

Труды XXX Всероссийского симпозиума
"Радиолокационные исследования прибрежных
сред", ред. Ю.В. Кулешова, СПб, ВКА им. А.Ф.
Можаевского, 2017г. Вып. 12, т. 1., стр. 78-83

С.В. Попов, С.П. Поляков, С.С. Прякин, В.Л. Мартьянов, В.В. Лукин
АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», г. Санкт-Петербург,
г. Ломоносов
ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»,
г. Санкт-Петербург

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ РОССИЙСКОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕДИЦИИ

В работе излагаются основные результаты изучения зон ледниковых трещин в районе отечественных станций Мирный и Прогресс методами георадиолокации. Исследования выполнялись на частотах 270 МГц, 400 МГц и 900 МГц. В ходе трёхлетних инженерных изысканий в районе станции Мирный найдено подходящее место, и подготовлена посадочная площадка, на которой в 2016 г. был принят среднемагистральный самолёт на лыжном шасси. В ходе аналогичных работ обследован участок трассы следования санно-гусеничных походов, расположенный в зоне ледниковых трещин. Подготовлены рекомендации по оптимальному, с позиций безопасности, их преодоления.

ВВЕДЕНИЕ

Абсолютное большинство зимовочных станций и полевых баз в Антарктиде расположено в её краевой части. С одной стороны, это существенно упрощает их логистическое обеспечение, но с другой является предметом постоянного беспокойства, которое вызвано наличием трещин в теле ледника. Их ширина может превышать десятки метров при глубине около сотни метров и более. Наиболее значительной известной трещиной является Гранд Касмс (Grand Chasms), которая в октябре 1985 г. привела к расколу части шельфового ледника Фильхнера-Ронне на три части, размером примерно по 90×95 км каждый. Её ширина незадолго до этого составила 19 км [12]!

Станция Мирный является первой отечественной станцией в Антарктиде. Именно отсюда на протяжении многих десятилетий уходили санно-гусеничные походы изучать внутренние районы континента и открывать новые станции и полевые базы, в частности станцию Восток. Но не только этим знаменит Мирный. Он печально известен своими многочисленными трещинами. Первой их жертвой стал механик-водитель А.И. Щеглов, погибший 25 февраля 1964 г. при попытке преодоления одной из них, которая пересекла трассу следования санно-гусеничного похода (СПП) на станцию Восток. Спустя почти полвека, 20 ноября 2008 г., также погиб другой механик-водитель Д.А. Ламакин. Тем не менее, не смотря на

обилие трещин, с момента образования станции здесь имелось несколько посадочных площадок, которые обеспечивали приём самолётов различного типа. Аэродромная служба своевременно выявляла трещины и устраняла их.

В связи с ухудшением общей экономической ситуации в нашей стране, авиационное сообщение со станцией Мирный было прервано в 1991 г. после завершения летнего полевого сезона 36-й САЭ [7]. С течением времени экономическое положение стабилизировалось, в связи с этим появились предпосылки для расширения 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», утверждённую Правительством РФ № 1926-р от 30 октября 2010 г. Помимо прочего, оно предполагает организацию посадочной площадки на станции Мирный, в том числе и для обеспечения отечественных геолого-геофизических работ в этом секторе Антарктиды.

Вторым важным объектом исследований был участок трассы следования СГП «Прогресс – Восток», расположенный в зоне ледниковых трещин, аналогичный району станции Мирный. В течение последнего десятилетия в них неоднократно проваливалась российская и китайская транспортная техника (рис. 1).

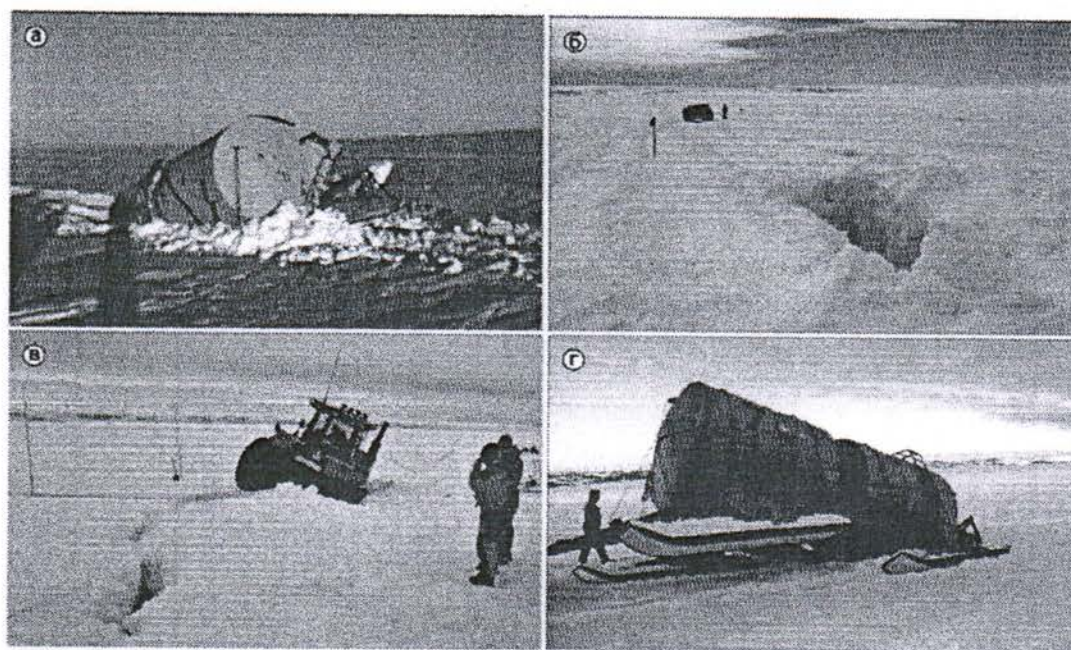


Рисунок 1. Трещины, расположенные в районе трассы следования СГП Прогресс – Восток

В связи с этим, поиск путей преодоления зоны трещин с минимальным риском, а также выявление трещин в районе трассы, является одной из приоритетных задач Российской антарктической экспедиции.

ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ В РАЙОНЕ СТАНЦИИ МИРНЫЙ

Для восстановления аэродрома и авиационной службы станции Мирный, в течение летних полевых сезонов 59-61 РАЭ (2013-2016 гг.) были осуществлены сначала рекогносцировочные работы, а затем масштабные гляцио-геофизические инженерные изыскания. Они включали в себя аэрофотосъёмку, керновое бурение, установку вех для изучения характера течения ледника, и электромагнитные зондирования [2-6]. Последние составляли основу работ, поскольку именно они позволяют оперативно выявлять особенности строения приповерхностной части ледника, включая скрытые трещины [3,5,9,10,13,14]. Схема расположения работ представлена на рис. 2.

В ходе летнего полевого сезона 59-й РАЭ (2013/14 г.) георадарные исследования выполнялись с помощью прибора фирмы GSSI (*Geophysical Survey Systems Inc., USA*) SIR-3000 с частотой зондирующих импульсов 400 МГц. В результате был намечен участок ледника, принципиально пригодный для организации на нём посадочной площадки.

В ходе следующего полевого сезона 60-й РАЭ (2014/15 г.) была выполнена площадная георадарная съёмка масштаба 1: 15 000 на территории 1700×800 м (рис. 2). Общая протяжённость георадарных маршрутов составила около 20 пог. км. Работы выполнялись аналогичными приборами одновременно на двух частотах: 270 МГц и 900 МГц. Планово-высотная привязка осуществлялась с помощью приёмоиндикатора GARMIN GPSmap 60 с выносной антенной GA 25MCX. В качестве транспортного средства использовался снегоход «Росомаха». Георадарная съёмка предварялась опытно-методическими работами, направленными на выяснение возможностей используемой аппаратуры для выявления трещин. Они выполнялись на одной из них на частотах 270 МГц, 400 МГц и 900 МГц. Результаты работ показали пригодность аппаратуры для решения поставленных задач [3,5].

В ходе работ, в районе планируемой подготовки посадочной площадки методом георадарного профилирования выявлено множество трещин. Однако они практически не представляют реальной опасности для людей и транспортной техники, включая авиационную, поскольку либо характеризуются малой шириной (первые десятки сантиметров), либо над ними имеются снежно-фирновые мосты значительной толщины (один метр и более). Таким образом, проведённые инженерные изыскания позволили сделать вывод о принципиальной возможности строительства посадочной площадки в этом районе.



- 1 — георадарные маршруты 60-й РАЭ (2014/15 г.);
- 2 — георадарные маршруты 61-й РАЭ (2015/16 г.);
- 3 — пункты кернового бурения;
- 4 — вехи для изучения динамики ледника;
- 5 — пункты пенетрометрических измерений;
- 6 — пункты выполнения опытно-методических работ;
- 7 — границы посадочной площадки.

На врезке *a* приведена роза ветров, построенная по метеоданным за четыре летних месяца 2014 г. (январь, февраль, ноябрь и декабрь)

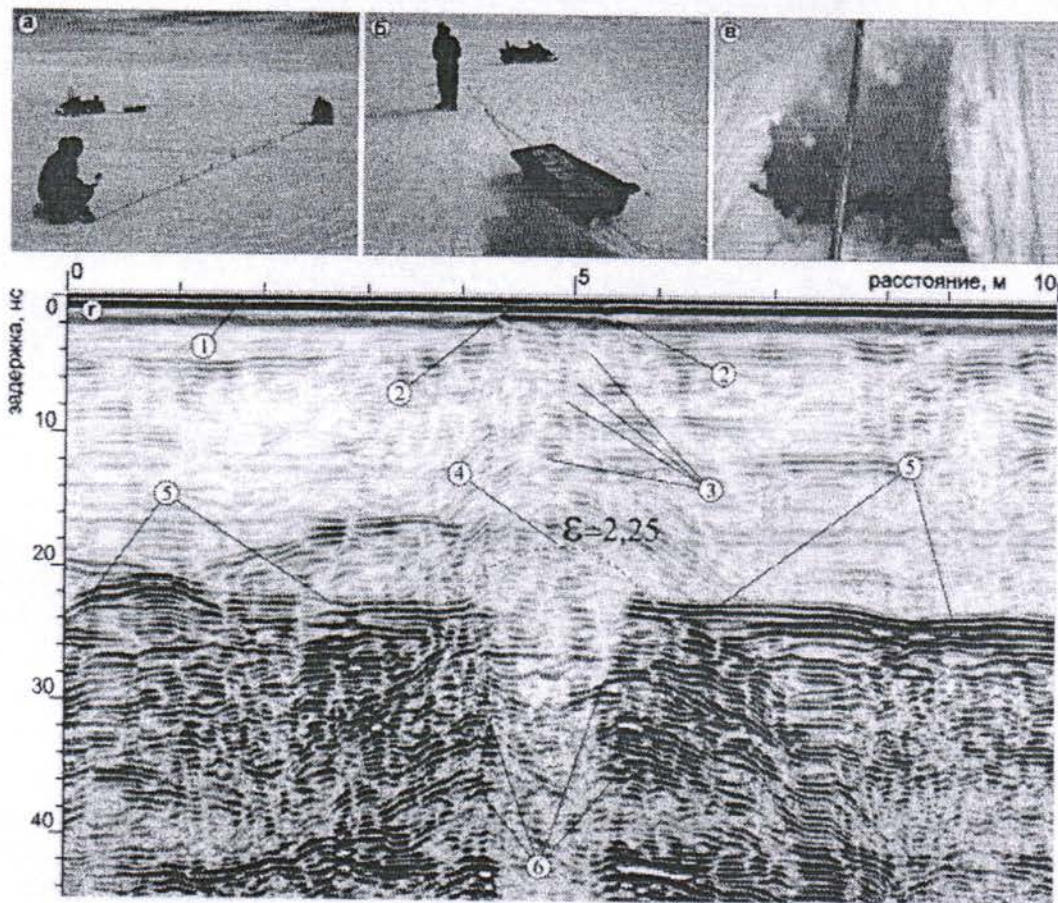
Рисунок 2. Схема расположения работ в районе станции Мирный

Ввиду принятия столь ответственного решения, в задачи следующего летнего полевого сезона 61-й РАЭ (2015/16 г.) входила полная подготовка посадочной площадки и приём самолёта на лыжном шасси, с помощью которого планировался вывоз сезонного состава со станции Мирный. С этой целью инженерные изыскания были расширены.

Помимо геодезических и гляциологических исследований, они включали в себя повторную площадную георадарную съёмку масштаба 1:10 000 на территории примерно 2 км×1,3 км (см. рис. 2), для выполнения которой применялась та же аппаратура и транспортное средство, что и раньше. Общий объём работ для каждого георадара составил 40,2 км.

Съёмка сопровождалась многочисленными опытно-методическими работами (рис. 2), направленными на выяснение вопросов формирования отражённых сигналов от трещин с различными характеристиками [2-5].

В частности, они выполнялись на трещине шириной около 1,5 м (полигон R2, рис. 2), сформированной в снежно-фирновой толще, через которую был размечен маршрут общей длиной 10 м (рис. 3а).



- 1 — прямая волна;
- 2 — отражение, соответствующее положению трещины;
- 3 — мозаичный характер отражений внутри трещины;
- 4 — отражение, сформированное от куска плотного снега или фирна;
- 5 — граница между снежно-фирновой толщей и ледниковым льдом;
- 6 — дифрагированные волны, сформированные от участков стенок трещины, расположенной в ледниковом льду.

Теоретический годограф дифрагированной волны показан пунктиром.

Положение полигона показано на рис. 2

Рисунок 3. Трещина в районе трассы следования СГП «Прогресс–Восток» (а) и временной георадарный разрез, полученный при её лоцировании (б)

Его середина соответствовала центру видимой части трещины. Вдоль маршрута выполнялось лоцирование на частотах 270 МГц и 900 МГц (рис. 3б).

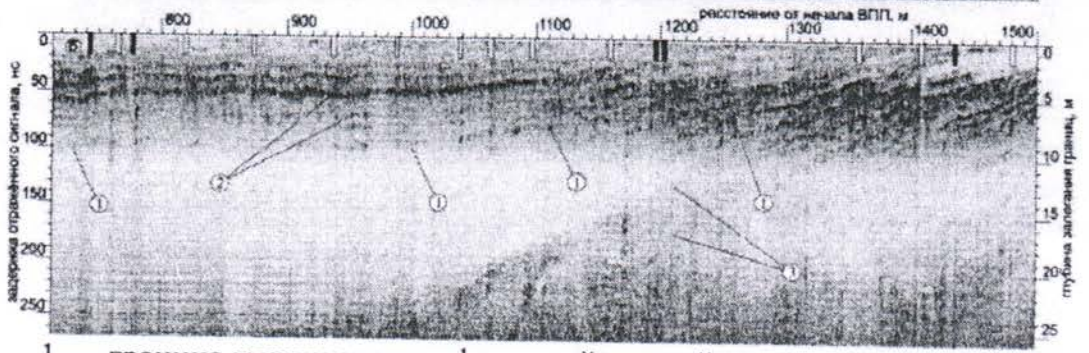
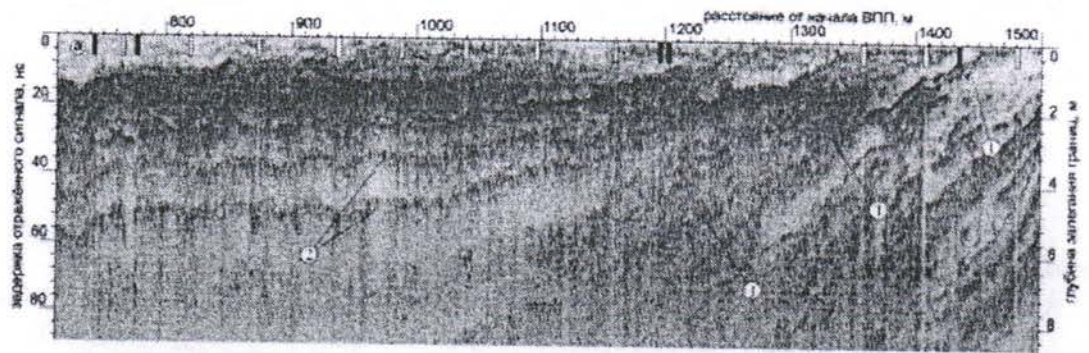
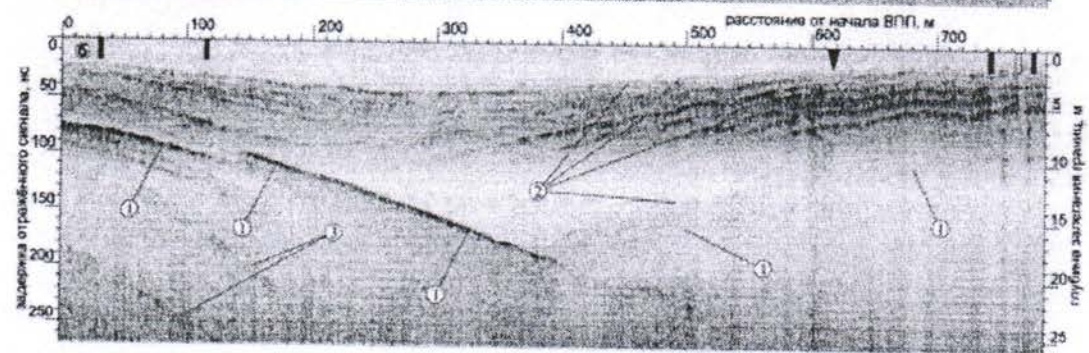
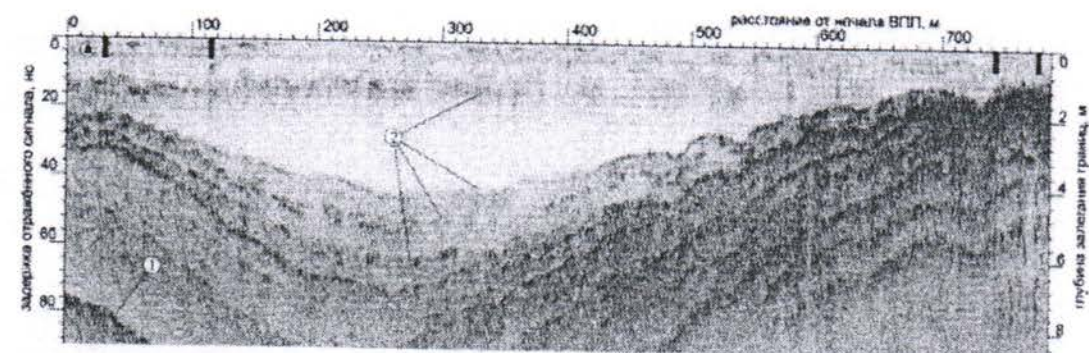
После завершения работ трещина была вскрыта. Визуальное обследование показало, что её приповерхностная часть была забита снегом примерно на 2 м (рис. 3в).

На временном георадарном разрезе (рис. 3г) наблюдается интенсивное отражение 1, сформированное зондирующим импульсом. Границы трещины маркируются нарушениями слоистости снежно-фирновой толщи 2. Ввиду того, что стенки рельефны, а диэлектрическая проницаемость снега не сильно отличается от воздуха, дифрагированные волны от её стенок практически не наблюдаются. Мозаичная структура волнового поля внутри трещины 3 указывает на то, что она частично забита снегом и кусками слежавшегося фирна, что и наблюдалось при её вскрытии. Один из таких кусков сформировал дифрагированную волну 4, по которой выполнены расчёты кинематических характеристик среды. Теоретический годограф лучше всего совпадает с зарегистрированным, при диэлектрической проницаемости равной 2,25. Это соответствует скорости распространения электромагнитных волн 20,0 см/нс [2]. Интенсивное отражение 5 маркирует границу между снежно-фирновой толщиной и ледниковым льдом. Твёрдость и диэлектрическая проницаемость среды увеличивается. Это приводит к тому, что стенки трещины становятся менее рельефными, а отражение более контрастным, что ведёт к уверенной регистрации дифрагированных волн 6. К сожалению, они не поддаются обчёту, что может быть связано с конфигурацией границы раздела [2].

Таким образом, трещины, как и любые другие неоднородности значимых размеров, формируют дифрагированные волны. Их обчёт в рамках модели слоисто-наклонной среды позволяет сформировать кинематическую модель и пересчитать временной разрез в глубинный. Поскольку район работ изобилует трещинами, эта методика была применена и позволила, в конечном итоге, сформировать схему значений диэлектрической проницаемости снежно-фирновой толщи и определить её толщину. Выяснено, что последняя изменяется в пределах от нуля (т.н. «голубой лёд» в зонах абляции) до 40 м. Диэлектрическая проницаемость варьирует в пределах от 1,43 до 3,08, при среднем значении 2,13 [4]. Наименьшие значения соответствуют покрову с наименьшей плотностью снега [11].

Георадарная съёмка включала в себя детальное изучение посадочной площадки. На её территории выполнено 19 маршрутов. Один из них расположен вдоль посадочной площадки (см. рис. 2). На рис. 4 приведены временные георадарные разрезы, полученные в результате лоцирования на частотах 900 МГц (секция а) и 270 МГц (секция б).

Согласно полученным данным, граница между снежно-фирновой толщиной и ледниковым льдом 1 (см. рис. 4) залегает на глубинах до 20 м.



- 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)

Рисунок 4. Временной георадарный разрез вдоль взлётно-посадочной
 полосы, выполненный на частотах 900 (а) и 270 МГц (б)

Это значение достигается на удалении около 400 м от начала ВПП. Отражения 2 связаны с особенностями строения снежно-фирновой толщи, и подтверждаются данными кернового бурения [2,4]. Отражения 3 обусловлены слоистостью ледникового льда.

В пределах первых 700 м ВПП наблюдаются лишь отдельные трещины шириной до 30 см, перекрытые достаточно мощными снежными мостами, ввиду чего они визуальны не прослеживаются на поверхности ледника. Как показывает опыт, они опасности не представляют, поскольку могут быть легко заделаны. Далее до конца ВПП появляется значительное число трещин, что указывает на смену динамического режима. Кроме того, их ширина также возрастает, иногда до 150 см. Однако при этом они перекрыты мостами сильно фирнизированного снега толщиной более 1 м, ввиду чего они также не представляют опасности [2,4,5].

Как и планировалось, работы летнего полевого сезона 61-й РАЭ завершились подготовкой посадочной площадки для приёма самолётов на лыжном шасси, на которую 10 февраля 2016 г. успешно приземлился среднемагистральный самолёт DC-3T (BT-67) «Турбобаслер» компании «ALCI» (г. Кейптаун, ЮАР), пилотируемый канадским экипажем авиакомпании «Kenn Borek Air Ltd». Таким образом, авиационное сообщение со станцией Мирный было восстановлено.

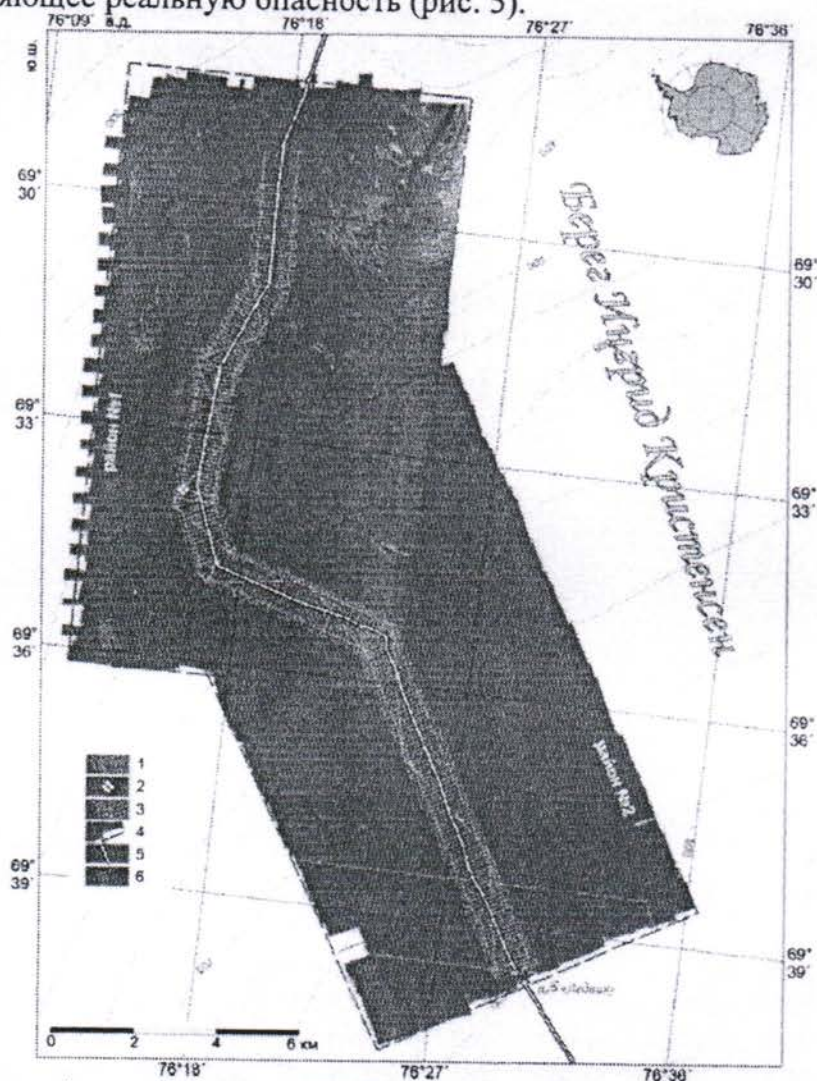
ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ В РАЙОНЕ СТАНЦИИ ПРОГРЕСС

С целью решения поставленной задачи выявления трещин, представляющих опасность для людей и техники санно-гусеничного похода, в сезон 61-й РАЭ (2015/16 г.) были выполнены комплексные гляцио-геофизические инженерные изыскания. Они включали в себя площадную наземную георадарную съёмку масштаба 1:10 000, керновое бурение, установку вех для определения особенностей динамики ледника, а также аэрофотосъёмку [3]. Георадарная съёмка осуществлялась по сети рядовых, секущих и диагональных маршрутов с межмаршрутным расстоянием 100 м (рис. 5). В работах использовались промышленные приборы фирмы GSSI (*Geophysical Survey Systems Inc., USA*) с системным модулем SIR-3000. Большая часть съёмки выполнена на частоте 400 МГц, а остальная на частоте 900 МГц. В качестве транспортного средства использовался тягач Kässbohrer Pisten Bully Polar 300. Скорость движения по маршрутам составляла около 5 км/час. Антенна георадара располагалась в пластиковых санях, соединённых с транспортёром жёсткой сцепкой. Это устраняло их инерционность. Кроме того, жёсткая сцепка обеспечивала точное повторение манёвров транспортёра санями.

Наиболее безопасным является пересечение трещин на транспортной технике в составе СГП в крест её предполагаемого простираения. Поэтому наибольший интерес представляет выявление именно тех из них, которые расположены субпараллельно трассе следования СГП, ввиду

вышеизложенного, рядовые маршруты располагались субортогонально ей (рис. 5). В ходе работ было выполнено 240 рядовых, 12 секущих и 10 диагональных маршрутов. Их общая протяжённость составила 315 пог. км. Плановая привязка пунктов зондирования осуществлялась по GPS с помощью приёмоиндикатора GARMIN GPSmap 60 с выносной антенной GA 25MCX.

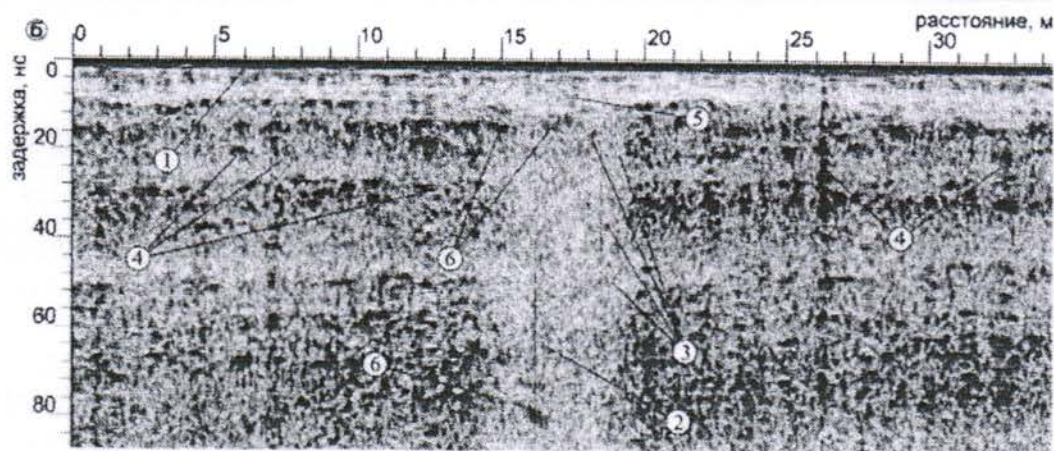
Анализ полученных георадарных данных, а также материалов аэрофотосъёмки показал, что в коридоре шириной около полукилометра в разные стороны от трассы следования СГП есть лишь одно место, представляющее реальную опасность (рис. 5).



- 1 — трещины, выявляемые по аэрофотосъёмке;
 - 2 — место проведения ОМР (широкие трещины);
 - 3 — положение георадарных маршрутов 61-й РАЭ;
 - 4 — районы аэрофотосъёмки 61-й РАЭ;
 - 5 — трасса следования СГП;
 - 6 — изогипсы высот дневной поверхности в метрах; сечение изолиний 100 м
- Рисунок 5. Схема расположения работ сезона 61-й РАЭ в районе трассы следования СГП

Имеющиеся там приповерхностные трещины характеризуются размером около 5 м. Именно туда в своё время проваливалась техника российской и китайской антарктических экспедиций (рис. 1). Прочие трещины, согласно результатам дешифрирования аэрофотосъёмки, ближе всего подходят к трассе в северной части. Расстояние от трещин до трассы составляет, в целом, чуть более одного километра (рис. 5).

На одной из широких трещин в сезон 61-й РАЭ были выполнены опытно-методические работы. Они проводились на обширной трещине, в которую в 2012 г. частично провалилась топливная ёмкость (рис. 6а).



- 1 — прямая волна;
 2 — значимое ослабление отражённых импульсов, связанное с наличием трещины;
 3 — дифрагированные волны, сформированные фрагментами стенок трещины;
 4 — отражения, сформированные 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

Рисунок 6. Трещина в районе трассы следования СГП «Прогресс-Восток» (а) и временной георадарный разрез, полученный при её лоцировании (б)

На рис. 6б, в качестве примера, представлен временной разрез, полученный при её пересечении. Зондирование осуществлялось на частоте 900 МГц. Интенсивное отражение 1 сформировано зондирующим импульсом. В центральной части разреза отчётливо наблюдается значимое ослабление отражённых импульсов 2, связанное с наличием трещины. Её ширина составляет около 5 м.

Дифрагированные волны 3, сформированные стенками трещины, выражены слабо. Это отличает её от остальных 4, расположенных по соседству с ней, что связано, прежде всего, с рельефной формой стенок. Кроме того, они сформированы менее диэлектрически контрастной, чем лёд, снежно-фирновой толщей.

Трещина перекрыта снежным мостом, толщина которого, согласно прямым измерениям, составляет около 80 см. Отражение 5, достаточно отчётливо наблюдаемое на задержке 8,06 нс, связано с его нижней частью. В этом случае, диэлектрическая проницаемость снега составляет 2,3. Это соответствует скорости распространения электромагнитных волн в среде 19,9 см/нс. Аналогичные значения для снежно-фирновой толщи были получены исполнителями в районе станции Мирный (см. выше).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе трёх летних полевых сезонов 2013-2016 гг. в районе отечественных антарктических станций Мирный и Прогресс выполнены обширные комплексные гляцио-геофизические инженерные изыскания, направленные на решение прикладных задач выявления и локализации трещин в приповерхностной части ледника. В районе станции Мирный они позволили подобрать подходящее, с позиций авиационных требований, место, организовать посадочную площадку и 10 февраля 2016 г. принять среднемагистральный самолёт DC-3T (BT-67) «Турбобаслер» компании «ALCI» (г. Кейптаун, ЮАР), пилотируемый канадским экипажем авиакомпании «Kenn Borek Air Ltd». В районе станции Прогресс обследовать действующую трассу следования санно-гусеничных походов. Согласно полученным результатам, трещины значимого размера непосредственно на трассе и на расстоянии около полукилометра в обе стороны от неё отсутствуют, за исключением одного места, которое обозначено вехами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников — Москва: Научный мир, 2006, —392 с.
2. Попов С.В., Межонов С.В., Поляков С.П., Мартьянов В.Л., Лукин В.В. Гляциогеофизические инженерные изыскания для подготовки

- лётного поля в районе российской станции Мирный, Восточная Антарктида // *Лёд и снег*, 2016, Т. 56, №3, — С. 413-426.
3. *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.
 4. *Попов С.В., Поляков С.П., Пряхин С.С., Мартьянов В.Л., Лукин В.В.* Строение верхней части ледника в районе планируемой взлётно-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)
 5. *Попов С.В., Поляков С.П., Пряхин С.С., Мартьянов В.Л., Лукин В.В.* Применение дистанционных методов для выбора строительства посадочной площадки для самолётов на лыжном шасси на станции Мирный, Восточная Антарктида // *Природная среда Антарктики: современное состояние изученности: матер. II Междунар. науч.-прак. конф. (пос. Нарочь, Республика Беларусь, 18–21 мая 2016 г.)* / ред. В.Е. Мямин и др., Минск: Конфидо, 2016, — С. 295–300.
 6. *Пряхин С.С., Попов С.В., Сандалюк Н.В., Мартьянов 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.
 7. *Саватюгин Л.М.* Российские исследования в Антарктике. Т. III. 31 САЭ – 40 РАЭ —СПб.: Гидрометеиздат, 2001. — 344 с.
 8. *Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А.* Радиолокация слоистых земных покровов — Москва: «Советское радио», 1977, — 176 с.
 9. 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.
 10. Arcone S.A., Delaney A.J. GPR images of hidden crevasses in Antarctica // *Proc. SPIE 4084. Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar*, 760, April 27. 2000. doi:10.1117/12.383512.
 11. Robin G. de Q. Velocity of radio waves in ice by means of interferometric technique // *J. Glaciol.* 1975, V. 15, No 73, — P. 151–159.
 12. Swithinkbank C. Satellite image atlas of glaciers of the world. Antarctica — U.S. Geological Survey Professional Paper 1386-B. US Government Printing Office, Washington, D.C., 1988, — 290 p.
 13. Taurisano A., Tronstad S., Brandt O., Kohler J. On the use of ground penetrating radar for detecting and reducing crevasse-hazard in Dronning Maud Land, Antarctica // *Cold Reg. Sci. Technol.* 45, 2006, — P. 166–177 (doi:10.1016/j.coldregions.2006.03.005)
 14. 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 Proc.* 318, 2007, — P. 153–162.