

ГЕОРАДАРНОЕ ЛОЦИРОВАНИЕ ТРЕЩИН В РАЙОНЕ РОССИЙСКИХ АНТАРКТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ПРОГРЕСС И МИРНЫЙ (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА) В СЕЗОН 2014/15 ГОДА

С.В. Попов¹, С.П. Поляков²

¹Полярная морская геологоразведочная экспедиция (ПМГРЭ),
198412, Санкт-Петербург, г. Ломоносов, ул. Победы, 24, Россия; spopov67@yandex.ru

²Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт
119397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Россия

Представлены результаты опытно-методических георадарных исследований, выполненных в районе отечественных станций Прогресс и Мирный в ходе летнего полевого сезона 60-й Российской антарктической экспедиции 2014/15 г. Работы были направлены на выявление и локализацию трещин в приповерхностной части ледника посредством лоцирования на частотах 270, 400 и 900 МГц. Установлено, что перспективным для решения прикладных задач является лоцирование на частотах от 400 до 900 МГц. Работы показали, что конфигурация трещин в снежно-фирновой толще может быть такой, что характерные для подобных объектов дифрагированные волны будут выражены крайне слабо. Кроме того, дифрагированные волны, формирующиеся стенками трещины, могут стать достаточно надежной основой для создания скоростной модели среды, особенно при отсутствии данных кернового бурения или наклонных зондирований.

Восточная Антарктида, станция Прогресс, станция Мирный, георадарное профилирование, ледниковые трещины

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

S.V. Popov¹, S.P. Polyakov²

¹Polar Marine Geosurvey Expedition (PMGE),
198412, St. Petersburg, Lomonosov, Pobeda str., 24, Russia; spopov67@yandex.ru

²Arctic and Antarctic Research Institute
119397, St. Petersburg, Bering str., 38, Russia

The results of the experimental ground-penetrating radar investigations in the area of Russian Progress and Mirny winter stations have been discussed. The tests were carried out during the austral summer field season of 2014/15. The scientific works were aimed at identifying and localization of the crevasses in the near-surface glacier. The soundings were carried out at frequencies of 270 MHz, 400 MHz and 900 MHz. It has been founded that the most promising is sounding at the frequencies from 400 MHz to 900 MHz. The works have also demonstrated that the cracks located inside the snow-firn can form very weak diffracted waves. In addition, the diffracted waves formed by the crevasses could be the reliable basis for the creation of the velocity model to recount travel time into the depth. It becomes especially important when the ice core data are unavailable or the multi-offset sounding is possible.

East Antarctica, Progress Station, Mirny Station, ground-penetrating radar profiling, ice crevasses

ВВЕДЕНИЕ

Выявление и локализация трещин в приповерхностной части ледника играют важную роль в обеспечении безопасности антарктических станций, баз и полевых лагерей, а также в формировании целостного представления о криосфере нашей планеты [Мельников, 2014]. Первый санно-гусеничный поход (СГП) состоялся в рамках реализации научных и логистических программ 53-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) в сезон 2007/08 г. После перемещения базы СГП со станции Мирный на станцию Прогресс, последняя

превратилась в единственный пункт обеспечения жизнедеятельности внутриконтинентальной станции Восток. Однако трасса следования СГП проходит через зону трещин, что делает ее небезопасной для людей и транспортной техники. В связи с этим поиск пути ее пересечения с минимальным риском, а также обнаружение и локализация трещин в этом районе являются приоритетными задачами РАЭ. Кроме того, аэродромы прибрежных антарктических станций располагаются на ледниках, и для гарантии безопасности авиационных

операций в Антарктиде необходимо своевременное выявление даже небольших объектов. Таким образом, изучение ледниковых трещин как таковых, их выявление и локализация имеют важное прикладное значение.

В ходе летнего полевого сезона 60-й РАЭ (2014/15 г.) был выполнен комплекс геофизических исследований в районе прибрежных отечественных антарктических станций Прогресс и Мирный. В них использовались георадары GSSI SIR-3000 с антеннами, обеспечивающими частоту зондирующих импульсов 270, 400 и 900 МГц, фирмы GSSI (Geophysical Survey Systems Inc., USA). Характеристики георадаров представлены в работе [GSSI Antennas Manual, 2014]. Исследования были направлены на выявление и изучение трещин значимого размера. Были проведены опытно-методические работы с целью выяснения возможностей имеющейся аппаратуры применительно к решению поставленной задачи и отладке методики. В настоящей статье изложены результаты этих исследований.

ИССЛЕДОВАНИЯ НА МОДЕЛЬНОМ ОБЪЕКТЕ

Комплекс исследований приповерхностных трещин был начат 27 декабря 2014 г. с вопросов формирования временного георадарного разреза при лоцировании модельного объекта. С этой целью в плотном снегу в районе взлетно-посадочной полосы станции Прогресс выкопана канава глубиной 60 см и шириной 42 см, которая была перекрыта мостом из спрессованного снега толщиной около 10 см. Маршруты протяженностью 375 см располагались ортогонально канаве и пересекали

ее по снежному мосту (рис. 1). В работах использовался георадар с частотой зондирующих импульсов 900 МГц.

На начальном этапе работ на дно трещины была положена металлическая пластина, после чего выполнен георадарный маршрут. Пластина формировала интенсивный отраженный сигнал и позволяла однозначно локализовать дно “трещины”. Временной георадарный разрез приведен на рис. 2, а. Интенсивному отражению 1 соответствует положение антенны на снежной поверхности. Отражение 2 связано с мостом через “трещину”, который сформирован из утрамбованного снега. Интенсивное субгоризонтальное отражение 3 вызвано металлической пластиной. От краев пластины формируются дифрагированные волны 4, имеющие вид гиперболических отражений с развитой одной ветвью и подавленной другой. Края пластины маркируются вершинами дифрагированных волн. Ниже 3 располагается серия интенсивных отражений 5, являющихся результатом реверберации от металлической пластины.

По годографу двух дифрагированных волн в рамках модели однородной среды рассчитаны скорости распространения волн в снежном покрове. Оба значения равны 17.62 см/нс, что соответствует диэлектрической проницаемости 2.9. В целом полученные значения вполне правдоподобны и соответствуют величинам для фирна или плотного снега при температуре, близкой к фазовому переходу [Мачерет, 2006]. Теоретические годографы дифрагированных волн показаны на рис. 2, а штриховыми линиями. Они построены в рамках модели однослойной среды [Попов, 2002; Владов, 2004; Мачерет, 2006].

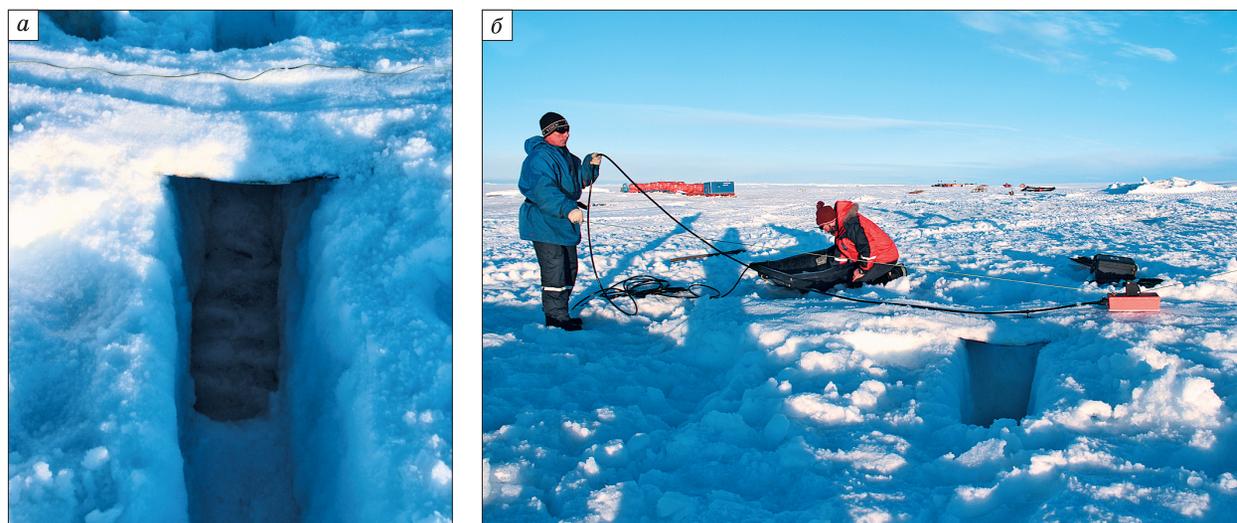


Рис. 1. Модельная трещина (а) и ход выполнения опытно-методических работ (б) в районе взлетно-посадочной полосы станции Прогресс.

Фото С.С. Пряхина (декабрь 2014 г.).

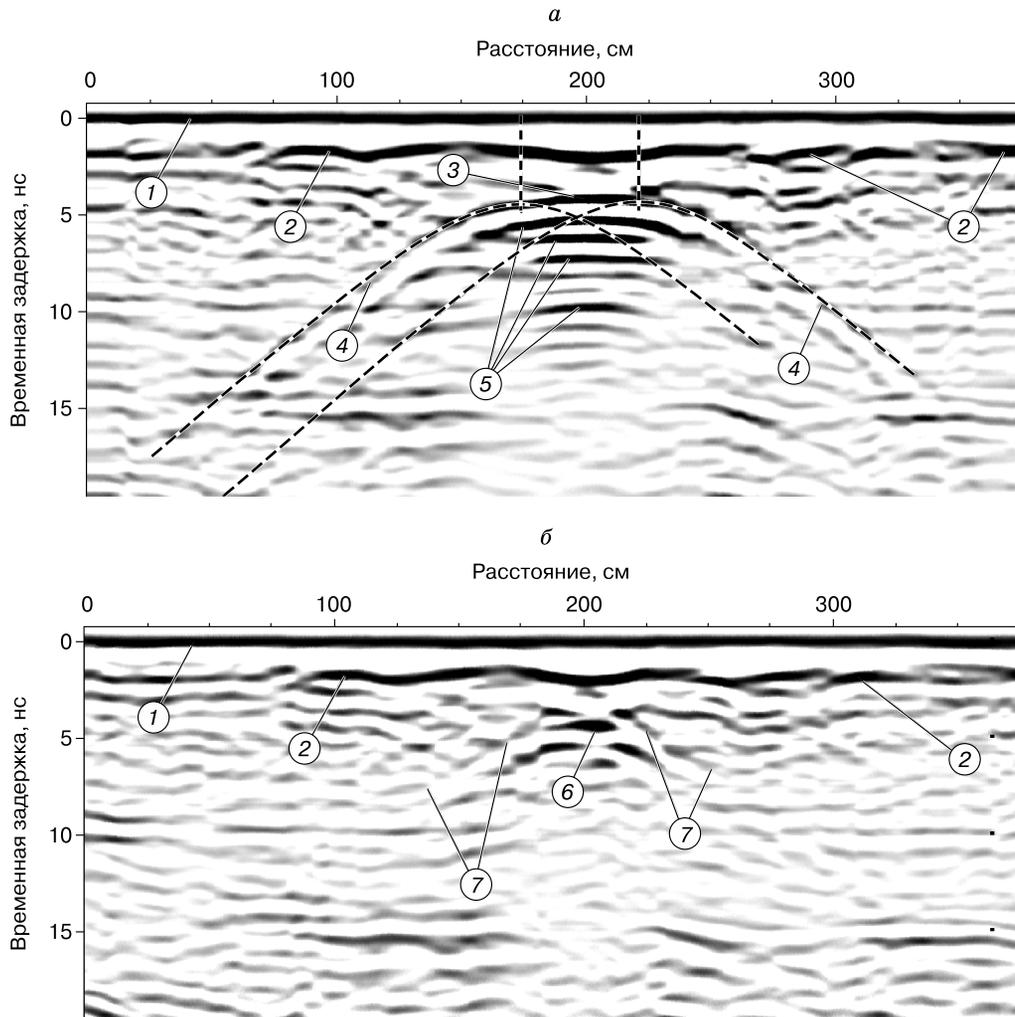


Рис. 2. Временной георадарный разрез над модельной трещиной с металлической пластиной на дне (а) и без нее (б) в районе взлетно-посадочной полосы станции Прогресс.

1 – нулевая отметка; 2 – отражение от нижней границы спрессованного снега (снежного моста); 3 – отражение от поверхности металлической пластины; 4 – дифрагированные волны, сформированные от металлической пластины; 5 – отражения, связанные с реверберацией от металлической пластины; 6 – отражение от придонной части трещины; 7 – дифрагированные волны, сформированные от элементов трещины. Теоретические годографы дифрагированных волн показаны штриховыми линиями.

В заключение этого этапа исследований георадарное профилирование выполнялось без использования металлической пластины. Временной разрез представлен на рис. 2, б. На нем присутствуют отражения 1 и 2, которые сформированы от поверхности снежной толщ (прямая волна) и моста через “трещину” соответственно. Далее наблюдается интенсивное отражение 6, характеризующееся теми же задержками, что и отражение 3 от пластины (см. рис. 2, а). Неожиданно высокую интенсивность 6 можно объяснить подтаиванием придонной части “трещины” и формированием корки льда. Она имеет бóльшую диэлектрическую про-

ницаемость, чем снег, и, следовательно, формирует более контрастное отражение. Справа и слева от 6 наблюдаются дифрагированные волны 7, сформированные от элементов “трещины”.

Таким образом, можно сделать вывод о практической возможности использования годографов дифрагированных волн, сформированных от элементов трещин, для создания скоростной модели среды. Это обстоятельство важно для интерпретации данных при отсутствии априорных представлений (в частности, отсутствии материалов ядерного бурения) и невозможности выполнения наклонных зондирований.

**ЛОЦИРОВАНИЕ ТРЕЩИН
НА РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТОТАХ**

На вооружении РАЭ имеются георадары, обеспечивающие лоцирование на трех частотах: 270, 400 и 900 МГц. Каждая из них позволяет по-разному изучать разрез ледника, т. е. они дополняют друг друга. Георадары с частотой зондирующих импульсов 270 МГц обладают наибольшей глубиной. Они позволяют получать уверенные отражения не только от слоев, залегающих в леднике на глубинах до 70 м, но и успешно лоцировать влажную снежно-фирновую толщу (удельное поглощение электромагнитных волн в которой существенно выше [Мачерет, 2006]). Вместе с тем эти георадары обладают недостаточным разрешением для детализации и локализации малых объектов. Зондирование на частоте 400 МГц является некоторым компромиссом. С одной стороны, она обеспечивает глубину в несколько десятков метров, а с другой – позволяет достаточно уверенно проработать структуры размером около 1 м. Георадары с частотой зондирующих импульсов 900 МГц обладают наименьшей глубиной (около 10 м). Однако они обеспечивают наибольшее разрешение по разрезу и способны локализовать структуры размером менее 20 см.

В качестве объекта исследований была использована одна из многочисленных трещин, расположенных недалеко от сопки Радио у станции Мирный (рис. 3, а). Ширина ее составляет 85 см при длине несколько сотен метров в обе стороны. Стенки трещины вертикальные. Измеренная толщина снежного моста в районе проведения исследований составила 35 см. Глубина трещины составила 430 см, причем в 220 см от снежной поверхности располагался слой талой воды толщиной 210 см. Указанные параметры делали объект идеальным для проведения различного рода тестов.

На временных георадарных разрезах наблюдается интенсивное отражение 1, сформированное зондирующим импульсом (см. рис. 3, б–г). Положение трещины определяется по 2. Отражения 3, 4 сформированы от поверхности талой воды, которая располагается примерно на одинаковой глубине от снежной поверхности. Однако 3 и 4 характеризуются разными временными задержками – 15.42 и 21.84 нс соответственно. Это можно объяснить следующим образом. Отражение 4 сформировано электромагнитной волной, которая, распространяясь в снежно-ледовой толще, отразилась от поверхности воды и вернулась назад. Если предположить, что глубина водного слоя почти постоянна, то указанная задержка соответствует эффективной диэлектрической проницаемости $\bar{\epsilon}_1 = 2.2$ (при этом средняя скорость распространения электромагнитных волн в среде $\bar{v}_1 = 20.2$ см/нс). Задержке 3 соответствует

$\bar{\epsilon}_2 = 1.11$ ($\bar{v}_2 = 28.5$ см/нс). Такая малая величина связана с тем, что большую часть пути волна распространялась в пределах открытой трещины. Действительно, общее время распространения волны в N -слойной среде τ_Σ складывается из времени ее распространения в каждом i -м слое τ_i . Последняя, в свою очередь, зависит от мощности слоя T_i и его диэлектрической проницаемости ϵ_i :

$$\tau_\Sigma = \frac{2}{c} \sum_{i=1}^N T_i \sqrt{\epsilon_i}, \quad (1)$$

где c – скорость распространения электромагнитных волн в вакууме.

Для рассматриваемого случая мощности первого и второго слоев равны 35 и 185 см при диэлектрических проницаемостях 2.2 и 1.0 соответственно. С учетом (1), получаем теоретическую величину задержки отражения 3, равную 15.79 нс, что отличается от измеренного значения всего на 2 %, т. е. находится в пределах погрешности измерений.

Из анализа рис. 3, б–г следует, что контрастность 3 уменьшается с уменьшением частоты, при этом контрастность 4 остается практически неизменной. Данное обстоятельство связано с тем, что основная часть сферической волны, отраженной от плоской поверхности, формируется в так называемой первой зоне Френеля, которая представляет собой круг радиуса r_f :

$$r_f = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda T}, \quad (2)$$

где λ – длина волны в среде; T – расстояние от источника до рефлектора [Боганик, 2006]. Согласно (2), для лоцирования с частотами 270, 400 и 900 МГц r_f составляет 78, 64 и 43 см соответственно. Таким образом, при относительно низкочастотном лоцировании область формирования отраженного сигнала превышала размеры поверхности воды в пределах трещины, а ее вертикальные стенки ограничивали поток энергии.

Дифрагированные волны 5 сформированы от вертикальных углов трещины; привершинная часть 5 маркирует ее границы.

На всех временных разрезах ниже 3 наблюдается ослабление отраженного сигнала 6, что связано с наличием достаточно мощного слоя талой воды, удельное поглощение в котором, в зависимости от температуры, превышает аналогичный параметр для снега и льда примерно на два порядка [Финкельштейн, 1977; Мачерет, 2006]. Отсутствие ослабления за пределами трещины свидетельствует о том, что мощность водоносного горизонта 4 значительно меньше глубины воды в трещине и составляет, вероятно, не более первого десятка сантиметров.

Анализ представленных временных георадарных разрезов (см. рис. 3, б–г) подтверждает, что с

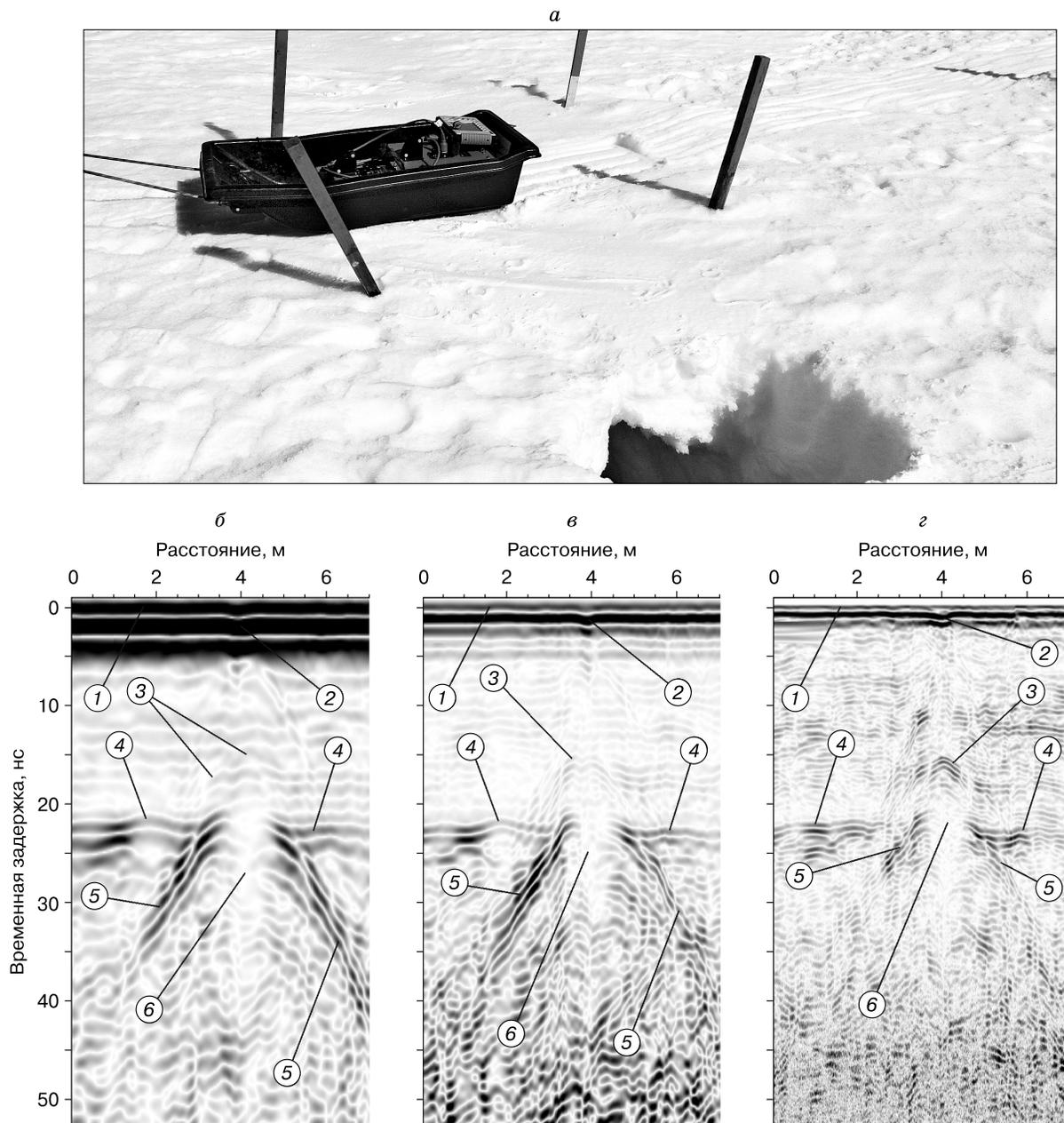


Рис. 3. Вид полигона с трещиной (а) и временные георадарные разрезы, полученные на частотах 270 МГц (б), 400 МГц (в) и 900 МГц (з) в районе планируемой взлетно-посадочной полосы станции Мирный.

1 – нулевая отметка; 2 – отражение, соответствующее положению трещины; 3 – отражение от поверхности воды в пределах трещины; 4 – отражение от поверхности воды за пределами трещины; 5 – дифрагированная волна, сформированная от стенок трещины; 6 – ослабление отраженного сигнала, вызванное наличием мощного слоя талой воды. Фото С.В. Попова (январь 2015 г.).

ростом частоты (а, следовательно, с уменьшением длины волны) улучшается их детализация и контрастность. Элементы трещин, сформированные в атмосферном льду, размеры которых представляют практический интерес, являются достаточно сильными рефлекторами. При имеющейся аппа-

ратуре их выявление и локализация целесообразны на частотах 400 и 900 МГц.

Трещины, формирующие выраженные дифрагированные волны

Теоретически для формирования контрастных дифрагированных волн, применительно к

объектам исследований, необходимо соблюдение по крайней мере одного из условий: 1) значимое различие вещественной части величин диэлектрических проницаемостей сред, формирующих границу; 2) наименьшая по сравнению с длиной волны шероховатость границы раздела сред. Данным условиям, насколько это возможно в принципе, удовлетворяют трещины, образованные во льду, независимо от их генезиса. Подобные приповерхностные объекты можно наблюдать в районах с незначительной положительной или отрицательной удельной аккумуляцией, в частности, между полевыми базами Прогресс-1 и Прогресс-3, а также в непосредственной близости от станции Мирный. Лоцирование открытых трещин, локализованных в теле атмосферного льда, рассмотрено выше.

В ходе летнего полевого сезона 58-й РАЭ (2012/13 г.) на участке между полевыми базами Прогресс-1 и Прогресс-3 были выполнены опытно-методические работы по изучению залеченных трещин [Попов, Эберляйн, 2014]. Предположительно они образовались в результате компрессии трещин ледника Долк при его натекании на скальные выходы холмов Ларсеманн. Снежный покров

в этом районе практически отсутствует, и эти объекты выделяются как протяженные ярко выраженные линейные структуры (рис. 4, а).

На рис. 4, б представлен временной георадарный разрез по маршруту, расположенному ортогонально простирающуюся трещин. В верхней части имеется интенсивное отражение 1, сформированное зондирующим импульсом. Контрастно выделяющиеся дифрагированные волны 2 сформированы от залеченных трещин. Ввиду того, что снежно-фирновая толща практически отсутствует, пересчет временного разреза в глубинный (правая вертикальная ось на рис. 4, а) выполнялся, исходя из диэлектрической проницаемости льда, равной 3.17 [Мачерет, 2006].

Трещины, формирующие слабовыраженные дифрагированные волны

В предыдущих разделах было проиллюстрировано на конкретных примерах, что контрастность дифрагированной волны зависит от конфигурации стенок трещины и коэффициента отражения Френеля. В этом смысле полости внутри снежно-фирновой толщи не являются контрастными объектами. Причина достаточно очевидна.

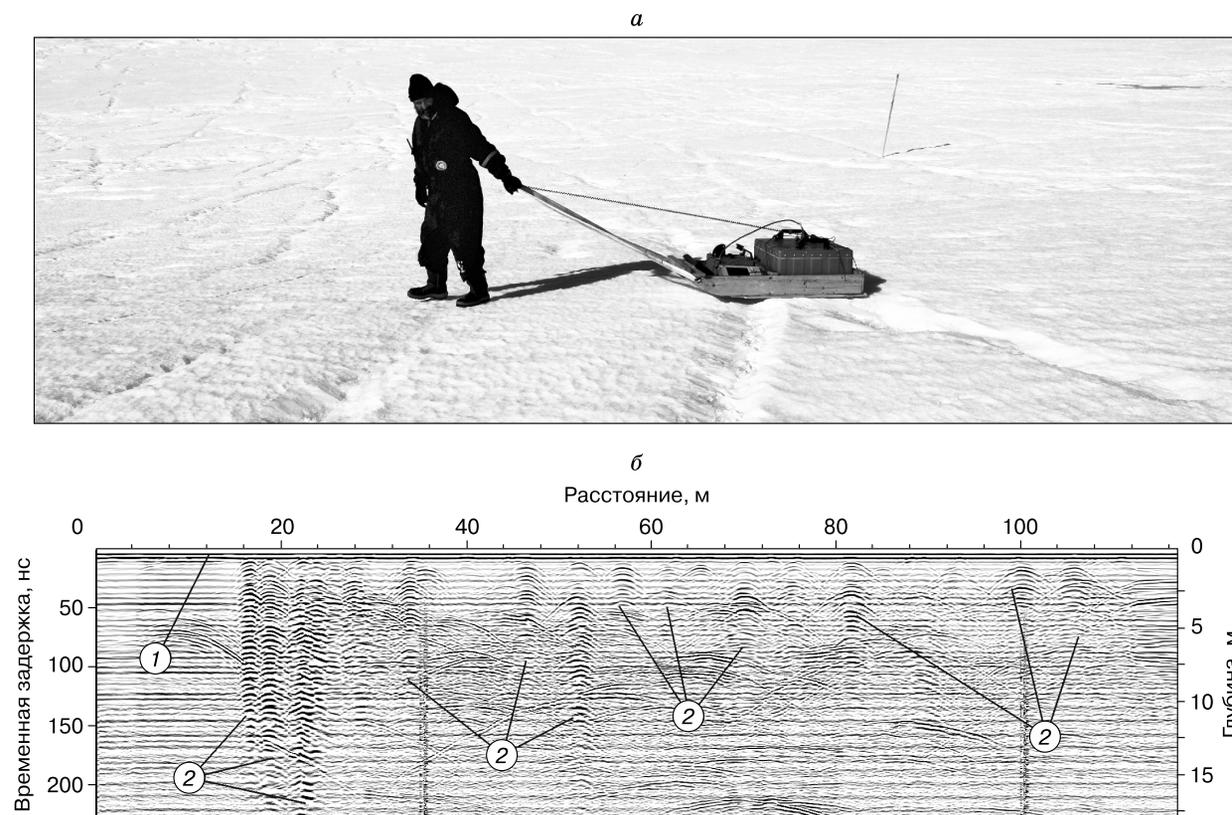


Рис. 4. Залеченные трещины в районе между полевыми базами Прогресс-1 и Прогресс-3 (а) и временной георадарный разрез, полученный при лоцировании залеченных трещин (б).

1 – нулевая отметка; 2 – дифрагированные волны, сформированные от элементов трещин.
Фото А.О. Сандалова (февраль 2012 г.).

Во-первых, диэлектрическая проницаемость снега и фирна всего в 2–2.5 раза выше, чем у воздуха. Это означает, что максимально возможный коэффициент отражения Френеля (т. е. в случае зеркального отражения, который на практике не реализуется) составляет около 20 %. Во-вторых, поскольку снег достаточно мягкий материал, граница раздела сред со временем становится рельефной и ее шероховатость увеличивается. Таким образом, трещины, сформированные в областях с разными условиями

снегонакопления, будут различаться по условиям распространения электромагнитных волн. Следовательно, будут различаться и временные георадарные разрезы, сформированные в ходе их лоцирования. Визуальное сравнение показывает, что трещины, развитые в районе станции Мирный, кардинально отличаются от трещин на трассе следования СГП Прогресс–Восток.

С целью более детального изучения трещин, сформированных в мощной снежно-фирновой

а



б

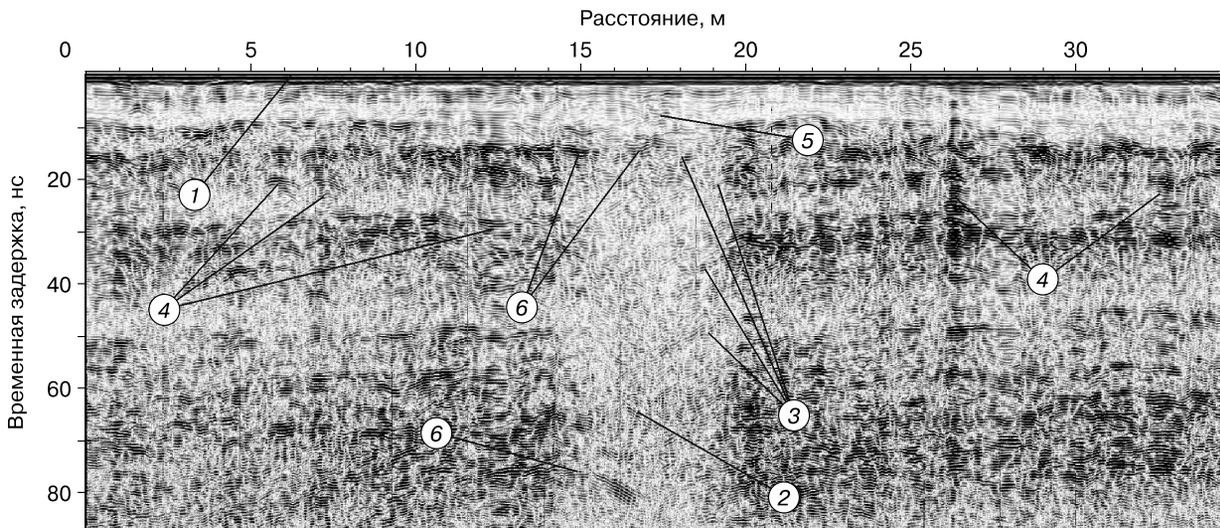


Рис. 5. Трещина в районе трассы следования санно-гусеничного похода Прогресс–Восток (а) и временной георадарный разрез, полученный при ее лоцировании (б).

1 – нулевая отметка; 2 – значимое ослабление отраженных импульсов, связанное с наличием трещины; 3 – дифрагированные волны, сформированные фрагментами стенок трещины; 4 – отражения, вызванные трещинами с относительно ровными стенками; 5 – отражение от нижней границы снежного моста; 6 – отражения, сформированные от нависающих (предположительно ледовых) козырьков или разрушенных фрагментарных снежно-ледовых мостов. Фото И.К. Вдовенко.

толще, 5 февраля 2015 г. было проведено георадарное профилирование на частотах 270 и 900 МГц на обширной трещине, в которую в 2012 г. частично провалилась топливная емкость (рис. 5, а). Работы проводились в пункте с координатами 69°34.025' ю.ш., 76°15.782' в.д. на удалении около 200 м от основной трассы следования СПП.

На рис. 5, б представлен один из временных георадарных разрезов, полученных по маршруту, расположенному вкрест простирания изучаемой трещины. Зондирование осуществлялось на частоте 900 МГц. Интенсивное отражение 1 сформировано зондирующим импульсом и маркирует начало радиолокационной записи. В центральной части разреза наблюдается значимое ослабление отраженных импульсов 2, связанное с наличием трещины. Ее ширина составляет около 5 м.

Следует отметить, что дифрагированные волны, сформированные стенками трещины 3, выражены крайне слабо. Это кардинально отличает данный объект от аналогичных, расположенных по соседству (отражения 4) или на других участках. Это обстоятельство связано прежде всего с негладкой формой стенок, а также с тем, что они сформированы менее контрастной, чем лед, снежно-фирновой толщей. Если на правой границе дифрагированные волны 3 можно различить, то на левой границе они отсутствуют. Отсюда можно предположить, что первая волна более ровная, чем вторая.

Трещина перекрыта толстым снежным мостом, толщина которого, согласно прямым измерениям, составляет 80 см. Отражение 5, достаточно отчетливо наблюдаемое при задержке 8.06 нс, связано с его нижней частью. В этом случае диэлектрическая проницаемость снега составляет 2.3, скорость распространения волн в среде 19.9 см/нс. Аналогичные значения для снежно-фирновой толщи были получены в районе станции Мирный.

Отсутствие отражений внутри области 2 (за исключением ветвей гиперболических отражений, связанных с дифрагированными волнами) позволяет предположить, что трещина в основном полая. В противном случае колотый лед или смерзшийся снег непременно сформировал бы по крайней мере дифрагированную волну. Тем не менее наблюдаются отдельные отражения 6 в привершинной области, которые связаны с подобными объектами. Судя по интенсивности отраженного сигнала, вероятнее всего, это именно ледяные, а не снежные фрагменты.

Изученная трещина относится к наиболее опасному типу, поскольку выявление подобных трещин представляет наибольшую трудность.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОРАДАРА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ВЫЯВЛЕНИЯ ТРЕЩИН

Особую важность представляет вопрос, связанный с безопасностью передвижения по трещинам на транспортной технике. Бытует мнение, что оперативный анализ данных, получаемых с георадара, антенна которого закреплена на выпущенной впереди трактора длинной стреле, способен предотвратить попадание в трещину (рис. 6). Автор полагает, что это опасное заблуждение. Георадар действительно является весьма мощным геофизическим прибором, который позволяет решать широкий круг научных и прикладных задач в области гляциологии, четвертичной и инженерной геологии, а также неразрушающего контроля. Именно он более всего подходит для решения вопросов выявления и локализации трещин в теле ледника. На это указывают как многочисленные публикации, так и результаты проведенных работ. Однако при всех многочисленных достоинствах георадар не способен творить чудеса.

Во-первых, геофизические данные, в том числе георадарные, обрабатывает не компьютер, не



Рис. 6. Приспособления, предназначенные для дистанционного обнаружения приповерхностных трещин в теле ледника с помощью георадаров на станции Прогресс.

а – общий вид; б – вынесенная антенна. Фото С.П. Полякова (декабрь 2012 г.).

прибор, а человек. Именно от его образования и опыта, а не от программного обеспечения, зависят результаты интерпретации полученных данных. При этом надо понимать, что радиолокационные и особенно георадарные данные по целому ряду причин являются наиболее сложноинтерпретируемыми.

Во-вторых, учитывая высокую скорость движения предполагаемого транспортного средства (5–10 км/ч), у оператора имеется всего несколько секунд на принятие решения. Это практически невыполнимая задача даже для профессионала: указанный момент настолько краток, что принятое решение может быть правильным лишь случайно.

В-третьих, анализ временного разреза, представленного на рис. 5, б, показывает, что в конфигурации трещин какие-либо признаки ее приближения (дифрагированные волны) либо отсутствуют, либо неярко выражены, и это дополнительно сокращает время на принятие решения. Разумеется, возможна и иная ситуация: наличие интенсивных дифрагированных волн. Однако за отпущенный краткий миг надо успеть понять, что наблюдаемое отражение действительно является дифрагированной волной от трещины, а не от поверхностного рефлектора (например, топливной емкости, бочки) и не от слоев снежно-фирновой толщи.

В-четвертых, объективно говоря, понять, что наблюдаемое отражение представляет собой дифрагированную волну, можно лишь после того, как антенна пересечет формирующий ее рефлектор и на экране монитора появится вершина дифрагированной волны. Но это произойдет уже тогда, когда гусеницы или колеса транспортного средства начнут пересекать опасную зону, а затем проваливаться в трещину.

Вывод, с точки зрения авторов, лишь один: чтобы выяснить, имеются на некоторой территории трещины или нет, необходимо провести георадарную съемку по всем правилам выполнения геофизических работ подобного рода. Бесспорно, ни о какой оперативности при таком подходе речи быть не может, однако это самый надежный и правильный способ решения поставленной задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в сезон 60-й РАЭ опытно-методические работы показали следующее.

1. Перспективным для решения прикладных задач обнаружения и локализации трещин в поверхностной части ледника является лоцирование на частотах от 400 до 900 МГц.

2. Трещины в атмосферном льду выявляются, как правило, достаточно уверенно по интенсивным дифрагированным волнам.

3. Конфигурация трещин в снежно-фирновой толще может быть такой, что характерные для по-

добных объектов дифрагированные волны будут выражены крайне слабо. Это усложняет выявление подобных объектов, особенно при выполнении производственных работ. Необходимо обращать особое внимание на области временного георадарного разреза, на которых наблюдается ослабление отраженного сигнала, не связанное с аппаратурой.

4. Дифрагированные волны, формирующиеся стенками трещины, могут стать достаточно надежной основой для создания скоростной модели среды, особенно при отсутствии данных kernового бурения или наклонных зондирований.

Руководствуясь общегеофизическими представлениями, авторы полагают, что данный вид работ целесообразно сочетать с акустическими методами исследований ледников и снежно-фирновой толщи [Епифанов, 2014], чтобы лучше понять их строение.

Авторы выражают признательность руководству Российской антарктической экспедиции и ООО «Антраверс-Сервис» за возможность выполнения георадарных работ; благодарят сотрудников Аэродромного отряда 60-й РАЭ Е.Г. Грузинова, С.В. Кашина, А.И. Куцурубю, Ю.И. Нездерева, А.Л. Новикова, С.С. Пряхина, Н.В. Сандалюк за помощь в их проведении.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-05-00579-А.

Литература

- Боганик Г.Н.** Сейсморазведка / Г.Н. Боганик, И.И. Гурвич. Тверь, Изд-во АИС, 2006, 744 с.
- Владов М.Л.** Введение в георадиолокацию / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 153 с.
- Епифанов В.П.** Применение акустических методов в исследованиях снежного покрова // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 3, с. 101–113.
- Мачерет Ю.Я.** Радиозондирование ледников / Ю.Я. Мачерет. М., Науч. мир, 2006, 392 с.
- Мельников В.П.** К созданию цельного образа криосферы // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 4, с. 3–12.
- Попов С.В.** Определение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике по гиперболическим отражениям от неоднородностей // Материалы гляциол. исслед., 2002, № 92, с. 223–225.
- Попов С.В., Эберляйн Л.** Опыт применения георадара для изучения строения снежно-фирновой толщи и грунта Восточной Антарктиды // Лед и снег, 2014, № 4 (128), с. 95–106.
- Финкельштейн М.И.** Радиолокация слоистых земных покровов / М.И. Финкельштейн, В.Л. Мендельсон, В.А. Кутев. М., Сов. радио, 1977, 176 с.
- GSSI Antennas Manual.** Geophysical Survey Systems, Inc. Salem, 2014, 99 p. (NH, USA, MN30-903 Rev E).

Поступила в редакцию
5 марта 2015 г.