

ПОДЗЕМНЫЕ ЛЬДЫ И НАЛЕДИ

УДК 550.31

Опыт применения георадара для изучения строения снежно-фирновой толщи и грунта Восточной Антарктиды

© 2014 г. С.В. Попов¹, Л. Эберляйн²¹Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург;²Институт планетарной геодезии Дрезденского технического университета, Германия
spopov67@yandex.ru

Investigation of snow-firn thickness and ground in the East Antarctica by means of geophysical radar

S.V. Popov¹, L. Eberlein²¹Polar Marine Geological Survey Expedition, Sankt-Petersburg; ²Institute of Planetary Geodesy, Dresden Technical University, Germany

Статья принята к печати 11 февраля 2014 г.

Восточная Антарктида, георадарное профилирование, станция Восток, станция Прогресс.
East Antarctica, GPR profiling, Progress Station, Vostok Station.

Рассматриваются результаты георадарных исследований, проведённых в Восточной Антарктиде в летний полевой сезон 58-й РАЭ (2012/13 гг.). Цель этих работ – изучение строения снежно-фирновой толщи и грунта районов подледникового озера Восток, трассы следования санно-гусеничного похода «Восток – Прогресс» и холмов Ларсеманн (станция Прогресс). Использовался промышленный георадар GSSI SIR10B (Geophysical Survey Systems, Inc., USA) с антенной «5106» и частотой зондирующих импульсов 200 МГц. Выявлены возможности метода георадиолокации для решения гляциологических и геологических задач. Разработаны методические рекомендации для научной и производственной работы с георадаром в условиях Восточной Антарктиды. Получены данные о строении снежно-фирновой толщи в районе станций Восток и Прогресс, на участках маршрутов в центральной и северной частях акватории озера Восток, а также по трассе следования санно-гусеничного похода «Восток – Прогресс». Кроме того, в районе станции Прогресс получены данные о строении грунта.

Results of field investigations of snow-and-firn thickness and ground structures performed with the use of geophysical radar GPR (Ground-Penetrating Radar) are discussed in the paper. The works were done during the austral summer season of 2012–2013 (58th Russian Antarctic Expedition) in the Eastern Antarctica and mainly concentrated in the vicinity of the Lake Vostok, between the Russian stations Vostok and Progress (the Larsemann Hills). Methodological recommendations on using the GPR under conditions of the Eastern Antarctica were developed.

Введение

В летний полевой сезон участниками 58-й Российской антарктической экспедиции (2012/13 гг.) проведено, насколько можно судить по отсутствию публикаций, новое для отечественных антарктических работ исследование – георадарное профилирование – радиолокационный метод изучения строения верхней (приповерхностной) части геологического разреза, сложенного снежно-фирновой толщей для ледников или грунтом. Работы вели с помощью приборов, излучающих короткие и высокочастотные импульсы, что позволяло получить гораздо большее разрешение по глубине, чем при использовании ледовых локаторов. С сожалением отметим, что новым этот метод считается лишь для отечественных исследований. На протяжении последних, по крайней мере, пятнадцати лет он активно применялся нашими зарубежными коллегами для решения гляциологических задач в Антарктиде, Арктике и на горных ледниках. Этот метод доказал свою эффективность, о

чём свидетельствует большое число публикаций, например [9–15, 17, 18]. Георадиолокация широко используется и в нашей стране, и за рубежом для изучения верхних частей геологических разрезов, а МГУ имени М.В. Ломоносова и СПбГУ (и не только они) готовят специалистов по этому профилю. Каждый год по данной тематике проводятся специализированные международные геофизические симпозиумы и конференции, и остаётся только сожалеть, что этот перспективный геофизический метод до сих пор не использовался в отечественных антарктических исследованиях.

Георадарные работы сезона 58-й РАЭ носили опытно-методический характер. Их основные цели – выяснение возможностей данного метода применительно к научным и производственным задачам в Антарктиде, а также получение опыта работы с новыми приборами в суровых климатических условиях внутренних районов континента. Исследования вели по двум направлениям: 1) изучение строения приповерхностной части

ледника; 2) исследование грунта. Ледник изучался в районе станций Восток и Прогресс, а также в санно-гусеничном походе «Восток – Прогресс». Строение грунта (верхняя часть геологического разреза) исследовалось на холмах Ларсеманн (район станции Прогресс и полевых баз Прогресс-1 и Прогресс-3).

Работы вели промышленным моноимпульсным георадаром GSSI SIR10B (Geophysical Survey Systems, Inc.) производства США с антенной «5106» (частота зондирования 200 МГц), который любезно предоставили нам сотрудники Национального института геофизики и вулканологии Рима (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV). Радиолокационные данные регистрировали с частотой 17,75 Гц. Отражённый сигнал квантовали на 16-тиразрядную плату АЦП (аналого-цифровые преобразователи). В работах, выполненных на холмах Ларсеманн, в ряде случаев использовалась аналогичная аппаратура, имеющаяся в распоряжении сотрудников РАЭ: георадар GSSI SIR-3000 с антенной «5103» (частота зондирования 400 МГц). Плановая привязка велась с использованием приёмоиндикатора Garmin GPS MAP 60. Регистрацию выполняли с частотой от 0,2 до 1 Гц с последующим приведением значений плановых координат для каждого пункта радиолокационного зондирования путём линейной интерполяции. Точность плановой привязки, согласно результатам стояночных наблюдений (наблюдений в течение длительного периода с целью получения представительного набора данных для последующей статистической обработки), а также специально выполненных работ на станции Прогресс, составила менее 2 м.

Для используемых георадаров регистрация возможна с различным периодом дискретизации. Программно устанавливаются два параметра: окно регистрации и количество дискретов оцифровки отражённого сигнала платой АЦП. Период дискретизации – это отношение первого параметра ко второму. Окно регистрации выбирается исходя из поставленных задач и определяется требуемой глубиной зондирования. Количество дискретов оцифровки может быть 512, 1024 или 2048. Регистрация ведётся в формате GSSI RADAN GPR Data (расширение файлов *.dzt) с последующим преобразованием в общепринятый формат SEG-Y для последующей обработки. Важнейший параметр – вертикальное разрешение георадара по глубине. От него зависит детальность выполняемых измерений. В случае снежно-фирновой толщи для гео-

радара с частотой 200 МГц оно составляет около 0,5 м, а с частотой 400 МГц – около 25 см.

Исследования в районе станции Восток

Методика работ. Работы выполняли преимущественно в первой половине января 2013 г. В это время дневная температура окружающего воздуха в районе исследований относительно высокая, т.е. практически не опускается ниже -35°C . Данное обстоятельство крайне важно, поскольку методически работы были организованы так, что вся аппаратура находилась на открытом воздухе. Согласно техническому описанию, антенны и блок управления GSSI SIR10B ещё могли функционировать при такой температуре, однако жидкокристаллический монитор требовал дополнительного обогрева. Измерения проводились с использованием снегохода (рис. 1, а), за исключением отдельных маршрутов, пройденных с помощью ручного передвижения аппаратуры (см. рис. 1, б). Исходя из поставленных задач работы выполнялись и на геодезическом, и на гляциологическом полигонах, расположенных недалеко от станции Восток. Кроме того, 10 января 2013 г. проведены однодневные рекогносцировочные исследования, направленные на изучение строения волнообразных снежных гряд – мегадюн, расположенных приблизительно в 30 км от станции Восток (рис. 2, а). Одними из первых подобные структуры в Антарктиде обнаружили и описали наши итальянские коллеги [17].

Комплекс работ предусматривал: геодезические наблюдения; георадарное профилирование; установку гляциологических вех для измерений при последующих посещениях данного района. Геодезические наблюдения вели сотрудники Дрезденского технического университета (Technische Universität Dresden, Institut für Planetare Geodäsie) и ОАО «Аэрогеодезия». Они же выставляли и гляциологические вехи. Общая протяжённость маршрутов, при продолжительности работ около 9 часов, составила 83 км. Георадарное профилирование выполнялось на подъезде к участку работ и при возвращении на станцию Восток (см. рис. 2, а). В районе мегадюн проведена площадная съёмка. Это – три маршрута, ориентированные ортогонально мегадюнам и имеющие протяжённость 2 км каждый, и два маршрута той же протяжённости, пройденные параллельно этим структурам (см. рис. 2, а). Работы планировались с использованием данных RADARSAT [19]. Для работ в районе мегадюн выбрано окно регистра-

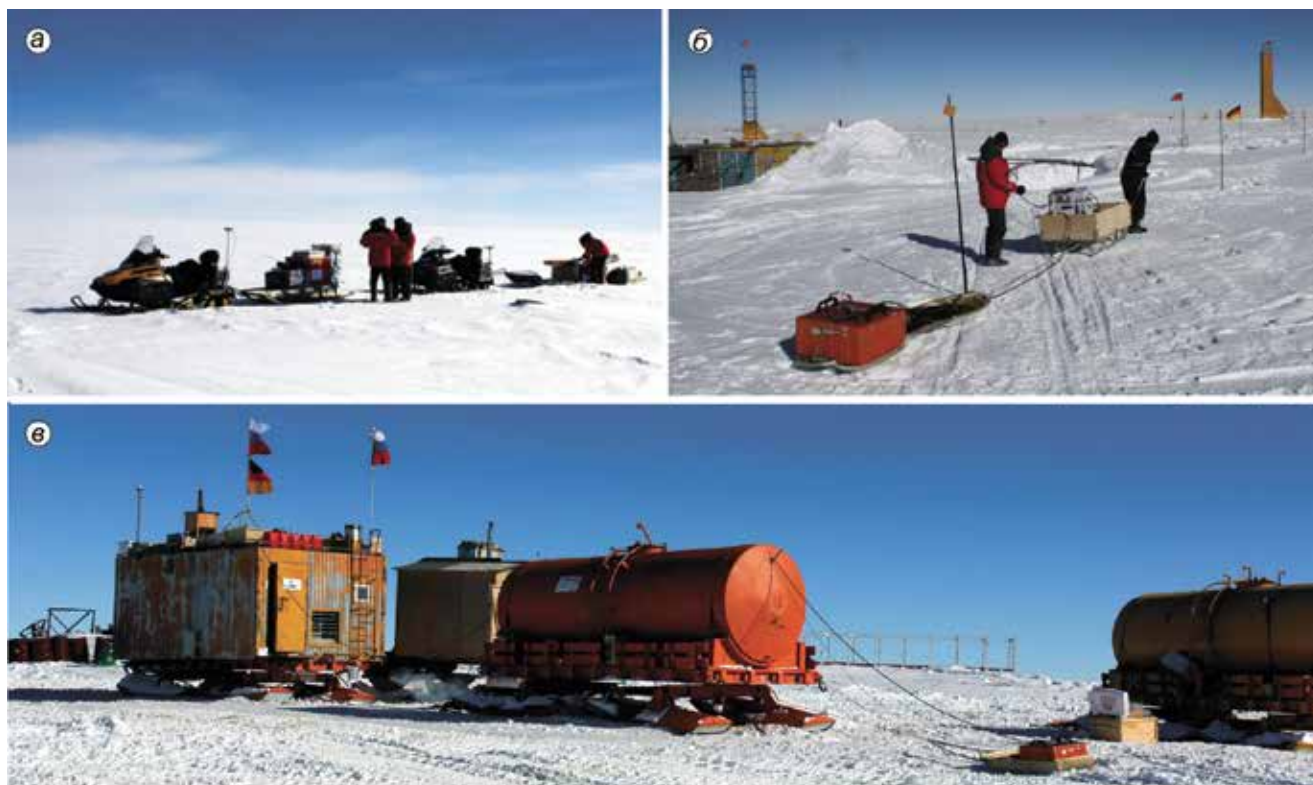


Рис. 1. Георадарные исследования:

a – в районе мегадюны; *б* – на станции Восток; *в* – в санно-гусеничном походе «Восток – Прогресс»

Fig. 1. GPR investigations

a – scientific traverse to the megadune area; *b* – measurements at Vostok Station; *c* – measurements in «Vostok – Progress» logistic traverse

ции равное 265,20 нс и 1024 дискретов оцифровки отражённых сигналов. Таким образом, период дискретизации составил около 259 пс.

Скоростная модель среды. Основной вопрос обработки и последующей интерпретации данных георадарного профилирования состоит в выборе скоростной модели, позволяющей пересчитывать временной георадарный разрез в глубинный. К сожалению, при выполнении работ невозможно было провести специальные исследования, направленные на измерение скоростных характеристик снежной толщи, в частности наклонные зондирования. Поэтому авторы прибегли к эмпирическим оценкам. Имеющиеся модели, полученные для диэлектрической проницаемости сухого снега ϵ_s (что соответствует условиям центральных районов Антарктиды) в зависимости от его плотности ρ_s , достаточно близки между собой [4]. Для расчётов использовано соотношение, полученное Г. Робинсом [20]:

$$\epsilon_s = (1 + 0,848\rho_s)^2,$$

что соответствует

$$v_s = c/(1 + 0,848\rho_s), \quad (1)$$

где c – скорость распространения света в вакууме равная 300 м/мкс.

Обзор опубликованных моделей для ϵ_s [4] показывает, что различия между ними обусловлены в основном коэффициентом при линейном члене в формуле (1). При этом разброс значений составляет менее 0,4%. Ближайшая к району исследований скважина, для которой известно распределение плотности снега по глубине, – скважина 5Г, расположенная на станции Восток (т.е. примерно в 30 км от участка работ). На рис. 3 дан профиль плотности $\rho_s(T)$ до глубины 40 м по данным, опубликованным в работах [1, 16]. Плотность приповерхностного слоя снега равная 0,33 г/см³ взята из работ [6, 16]. Эти данные достаточно точно ($R^2 = 0,98$) аппроксимируются линейной зависимостью

$$\rho_s(T) = 0,34313 + 0,00749T. \quad (2)$$

Как следует из рис. 3, в приповерхностном снежном слое скорость распространения электромагнитных волн изменяется достаточ-

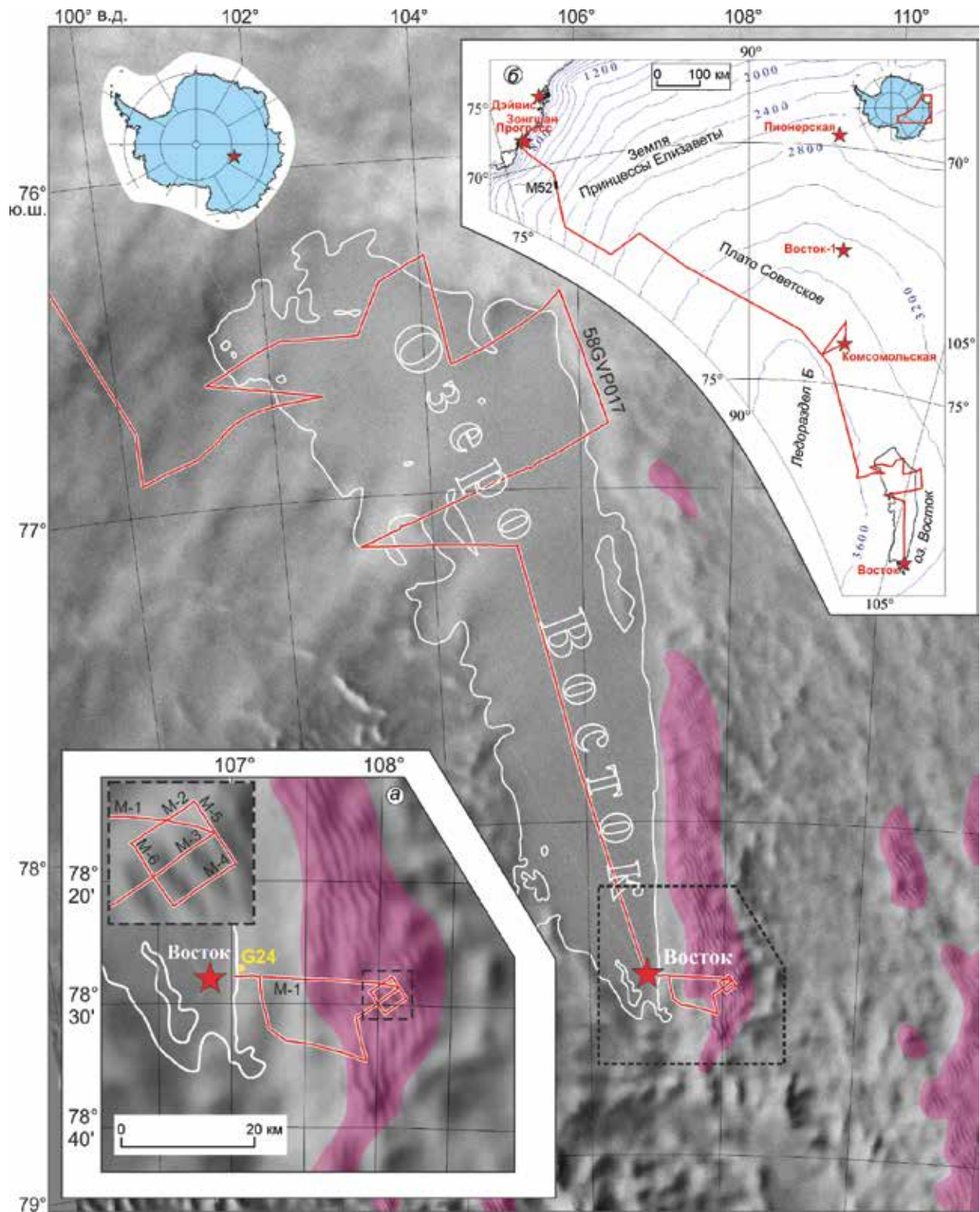


Рис. 2. Схема расположения георадарного профилирования в районе подледникового оз. Восток и в санно-гусеничном походе «Восток – Прогресс».

Красная линия – положение георадарных маршрутов; береговая линия оз. Восток показана белым цветом; малиновым – районы развития мегадюн; жёлтая точка – гляциологический пункт G24; спутниковый снимок RADARSAT приведён по материалам [19]

Fig. 2. Location of GPR profiles in the Lake Vostok area and between Vostok and Progress stations.

Red line is the GPR profiles; Lake Vostok coastline is depicted by white; megadune region is depicted by magenta area; point of the glaciological measurements G24 is marked by yellow circle; RADARSAT image is depicted on [19]

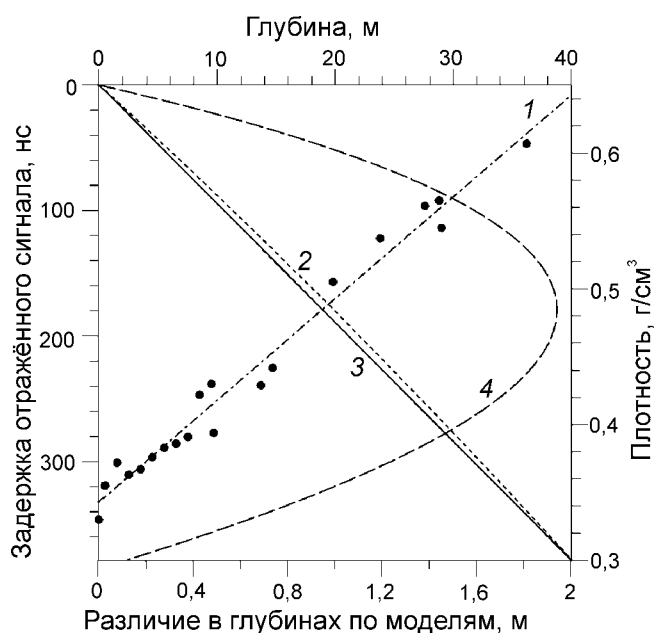


Рис. 3. Скоростная модель верхней части снежного покрова.

Точками показаны результаты измерений плотности ядра скважины 5Г на станции Восток по [1, 16]; 1 – аппроксимация данных по плотности снега линейным трендом; 2 – модель, соответствующая постоянной скорости в снежном покрове; 3 – модель, соответствующая скорости в снежном покрове в зависимости от его плотности; 4 – различие в определении глубин по двум перечисленным моделям

Fig. 3. Electromagnetic velocity model of the upper part the 5G borehole site snow section.

Snow density on [1, 16] are depicted by dots; 1 – approximation the density data by linear trend; 2 – velocity model related to the constant velocity in the snow; 3 – density-depended velocity model; 4 – depth differences counted on the both of the models

но быстро (от поверхности до глубины 40 м она уменьшается почти на 20%), поэтому в качестве скоростной модели целесообразно избрать не постоянную среднюю величину, а переменную, функционально зависящую от плотности, а следовательно, и от глубины. Подставив зависимость (2) в (1), после преобразований получим соотношение для скорости распространения электромагнитных волн в среде:

$$v_s(T) = c / (1,29097 + 0,00635 T)$$

или

$$\varepsilon_s(T) = (1,29097 + 0,00635 T)^{0,5}. \quad (3)$$

На рис. 3 приведены скоростная модель, рассчитанная по формулам (3), а также её сравнение с моделью постоянной скорости ($\bar{v}_s = 211,28$ м/мкс; $\bar{\varepsilon}_s = 2,02$), равной средней величине по разрезу до глубины 40 м.

Морфология снежных слоёв. Насколько можно судить по полученным данным, в районе мегадюн, до глубины приблизительно 30 м, снежная толща имеет выраженное слоистое строение (рис. 4 а, б). На временных георадарных разрезах установлено восемь контрастных слоёв. По маршрутам, расположенным ортогонально этим структурам, они характеризуются волнообразной формой. Их амплитуда непостоянна и в районе съёмки составляет около 5–7 м (рис. 5). Характерная особенность района мегадюн – видимое смещение волн по глубине относительно друг друга, причём с глубиной оно явно нарастает. Смещение нарастает в восточном направлении, и на глубине около 20 м оно составляет уже около 1 км (см. рис. 4, а и рис. 5). На глубине приблизительно 17 м зафиксирована видимая зона нарушений мощностью до 5 м. Слои в ней сильно деформированы, поэтому проследить их по маршруту невозможно (см. рис. 4, а и рис. 5). Ниже зоны нарушений также располагаются слои сходной волнообразной конфигурации, при этом смещение волн относительно приповерхностных увеличивается в ещё большей степени. Поскольку объём проведённых работ был незначителен и носил рекогносцировочный характер, ответить на вопрос, чем именно вызвано наличие такой зоны, без дополнительных исследований трудно, поэтому мы ограничиваемся лишь констатацией данного факта.

Ранее выполненные измерения в пункте G24 ([6], см. рис. 1), который расположен в 5 км к востоку от станции Восток (см. рис. 2, а), показали, что удельная аккумуляция снежного покрова составляет 7 см/год [6]. Таким образом, событие, сформировавшее зону нарушений, могло произойти приблизительно 215 лет назад. Отметим, что за пределами района мегадюн, в частности по направлению к станции Восток, зона нарушений не прослеживается. Отсутствует там и видимое смещение волн мегадюн (см. рис. 4, б). Всё это означает, что характер снегонакопления в обсуждаемом районе отличается, в частности, от характера снегонакопления в районе станции Восток. Анализ конфигурации снежных слоёв (см. рис. 5) позволяет предположить, что на изученном участке мегадюны характеризуются приблизительно одинаковой длиной волны. Это подтверждают результаты спектрального анализа конфигурации выявленных восьми слоёв, за исключением тех, которые представлены очень короткими фрагментами.

Согласно теории обработки сигналов [3], использование окон разной конфигурации (в зави-

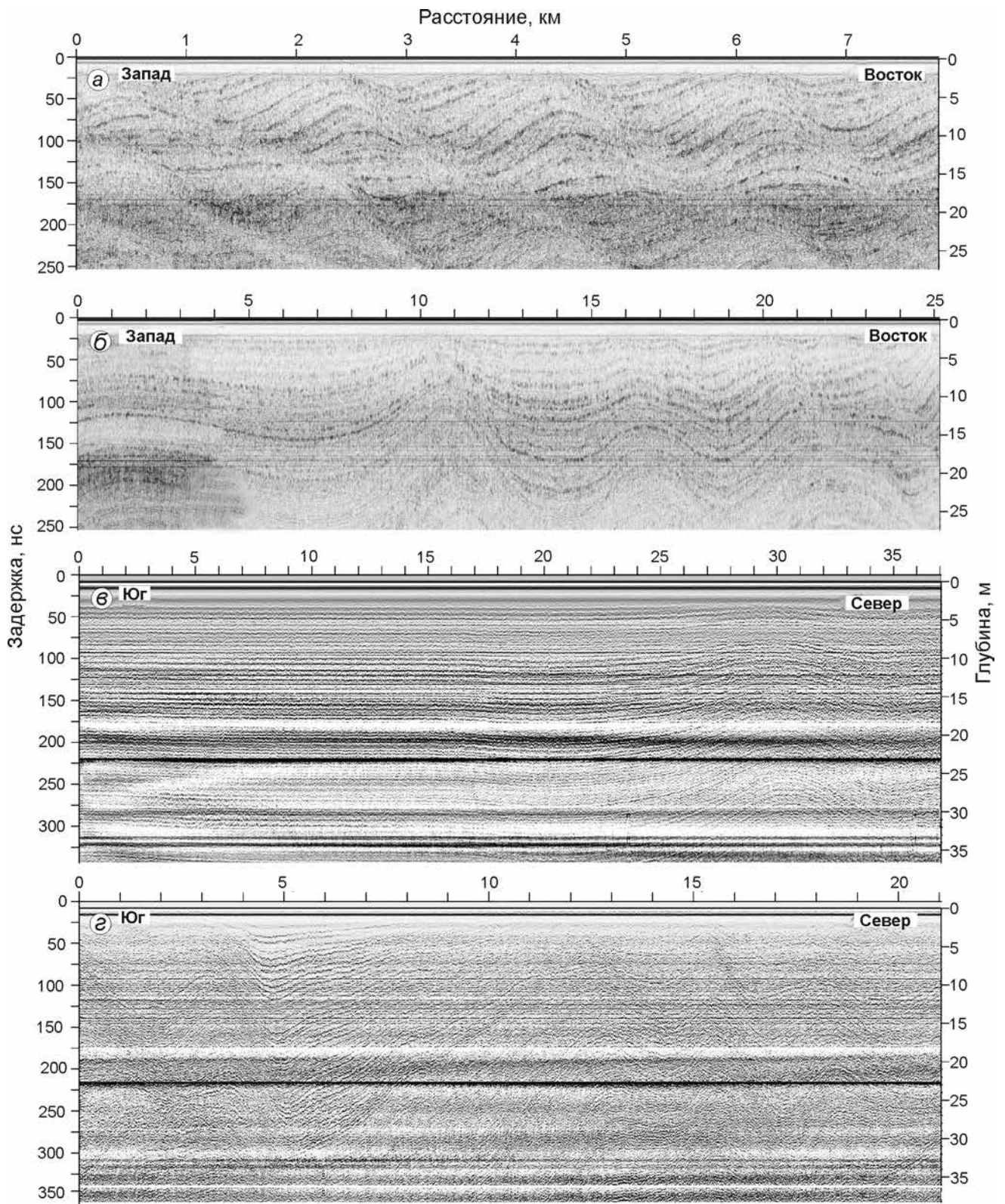


Рис. 4. Временные георадарные разрезы по маршрутам М-3 (а) и М-1 (б) в районе станции Восток, а также 58GVP017 (в) и М52 (г) трассы следования санно-гусеничного похода «Восток – Прогресс».

Расположение маршрутов см. на рис. 2

Fig. 4. GPR time-sections on M-3 (a), M-1 (б), 58GVP017 (в) and M52 (г).

See location in Fig. 2

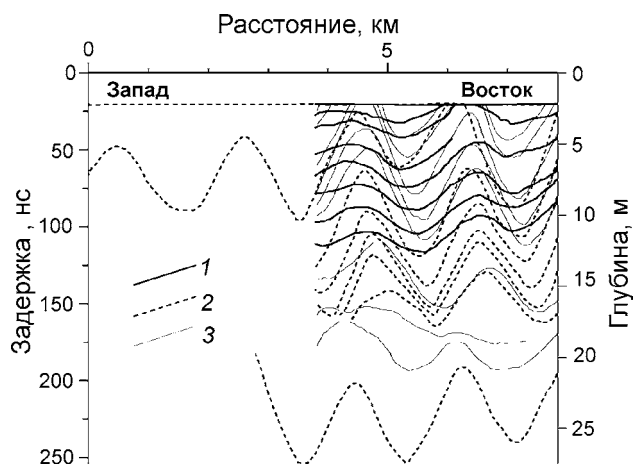


Рис. 5. Разрезы снежного покрова по маршрутам, выполненным в районе мегадюн.

1 – слои по маршруту М-2; 2 – слои по маршруту М-3; 3 – слои по маршруту М-4. Расположение маршрутов см. на рис. 2

Fig. 5. Snow sections on the profiles collected in the megadune area.

1 – layers along M-2 profile; 2 – layers along M-3 profile; 3 – layers along M-4 profile. See location in Fig. 2

симости от решаемых задач и входных данных) позволяет лучше выявлять слабые спектральные составляющие на фоне более мощных на соседних частотах. Это связано с тем, что мы применяем преобразование Фурье к цифровым массивам конечной длины. В результате происходит так называемая «утечка спектра», которая выражается в том, что спектральные составляющие, не кратные частоте дискретизации, «растекаются» по спектру, изменяя его. Для уменьшения этого эффекта входные данные были взвешены окном Ханна. Использование именно этого окна позволило лучше выявить низкочастотные составляющие спектра. Для сравнения использовались также окна Хамминга, Наттала, Кайзера–Бесселя и др. Все они, по сравнению с использованным нами окном, имеют большую ширину главного лепестка спектра окна, что ухудшает разрешающую способность преобразования Фурье, важную для нас в низкочастотной области. Фрагменты спектра формы слоёв по маршрутам показывают практически полное соответствие пиковых значений в низкочастотной области. Таким образом, региональная составляющая соответствует $0,70 \pm 0,03$, $0,65 \pm 0,08$ и $0,54 \pm 0,03$ Гц для маршрутов М-2, М-3 и М-4 соответственно (см. рис. 2, а). Указанные значения отвечают длинам волн $1,43 \pm 0,06$, $1,53 \pm 0,18$ и $1,84 \pm 0,11$ км и определяют, пользуясь морфометрической терминологией, так называемый *ритм рельефа*. В среднем он составляет 1,6 км.

Исследования в районе подледникового озера Восток и по маршруту «Восток – Прогресс»

Район подледникового озера Восток. Значительный объём работ по георадарному профилированию в этом районе выполнен параллельно с маршрутами геодезической программы Дрезденского технического университета. Общая протяжённость маршрутов в пределах листа схемы (см. рис. 2) составила около 696 км. Блок управления георадаром помещался в жилом балке, а антенна, соединённая с блоком 30-метровым кабелем, двигалась за топливной ёмкостью. Расстояние между антенной и ёмкостью составляло около 8 м, что предотвращало появление интенсивной волны, отражённой от неё. Антенну крепили на специально изготовленных деревянных санях, которые двигались внутри колеи балка и ёмкости, что препятствовало их переворачиванию (см. рис. 1, в). Отражённый сигнал регистрировался в окне 343,99 нс при 1024 дискретах оцифровки. Таким образом, период дискретизации составил около 336 пс.

Согласно предварительным результатам, снежно-фирновая толща в районе акватории оз. Восток характеризуется плоскопараллельным залеганием слоёв с заглублением в северном направлении. Исключение составляют области, прилегающие к береговой линии, где слои сильно деформируются. Кроме того, на маршруте 58GVP017, расположенном за пределами акватории озера на восточном берегу (см. рис. 2), обнаружено утончение слоёв. Временной георадарный разрез приведён на рис. 4, в. Геодезические данные показывают, что подъём слоёв совпадает с локальным волнообразным повышением дневной поверхности. Возможно, он представляет собой фрагмент мегадюн, развитых вдоль восточного берега оз. Восток (см. рис. 2). Высота волны на дневной поверхности составляет 4,3 м. Соответствующая ей волна на временном георадарном разрезе характеризуется амплитудой около 8 м (см. рис. 4, в). Заглубление слоёв снежно-фирновой толщи в северном направлении в региональном масштабе согласуется с ростом удельной аккумуляции снега в том же направлении [6, 16]. Аналогичная ситуация наблюдается при анализе слоистости ледника, установленной по данным выполненного ранее радиолокационного профилирования: слои в генеральном плане также заглубляются в северном направлении – в среднем от 210 м (приповерхностные) до 620 м (придонные) [5].

Санно-гусеничный поход по маршруту «Восток – Прогресс». Георадарные исследования также вы-

полнялись по геодезическим маршрутам и имели попутный характер. Методически они были организованы, как и на оз. Восток. Общая протяжённость геодезических маршрутов между северной частью озера и станцией Прогресс (см. рис. 2, б) составила около 1490 км, при этом георадарное профилирование сопровождало значительную часть маршрута. Работы выполнялись с 1 по 11 февраля 2013 г. Согласно метеорологическим наблюдениям, в течение этого периода температура окружающего воздуха во внутренних районах Восточной Антарктиды (особенно в районе станции Комсомольская) может опускаться ниже -50°C . Именно это вызывало основное беспокойство, поскольку при таких условиях пластмассовый корпус антенны и резиновый соединительный кабель георадара становятся хрупкими и могут выйти из строя. Тем не менее, аппаратура продемонстрировала высокую надёжность и переход протяжённостью в 1,5 тыс. км в составе санно-гусеничного похода прошёл без осложнений.

Согласно предварительным результатам, снежно-фирновая толща на участке исследований (см. рис. 2, б) характеризуется слоистым строением. Слои располагаются преимущественно субгоризонтально. Исключение составлял участок трассы от 200-го км до станции Прогресс вплоть до самой станции. Здесь, согласно геодезическим данным, отмечаются значительные вариации высот дневной поверхности, местами превышающие 20 м.

Это отразилось и в строении снежно-фирновой толщи. В качестве примера на рис. 4, з приведён временной георадарный разрез по маршруту М-52; его положение дано на врезке б рис. 2. На разрезе отчётливо наблюдаются согласно залегающие рельефные слои, амплитуда которых в основном превышает 7 м. Отметим, что в большинстве случаев между конфигурацией соседних слоёв имеется видимая корреляция. Однако иногда (см. рис. 4, з), в том числе и на участках профилей, ориентированных вдоль линии тока ледника, она нарушается. Данное обстоятельство может свидетельствовать о неравномерном снегонакоплении.

Исследования в районе станции Прогресс

В районе станции Прогресс, а также в районе полевых баз Прогресс-1 и Прогресс-3 георадарные опытно-методические работы выполнялись для изучения строения ледника, приповерхностной части грунта и придонной части водоёмов (рис. 6). Ввиду методических особенностей данного вида работ транспортная техника не применялась. Общая протяжённость маршрутов – около 40 км. Исследования выполняли с 14 февраля по 5 марта 2013 г. Сначала использовались две антенны, обеспечивающие частоту зондирования и 200 МГц (антенна «5106»), и 400 МГц (антенна «5103»). Однако после первых тестирований и последующего сравнения данных, полученных вдоль одних и тех же маршрутов, стало понятно, что предпочте-

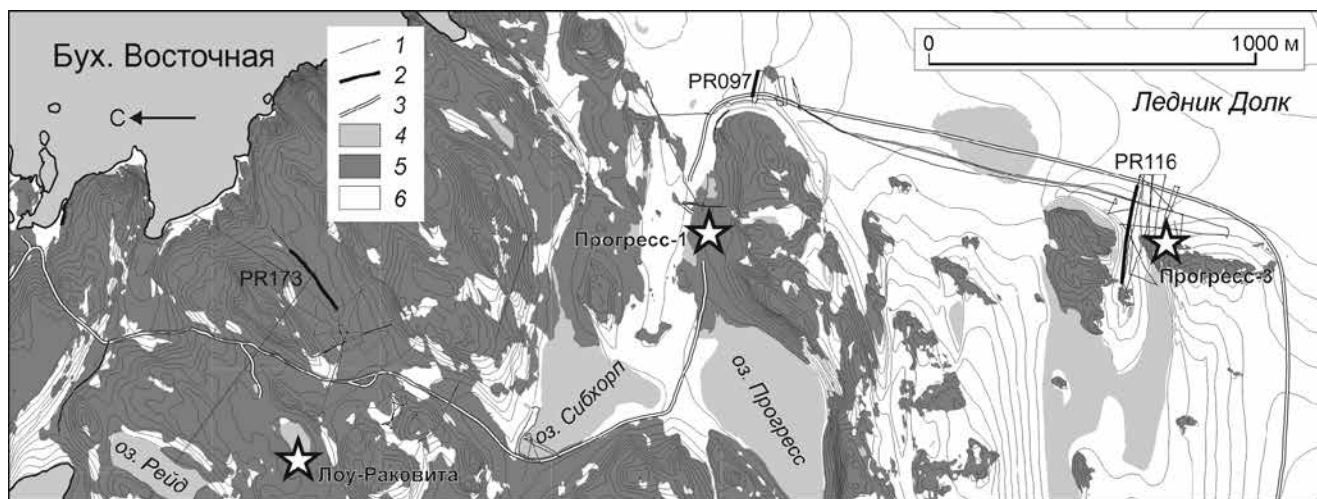


Рис. 6. Схема расположения георадарного профилирования в районе холмов Ларсеманн (станция Прогресс). 1 – георадарные маршруты; 2 – маршруты, обсуждаемые в настоящей работе; 3 – дорога, соединяющая станцию Прогресс и аэродром; 4 – озёра и заливы; 5 – горные выходы; 6 – снежники и ледники

Fig. 6. Location of GPR profiles in the Larsemann Hills area (Progress Station). 1 – GPR profiles; 2 – profiles, discussed in this paper; 3 – road between Progress Station and snow run-way; 4 – lakes and bays; 5 – outcrops; 6 – areas covered by snow and ice

ние следует отдать антенне «5106». Таким образом, большая часть исследований выполнена путём зондирования с частотой именно 200 МГц. Окно регистрации отражённого сигнала зависело от решаемых задач и изменялось от 75 до 400 нс. Количество дискретов оцифровки составляло 1024 для узких окон и 2048 — для широких.

Одна из решаемых нами задач — выявление полостей и нарушений (трещин) в леднике. Эффективность применения георадара для её решения общеизвестна (например, [15]). Помимо научного интереса, эта задача имеет сугубо практическое значение. Зоны трещин есть на всех прибрежных станциях, и их размер может превышать несколько метров ([8], см. рис. 6), поэтому они потенциально опасны и для людей, и для техники. Так, при пересечении 20 октября 2008 г. зоны трещин, расположенной на седьмом километре трассы следования санно-гусеничного похода «Мирный — Восток», произошёл несчастный случай. Трещины обнаружены и в районе станции Прогресс, при подъёме на купол для дальнейшего следования на станцию Восток. В частности, при выполнении наземных радиолокационных исследований в сезон 56-й РАЭ (2010/11 г.) в трещину провалилась одна из лыж топливной ёмкости. Таким образом, выявление и картирование трещин — важнейшая задача, обеспечивающая безопасность выполнения работ и жизнедеятельности в Антарктиде.

По ряду организационных причин работы ограничивались зоной залеченных трещин, расположенной вблизи полевой базы Прогресс-1 (см. рис. 6). Снежный покров там практически отсутствует, и трещины визуально выделяются как протяжённые линейные структуры. Их ширина в данном районе не превышает 0,5 м. На временном георадарном разрезе (рис. 7, а) по маршруту, расположенному ортогонально простиранию трещин, контрастно выделяются сформированные ими дифрагированные волны 1 (цифры даны в кружках). Поскольку снежно-фирновая толща отсутствовала, пересчёт временного разреза в глубинный (правая вертикальная ось) выполнялся исходя из $\varepsilon_{ice} = 3,17$ [2, 4], что соответствует $v_{ice} = 168,5$ м/мкс.

Другой район работ находился в непосредственной близости от полевой базы Прогресс-3 (см. рис. 6). Предполагалось, что мощность ледника здесь относительно небольшая, а придонная часть, вероятнее всего, сложена моренным материалом, поэтому разрез ледника интересен как с позиции гляциологии, так и с позиции геоло-

гии. Временной георадарный разрез по маршруту PR116 представлен на рис. 7, б. Он отличается большим количеством рефлекторов, которые, судя по форме дифрагированных волн, располагаются внутри диэлектрически различных слоёв или границ раздела сред. Для полного понимания волновой картины данных пока недостаточно. Чтобы получить скоростные характеристики разреза и истинное геометрическое положение границ раздела сред, целесообразно выполнить наклонное зондирование. Тем не менее, на качественном уровне можно предположить, что зона 2, представленная совокупностью рефлекторов, может служить границей раздела снежно-фирновой толщи и атмосферного льда. Теоретически она может быть также сформирована каменным материалом, представляющим собой продукт экзарации, захваченный и транспортируемый ледником. В таком случае, вероятнее всего, эта группа рефлекторов характеризовалась бы значительным количеством дифрагированных волн, которые отсутствуют на представленном временном разрезе.

Ниже расположены отражения от подлёдной поверхности 3. Судя по обилию дифрагированных волн, она достаточно шероховатая. Если наше предположение относительно генезиса границы 2 правильное, то можно оценить среднюю скорость распространения электромагнитных волн в этом леднике. В районе 60 м от начала маршрута задержка отражённого сигнала от границы раздела «снег—лёд» составляет около 69 нс, а от подлёдной поверхности — около 273 нс. Если принять, что скорость в снеге в районе полевой базы Прогресс-3 аналогична скорости в районе оз. Восток ($\bar{v}_s = 211,28$ м/мкс), а в атмосферном льду $v_{ice} = 168,5$ м/мкс [2, 4], то средняя скорость составит $\bar{v} = 175,5$ м/мкс, что вполне соответствует районам шельфовых ледников, где доля снежно-фирновой толщи для ледника значительно больше, чем во внутренних районах Антарктиды [2, 4]. На основе названной скорости и сформирована правая вертикальная ось глубин (см. рис. 7, б).

Придонная часть временного георадарного разреза изобилует дифрагированными волнами 4. Можно предположить, что они сформированы включениями моренного материала. Помимо 4, в придонной части разреза имеются интенсивные отражения 5. Так как явно выраженные дифрагированные волны отсутствуют, вероятнее всего они сформированы гладкой поверхностью. В качестве рабочей гипотезы можно предположить, что это — незначительный по мощности слой влажного песка

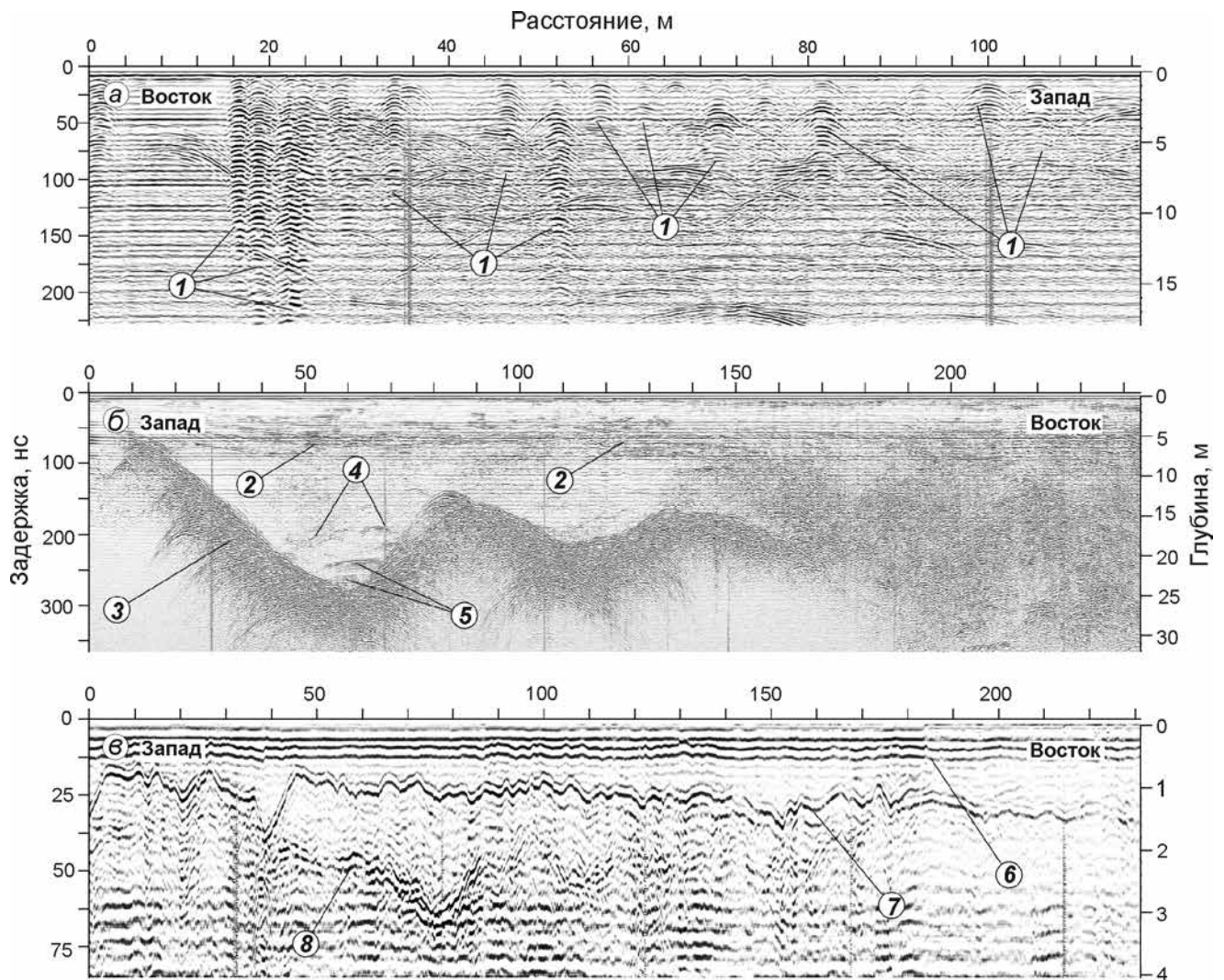


Рис. 7. Временные георадарные разрезы по маршрутам PR097 (а), PR116 (б) и PR173 (в) в районе холмов Ларсеманн. Отражения, сформированные: 1 – зоной трещин; 2 – границей раздела снежно-фирновой толщи и атмосферного льда; 3 – подлёдной поверхностью; 4 – включениями моренного материала; 5 – слоем влажного песка; 6 – границей раздела сухого и влажного песка; 7 – предположительно водоносным горизонтом; 8 – предположительно коренными породами скального основания.

Расположение маршрутов см. на рис. 6

Fig. 7. GPR time-sections on PR097 (a), PR116 (b) and PR173 (c) profiles collected in the Larsemann Hills area. Reflectors from: 1 – crevasses in ice; 2 – boundary between snow-firn and meteoric ice; 3 – sub-ice surface; 4 – moraine inclusions; 5 – wet sand; 6 – boundary between relative dry and wet sand; 7 – watery sediments (probably); 8 – rock bed (probably). See location in Fig. 6

или нечто похожее. Если принять диэлектрическую проницаемость этой среды равной $\epsilon_{snd} = 25$ [7], то мощность данного слоя составит около 1,3 м. Анализ отражений от подлёдной поверхности 3 показал, что, вероятно, среди рефлекторов этой группы имеются те, которые сформированы от слоёв, слагающих грунт, однако полной уверенности в этом нет. Обосновать данное утверждение или противоположное ему можно, вероятно, лишь после выполнения наклонных зондирований.

Последний из рассматриваемых районов располагается в области предполагаемого наличия грунтовых вод (Е. Шевнина, частное сообщение). На рис. 7, в представлен георадарный разрез по маршруту PR173, на котором отчётливо выявляются три границы, разделяющие четыре диэлектрически контрастных слоя геологического разреза. Первая из них 6 разделяет достаточно сухой слой элювиальных отложений, представленный, главным образом, песчано-гравийным

материалом и, вероятно, слой того же состава, но с повышенным содержанием влаги. Что отражает граница, представленная рефлекторами 7, без дополнительной информации определить сложно. Можно предположить, что они маркируют водонесный горизонт. Рефлекторы 8 связаны, вероятно, с коренными породами скального комплекса. Если предлагаемая геологическая модель верна, то можно ожидать, что средняя диэлектрическая проницаемость по разрезу составляет около 10. Исходя из этого значения была рассчитана вертикальная шкала глубин. В этом случае общая мощность слоя песка составляет около 1,5 м. Представленный вариант интерпретации — лишь один из возможных. Для выяснения истинного характера выявленных слоёв необходимо выполнить наклонные зондирования, определить значения диэлектрических проницаемостей и подобрать разумную геологическую модель.

Заключение

В сезон 58-й РАЭ выполнены достаточно интересные и весьма перспективные работы, которые продемонстрировали возможности использования георадиолокации для решения широкого круга гляциологических и геологических задач применительно к условиям Антарктиды, включая её центральные районы. Авторы надеются, что первый позитивный опыт не будет последним и что георадарное профилирование займёт достойное место среди дистанционных методов исследования ледового континента отечественными специалистами.

Благодарности. Авторы благодарят Dr. Achille Zirizzotti и Dr. Stefano Urbini из Национального института геофизики и вулканологии г. Рим (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV) за предоставленную аппаратуру; Российскую антарктическую экспедицию, в частности А. Туркеева и начальника станции Восток П.В. Тетерева, за помощь в организации исследований в районе мегадюн; начальника станции Прогресс Д.Г. Серова за помощь в организации работ в районе станции Прогресс; Н.А. Шангина за изготовление деревянных саней для антенны георадара, которые выдержали полуторатысячечилометровый переход по Центральной Антарктиде и каменному грунту холмов Ларсеманн; А. Сандалова за помощь в выполнении георадарных работ, а также О.Б. Соболеву за конструктивную критику настоящей работы.

Авторы приносят благодарность рецензенту, сотруднику Института географии РАН Ю.Я. Мачерету, за всестороннее обсуждение настоящей работы и сделанные замечания.

Литература

1. Барков Н.И. Результаты исследования скважины и ледяного керна на станции Восток в 1970–1972 гг. // МГИ. 1973. № 22. С. 77–81.
2. Богородский В.В., Бенгли Ч.Р., Гудмандсен П. Радиогляциология. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 308 с.
3. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / Пер. с англ. М.: изд. ООО «Бином-Пресс», 2006. 656 с.
4. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
5. Попов С.В., Харитонов В.В., Черноглазов Ю.Б. Плотность и удельная аккумуляция снежного покрова южной части подледникового озера Восток (Восточная Антарктида) // МГИ. 2004. № 96. С. 201–206.
6. Попов С.В., Липенков В.Я., Еналиева В.В., Преображенская А.В. Внутриледниковые изохронные поверхности в районе озера Восток, Восточная Антарктида // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 76. С. 89–95.
7. Финкельштейн М.И., Карпунин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация. М.: Радио и связь, 1994. 216 с.
8. Черноглазов Ю.Б., Попов С.В., Мартынов В.Л. Проведение аэрофотосъемки на российской станции Прогресс в Восточной Антарктиде в 2004–2005 гг. // МГИ. 2006. № 100. С. 160–164.
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. 8th Intern. Conf. on Ground Penetrating Radar, 760, April 27. 2000. doi:10.1117/12.383512.
11. Arcone S.A., Chacho E.F., Delaney A.J. Seasonal structure of taliks beneath Arctic streams determined with ground-penetrating radar // PERMAFROST – 7th Intern. Conf. (Proc.), Yellowknife (Canada), Collection Nordicana. 1998. № 55. P. 19–24.
12. Arcone S.A., Kreutz K.J. GPR Reflection Profiles of Clark and Commonwealth Glaciers, Dry Valleys, Antarctica // Annals of Glaciology. 2009. V. 50. № 51. P. 121–129.
13. Brandt O., Kohler J., Luthje M. Spatial mapping of multi-year superimposed ice on the glacier Kongsvegen, Svalbard // Journ. of Glaciology. 2008. V. 54. № 184. P. 73–80.
14. Dunse T., Schuler T.V., Hagen J.O., Eiken T., Brandt O., Högda K.A. Recent fluctuations in the extent of the firm area of Austfonna, Svalbard, inferred from GPR // Annals of Glaciology. 2009. V. 50. № 50. P. 155–162.
15. Eder K., Reidler C., Mayer C., Leopold M. Crevasse detection in alpine areas using ground penetrating radar as a component for a mountain guide system // The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. V. XXXVII. Pt. B8. Beijing, 2008. P. 837–841.
16. Ekaykin A.A., Lipenkov V.Y., Petit J.R., Johnsen S., Jouzel J., Masson-Delmotte V. Insights into hydrological regime of Lake Vostok from differential behavior of deuterium and oxygen-18 in accreted ice // Journ. of Geophys. Research. 2010. V. 115. № C05003. P. 1–14. doi:10.1029/2009JC005329.

17. Frezzotti M., Gandolfi S., Urbini S. Snow megadunes in Antarctica: Sedimentary structure and genesis // *Journ. of Geophys. Research.* 2002. V. 107. № D18. 4344. doi:10.1029/2001JD000673.
18. Kanagaratnam P., Gogineni S.P., Ramasami V., Braaten D. A wideband radar for high-resolution mapping of near-surface internal layers in glacial ice // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2004. V. 42. № 3. P. 483–490.
19. Liu H., Jezek K., Li B., Zhao Z. Radarsat Antarctic Mapping Project digital elevation model version 2. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, Digital media, 2001.
20. Robin G. de Q. Velocity of radio waves in ice by means of interferometric technique // *Journ. of Glaciology.* 1975. V. 15. № 73. P. 151–159.

Summary

Results of field investigations of snow-and-firn thickness and ground structures performed with the use of geophysical radar GPR (Ground-Penetrating Radar) are discussed in the paper. Industrial radar GSSI SIR10B (Geophysical Survey Systems, Inc., USA) with «5106» antenna (pulses frequency of 200 MHz) was used. Its mean wavelength is 1.57 ± 0.18 km. The main purpose of this work was to test this new technique for solution of glaciological and geological problems. The works

were done during the austral summer season of 2012–2013 (58th Russian Antarctic Expedition) in the Eastern Antarctica and mainly concentrated in the vicinity of the Lake Vostok, between the Russian stations Vostok and Progress (the Larsemann Hills). The GPR sounding was carried out together with precise geodetic measurements. The electromagnetic wave propagation in the snow-firn layer was analyzed using the data on density obtained from the 5G borehole at the Vostok Station. Investigations near the Vostok Station focused on a huge snow ridge or so-called «megadune» located eastward from the station at a distance of 30 km. About 80 km of the GPR cross-sections were collected there. Eight internal layers were traced. They demonstrated wavy forms with amplitudes of about 10 m high which corresponded to the megadunes. Main result of GPR investigations in the Larsemann Hills was our understanding of the snow-firn and ground structures in this region. The GPR data collected on structures of crevasses near Progress-1, shallow glacier near the Progress-3, and ground not far from Progress-2 are also discussed. Methodological recommendations on using the GPR under conditions of the Eastern Antarctica were developed.