

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.324

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(73-84)

**СТРОЕНИЕ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЛЕДНИКА В РАЙОНЕ
ПЛАНИРУЕМОЙ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЫ СТАНЦИИ МИРНЫЙ,
ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА (ПО МАТЕРИАЛАМ РАБОТ 2014/15 ГОДА)**

С.В. Попов, С.П. Поляков*, С.С. Пряхин*, В.Л. Мартьянов*, В.В. Лукин*

*Полярная морская геолого-разведочная экспедиция,
198412, Санкт-Петербург, Ломоносов, ул. Победы, 24, Россия
*Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт,
199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Россия; spopov67@yandex.ru*

Представлены результаты георадарного профилирования и кернового бурения, выполненных в районе отечественной станции Мирный в ходе летнего полевого сезона 60-й Российской антарктической экспедиции (2014/15 г.). Георадарное профилирование осуществлялось на частотах 270 и 900 МГц по маршрутам общей протяженностью 20 км. Отобрано пять кернов длиной около 7 м. Выяснено, что верхняя часть ледника сформирована снежно-фирновой толщей, ниже которой залегает атмосферный лед. Эффективные диэлектрические проницаемости сред составляют 2.13 и 3.0 соответственно. Мощность снежно-фирновой толщи в районе работ изменяется от нуля ("голубой лед") до приблизительно 40 м.

Восточная Антарктида, станция Мирный, георадарное профилирование, керновое бурение, диффракцированные волны, снежно-фирновая толща

**STRUCTURE OF THE UPPER PART OF THE GLACIER IN THE AREA
OF THE DESIGNED SNOW-RUNWAY OF MIRNY STATION, EAST ANTARCTICA
(BASED ON THE DATA COMPILED IN 2014/15 FIELD SEASON)**

S.V. Popov, S.P. Polyakov*, S.S. Pryakhin*, V.L. Mart'yanov*, V.V. Lukin*

*Polar Marine Geosurvey Expedition, 24, Pobeda str., St. Petersburg, Lomonosov, 198412, Russia
Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Bering str., St. Petersburg, 199397, Russia; spopov67@yandex.ru

The main results of GPR sounding and ice core sampling carried out in the area of the Russian Mirny Station during the austral summer field season of 60th Russian Antarctic Expedition (2014/15) have been presented. The GPR data were collected at the frequencies of 270 MHz and 900 MHz. The total length of the profiles was 20 km. Five ice cores about 7 m long were selected. The upper part of the glacier was found to consist of a snow-firn layer and meteoric ice underneath. The effective permittivity values of the media were determined to be 2.13 and 3.0, accordingly. In the study area the snow-firn layer thickness varied between zero ("blue ice") and approximately 40 m.

East Antarctica, Mirny Station, GPR sounding, ice core sampling, diffracted waves, snow-firn layer

ВВЕДЕНИЕ

Первая отечественная станция в Антарктиде – *Мирный* – была открыта 13 февраля 1956 г. на побережье моря Дейвиса. Именно здесь на протяжении более полувека располагалась база санно-гусеничных походов (СПП) для освоения внутренних районов континента. Отсюда они уходили, чтобы открыть станции *Пионерская*, *Комсомольская*, *Восток* и водрузить Государственный флаг СССР на Полюсе Недоступности. Именно с Мирного более пяти десятилетий осуществлялось основное обеспечение станции *Восток*. Помимо логистических задач СПП выполняли большое коли-

чество научных программ, среди которых важное место занимали гляциологические и геофизические исследования [*Первая... экспедиция, 1959; Трешников, 1963; Саватюгин, Преображенская, 1999; Лукин и др., 2006*].

После планового переноса транспортного узла на станцию Прогресс (первый экспериментальный СПП Прогресс – Восток состоялся в сезон 53-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ), 2007/08 г.) станция Мирный не потеряла своего стратегического значения. Она продолжает оставаться важным логистическим пунктом, по-

сколькx позволяет соединить внутриконтинентальные авиатрассы Восточной Антарктиды [Поляков и др., 2015]. Однако для этого необходимо восстановить некогда существовавшую здесь взлетно-посадочную полосу (ВПП). С этой целью в течение летнего полевого сезона 59-й РАЭ

(2013/14 г.) сотрудником РАЭ С.В. Вольфом были выполнены рекогносцировочные работы, включавшие георадарное профилирование и установку вех для последующего определения скорости течения ледника в этом районе. В сезон 60-й РАЭ в период с 10 по 21 января 2015 г. были про-

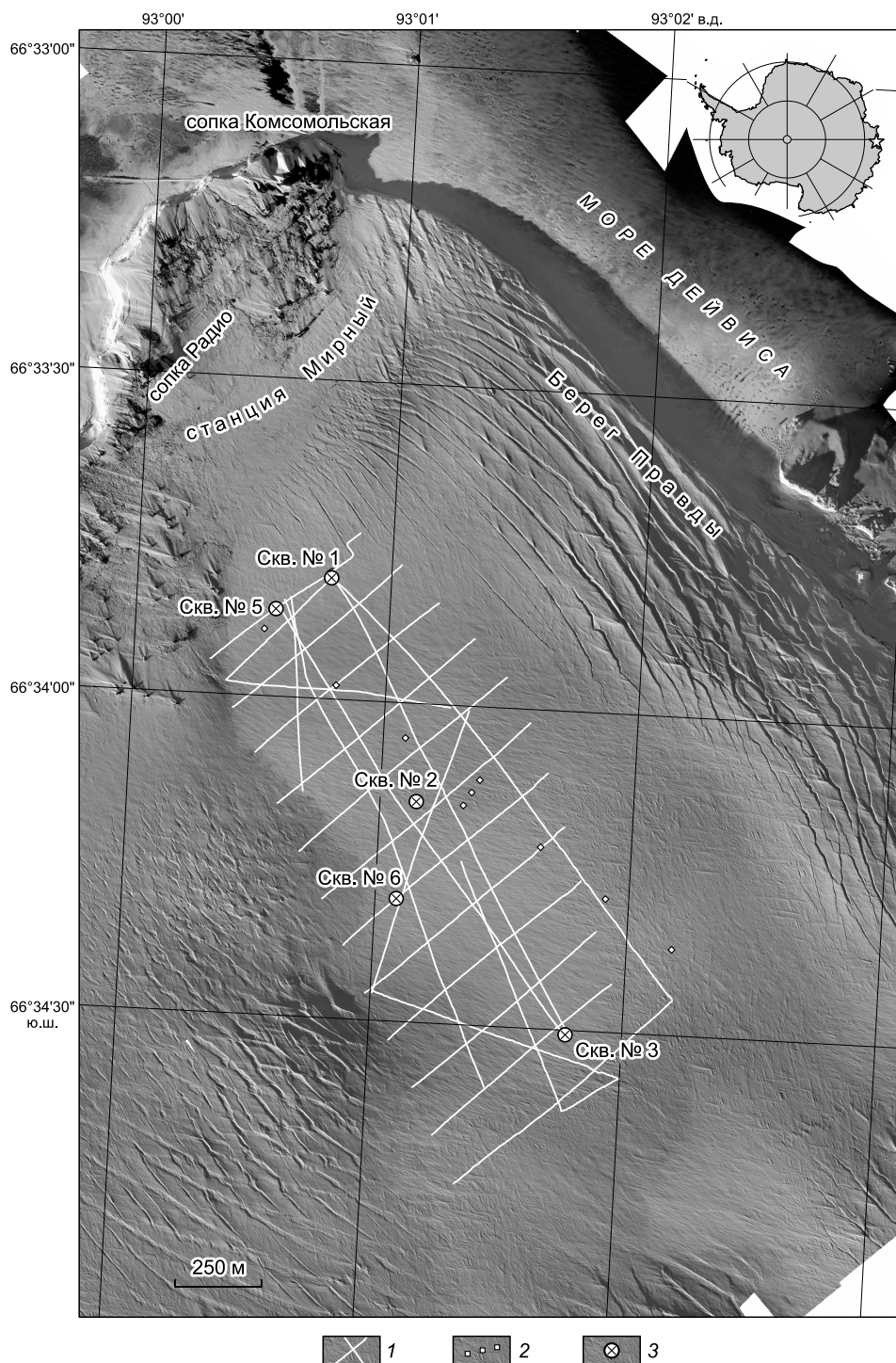


Рис. 1. Схема гляцио-геофизических работ:

1 – георадарные маршруты; 2 – вехи для определения скорости течения ледника; 3 – пункты кернавого бурения.

ведены масштабные исследования, представлявшие собой комплексные инженерные ледоисследовательские изыскания. Они были направлены на изучение верхней части ледника и, в частности, на выявление трещин значимого размера. Работы включали: 1) аэрофотосъемку, 2) площадное георадарное профилирование, 3) керновое бурение и 4) мониторинг ледника [Поляков и др., 2015; Попов и др., 2015; Пряхин и др., 2015]. Схема расположения работ приведена на фрагменте фотоплана (рис. 1). Объем статьи не позволяет осветить все аспекты проведенных работ, поэтому в ней представлена лишь часть полученных результатов.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ И ХАРАКТЕРИСТИКА АППАРАТУРЫ

Аэрофотосъемка была выполнена 11 января 2015 г. на вертолете Ка-32 (бортовой номер RA-31021) на относительной высоте 1500 м. Работы проводились на территории 3.5×3.5 км по 14 маршрутам общей протяженностью 52.5 км с межмаршрутным расстоянием 280 м. При съемке использовалась цифровая зеркальная камера Canon 650D с объективом Canon EF 40 mm 1:2.8 STM.

В общей сложности получено 219 фотоснимков. В результате работ был составлен фотоплан с детальностью 16 пиксел/см. Статистические расчеты, выполненные по 14 опознакам, показали, что точность нанесения географической сетки составила 17 м. Подробное описание методик выполнения съемки и обработки данных, а также сам фотоплан приведены в работе [Пряхин и др., 2015].

Георадарное профилирование выполняли приборами фирмы GSSI (Geophysical Survey Systems Inc., USA) SIR-3000 одновременно на двух частотах 270 и 900 МГц. Их технические характеристики представлены в работе [GSSI Antennas Manual, 2014]. В качестве транспортного средства использовался снегоход (рис. 2, а). Съемка выполнялась при скорости движения около 5 км/ч. Общая протяженность георадарных маршрутов составила 20 км. Плановая привязка пунктов зондирования осуществлялась по GPS с помощью приемоиндикатора GARMIN GPSmap 60 с выносной антенной GA 25MCX. Согласно результатам стояночных наблюдений, точность плановой привязки составила около 2 м, что вполне достаточно для решения поставленных задач. Перед

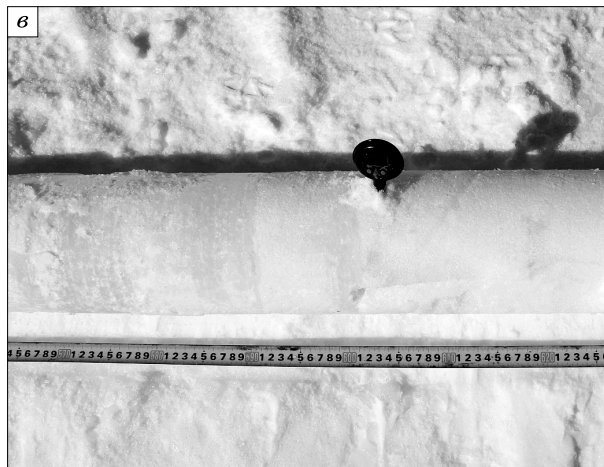


Рис. 2. Выполнение георадарного профилирования (а), кернового бурения (б) и измерение температуры керна (в).

Фотографии С.С. Пряхина, январь 2015 г.

выполнением георадарной съемки были проведены опытно-методические работы с целью выяснения возможностей имеющейся аппаратуры [Попов, Поляков, 2016].

Бурение с отбором керна (см. рис. 2, б) производили механическим буром Kovacs (Kovacs Enterprises, USA), который обеспечивал диаметр скважины 17 см и керна 14 см. Сразу после взятия керна измерялась температура внутри него на различных горизонтах, после чего керны описывались, фотографировались и распиливались на фрагменты, а также определялась их плотность.

Плотность фрагментов керна определялась как отношение их массы к объему. Для этого образцы взвешивали на электронных весах Fishermap OCS20K (Китай) с погрешностью ± 20 г. Фрагменты керна имели среднюю массу около 2 кг и характеризовались формой, весьма близкой к цилиндрической. Их объем определялся тригонометрическим способом. Погрешность определения плотности, исходя из характеристик точности приборов и методики измерений, оценивается в 6 %.

Температура определялась портативным электронным термометром GTN 175/МО (Германия) для измерения температуры снега и льда с рабочим диапазоном от -199 до $+199$ °C и погрешностью ± 0.1 °C. В установленных пунктах керна высверливали отверстие глубиной около 6 см, чтобы в него полностью можно было погрузить щуп термометра (см. рис. 2, в). Выжидалось некоторое время (обычно до 2 мин), для того чтобы температура щупа сравнялась с температурой керна, после чего производилось само измерение.

РЕЗУЛЬТАТЫ КЕРНОВОГО БУРЕНИЯ

В ходе работ в пределах площадной георадарной съемки было отобрано пять кернов (рис. 3) в пунктах с координатами $66^{\circ}33.810'$ ю.ш., $93^{\circ}00.764'$ в.д. (скв. № 1); $66^{\circ}34.154'$ ю.ш.,

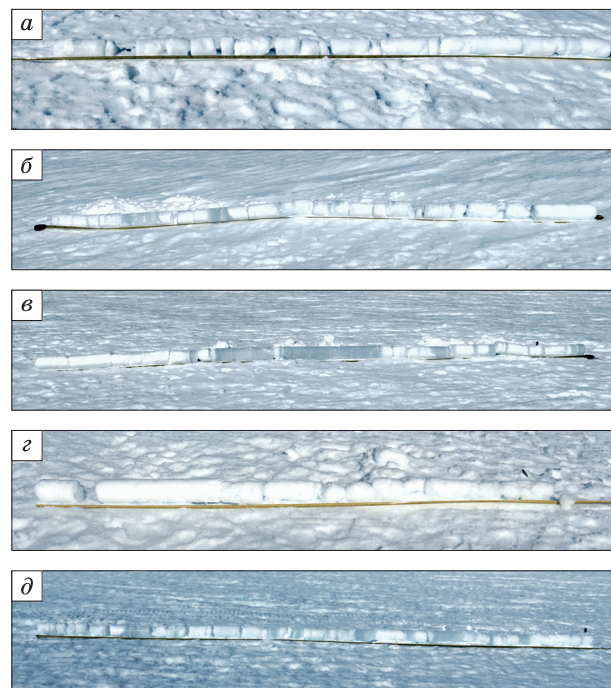


Рис. 3. Фотографии кернов: № 1 (а), № 2 (б), № 3 (в), № 5 (г), № 6 (д).

Фотографии С.С. Пряхина, январь 2015 г.

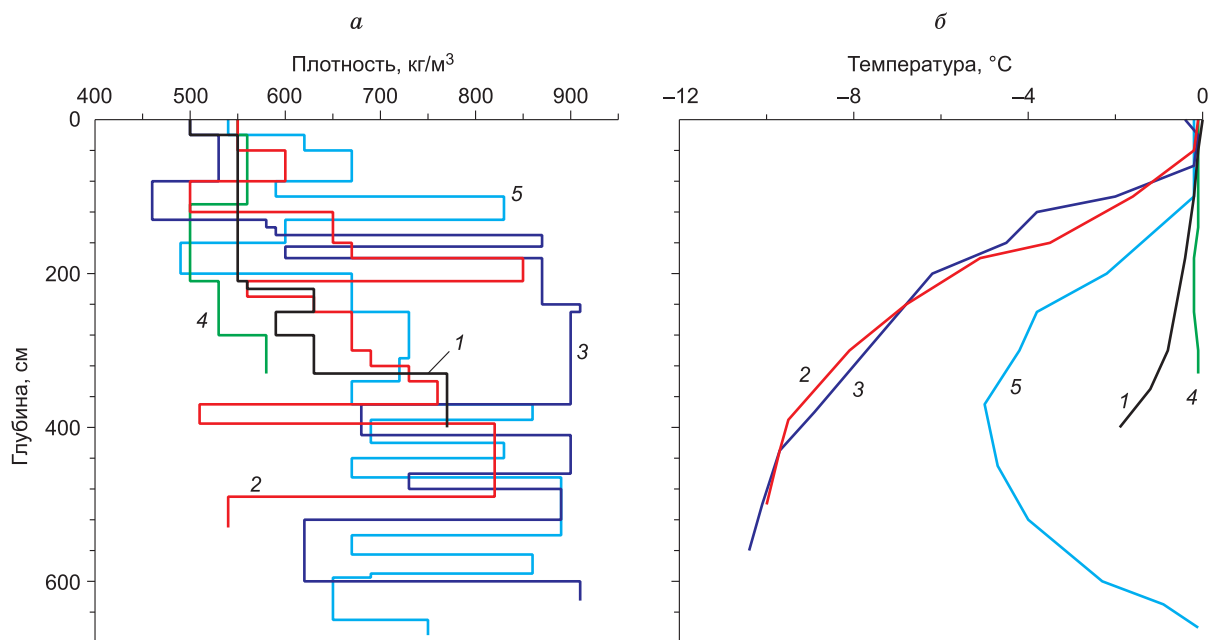


Рис. 4. Профили плотности (а) и температуры (б) по данным кернов:

1 – керн № 1; 2 – керн № 2; 3 – керн № 3; 4 – керн № 5; 5 – керн № 6.

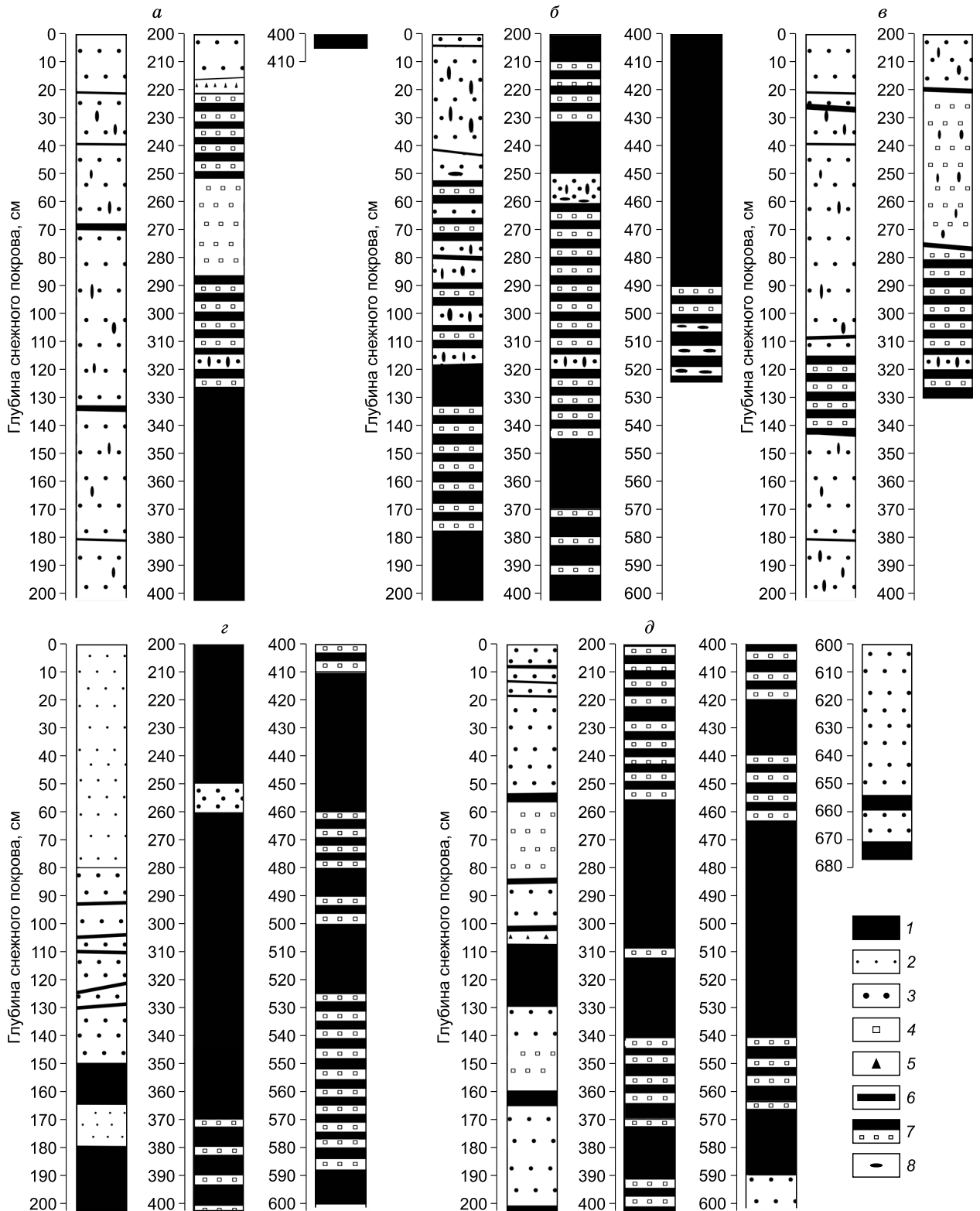


Рис. 5. Стратиграфическое описание кернов: № 1 (а), № 2 (б), № 5 (в), № 3 (г), № 6 (д).

1 – ледниковый лед; 2 – мелко- и среднезернистый снег; 3 – крупнозернистый снег или фирн; 4 – огранные кристаллы; 5 – глубинная изморозь; 6 – ледяная корка; 7 – ледниковый лед с вкраплениями огранных кристаллов; 8 – ледяные включения.

93°01.143' в.д. (скв. № 2); 66°34.507' ю.ш., 93°01.778' в.д. (скв. № 3); 66°33.863' ю.ш., 93°00.550' в.д. (скв. № 5) и 66°34.307' ю.ш., 93°01.084' в.д. (скв. № 6), на глубину 405, 525, 625, 330 и 677 см соответственно (см. рис. 1). Их плотностные и температурные профили показаны на рис. 4. Стратиграфическое описание кернов в соответствии с [Гляциологический словарь, 1984] приведено на рис. 5.

Накопленный за зимний период слой снежно-го покрова в течение лета достигает температуры фазового перехода, проходит глубокую стадию конструктивного метаморфизма [Де Кервен, 1966] с превращением мелкозернистого снега в крупнокристаллический фирн с множественными ледяными включениями. По международной классификации ледников [Патерсон, 1984] этот район можно отнести к зоне промачивания (инфильтрационная зона).

В пункте бурения № 6 (см. рис. 1) обнаружен уникальный ход профиля температуры в толще ледника. Несмотря на то что на глубине 4 м температура опускается до -5°C , на глубине 6.4 м она поднимается до температуры фазового перехода (см. рис. 4, б), т. е. на данном горизонте была обнаружена вода. Предварительное объяснение этого феномена состоит в наличии активно образующихся незалеченных трещин и микротрещин в теле ледника, через которые талая вода с поверхности проникает в его снежно-фирновую толщу до уровня начала атмосферного льда.

ХАРАКТЕР ВОЛНОВОГО ПОЛЯ И СОПОСТАВЛЕНИЕ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ И ДАННЫХ КЕРНОВОГО БУРЕНИЯ

Площадная георадарная съемка проводилась по системе рядовых, секущих и диагональных маршрутов общей протяженностью 20 км (см. рис. 1). Практически все они выполнялись при лоцировании одновременно на двух частотах 270 и 900 МГц. Исключение составляли крайне незначительные фрагменты, где имели место технические неполадки. Наличие двух столь разных частот зондирования позволило, с одной стороны, получить качественные данные до глубины в несколько десятков метров, а с другой – выяснить особенности строения приповерхностной части ледника. Последнее очень важно для локализации и изучения трещин.

Георадарные данные обрабатывались по стандартной методике. Она включает: 1) состыковку отдельных фрагментов в единый маршрут; 2) привязку каждого пункта зондирования в плане; 3) всестороннюю проверку данных плановой привязки; 4) улучшение контрастности целевых границ (фильтрация, нелинейное усиление); 5) подбор параметров визуализации временных разрезов

(цветовая гамма и пр.); 6) выбор скоростной модели среды; 7) оцифровку целевых границ; 8) расчет невязок в точках пересечения маршрутов и их статистическую обработку; 9) окончательную визуализацию данных и построение комплекта карт. Эта методика расчетов хорошо зарекомендовала себя при обработке радиолокационных и георадарных данных, получаемых в Антарктиде на протяжении многих лет.

По невыясненной причине исходные данные характеризуются наличием интенсивных помех, которые наблюдаются на временных разрезах в виде горизонтальных полос при лоцировании на частоте 270 МГц. В ряде случаев они полностью или частично маскируют целевые границы и препятствуют, таким образом, успешной интерпретации материала без предварительной обработки. Эффективным средством борьбы с ними является горизонтальная фильтрация. Применительно к имеющимся данным положительные результаты были достигнуты при использовании скользящего окна шириной 200 трасс.

Ледниковый покров района исследований характеризуется весьма сложным строением, что подтверждается данными кернового бурения (см. рис. 3 и рис. 5). Это связано, по-видимому, с климатическими условиями: высокие температуры в летний период обеспечивают интенсивное поверхностное таяние и заполнение трещин талой водой с последующим проникновением ее в глубь ледника.

На рис. 6 приведен временной георадарный разрез по маршруту MR17-56а юго-восточного простираения, которым можно, в известном смысле, охарактеризовать строение ледника всего района работ. Кроме того, он начинается в непосредственной близости от скв. № 3 и заканчивается рядом со скв. № 1, что позволяет сравнить гляциологические и георадарные данные.

На разрезе наблюдается слабое отражение 1, сформированное прямой волной и соответствующее положению дневной поверхности (см. рис. 6). Ее низкая интенсивность обусловлена применением фильтрации, что повлекло за собой подавление всех протяженных горизонтальных границ. Интерес представляет высококонтрастное отражение 2. Если отвлечься от заведомо невероятных вариантов, то, судя по интенсивности и форме, оно может быть связано лишь с наличием водного слоя. Во всяком случае именно так на временных радиолокационных разрезах выглядит отражение от подледниковых водоемов [Попов, 2010; Попов, Черноглазов, 2011; Попов, Понков, 2015; Wright, Siebert, 2011]. Это подтверждается данными термометрии скв. № 1 (см. рис. 4, б).

Ниже отражения 2 наблюдаются выраженные отражения 3, которые иногда (в частности, на соседних маршрутах) пересекают отражения 2 и

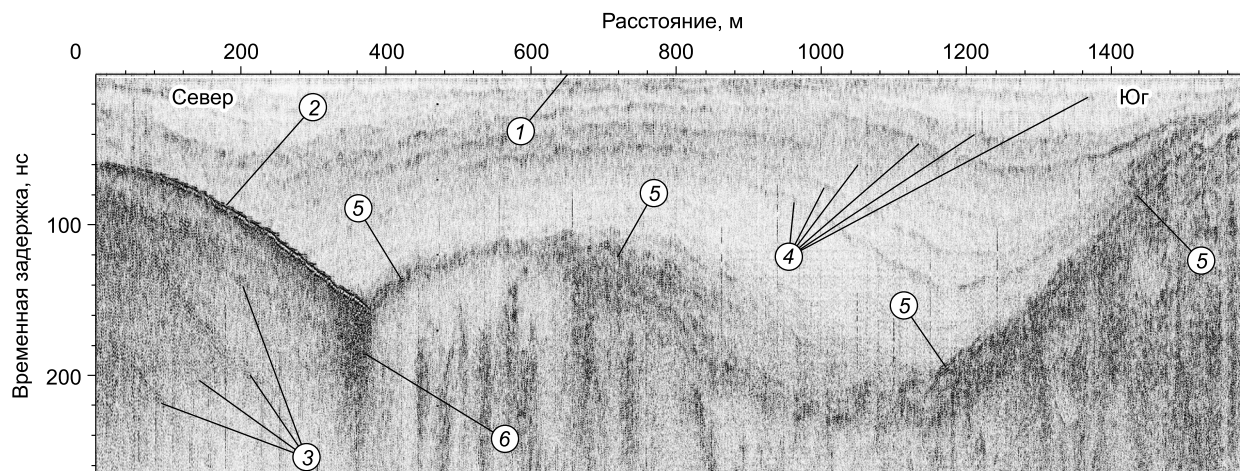


Рис. 6. Временной георадарный разрез по маршруту MR17-56а.

1 – прямая волна; 2 – отражение, связанное с наличием водного слоя и являющееся границей между снежно-фирновой толщей и атмосферным льдом; 3 – слои внутри атмосферного льда; 4 – слои, слагающие снежно-фирновую толщу; 5 – граница между снежно-фирновой толщей и атмосферным льдом; 6 – атмосферный лед, сформированный протеканием талой воды.

продолжаются в вышележащую среду достаточно интенсивными слоями 4. Данное обстоятельство означает, что отражение 2 связано с достаточно тонким слоем пресной воды. Это, в свою очередь, указывает на то, что отражение 2, вероятно, также отделяет и относительно рыхлую снежно-фирновую толщу от консолидированного ледникового льда, который, считаясь практически водонепроницаемым [Глазовский, Мачерет, 2014], является естественным препятствием для талой воды. Этот механизм достаточно подробно изложен в работе [Глазовский, Мачерет, 2014].

В 380 м от начала маршрута водоносный слой заканчивается и контрастная, ярко выраженная граница 2 переходит в размытую и более рельефную границу 5. Контрастная клиновидная область 6, расположенная на стыке границ 2 и 5, вероятно, является результатом проникновения талой воды в глубь ледника по микротрещинам или иным образом. Но, судя по характеру отражения и отсутствию искажений ниже лежащих границ, область 6 является скорее замерзшей, чем талой водой.

Таким образом, если наши рассуждения верны, то отражения 2 и 5 с высокой долей вероятности маркируют границу между снежно-фирновой толщей и ледниковым льдом. Чтобы проверить это, имеется две возможности: анализ керна и определение скорости распространения электромагнитных волн в слоях, расположенных выше и ниже этой границы.

В районе скважин № 1 и 3 обсуждаемые отражения располагаются на временных задержках 61 и 40 нс соответственно, т. е. на глубинах 7.5 и

5.0 м, при самой низкой из разумных величин диэлектрической проницаемости снежно-фирновой толщи (1.5). Однако по организационным причинам керны удалось взять лишь до глубин 405 и 625 см соответственно.

Обратимся к данным по керну № 1 (см. рис. 3, а). Согласно плотностному разрезу (см. рис. 4, а) и стратиграфическому описанию (см. рис. 5, а), на глубине 330 см начинается лед с вкраплениями кристаллов и плотностью 770 кг/м^3 (монолитный лед характеризуется плотностью более 800 кг/м^3 [Гляциологический словарь, 1984]). Выше располагается снежно-фирновая толща. Однако, исходя из интервала разумных значений диэлектрических проницаемостей, граница 2 никак не может залегать на столь малой глубине. Вероятно, ей соответствует одна из границ 4, а монолитный лед с большей плотностью располагается существенно глубже.

Обратимся к керну № 3 (см. рис. 3, в). Монолитный лед с плотностью около 900 кг/м^3 начинается с глубины 250 см. Однако ниже 370 см его плотность начинает сильно варьировать, что, видимо, связано с включениями крупнозернистого фирна, нарушающими сплошность льда. Исходя из характера волнового поля в непосредственной близости от скважины, можно предположить, что граница 5 соответствует глубине 370 см: на участке разреза, расположенного выше отражения 5, отражения отсутствуют (т. е. среда однородная), а ниже него они имеются в большом количестве (т. е. среда неоднородная). Если наше предположение верно, то диэлектрическая проницаемость снежно-фирновой толщи, расположенной выше

границы 5, составляет около 2.7, что является вполне приемлемым значением.

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СРЕДЫ, РАССЧИТАННАЯ ПО ГОДОГРАФАМ ДИФРАГИРОВАННЫХ ВОЛН

Неоднородности в теле ледника формируют дифрагированные волны. По их годографам можно построить вполне обоснованную кинематическую модель среды, что позволит пересчитать временной георадарный разрез в глубинный [Попов, 2002; Владов, Старовойтов, 2004; Мачерет, 2006; Глазовский, Мачерет, 2014]. Благодаря своей протяженности и глубине, трещины большей частью являются великолепными рефлекторами, поэтому формируют многочисленные и достаточно интенсивные дифрагированные волны с центрами, расположенными на различных глубинах [Глазовский, Мачерет, 2014; Попов, Эберляйн, 2014; Попов, Поляков, 2016]. Это, в свою очередь, позволяет набрать необходимую статистику для улучшения точности кинематической модели. Справедливости ради надо отметить, что в ряде случаев данное утверждение не совсем верно. В работе [Попов, Поляков, 2016] 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, отлича-

ются достаточно ровными, почти вертикальными стенками. Это приводит к тому, что они маркируются достаточно интенсивными дифрагированными волнами.

С целью формирования кинематической модели среды было обчислено 56 годографов дифрагированных волн, точки дифракций которых располагались выше границ 2 и 5 (см. рис. 6). В ряде случаев в одном пункте удавалось выполнить несколько измерений на различных глубинах, тогда значения в пределах одного слоя усреднялись. Характерные дифрагированные волны, используемые для расчетов, приведены на рис. 7. Положение пунктов измерений показано на рис. 8. Расчеты для верхнего слоя выполнялись исходя из предположения о ее однородности и изотропности [Попов, 2002]. Вычисления для нижележащей области производились в рамках модели слоисто-наклонной среды.

По результатам расчетов была составлена схема диэлектрической проницаемости верхнего слоя (см. рис. 8). Как следует из полученных данных, эта величина варьирует от 1.43 до 3.08. Наименьшие значения диэлектрической проницаемости соответствуют покрову с наименьшей плотностью снега [Robin, 1975]. Они наблюдаются в центральной и восточной частях района работ. По его периферии располагаются области с повышенными значениями диэлектрической проницаемости и, следовательно, с большими плотностями. Это вполне соответствует наблюдениям авторов.

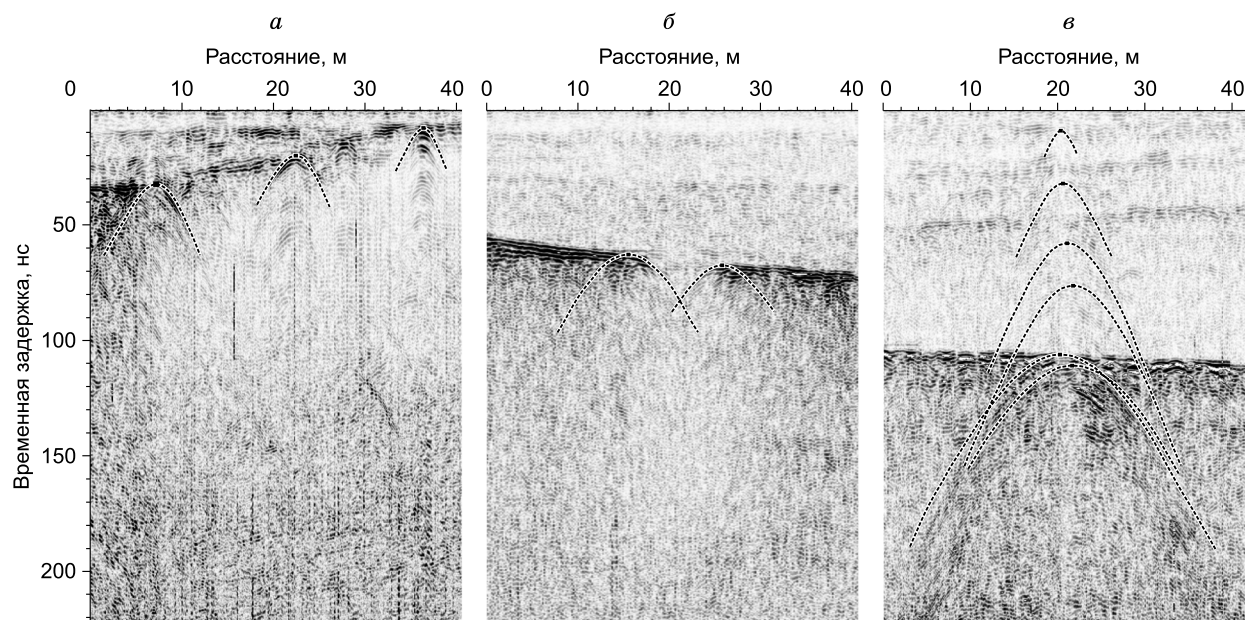


Рис. 7. Фрагменты временных георадарных разрезов с дифрагированными волнами, принятыми к расчетам диэлектрической проницаемости.

Дифрагированные волны, сформированные: *а* – от узких трещин; *б* – от краевых частей нарушения внутриледникового слоя; *в* – от глубокой и рельефной трещины. Теоретические годографы показаны пунктирными линиями.

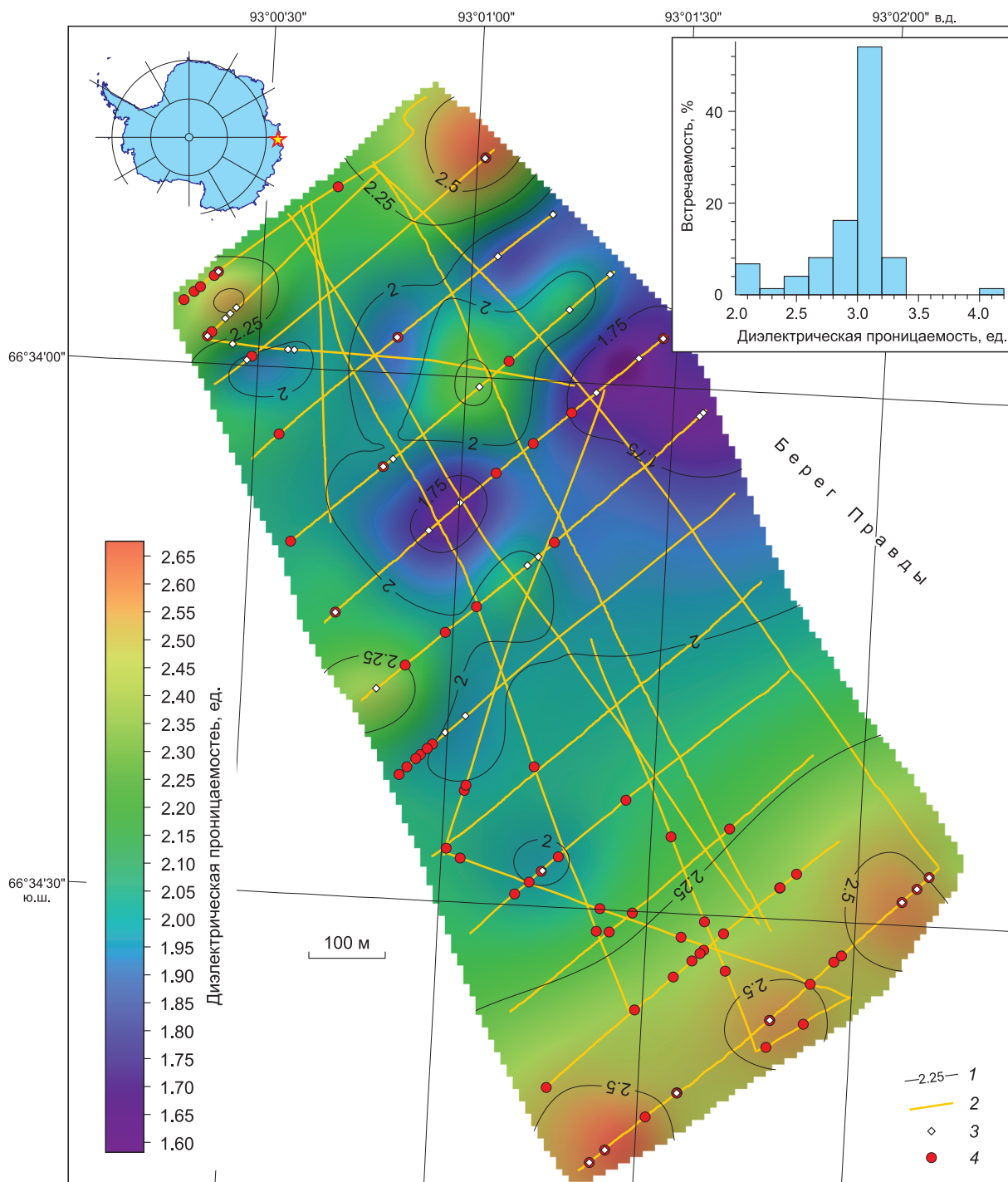


Рис. 8. Схема диэлектрической проницаемости снежно-фирновой толщи, определенной по годографам дифрагированных волн.

1 – изолинии и их значения; 2 – георадарные маршруты; 3 – положение точек дифракции годографов, принятых к обработке и расположенных в снежно-фирновой толще; 4 – положение точек дифракции годографов, принятых к обработке и расположенных в толще атмосферного льда. На врезке – гистограмма распределения диэлектрических проницаемостей толщи льда, определенных по годографам дифрагированных волн.

Оценим погрешность определения диэлектрической проницаемости ε :

$$\varepsilon = \frac{c}{2x} \sqrt{\tau^2 - \tau_0^2},$$

где x – расстояние по горизонтальной оси между точкой дифракции и некоторым значением на ветви годографа; τ_0 – задержка отраженного сигнала в точке дифракции; τ – задержка отраженного сигнала в рассматриваемой точке годографа; c – скорость распространения электромагнитных волн в вакууме [Попов, 2002].

Согласно теории ошибок, относительная погрешность $\frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon}$ такова, что

$$\frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\tau}{\tau}\right)^2}. \quad (1)$$

Оценим слагаемые, стоящие под знаком радикала в (1). Точность плановой привязки δx , согласно стояточным наблюдениям, составляет около 2 м. Характерная длина ветвей годографов около 5–7 м (см. рис. 7). Второе слагаемое в (1), т. е. квадрат относительной погрешности определения задержки, существенно меньше первого. Поэтому им можно пренебречь. Таким образом, погрешность определения диэлектрической проницаемости верхнего слоя составляет около 30 %. Ее можно уменьшить, лишь увеличив точность плановой привязки, т. е. выполнив комплекс специализированных исследований.

Учитывая столь высокие погрешности, будем считать верхний слой однородным и изотропным. В качестве эффективного значения диэлект-

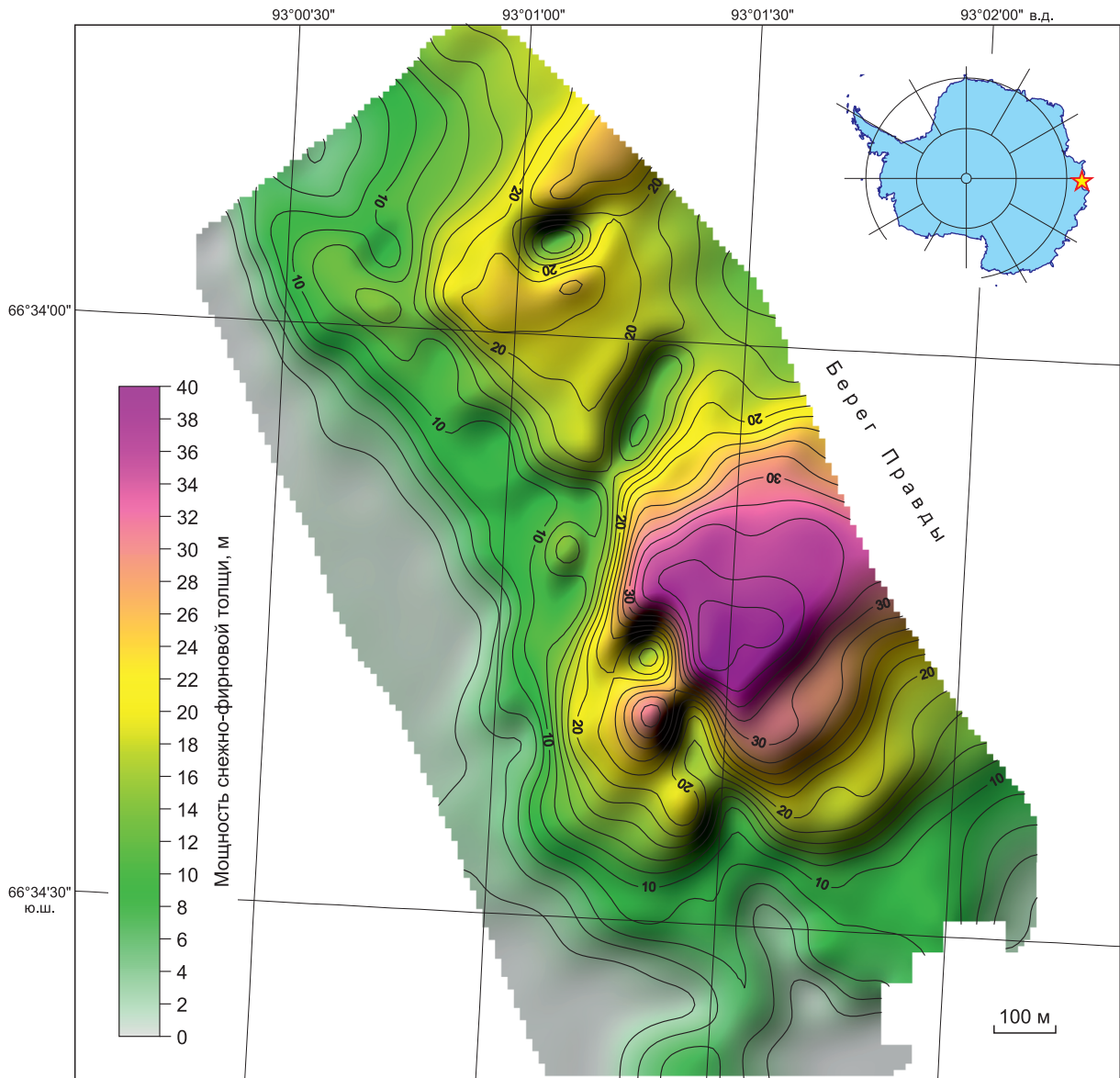


Рис. 9. Схема мощности снежно-фирновой толщи района исследований.

рической проницаемости примем усредненное значение схемы (см. рис. 8), равное 2.13 (скорость распространения электромагнитных волн 205.6 м/мкс), которое соответствует слою фирна [Мачерет, 2006].

На временных георадарных разрезах выявляется множество интенсивных дифрагированных волн, точки дифракции которых расположены ниже снежно-фирнового слоя (см. рис. 7, в). С использованием модели слоисто-наклонной среды было обчислено 77 таких годографов. Как и ранее, иногда в одном пункте удавалось выполнить несколько измерений на различных глубинах. В этом случае значения в пределах одного слоя усреднялись. Положение пунктов измерений приведено на рис. 8. На врезке к рисунку показана гистограмма распределения диэлектрических проницаемостей. Согласно результатам статистической обработки, средняя диэлектрическая проницаемость этой среды составляет 3.0 (скорость распространения электромагнитных волн равна 173.2 м/мкс). Эта величина очень близка к классическому значению для льда [Мачерет, 2006].

Таким образом, отражения 2 и 5 (см. рис. 6) маркируют границу раздела снежно-фирновой толщи и атмосферного льда. На рис. 9 приведена схема мощности снежно-фирновой толщи района исследований. Контуры карты несколько меньше территории съемки. Это связано с тем, что не на всех маршрутах удалось протрассировать границу раздела. Как следует из рис. 9, мощность снежно-фирновой толщи увеличивается в восточном направлении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сезон 60-й РАЭ в районе станции Мирный были впервые проведены масштабные комплексные гляцио-геофизические исследования, результаты которых фактически только начали публиковаться. В ходе работ выяснено, что в северной части ледника на глубине около 6 м имеется водонасыщенный слой. Авторы полагают, что он связан с наличием трещин, через которые талая вода проникает с поверхности и скапливается на границе между снежно-фирновой толщей и атмосферным льдом. Далее, в южном направлении, этот слой исчезает на расстоянии около 380 м от северной части территории съемки. Георадарные данные позволили выявить границу между снежно-фирновой толщей и атмосферным льдом. Кроме того, благодаря наличию многочисленных трещин, которые являются естественными рефлекторами и формируют дифрагированные волны, авторы смогли оценить диэлектрическую проницаемость снежно-фирновой толщи. В ходе анализа годографов выяснено, что она варьирует в преде-

лах от 1.43 до 3.08 при среднем значении 2.13. Мощность снежно-фирновой толщи составляет первые десятки метров. Аналогичным образом была определена диэлектрическая проницаемость атмосферного льда в этом районе. Она составляет 3.0.

Проектирование и строительство взлетно-посадочных полос для ледовых аэродромов, само по себе, являются весьма ответственным делом. Помимо геометрических факторов, изложенных в нормативных документах (РЭГА-94, НГЭА-92, ФАП-69, ВСН-3772 и др.), таких как ширина, длина, максимальные уклоны и шероховатости, важно знать строение приповерхностной части ледника. Ситуация существенно осложняется, если район работ расположен в прибрежной части Антарктиды, для которого характерны высокие скорости течения ледника и, как следствие, наличие приповерхностных трещин. Не менее важно знать строение ледника и для посадочных площадок, сформированных на морском льду. Ошибочное представление о толщинах ледникового покрова, наличии трещин или начале деструктивных процессов может иметь крайне пагубные и непоправимые последствия. Наиболее эффективный, надежный и своевременный способ их выявления – георадарное профилирование. Как показывает опыт авторов, этот метод позволяет оценить такие важные параметры трещин, как их конфигурацию, глубину, мощность снежного или снежно-фирнового моста над ними, а также опосредованно оценить плотность покрытия. Применительно к морскому льду этот метод позволяет достаточно оперативно выяснить его строение [Попов, Поляков, 2015], а также вовремя распознать начало разуплотнения или торошения.

В ходе полевых работ были выполнены комплексные инженерные ледоисследовательские изыскания. Столь разноплановые масштабные работы, направленные на решение одной задачи, в Антарктиде не проводились многие десятилетия.

Авторы благодарят руководство Российской антарктической экспедиции и своих коллег, сотрудников Аэродромного отряда 60-й РАЭ С.В. Вольфа, Е.Г. Грузинова, С.В. Кашина, А.И. Куцурубю, Ю.И. Нездерова, А.Л. Новикова и Н.В. Сандалюка за помощь в проведении работ. Пилотирование вертолета Ка-32 (бортовой номер РА-31021) при выполнении аэрофотосъемки осуществляли: В.В. Щербинин (командир воздушного судна), М.Ф. Бадамшин (второй пилот) и С.А. Стахальский (бортинженер) ЗАО «Авиалифт Владивосток».

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00579-А).

Литература

- Владов М.Л.** Введение в георадиолокацию / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 153 с.
- Глазовский А.Ф.** Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований / А.Ф. Глазовский, Ю.Я. Мачерет. М., ГЕОС, 2014, 527 с.
- Гляциологический словарь** / Под ред. В.М. Котлякова. Л., Гидрометеиздат, 1984, 433 с.
- Де Кервен М.Р.** О метаморфизме снега // Лед и снег / Под ред. У.Д. Кингери. М., Мир, 1966, с. 329–344.
- Лукин В.В.** Советские и российские антарктические экспедиции в цифрах и фактах (1955–2005 гг.) / В.В. Лукин, Н.А. Корнилов, Н.К. Дмитриев. СПб., АНИИИ, 2006, 456 с.
- Мачерет Ю.Я.** Радиозондирование ледников / Ю.Я. Мачерет. М., Науч. мир, 2006, 392 с.
- Патерсон У.С.Б.** Физика ледников / У.С.Б. Патерсон. М., Мир, 1984, 472 с.
- Первая континентальная экспедиция 1955–57 гг.** Общее описание // Труды Сов. антаркт. экспед., 1959, т. 1, 212 с.
- Поляков С.П., Мартьянов В.Л., Лукин В.В.** Снежно-ледовые взлетно-посадочные полосы Российской антарктической экспедиции – особенности подготовки и перспективы развития // Рос. полярные исслед., 2015, № 2 (20), с. 31–35.
- Попов С.В.** Определение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике по гиперболическим отражениям от неоднородностей // Материалы гляциол. исслед., 2002, вып. 92, с. 223–225.
- Попов С.В.** Радиолокационное зондирование неглубоких подледниковых водоемов: теоретические предпосылки и практические результаты // Лед и снег, 2010, № 4 (112), с. 5–14.
- Попов С.В., Поляков С.П.** Результаты гляциорадарных опытно-методических работ на морском льду в районе антарктической полевой базы Молодежная в сезон 60-й РАЭ (2014/15 г.) // Проблемы Арктики и Антарктики, 2015, т. 106, № 4, с. 54–62.
- 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.
- Попов С.В., Поляков С.П., Пряхин С.С., Мартьянов В.Л., Лукин В.В.** Применение гляциогеофизических методов для обеспечения безопасности логистических операций в Антарктиде // Рос. полярные исслед., 2015, т. 3, № 21, с. 29–31.
- Попов С.В., Попков А.М.** Сейсморадиолокационные исследования района подледникового озера Пионерское, Восточная Антарктида // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 107–113.
- Попов С.В., Черноглазов Ю.Б.** Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоемы // Лед и снег, 2011, № 1 (113), с. 13–24.
- 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.
- Пряхин С.С., Попов С.В., Сандалюк Н.В., Мартьянов В.Л., Поляков С.П.** Аэрофотосъемка районов российских антарктических станций Мирный и Прогресс в сезон 2014/15 г. // Лед и снег, 2015, т. 55, № 4, с. 107–113.
- Саватюгин Л.М.** Российские исследования в Антарктике / Л.М. Саватюгин, М.А. Преображенская. СПб., Гидрометеиздат, 1999, т. I, 360 с.
- Трешников А.Ф.** История открытия и исследования Антарктиды / А.Ф. Трешников. М., Географгиз, 1963, 431 с.
- GSSI Antennas Manual.** Geophysical Survey Systems, Inc., Salem, NH, MN30-903 Rev. E, 2014, 99 p.
- Robin G. de Q.** Velocity of radio waves in ice by means of interferometric technique // J. Glaciol., 1975, vol. 15, No. 73, p. 151–159.
- Wright A., Siegert M.J.** The identification and physiographical setting of Antarctic subglacial lakes: an update based on recent geophysical data for Subglacial Antarctic Aquatic Environments // Subglacial Antarctic Aquatic Environments / M. Siegert, C. Kennicutt, B. Bindshadler (eds.). Washington DC, AGU Geophys. Monograph 192, 2011, p. 9–26.

*Поступила в редакцию
8 января 2016 г.*