guide system. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008, XXXVII, Part B8: 837–841.
6. Singh K.K., Negi H.S., Ganju A., Kulkarni A. V., Kumar A., Mishra V.D., Kumar S. Crevasses detection in Himalayan glaciers using ground-penetrating radar. *Current Science*. 2013, 105: 1288–1295.
7. Zamora R., Casassa G., Rivera A., Ordenes F., Neira G., Araya L., Mella R., Bunster C. Crevasse detection in glaciers of southern Chile and Antarctica by means of ground penetrating radar. *IAHS Processings*. 2005, 318: 153–162.
8. Sukhanova A.A., Popov S.V., Grigoreva S.D. Sbornik докладov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii “Tret’i Vinogradovskie chteniia. Grani gidrologii”. Engineering investigations aimed at organizing a round-year logistic route at the area of the Progress station (Russia) during the field season of the 63rd RAE (2017/2018). *Processings of the international scientific conference “Third Vinogradov’s symposium”*. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2018: 797–800 [In Russian].
9. Macheret Yu.Ya. *Radiozondirovanie lednikov*. Radio-echo sounding of glaciers. Moscow: Nauchnyi Mir, 2006: 392 p. [In Russian].
10. Popov S.V. Determination of dielectric permittivity from diffraction traveltime curves within a dipping-layer model. *Earth’s Cryosphere*. 2017, XXI, 3: 75–79. doi: 10.21782/EC2541-9994-2017-3(75-79). [In Russian].
11. Voitkovskiy K.F. *Osnovy gliatsiologii*. Fundamentals of glaciology. Moscow: Nauka, 1999: 255 p. [In Russian].
12. Cuffey K.M., Paterson W.S.B. *The physics of glaciers*. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2010: 693 p.

13. Glazovsky A.F., Macheret Yu.Ya. *Voda v lednikakh: Metody i rezul'taty geofizicheskikh i distantsionnykh issledovaniy*. Water in glaciers: Methods and results of geophysical and remote sensing studies. Moscow: GEOS, 2014: 528 p. [In Russian].
14. Popov S.V., Polyakov S.P., Pryakhin S.S., Mart'yanov V.L., Lukin V.V. The structure of the upper part of the glacier in the area of a snow-runway of Mirny Station, East Antarctica (based on the data collected in 2014/15 field season). *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2017, XXI, 1: 67–77. doi: 10.21782/EC2541-9994-2017-1(67-77).
15. Looyenga H. Dielectric constants of heterogeneous mixture. *Physica*. 1965. 31, 3: 401–406.
16. 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. [In Russian]. doi.org/10.15356/2076-6734-2017-1-45-56.
17. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Comput. Phys. Commun.* 2016, 209: 163–170. doi:10.1016/j.cpc.2016.08.020.