

Прикладные проблемы

УДК 550.8.056

doi:10.15356/2076-6734-2016-3-413-426

Гляциогеофизические инженерные изыскания для подготовки лётного поля в районе российской станции Мирный (Восточная Антарктида)

© 2016 г. С.В. Попов^{1*}, С.В. Межонов², С.П. Поляков², В.Л. Мартьянов², В.В. Лукин²¹Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург; ²Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

*spopov67@yandex.ru

Glaciological and geophysical investigations aimed at organization of a new airfield at the Station Mirny (East Antarctica)

S.V. Popov^{1*}, S.V. Mezhanov², S.P. Polyakov², V.L. Mart'yanov², V.V. Lukin²¹Polar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia; ²Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*spopov67@yandex.ru

Received March 23, 2016

Accepted April 18, 2016

Keywords: *airfield, crevasse detection, East Antarctica, GPR profiling, Station Mirny*

Summary

Main results of glaciological and geophysical engineering surveys, conducted during three summer field seasons of 2013–2016 (59–61st Russian Antarctic Expeditions – RAE) near the Russian Station Mirny (East Antarctica), are discussed in the paper. Objective of these works was to site and then to organize a new airfield for landing of medium-range aircrafts with ski landing gears. Investigations included aerial photography, GPR surveys (georadar profiling), ice core drilling, and installation of landmarks to measure velocity of the glacier motion. The GSSI ground-penetrating radars with the main frequencies of 270 MHz and 900 MHz were used. In addition, special explorations were conducted for detecting the englacial crevasses by means of remote-sensing methods. The GPR data allowed a revealing the boundary between snow-and-firn thickness and atmospheric ice. In the course of processing of 252 travel-time curves of the diffracted waves a kinematic model of the sub-surface part of the glacier has been constructed. It was found that the dielectric permittivity of the snow-firn thickness averages 2.43; similar value for the atmospheric ice amounts to 3.0. The GPR data made it possible to determine intraglacial (englacial) crevasses and to choose the most favorable field for the landing. On February 10, 2016, the first middle-range aircraft DC-3T (BT-67) had landed onto the new run-way near the station Mirny.

Поступила 23 марта 2016 г.

Принята к печати 18 апреля 2016 г.

Ключевые слова: *Восточная Антарктида, выявление трещин, георадарное профилирование, лётное поле, станция Мирный*

Рассматриваются результаты гляциогеофизических инженерных изысканий в трёх летних полевых сезонах 2013–2016 гг. (59–61-я Российские антарктические экспедиции) в районе станции Мирный (Восточная Антарктида). Цель работы – выбор места посадочной площадки для приёма среднемагистральных самолётов на лыжном шасси и последующая её организация. Работы предусматривали проведение аэрофотосъёмки, георадарного профилирования, кернового бурения, а также установку вех для измерения скорости течения ледника. Георадарные данные позволили выявить внутриледниковые трещины и выбрать наиболее удачное место для посадочной площадки, на которую 10 февраля 2016 г. был принят самолёт DC-3T (BT-67).

Введение

К настоящему времени в Антарктиде имеется более 50 взлётно-посадочных полос, три из которых, расположенные в районе станций Новолазаревская, Прогресс и Восток, регулярно используются Российскими антарктическими экспедициями (РАЭ) [1]. Есть также

несколько посадочных площадок вблизи отечественных полевых баз, в частности Молодёжной, Дружной-4, Союз и Прогресс-3. В районе чилийской станции Президент Эдуардо Фрей Монталва (Base Presidente Eduardo Frei Montalva) находится аэропорт имени Тениенте Марша (Teniente Rodolfo Marsh Airport), который совместно используется рядом стран

и обеспечивает доставку грузов и личного состава на станцию Беллинсгаузен. И только станция Мирный не имеет авиационного сообщения. Исключение составляют лишь редкие посадки австралийских самолётов Twin Otter, совершающих перелёты между станциями Дейвис и Кейси, которые приземляются на припайный лёд. Авиационное сообщение со станцией Мирный прекратилось 20 лет назад (последний раз отечественные самолёты принимались в сезон 36-й САЭ (1990/91 г.) [2]) и с тех пор не возобновлялось.

В конце первой декады XXI в. по мере укрепления экономики нашей страны и с улучшением логистического обеспечения РАЭ появились предпосылки к расширению научных работ в Антарктиде. Это нашло своё отражение в «Стратегии развития деятельности Российской Федерации в Антарктике на период до 2020 года и на более отдалённую перспективу», утверждённой Правительством РФ 30 октября 2010 г. распоряжением № 1926-р. Для реализации задач, поставленных в указанном документе, и создания условий для изучения Земель Вильгельма II, Королевы Мэри и Уилкса с целью расширения районов отечественных аэрогеофизических работ в восточном направлении необходима организация посадочной площадки на станции Мирный. Именно от этого зависит успех изучения указанной территории. Кроме того, организация посадочной площадки позволила бы возобновить некогда прерванное авиационное сообщение со станцией.

Для прибрежной части Антарктиды характерны значительные скорости течения ледников, составляющие сотни и более метров в год [3], что приводит к образованию многочисленных трещин. Их ширина может превышать десятки метров при глубине около сотни метров. Станция Мирный печально знаменита своими трещинами. Если посмотреть на неё с высоты или хотя бы из окон жилых зданий, то создаётся впечатление, что она окружена ими со всех сторон. Первой их жертвой стал механик-водитель А.И. Щеглов, погибший 25 февраля 1964 г. при попытке преодоления зоны трещин, которая пересекает трассу следования санно-гусеничного похода на станцию Восток. Спустя почти полвека, 20 ноября 2008 г., там же погиб Д.А. Ламакин, другой механик-водитель.

Однако, несмотря на столь непростую ситуацию, со времени образования станции здесь имелся аэродром, на котором было две взлётно-посадочных полосы, где периодически возникали трещины разных размеров. Аэродромная служба своевременно устанавливала их и устраняла. Таким образом, подготовка посадочной площадки на станции Мирный и возобновление работы некогда прерванного авиационного сообщения тесно связаны с необходимостью выявления трещин, а следовательно, с изучением приповерхностной части ледника дистанционными методами. Как показывает опыт, наиболее эффективным из них считается георадарное профилирование [4–7].

Характеристика работ 59-й и 60-й РАЭ (2013–2015 гг.)

В летний полевой сезон 59-й РАЭ (2013/14 г.) были выполнены первые рекогносцировочные работы. Их цель — выяснение принципиальной возможности организации здесь безопасной взлётно-посадочной полосы. Рассматривалось несколько вариантов, однако по результатам обследования все они, кроме одного, были отклонены из-за наличия трещин и боковых господствующих ветров. Указанные работы, помимо визуальной оценки, предусматривали георадарное профилирование по отдельным маршрутам и установку 24 вех для последующего измерения скорости течения ледника. Георадарное профилирование выполнялось георадаром фирмы GSSI (Geophysical Survey Systems Inc., USA) SIR-3000 с частотой зондирующих импульсов 400 МГц. В результате первых исследований был намечен участок ледника, принципиально пригодный для организации на нём посадочной площадки.

В летний полевой сезон 60-й РАЭ (2014/15 г.) для более детального изучения намеченного района были выполнены значительные по объёму инженерные изыскания и научные исследования, которые предусматривали: 1) площадную георадарную съёмку масштаба 1:15 000; 2) керновое бурение; 3) аэрофотосъёмку [8, 9]; 4) установку вех.

Георадарное профилирование велось одновременно на двух частотах — 270 и 900 МГц.

В распоряжении авторов имелся ещё один георадар с частотой зондирующих импульсов 400 МГц, применявшийся в сезон 59-й РАЭ, однако опытно-методические работы показали, что его использование, при наличии двух других, существенно не повлияет на конечный результат [4, 8]. Планово-высотная привязка выполнялась с помощью приёмоиндикатора GARMIN GPSmap 60 с выносной антенной GA 25MCX. Транспортным средством служил снегоход «Росомаха». Работы выполнялись на площади 1700 × 800 м (рис. 1). Общая протяжённость георадарных маршрутов – 20 км. Перед георадарной съёмкой проведены опытно-методические работы, задача которых – установить возможность выявления трещин с помощью применяемой аппаратуры [4].

Керновое бурение позволяет получить наиболее достоверные и полные данные о леднике, но они носят локальный характер, а сам процесс получения материала занимает весьма продолжительное время. В процессе полевых работ было отобрано пять кернов глубиной около 6 м (см. рис. 1). Бурение велось механическим буром Kovacs (Kovacs Enterprises, USA), обеспечивающим получение керна диаметром 14 см. После его отбора измерялась температура на разных горизонтах. Затем керны описывались, фотографировались и распиливались на фрагменты; далее определялась их плотность [8]. Как показывает практика, георадарное профилирование и керновое бурение дополняют друг друга, а их совместное использование позволяет получить не только качественные научные результаты [10–14], но и успешно решить прикладные задачи [8].

Аэрофотосъёмка, выполненная при низком положении Солнца над горизонтом, даёт возможность уверенно картировать протяжённые линейные объекты на дневной поверхности. К ним относятся и трещины, выявление которых – основная задача работ. Кроме того, качественный фотоплан имеет важное самостоятельное значение для решения повседневных задач жизнедеятельности антарктических станций. Аэрофотосъёмка выполнена 11 января 2015 г. с борта вертолёта Ка-32 на относительной высоте 1500 м. Ей была покрыта территория 3,5 × 3,5 км. Использовалась цифровая зеркальная фотокамера Canon 650D с объективом

Canon EF 40 mm 1:2.8 STM. В результате был составлен фотоплан с детальностью 16 пиксель/см, который представлен в работе [9].

Таким образом, в результате инженерных изысканий на станции Мирный был определён участок, пригодный для организации посадочной площадки. Проведены также обширные опытно-методические работы с целью совершенствования методики выявления трещин по георадарным данным.

Работы 61-й РАЭ (2015/16 г.)

Летний полевой сезон 61-й РАЭ (2015/16 г.) – завершающий этап исследований. Он включал в себя повторную площадную георадарную съёмку масштаба 1:10 000 на территории примерно 2 × 1,3 км (см. рис. 1). Применялись те же георадары, что и раньше. Однако лоцирование велось одновременно на двух частотах – 270 и 900 МГц. Общий объём выполненных работ для каждого георадара составил 40,2 км. Транспортное средство – снегоход «Росомаха». Скорость движения по маршрутам – около 5 км/ч. Планово-высотная привязка выполнялась по GPS с помощью приёмоиндикатора GARMIN GPSmap 60 с выносной антенной GA 25MCX, которая крепилась к одной из антенн георадара, обеспечивая тем самым синхронность планово-высотной привязки пунктов зондирования. Согласно данным стояночных наблюдений, точность определения плановых координат равна приблизительно 3 м, что вполне достаточно для решения поставленных задач. Площадная съёмка сопровождалась многочисленными опытно-методическими работами, направленными на выяснение вопросов формирования отражённых сигналов от трещин с различными характеристиками.

Для изучения динамики ледника, кроме того, устанавливались дополнительные вехи. Всего в районе работ была поставлена 41 веха (см. рис. 1). Вехи представляют собой алюминиевые трубы, высота которых составляет 6 м, диаметр 40 мм, толщина стенок 3 мм. Согласно отработанной методике, они забуривались в снежно-фирновую толщу на глубину не менее 1 м, что предохраняет вехи от проседания или наклона и даёт возможность в дальнейшем определить снегонакопление и поле скорости течения ледника.

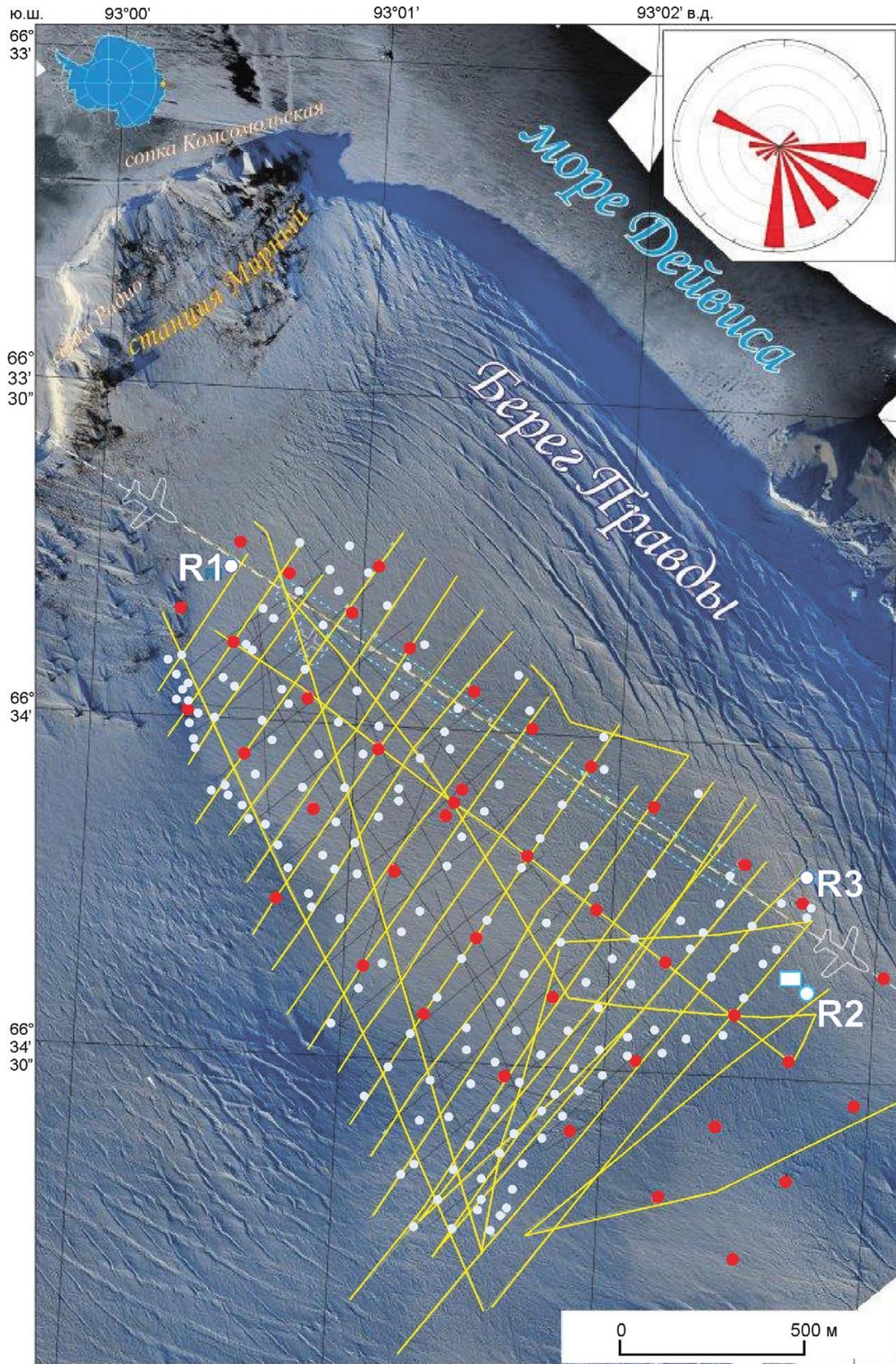


Рис. 1. Схема расположения гляциогорадарных работ в районе станции Мирный.

1 – маршруты георадарной съёмки 61-й РАЭ; 2 – маршруты георадарной съёмки 60-й РАЭ; 3 – положение вех; 4 – пункты пенетрометрии; 5 – пункты выполнения опытно-методических работ. Границы взлётно-посадочной полосы и перрона показаны бело-голубым пунктиром. Белой пунктирной линией нанесена ось взлётно-посадочной полосы. Фотоплан актуален на 11 января 2015 г. На врезке приведена роза ветров, построенная по метеоданным за четыре летних месяца 2014 г. (январь–декабрь). Материалы предоставлены метеорологом станции Мирный В.В. Шестериковым

Fig. 1. Location chart of the scientific works in the Mirny Station area

1 – GPR profiles of the 61st RAE; 2 – GPR profiles of the 60th RAE; 3 – glaciological markers; 4 – points of the penetrometric measurements; 5 – areas of the tests. Snow runway and the perron is depicted by blue-white dash lines. Axis of the runway is depicted by white dash line. Photomap relevant on January 11, 2015. Wind-rose based on the meteorological data collected in January–December of 2014 is shown on insert. The data provided by V.V. Shesterikov, the meteorologist of Mirny Station

Измерения вели приёмником GARMIN GPSmap 60; точность определения плановой привязки – около 3 м.

В соответствии с ежемесячными измерениями, выполненным с января 2015 г. по январь 2016 г., средняя скорость течения ледника в этом районе варьирует от 18 до 65 м/год (не опубликовано). По мнению авторов статьи, если среднегодовая скорость течения ледника существенно превышает погрешность прибора, то он может быть использован для получения надёжных результатов. Дополнительно с помощью пенетрометра Ленаэропроекта в 174 пунктах измерена твёрдость снега (см. рис. 1). Методика работы с прибором и его описание изложены в инструкции ВСН37-76 [15].

Результаты опытно-методических работ

Как уже отмечалось, гляциогеофизические инженерные изыскания выполнялись для выбора места посадочной площадки на станции Мирный с последующим приёмом самолёта в конце летнего полевого сезона 61-й РАЭ (2015/16 г.). Основная задача георадарных работ – надёжное выявление приповерхностных трещин в теле ледника. Для этого в сезон 60-й и 61-й РАЭ были выполнены опытно-методические работы на трещинах с различными гляциоморфологическими характеристиками.

В сезон 60-й РАЭ, в пункте R1 (см. рис. 1) были проведены такие работы на одной из трещин. Лоцирование выполняли всеми имеющимися приборами с последующим сравнением полученных временных георадарных разрезов. Анализ полученных данных показал, что вся имеющаяся аппаратура пригодна для выявления трещин. Детальное описание исследований

и полученных результатов изложено в работе [4]. Аналогичные работы выполнены 14 января 2016 г. в пункте R2 (см. рис. 1) на трещине шириной около 1,5 м, сформированной в снежно-фирновой толще. Цель работ – выяснение характера отражений от этих объектов. Для этого через трещину был размечен маршрут протяжённостью 10 м с интервалом 1 м (рис. 2, а). Его центр совпадал с центром видимой части трещины. Вдоль маршрута выполнялось лоцирование одновременно на частотах 270 и 900 МГц (см. рис. 2, б). Затем трещина была вскрыта. Согласно визуальным наблюдениям, её приповерхностная часть была почти полностью забита снегом примерно на 2 м (см. рис. 2, в).

На временном георадарном разрезе (см. рис. 2, г) отчётливо наблюдается отражение 1, сформированное зондирующим импульсом и маркирующее начало регистрации данных. Границы трещины выделяются по нарушениям слоистости снежно-фирновой толщи 2. Дифрагированные волны от её стенок также практически не зарегистрированы. Это связано с тем, что диэлектрические проницаемости снега, фирна и воздуха близки по значениям [12]. В результате коэффициенты отражения Френеля также незначительны. Следствие всего этого – видимое отсутствие контрастных отражений и дифрагированных волн. Мозаичность волнового поля внутри трещины 3 показывает, что она частично забита снегом и кусками слежавшегося фирна (что и наблюдалось при вскрытии трещины). От одного из них зарегистрирована дифрагированная волна 4, по которой могут быть произведены расчёты кинематических характеристик среды. Годограф 4 (как реальный, так и теоретический) – несимметричен, что вызвано неравномерностью движения антенны по маршруту. Теоретический годограф

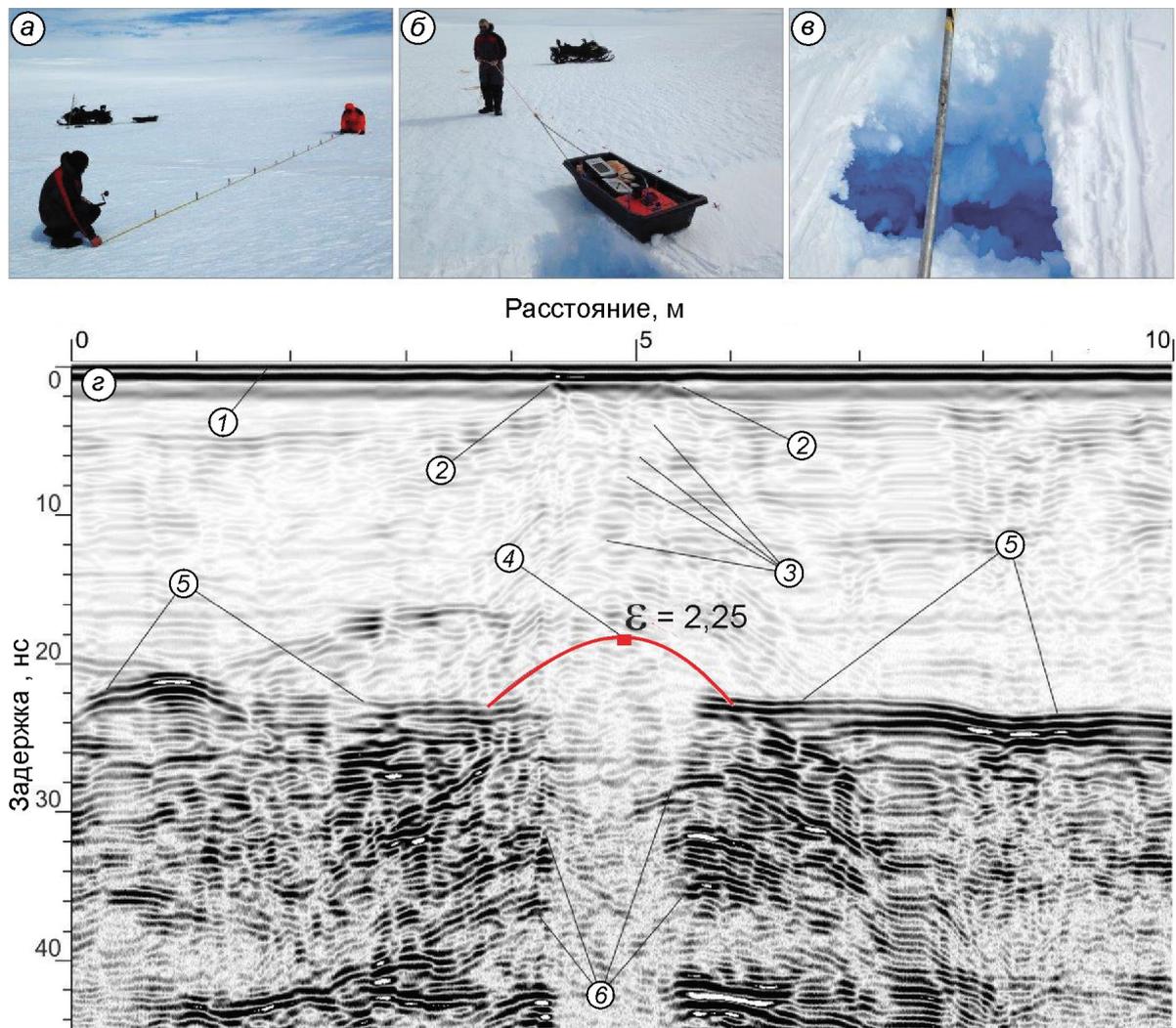


Рис. 2. Выполнение опытно-метеорологических работ на полигоне R2 (а–е) и временной георадарный разрез, полученный на частоте 900 МГц (z):

1 – нулевая отметка; 2 – отражение, соответствующее положению трещины; 3 – мозаичный характер отражений внутри трещины; 4 – отражение, сформированное от куска плотного снега или фирна; 5 – предположительная граница между снежно-фирновой толщей и ледниковым льдом; 6 – дифрагированные волны, сформированные предположительно от участков стенок трещины, расположенной в ледниковом льду. Теоретический годограф дифрагированной волны показан красным цветом. Положение полигона приведено на рис. 1. Фотографии выполнены С.В. Кашиным в январе 2016 г.

Fig. 2. Processing of the tests on R2 area (a–e) and GPR time-section, obtained with 900 MHz (z) GPR

1 – zero mark; 2 – reflection associated with crevasse; 3 – patchy reflections inside the crevasse; 4 – reflection, formed by a piece of dense snow or firn; 5 – suppositional boundary between snow–firn layer and meteoric ice; 6 – diffracted wave generated suppositional from the crevasse walls into meteoric ice. Theoretic hodograph of the diffracted wave is depicted by red. Position of the test area is shown in Fig. 1. Photos have been made by S.V. Kashin in January, 2016

лучше всего совпадает с зарегистрированным при диэлектрической проницаемости 2,25, т.е. скорость распространения электромагнитных волн составляет 20,0 см/нс.

Интенсивное отражение 5 предположительно маркирует границу между снежно-фирновой толщей и ледниковым льдом. На это указывает относительно высокая контрастность отраже-

ний. Временной разрез показывает, что трещина простирается вглубь, за границу записи. Отражения становятся более контрастными, при этом формируются многочисленные дифрагированные волны 6. К сожалению, они не поддаются обчёту. Вероятно, это обусловлено конфигурацией границ, морфометрические параметры которых не позволяют корректно применять

модель слоисто-наклонной среды [16]. Аналогичные работы выполнены 18 января 2016 г. в пункте R3 (см. рис. 1) на трещине шириной около 4,5 м, также сформированной в снежно-фирновой толще.

Кинематическая модель среды

Неоднородности в теле ледника формируют дифрагированные волны. По их годографам можно построить вполне обоснованную кинематическую модель среды, а затем пересчитать временной георадарный разрез в глубинный [4, 11, 12, 16, 17]. Трещины, благодаря своей протяжённости и глубине, в основном представляют собой великолепные рефлекторы, поэтому они формируют многочисленные и достаточно интенсивные дифрагированные волны с центрами, расположенными на различных глубинах [4, 11, 18]. В свою очередь, это позволяет набрать необходимую статистику для улучшения точности кинематической модели. Отметим, однако, что в ряде случаев данное утверждение не совсем верно. В работе [4] показано, что трещины,

сформированные в снежно-фирновой толще, на временном георадарном разрезе маркируются значимым ослаблением сигнала и интенсивных отражений не создают. В рассматриваемом районе эти объекты образованы в ледниковом льду и, согласно наблюдениям авторов статьи, характеризуются достаточно ровными, почти вертикальными стенками. В результате они маркируются интенсивными дифрагированными волнами.

Для формирования кинематической модели среды были проведены расчёты по 175 годографам дифрагированных волн, точки дифракций которых располагались выше границы, отделяющей снежно-фирновую толщу от ледникового льда. Иногда в одном пункте удавалось выполнить несколько измерений на различных глубинах, тогда значения в пределах одного слоя осреднялись. Характерные дифрагированные волны, используемые для расчётов, приведены на рис. 3. Положение пунктов измерений показано на рис. 4. Расчёты для верхнего слоя выполнялись на основе предположения о его однородности и изотропности; для нижележащей области – в рамках модели слоисто-наклонной среды [16]. По результатам расчётов составлена

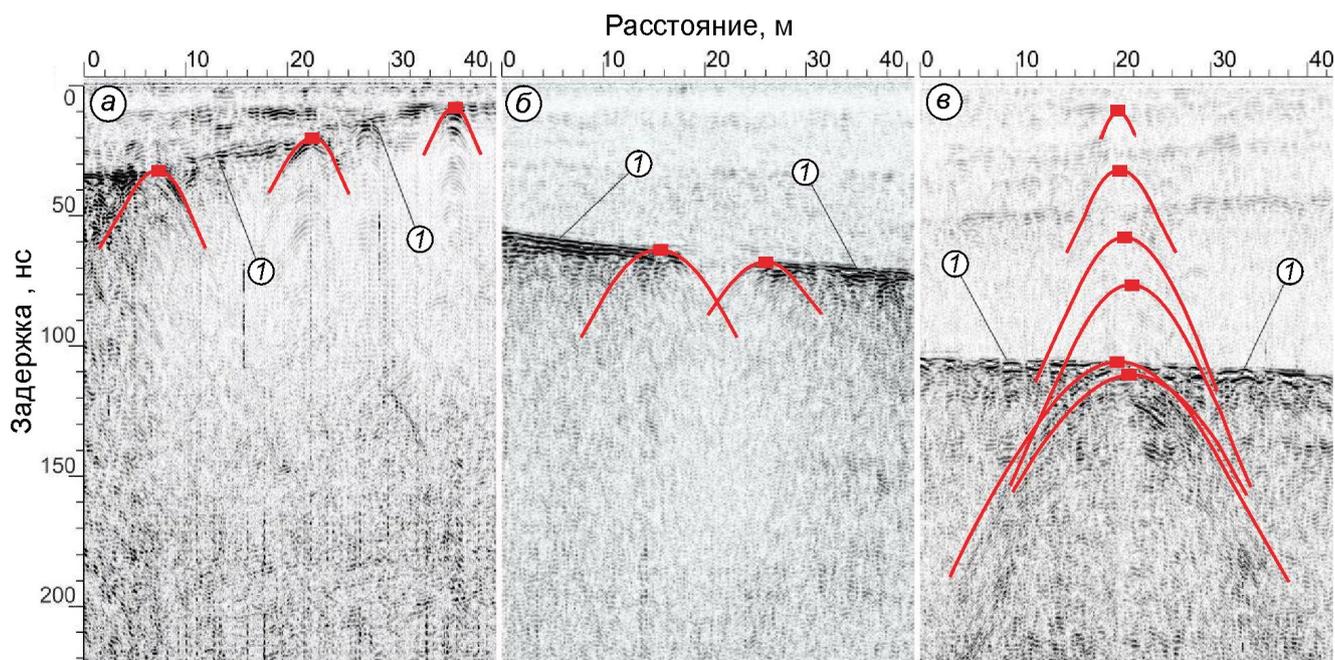


Рис. 3. Фрагменты временных георадарных разрезов (а–в) с дифрагированными волнами, принятыми к расчётам диэлектрической проницаемости.

Теоретические годографы показаны красными линиями, точки дифракции – красными прямоугольниками; см. текст

Fig. 3. Fragments of GPR time-sections (a–в) with diffracted waves used for counts of the permittivity.

Theoretic hodographs are depicted by red lines, points of the diffraction are shown by red rectangles; see text

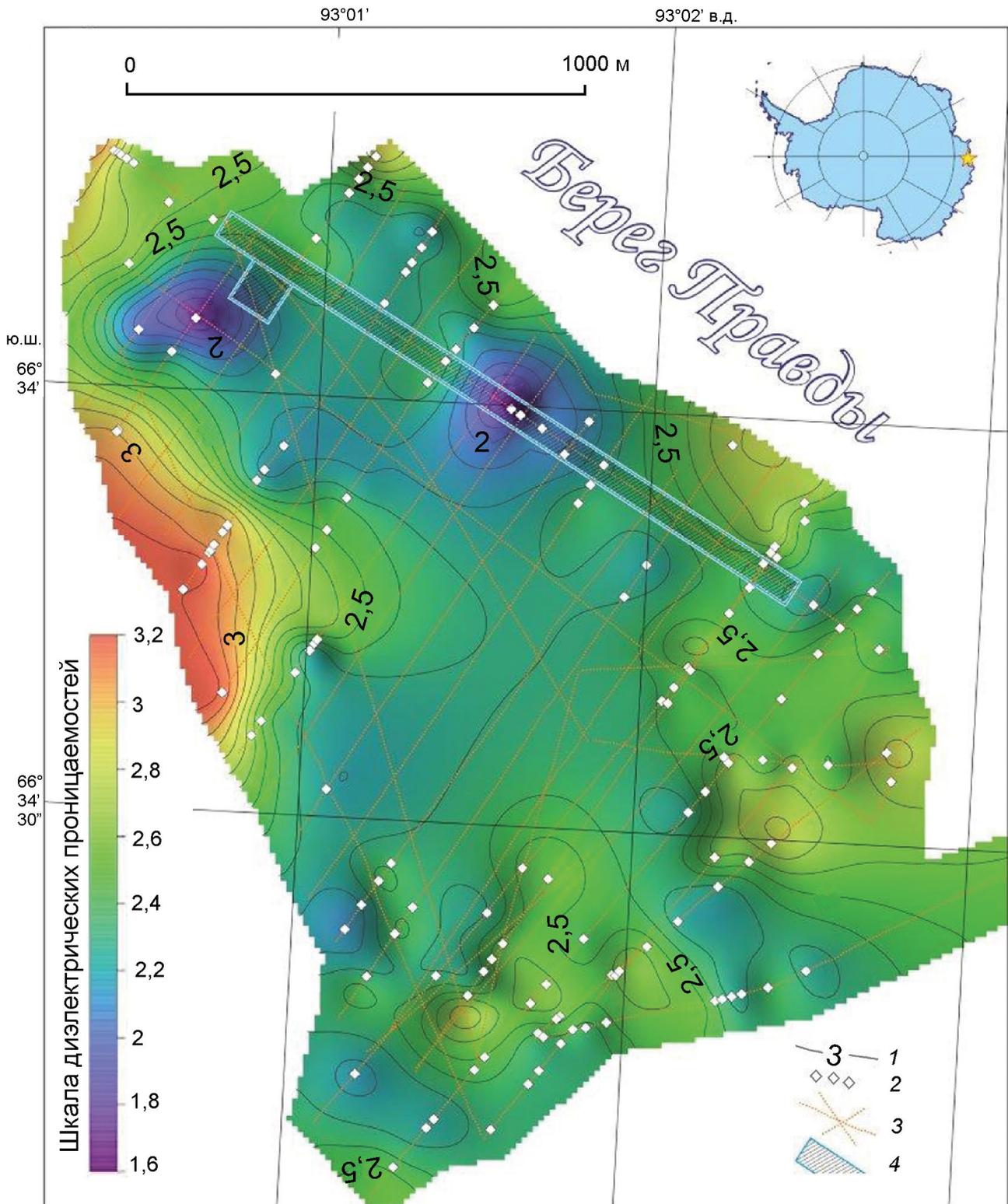


Рис. 4. Схема значений диэлектрической проницаемости снежно-фирновой толщи:
 1 – изолинии и их значения, сечение изолиний – 0,1; 2 – положение точек дифракции годографов, расположенных в снежно-фирновой толще и выбранных для обработки; 3 – георадарные маршруты; 4 – лётное поле

Fig. 4. Chart of the permittivity of the snow-firn layer:
 1 – contours of the permittivity, contour interval is 0,1; 2 – points of the diffraction used for counting and located into the snow-firn layer; 3 – GPR profiles; 4 – airfield

схема диэлектрической проницаемости верхнего слоя, представленная на рис. 4.

В работе [8] показано, что погрешность определения диэлектрической проницаемости верхнего слоя составляет около 30%. Тем не менее, несмотря на столь значительную величину, приведённая схема (см. рис. 4) отражает закономерности строения снежно-фирновой толщи изучаемого района, которые вполне соответствуют общегляциологическим представлениям. Это означает, что на неё вполне можно опираться при описании строения приповерхностной части ледника. Как следует из полученных данных, диэлектрическая проницаемость варьирует от 1,5 до 3,1. Её наименьшие значения соответствуют слою с наименьшей плотностью снега [19]. Он наблюдается в центральной части района работ. По периферии расположены области с повышенными значениями диэлектрической проницаемости и, следовательно, с большими плотностями, близкими ко льду. Тем не менее, из-за высоких погрешностей будем считать верхний слой однородным и изотропным. В качестве эффективного значения диэлектрической проницаемости примем осреднённое значение для приведённой схемы (см. рис. 4) равное 2,43 (скорость распространения электромагнитных волн 19,3 см/нс), которое соответствует слою фирна [12].

Аналогичное значение, полученное сходным образом по результатам работ 60-й РАЭ, составило 2,13 [8]. Отличие связано с различной территорией исследования. Осреднение грида схемы, представленной на рис. 4 в границах съёмки 60-й РАЭ, даёт величину 2,31. Отметим, что пункты измерений не совпадают друг с другом ввиду различной сети маршрутов. Отличается и число измерений: по материалам исследований 60-й РАЭ обработано 56 годографов, а 61-й РАЭ – 70. Таким образом, приведённая схема более точная, чем дана в работе [8]. Кроме того, визуальное сравнение схем диэлектрической проницаемости показывает, что в основном гриды коррелируют друг с другом. Причём относится это не только к области формальной интерполяции данных, но, что особенно важно, и к районам концентрации пунктов измерений.

На временных георадарных разрезах имеется множество интенсивных дифрагированных

волн, точки дифракции которых расположены ниже снежно-фирнового слоя (см. рис. 3). В работе [8] приводятся результаты обчёта 77 таких годографов с помощью модели слоисто-наклонной среды [16]. По результатам статистической обработки, её средняя диэлектрическая проницаемость равна 3,0 (скорость распространения электромагнитных волн 17,3 см/нс), что весьма близко к классическому значению для льда [12]. Таким образом, отражения I (см. рис. 3) действительно маркируют границу раздела снежно-фирновой толщи и атмосферного льда.

Строение ледника в пределах лётного поля

Наибольший интерес для исследований представлял тот участок ледника, где предполагалось разместить лётное поле для приёма самолёта. В его пределах выполнено 19 маршрутов (см. рис. 1 и 5). Учитывая относительно небольшие размеры лётного поля (взлётно-посадочная полоса – 1500 × 60 м и перрон – 100 × 100 м), полученных данных достаточно, чтобы охарактеризовать строение приповерхностной части этой территории в интересующем прикладном аспекте. Наибольший интерес вызывает фрагмент маршрута (61)RW в пределах лётного поля. Его положение показано на рис. 5. На рис. 6 приведены временные георадарные разрезы по указанному участку маршрута, полученные в процессе лоцирования на частотах 900 МГц (см. рис. 6, а) и 270 МГц (см. рис. 6, б).

На временных георадарных разрезах прямая волна (т.е. волна, распространяющаяся от передающей антенны к приёмной и маркирующей – в нашем случае положение дневной поверхности) отсутствует. Это вызвано тем, что для получаемых данных характерны высокоинтенсивные коррелированные помехи, особенно при лоцировании на частоте 270 МГц. С целью их подавления выполнена фильтрация скользящим окном размером 200 трасс, позволившая повысить контрастность выявления целевых границ. Однако прямая волна при этом была практически полностью подавлена. Поскольку на исходных временных разрезах она присутствовала, для последующей обработки в качестве маркера начала регистрации отражённого сигнала она не была потеряна.

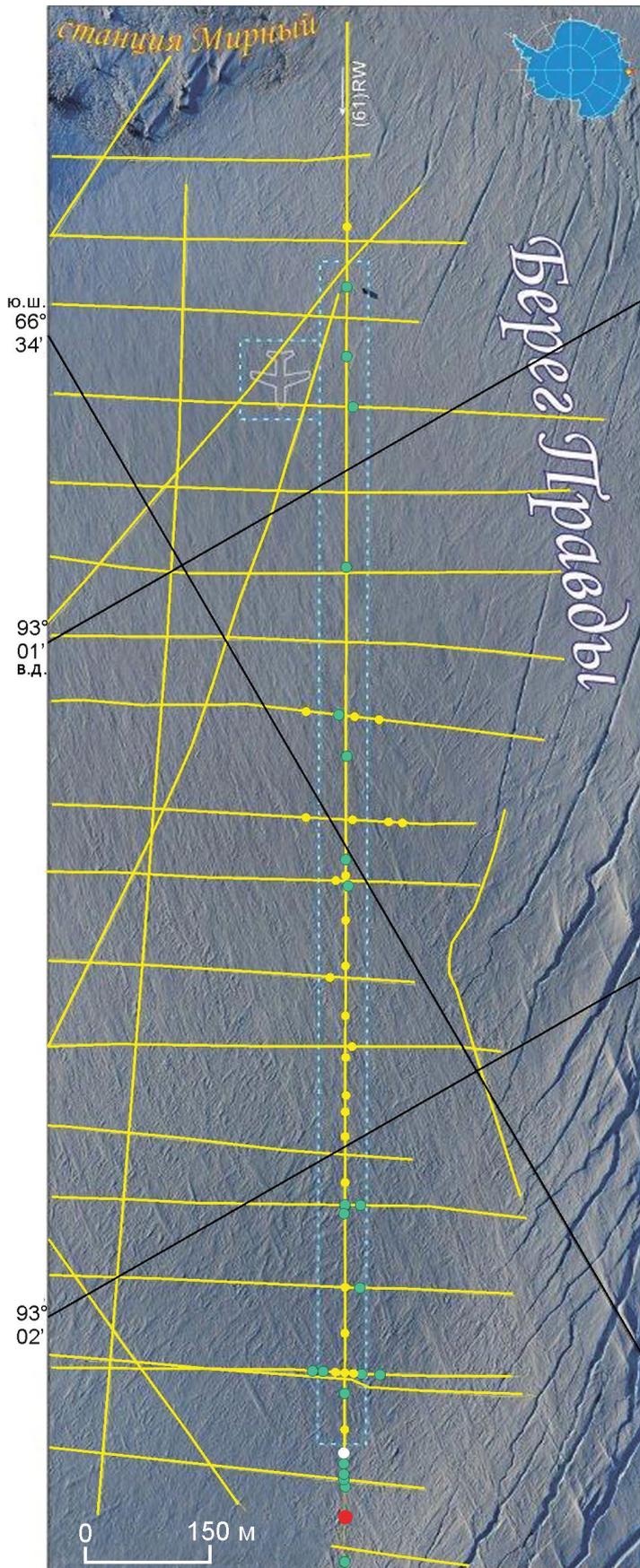


Рис. 5. Положение трещин на территории лётного поля станции Мирный.

Георадарные маршруты показаны жёлтыми линиями; сине-белый пунктир – границы лётного поля; точки – фрагменты трещин шириной до 30 см: компрессионные, открытые и забитые снегом (зелёного); ширина трещин от 30 до 150 см с толщиной мостов: до 1 м (красного), более 1 м (жёлтого); шириной более 150 см с толщиной мостов менее своей ширины (белого цвета). Фотоплан актуален на 11 января 2015 г.

Fig. 5. Crevasses in the airfield of Mirny Station vicinity:

GPR profiles are depicted by yellow lines; blue-white dotted lines show the boundary of the airfield; points are shown fragments of crevasses width up to 30 cm: closed, open, and partly filled with snow (green); width from 30 cm to 150 cm: with bridges up to 1 m thick (red), with bridges thicker than 1 m (yellow); width more than 150 cm with the thickness of the bridge less than its wide (white). Photomap relevant on January 11, 2015

Как следует из георадарных данных, в рассматриваемом районе ледника граница между снежно-фирновой толщей и ледниковым льдом *1* (см. рис. 6) залегает достаточно глубоко. Она прослеживается лишь на временных разрезах, полученных при лоцировании на частоте 270 МГц, которая обеспечивает значительную глубину. При зондировании на частоте 900 МГц эта граница наблюдается лишь фрагментарно. К сожалению, большая глубина её залегания не позволяет на данном этапе исследований подтвердить правильность интерпретации временных георадарных разрезов. Отражения *2* (см. рис. 6) связаны со слоистым строением снежно-фирновой толщи, визуально наблюдаемой и инструментально измеряемой по изменению плотности в многочисленных кернах, отобранных здесь в сезон 60-й РАЭ [8], включая скважину № 1, расположенную в начале лётного поля. Отражения *3* обусловлены слоистостью ледникового льда. Интерпретация полученных данных, выполненная в рамках настоящей работы, позволяет выявить и локализовать положение внутриледниковых трещин в пределах лётного поля и в непосредственной близости от него. Они показаны на схеме (см. рис. 5) и на временных георадарных разрезах (см. рис. 6).

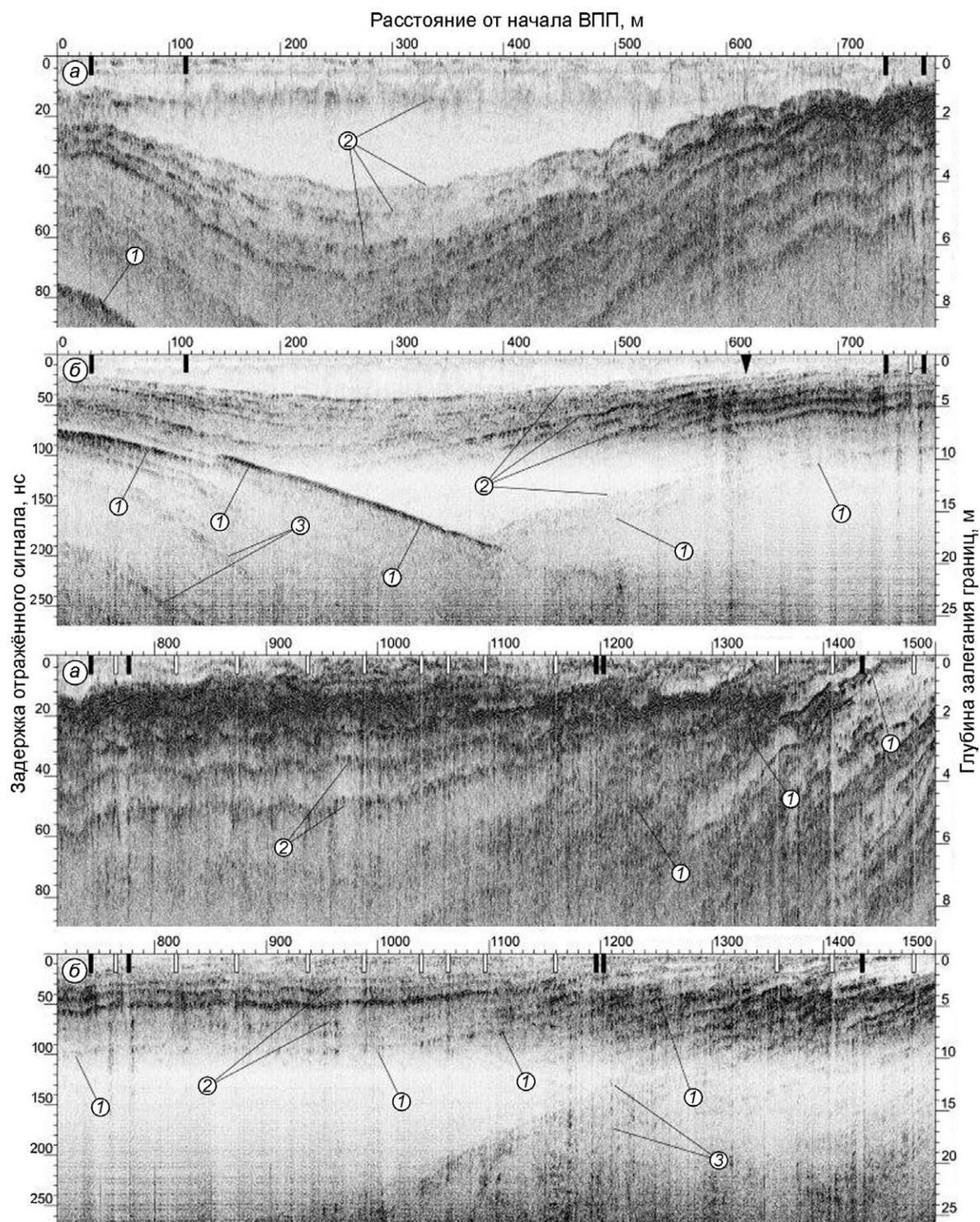


Рис. 6. Временной георадарный разрез по маршруту, расположенному вдоль взлётно-посадочной полосы, при лоцировании на частотах 900 (а) и 270 МГц (б):

1 – граница между снежно-фирновой толщей и ледниковым льдом; 2 – отражения от слоёв, сформированных в снежно-фирновой толще; 3 – отражения от слоёв ледникового льда; типы трещин: открытая шириной до 30 см (чёрный треугольник); заполненная снегом шириной до 30 см (чёрный прямоугольник); шириной от 30 до 150 см с мостом толщиной более 1 м (белый прямоугольник)

Fig. 6. GPR time-section along snow-runway with the frequency sounding of 900 MHz (a) and 270 MHz (b):

1 – boundary between snow-firn layer and meteoric ice; 2 – internal reflections into the snow-firn layer; 3 – internal reflections into meteoric ice; types of crevasses: open with width up to 30 cm (black triangle); partly filled with snow with width less than 30 cm (black rectangle); width from 30 cm to 150 cm with a bridge thicker than 1 m (white rectangle)



Рис. 7. Приземление самолёта BT-67 Lidia на взлётно-посадочной полосе станции Мирный. Фотография С.В. Попова, февраль 2016 г.

Fig. 7. Landing of BT-67 Lidia on the snow-runway of Mirny Station. Photo by S.V. Popov, February, 2016

Вернёмся к временному георадарному разрезу, полученному в ходе лоцирования вдоль длинной оси взлётно-посадочной полосы (см. рис. 6). Как следует из представленных материалов, в пределах первых 700 м маршрута наблюдаются лишь отдельные трещины шириной до 30 см, перекрытые достаточно мощными снежными мостами, которые визуальнo могут не проследиваться на поверхности ледника. Далее отметки 700 м и до конца взлётно-посадочной полосы в теле ледника появляется значительное число трещин, что указывает на смену динамического режима этой части ледника, которая, к сожалению, пока нами не изучена. На данной территории развиты преимущественно трещины шириной до 150 см, перекрытые мостами сильно фирнизированного снега мощностью более 1 м. Все они, как показывает опыт, опасности не представляют, поскольку могут быть легко заделаны.

Заключение

Главный результат работ летнего полевого сезона 61-й РАЭ – создание на станции Мирный посадочной площадки под самолёты на лыжном шасси. Это позволило 10 февраля 2016 г. принять на неё среднемагистральный самолёт DC-3T (BT-67) «Турбобаслер» Компании «ALCI» (г. Кейптаун, ЮАР), пилотируемый канадским экипажем авиакомпании «Kenn Borek

Air Ltd» (рис. 7). Таким образом, авиационное сообщение со станцией Мирный, прерванное два десятилетия назад, было восстановлено. Это позволит в полевой сезон 62-й РАЭ (2016/17 г.) начать комплексные аэрогеофизические работы с данного аэродрома и продолжить исследования выявленных в ходе санно-гусеничных походов таких интересных объектов, как горы Голицына и подледниковое озеро Пионерское.

Выполненные исследования, результаты которых изложены в настоящей работе, – только завершение первого этапа. За ним должен последовать другой, не менее важный этап, когда необходимо будет решить важнейшие технические вопросы, связанные с подготовкой лётного поля. Кроме того, следует провести работы, связанные с изучением динамики ледника в районе посадочной площадки. Результатом этого этапа станет создание схемы, отражающей вероятность возникновения трещин. Необходимо также выполнить физическое моделирование для разработки обоснованной классификации трещин по их потенциальной опасности.

Благодарности. Авторы признательны экипажу борта RA-31021 вертолёта КА-32 под командованием В.В. Щербинина (ЗАО «Авиалифт Владивосток») за качественное выполнение маршрутов аэрофотосъёмки 60-й РАЭ; привлечённым сотрудникам РАЭ: С.В. Вольфу, Е.Г. Грузинову, С.В. Кашину, А.И. Куцурубe, Е.В. Медведеву,

Ю.И. Нездерову, А.Л. Новикову, Д.П. Овечкину и С.С. Пряжину за помощь в выполнении работ; начальнику станции Мирный В.М. Виноградову за помощь в организации полевых работ.

Acknowledgments. The authors are grateful to the crew of the helicopter KA-32 (tail number RA-31021) under the command of V.V. Shcherbinin

(JSC «Vladivostok Avialift») for the qualitative performance of aerial routes of the 60th RAE; to the RAE participants: S.V. Volf, E.G. Gruzinov, S.V. Kashin, A.I. Kutsuruba, E.V. Medvedev, Yu.I. Nezderov, A.L. Novikov, D.P. Ovechkin and S.S. Pryakhina for their assistance in our work; and to V.M. Vinogradov, the chief of Mirny Station, for his help in the organization of field work.

Литература

1. Поляков С.П., Мартыанов В.Л., Лукин В.В. Снежно-ледовые взлетно-посадочные полосы Российской антарктической экспедиции – особенности подготовки и перспективы развития // Российские полярные исследования. 2015. № 2 (20). С. 31–35.
2. Саватюгин Л.М. Российские исследования в Антарктике. Т. III. 31 САЭ – 40 РАЭ. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 344 с.
3. Rignot E., Thomas R.H. Mass balance of polar ice sheets // Science. 2002. № 297 (5586). P. 1502–1506.
4. 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.
5. Daniels D. Ground Penetrating Radar. 2nd edition. IEE Radar, Sonar and Navigation series 15. New York: The Institution of Electrical Engineering, 2004. 761 p.
6. 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 // Intern. Archive Photogrammetry. Remote Sensing Spat. Inf. Sci. Beijing. 2008. V. XXXVII. № B8. P. 837–841.
7. Jol H.M. Ground penetrating radar: Theory and applications. Elsevier, 2009. 543 p.
8. Попов С.В., Поляков С.П., Пряжин С.С., Мартыанов В.Л., Лукин В.В. Строение верхней части ледника в районе планируемой взлётно-посадочной полосы станции Мирный, Восточная Антарктида, по материалам работ 2014/15 г. // Криосфера Земли. 2016 Принята к печати.
9. Пряжин С.С., Попов С.В., Сандалюк Н.В., Мартыанов В.Л., Поляков С.П. Аэрофотосъёмка районов российских антарктических станций Мирный и Прогресс в сезон 2014/15 г. // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 4. С. 107–113.
10. Богородский В.В., Бентли Ч.Р., Гудмандсен П. Радиогляциология. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 308 с.

References

1. Polyakov S.P., Mart'yanov V.L., Lukin V.V. Snow-ice runways of the Russian Antarctic Expedition – features of preparation and development prospects. Rossiyskie polyarnye issledovaniya. 2015, 2 (20): 31–35. [In Russian].
2. Savatyugin L.M. Rossiyskie issledovaniya v Antarktike. Tom III. 31 SAE – 40 RAE. Russian investigations in Antarctic. V. III. 31 SAE – 40 RAE. St.-Petersburg: Hydrometeoizdat, 2001: 344 p. [In Russian].
3. Rignot E., Thomas R.H. Mass balance of polar ice sheets. Science. 2002, 297 (5586): 1502–1506.
4. 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 2014/15. *Kriosfera Zemli*. Earth Cryosphere. 2016, XX (1): 90–98. [In Russian].
5. Daniels D. Ground Penetrating Radar, 2nd edition, IEE Radar, Sonar and Navigation series 15. New York, the Institution of Electrical Engineering 2004: 761 p.
6. 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. Intern. Archive Photogrammetry. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. Beijing, 2008, XXXVII (B8): 837–841.
7. Jol H.M. Ground penetrating radar: Theory and applications. Elsevier, 2009: 543 p.
8. Popov S.V., Polyakov S.P., Pryakhin S.S., Mart'yanov V.L., Lukin V.V. Structure of the upper part of glacier in the region of the planned runway near the Mirny Station, East Antarctica, according to materials of 2014/15. *Kriosfera Zemli*. Earth Cryosphere. 2016. In press. [In Russian].
9. Pryakhin S.S., Popov S.V., Sandalyuk N.V., Mart'yanov V.L., Polyakov S.P. Aerofotos'emka rayonov rossiyskikh antarkticheskikh stantsiy Mirnyy i Progress v sezon 2014/15 g. Aerial photography of Russian Antarctic stations Mirny and Progress in summer of 2014/15. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55 (4): 107–113. doi:10.15356/2076-6734-2015-4-107-113. [In Russian].
10. Bogorodskiy V.V., Bently Ch.R., Gudmandsen P. Radioglyatsiologiya. Radioglaciology. Leningrad: Hidrometeoizdat, 1983: 308 p. [In Russian].

11. Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я. Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М.: ГЕОС, 2014. 527 с.
12. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
13. Galley R.J., Trachtenberg M., Langlois A., Barber D.G., Shafai L. Observations of geophysical and dielectric properties and ground penetrating radar signatures for discrimination of snow, sea ice and freshwater ice thickness // *Cold Regions Science and Technology*. 2009. V. 57. № 1. P. 29–38.
14. Plewes L.A., Hubbard B. A review of the use of radioecho sounding in glaciology // *Prog. Phys. Geogr.* 2001. V. 25. № 2. P. 203–236.
15. Инструкция по проектированию, строительству и оценке эксплуатационной пригодности снежных и снежноледовых аэродромов Антарктиды ВСН37-76. Л.: изд. Министерства гражданской авиации СССР, 1976. 67 с.
16. Попов С.В. Определение диэлектрической проницаемости среды по годографам дифрагированных волн в рамках модели слоисто-наклонной среды // *Криосфера Земли*, 2016. Принята к печати.
17. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ, 2004. 153 с.
18. Попов С.В., Эберляйн Л.О Опыт применения георадара для изучения строения снежно-фирновой толщи и грунта Восточной Антарктиды // *Лёд и Снег*. 2014. № 4 (128). С. 95–106. doi:10.15356/2076-6734-2014-4-95-106.
19. Robin G. de Q. Ice Movement and Temperature Distribution in Glaciers and Ice Sheets // *Journ. of Glaciology*. 1955. V. 2. № 18. P. 523–532.
11. Glazovsky A.F., Macheret Yu.Ya. *Voda v lednikah. Metody i rezul'taty geofizicheskikh i distantsionnykh issledovaniy*. Water in glaciers. Methods and results of geophysical and remote sensing studies. Moscow: GEOS, 2014, 527 p. [In Russian].
12. Macheret Yu.Ya. *Radiozondirovanie lednikov*. Radioecho sounding of glaciers. Moscow: Scientific World, 2006: 392 p. [In Russian].
13. Galley R.J., Trachtenberg M., Langlois A., Barber D.G., Shafai L. Observations of geophysical and dielectric properties and ground penetrating radar signatures for discrimination of snow, sea ice and freshwater ice thickness. *Cold Region Science Technology*. 2009, 57 (1): 29–38.
14. Plewes L.A., Hubbard B. A review of the use of radioecho sounding in glaciology. *Prog. Phys. Geogr.* 2001, 25 (2): 203–236.
15. *Instruktsiya po proektirovaniyu, stroitel'stvu i otsenke ekspluatatsionnoy prigodnosti snezhnykh i snezhnoledovykh aerodromov Antarktity VSN37-76*. Manual for design, construction and serviceability assessment of snow and snow-ice Antarctic airfields. Leningrad: Ministry of Civil Aviation of the USSR, 1976: 67 p. [In Russian].
16. Попов С.В. Determination of dielectric permeability of the medium according to hodographs of diaphragm waves in the frame of model of foliated and inclined medium. *Kriosfera Zemli*. Earth Cryosphere. 2016. In press. [In Russian].
17. Vladov M.L., Starovoytov A.V. *Vvedenie v georadiolokatsiyu*. Introduction to GPR. Moscow State University, 2004: 153 p. [In Russian].
18. 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. doi:10.15356/2076-6734-2014-4-95-106. [In Russian].
19. Robin G. de Q. Ice Movement and Temperature Distribution in Glaciers and Ice Sheets. *Journ. of Glaciology*. 1955, 2 (18): 523–532.