

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.324

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(80-90)

ДИНАМИКА И СТРОЕНИЕ ЛЕДНИКА В РАЙОНЕ ПОСАДОЧНОЙ ПЛОЩАДКИ
СТАНЦИИ МИРНЫЙ (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА)
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЗИМОВОЧНЫХ РАБОТ И ПОЛЕВОГО СЕЗОНА 2016/17 ГОДАС.В. Попов^{1,2}, А.Л. Новиков³, А.Д. Белков⁴, М.П. Кашкевич², С.В. Тюрин²,
В.Л. Мартьянов³, В.В. Лукин³¹АО “Полярная морская геолого-разведочная экспедиция” (ПМГРЭ),

198412, Санкт-Петербург, Ломоносов, ул. Победы, 24, Россия; spopov67@yandex.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Россия³Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт (АНИИ),

199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Россия

⁴АО “Аэрогеодезия”, 192102, Санкт-Петербург, ул. Бухарестская, 8, Россия

В ходе зимовочного периода 61-й РАЭ (2016 г.) и полевого сезона 62-й РАЭ (2016/17 г.) в районе отечественной станции Мирный (Восточная Антарктида) выполнен обширный комплекс гляциогеофизических работ прикладного характера. Визуальное и инструментальное обследование посадочной площадки показало, что она вполне безопасна для осуществления авиационных операций. По результатам работ составлена схема высот поверхности ледника с точностью до 15 см. Высота поверхности ледника изменяется в интервале от 37 м в северной части до 71 м в юго-западной. Результаты мониторинга показали, что скорость течения ледника в районе работ изменяется приблизительно от 6 до 80 м/год. Наклонные зондирования позволили уточнить модель диэлектрической проницаемости в двух пунктах до глубины около 25 м и оценить влажность ледника.

Восточная Антарктида, станция Мирный, георадарное профилирование, наклонные зондирования, динамика ледника, строение ледника

ICE SHEET DYNAMICS AND STRUCTURE IN THE AREA OF SNOW RUNWAY
AT MIRNY STATION, EAST ANTARCTICA (BASED ON THE DATA COLLECTED DURING
THE 2016/17 SUMMER AND WINTERING SEASONS)S.V. Popov^{1,2}, A.L. Novikov³, A.D. Belkov⁴, M.P. Kashkevich², S.V. Tyurin²,
V.L. Mart'yanov³, V.V. Lukin³¹SV “Polar Marine Geosurvey Expedition” (PMGE),

24, Pobeda str., Lomonosov, St. Petersburg, 198412, Russia; spopov67@yandex.ru

²St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia³Arctic and Antarctic Research Institute (AARI), 38, Beringa str., St. Petersburg, 199397, Russia⁴JSC “Aerogeodesya”, 8, Buharestskaya str., St. Petersburg, 192102, Russia

Comprehensive glaciological and geophysical applied investigations have been performed during the austral winter of the 61st RAE (2016) and austral summer field season of the 62nd RAE (2016/17) in the area of the Russian Mirny Station (East Antarctica). The visual and instrumental observations have revealed that the landing-strip site is completely safe for the aviation operations. The ice sheet surface elevation chart with the accuracy of 15 cm has been compiled based on collected geodetic data. The height varies from 37 m in the northern part to 71 m in the south-west. The monitoring results have demonstrated that the glacier flow velocity varies from approximately 6 to 80 m/year. Multi-offset GPR soundings have allowed improving the dielectric permittivity model of the ice sheet and estimating its moisture content to the depth of about 25 m in two points.

East Antarctica, Mirny Station, GPR sounding, multi-offset soundings, ice dynamics, ice sheet structure

ВВЕДЕНИЕ

Станция Мирный расположена на берегу моря Дейвиса (Восточная Антарктида) в пункте с координатами 66°33' ю.ш., 93°01' в.д. Она была открыта 13 февраля 1956 г. и является первой отечественной станцией в Антарктиде. С момента свое-

го существования вплоть до летнего полевого сезона 36-й Советской антарктической экспедиции (САЭ, 1990/91 г.) она имела авиационное сообщение, которое было прервано в связи с ухудшением общей экономической ситуации в стране [Сава-

тюдгин, 2001]. С течением времени ситуация стабилизировалась, а логистическое обеспечение Российской антарктической экспедиции (РАЭ) улучшилось. В связи с этим появились предпосылки к расширению научных работ в Антарктиде. Это нашло отражение в “Стратегии развития деятельности Российской Федерации в Антарктике на период до 2020 года и на более отдаленную перспективу”, утвержденной распоряжением Правительства РФ № 1926-р от 30.10.2010 г. В частности, она предполагает выполнение геологических и комплексных аэрогеофизических исследований на Земле Вильгельма II, Королевы Мэри и Уилкса. Однако с позиций логистики это невозможно без организации посадочной площадки на станции Мирный. Кроме того, ее наличие существенно упростит авиационное сообщение между полярными станциями и полевыми базами, расположенными восточнее Кейси (Австралия), а также находящимися к западу от Дейвиса (Австралия). Расстояние между ними составляет около полутора тысяч километров. Таким образом, наличие промежуточного аэродрома крайне важно для обеспечения безопасности столь протяженных перелетов в сложных условиях Антарктики.

Чтобы восстановить ранее существовавшую на станции Мирный авиационную инфраструктуру, в течение летних полевых сезонов 59–61-й РАЭ (2013–2016 гг.) были выполнены сначала рекогносцировочные работы, а затем масштабные гляциогеофизические инженерные изыскания. При этом ведущим методом исследования являлась георадиолокация [Попов, Эберляйн, 2014]. Эти исследования детально изложены в работах [Пряхин и др., 2015; Попов, Поляков, 2016; Попов и др., 2016, 2017]. Исследования завершились подготовкой посадочной площадки, на которую 10 февраля 2016 г. был успешно принят среднемагистральный самолет DC-3T (VT-67) “Турбобаслер” компании ALCI (Кейптаун, ЮАР) [Попов и др., 2016].

Таким образом, в задачи летнего полевого сезона 62-й РАЭ (2016/17 г.), применительно к району посадочной площадки, входило ее визуальное и инструментальное обследование, составление высокоточной схемы высот поверхности ледника, проведение наклонных зондирований для построения скоростной (дизэлектрической) модели ледника и определение скорости его течения по ранее выставленным вехам. Кроме того, в ходе зимовочного периода 61-й РАЭ (2016/17 г.) выполнен комплекс наблюдений, включавший георадарное профилирование вдоль взлетно-посадочной полосы (ВПП), а также определены плановое положение ранее выставленных вех и их высоты для оценки скорости течения ледника.

Обследование посадочной площадки

К началу летнего полевого сезона 62-й РАЭ силами зимовочного состава посадочная площад-

ка станции Мирный была размечена и укатана. Были установлены осевые знаки визуального привода, а также маркировки боковых и торцевых сторон ВПП, балок руководителя полетов (РП), конусный ветроуказатель. Таким образом, посадочная площадка была полностью подготовлена к дальнейшему функционированию. Проверка ее безопасности осуществлялась в начале полевого сезона как визуально, так и инструментально: путем выполнения георадарного профилирования по трем маршрутам, расположенным по ее середине, а также в краевых частях слева и справа. Визуальное обследование показало, что, начиная с пикета 787 м до конца (1300 м), имеется в общей сложности 10 трещин шириной 10–20 см. Они характеризуются ровными стенками без козырьков. Трещины располагаются главным образом в краевой части ВПП. Георадарное профилирование выявило еще несколько подобных объектов различной ширины, однако толщина снежно-фирнового моста над ними составляет не менее 1.5 м, что делает их практически безопасными.

В целом выявленные трещины, включая открытые, при соблюдении осторожности особой опасности не представляют. Это, в свою очередь, означает, что трехлетние работы, результатом которых явилось создание посадочной площадки, проводились методически верно, а сделанные выводы научно обоснованны. Кроме того, у сотрудников РАЭ имеется богатый положительный опыт залечивания небольших трещин и восстановления тем самым целостности поверхности. Проведенные работы позволили активно использовать посадочную площадку на протяжении всего полевого сезона для выполнения комплексных аэрогеофизических исследований АО “ПМГРЭ”.

Характер поверхности ледника

В ходе полевых работ с целью построения схемы высот поверхности ледника были выполнены геодезические измерения с применением радионавигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. Высокая точность достигалась использованием статического дифференциального метода определения плановых координат и высот RTK (Real Time Kinematic). Его суть заключается в том, чтобы в каждом сеансе наблюдений в пунктах измерений и расположения базовой станции зарегистрировать данные о коде и фазе несущих частот навигационных спутников. Особенность метода в том, что обработка результатов наблюдений выполняется на передвижном (так называемом роверном) приемнике. Для этого на нем и на неподвижной базовой станции устанавливаются радиомодемы, обеспечивающие непрерывную радиосвязь друг с другом. Базовая станция вычисляет необходимые поправки в ходе измерений и передает их на роверный приемник по радиоканалу.

На последнем в режиме *on-line* осуществляется обработка результатов фазовых измерений с учетом принятых поправок. На мобильных и базовых пунктах измерений использовались спутниковые приемники Leica GX 1220 GG (LEICA Geosystems AG, Switzerland) и Leica GX 1230 GG (LEICA Geosystems AG, Switzerland) соответственно. Для передвижения применялся снегоход. Регистрация данных осуществлялась в автоматическом режиме с интервалом 5 м. В местах со сложным рельефом или труднодоступных для передвижения на транспорте определения выполнялись пешком. В общей сложности в районе действующей посадочной площадки были выполнены геодезические маршруты погонной длиной 34 км. Их положение показано на рис. 1. Обработка данных осуществлялась в специализированном программном пакете Topcon Pinnacle (Topcon Positioning Systems Inc., USA).

В дополнение к указанным измерениям в этом районе была выполнена тахеометрическая съемка. В работах использовался тахеометр Trimble M3 DR 5" (Trimble Navigation Ltd, USA). Для увеличения дальности и точности измерений в качестве отражателя применялась призма 1Р, позволяющая производить съемку на расстоянии до 5000 м от прибора. В общей сложности было отработано 115 пунктов (см. рис. 1).

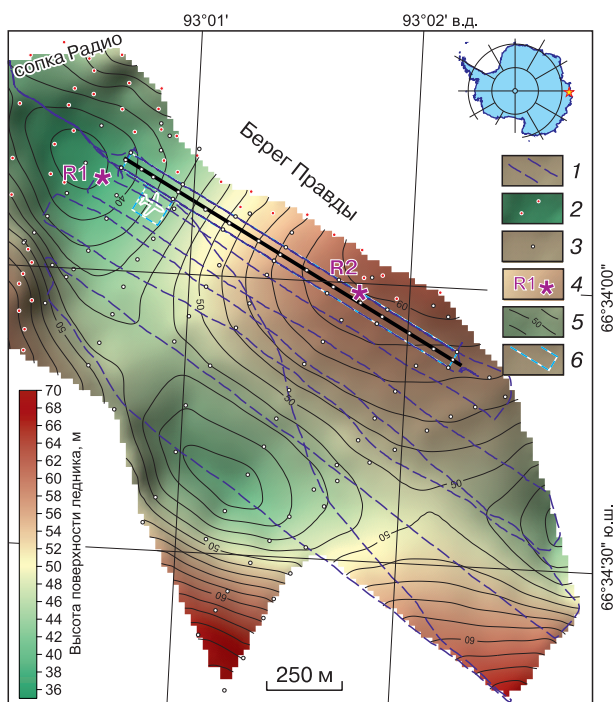


Рис. 1. Состав работ и схема высот поверхности ледника в районе станции Мирный.

1 – геодезические маршруты; 2 – пункты пешеходных измерений; 3 – пункты тахеометрических измерений; 4 – пункты выполнения наклонных зондирований и их номера; 5 – изогипсы поверхности ледника, м; сечение изолиний 2 м; 6 – посадочная площадка, организованная в сезон 62-й РАЭ.

Сравнение данных показало, что они вполне сопоставимы по качеству измерений. Ввиду того что оба комплекта данных можно считать равнозначными, они были объединены и на их основе сформирована общая схема высот поверхности ледника (см. рис. 1). Гридирование осуществлялось в программе Civil AutoCAD 3D 2012 (Autodesk Inc., USA) по алгоритму триангуляции Делоне с последующим незначительным сглаживанием. Для оценки качества проведена статистическая обработка. Она показывает, что среднеквадратичное отклонение всех 6290 измерений от построенного грида составляет 15 см. С целью улучшения восприятия сечение изолиний на схеме выбрано 2 м.

Высота поверхности обсуждаемого участка ледника изменяется в интервале от 37 м в северной части до 71 м в юго-западной. В генеральном плане он представляет собой серпообразную долину и формирующие ее склоны. Закартировать их полностью мешают зоны трещин. Они окружают долину с южной, восточной и западной сторон, что наглядно демонстрируется на ортофотоплане [Пряхин и др., 2015].

Основной прикладной интерес в части авиационной безопасности представляет район посадочной площадки и ее продольный профиль (рис. 2). Как видно на рис. 2, между тахеометрическими и GNSS геодезическими данными наблюдается почти полное соответствие. Высота поверхности ледника по продольному профилю ВПП изменяется в пределах от 38 м в ее начале до 59 м на удалении 873 м. На наиболее крутом участке в интервале 120–680 м средний уклон составляет около 1.66° (29 м/км). Боковые уклоны практически отсутствуют. Указанные параметры ВПП соответствуют авиационным требованиям, изложенным в нормативных документах ВСН37-76, РЭГА-94, НГЭА-92 и ФАП-69 [МГА СССР, 1976; Минтранс РФ, 1993, 1999, 2011], хотя и находятся вблизи предельных значений.

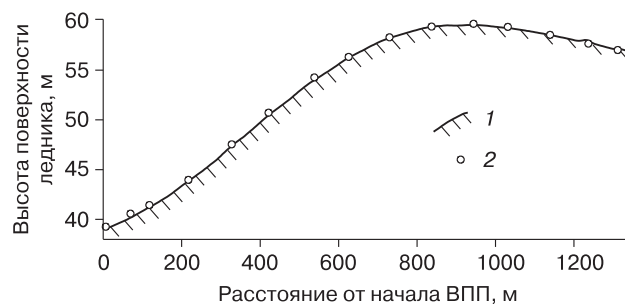


Рис. 2. Продольный профиль поверхности ледника вдоль оси ВПП станции Мирный.

1 – профиль поверхности по спутниковым геодезическим данным; 2 – результаты тахеометрической съемки.

Характер течения ледника

В силу обстоятельств посадочная площадка станции Мирный организована на динамически активном и малоизученном участке ледника. Наличие трещин в этом районе делает необходимым выполнение длительных планомерных наблюдений за его динамикой и аккумуляцией твердых атмосферных осадков для построения прогностических схем их вероятного развития. С этой целью в ходе летних полевых сезонов 59, 60 и 61-й РАЭ был установлен в общей сложности 41 контрольный ориентир (вехи). Они представляют собой 6-метровые алюминиевые трубы диаметром 40 мм с толщиной стенок 3 мм. Вехи забуривались в снежно-ледовый покров не менее чем на 1 м. Такая глубина погружения гарантирует их от проседания или наклона и позволяет определить снегонакопление и поле скорости течения ледника в районе работ [Попов и др., 2016].

В течение зимы из-за сильного ветра две вехи были сломаны у самого основания (рис. 3, *а*), а еще у четырех отломана верхняя часть. Это явилось неприятной неожиданностью. Данные по снегонакоплению по сломавшимся вехам не были потеряны лишь благодаря тому, что на них был нанесен маркер, отмечающий расстояние от конца трубы, для удобства выполнения измерений. Еще четыре вехи ушли в зону трещин и стали недоступны для измерений. Таким образом, на настоящий момент имеется 35 вех для продолжения мониторинга.

В ходе зимовки 61-й РАЭ с периодичностью один раз в квартал выполнялись измерения высоты вех и их планового положения. Для этого использовался спутниковый приемник GARMIN GPSmap 60 с выносной антенной GA 25MCX. Хотя был использован прибор негео-

дезического класса, его применение оправдано ожидаемыми скоростями течения ледника. Согласно предварительным оценкам, они составляют примерно от 18 до 65 м/год для различных его участков [Попов и др., 2016]. Несмотря на относительно невысокую точность прибора, даже ежеквартальные изменения положения вех должны быть заметны, что и было зарегистрировано (рис. 4).

Для оценки скорости течения ледника для каждой вехи брались географические координаты первой и последней серий. Затем решалась обратная геодезическая задача на эллипсоиде WGS-84. Поскольку интервал между сериями составляет 381 день, для приведения измерений к одному году их значения необходимо уменьшить на 4.4 % (т. е. умножить на 0.958). Полученное значение относилось к положению вех на май 2016 г., которое соответствует среднему положению известного участка ее пути. Исключение составляют четыре вехи N11, N12, N40 и N41 (см. рис. 4), которые последний раз посещались в ноябре 2016 г. Для них интервал измерений составил 297 дней. Для приведения этих значений к одному году измеренную разность следует увеличить в 1.23 раза. Для построения схемы скоростей течения ледника указанные данные, приведенные к одному году, гридировались методом Inverse Distance в компьютерной программе Surfer 13.6 (Golden Software Inc., USA). Результирующая схема представлена на рис. 5.

В рамках настоящего этапа научного исследования авторы воздерживаются от анализа составленной схемы и ограничиваются общими замечаниями о том, что скорость течения ледника в районе работ изменяется примерно от 6 до 80 м/год. В ходе летнего полевого сезона 62-й РАЭ (2016/17 г.) были выполнены трехкратные изме-



Рис. 3. Фотографии сломанной вехи (а) и процесса измерения планового положения и высоты вех (б).
Фотографии С.В. Попова (а) и А.Л. Новикова (б), февраль 2017 г.

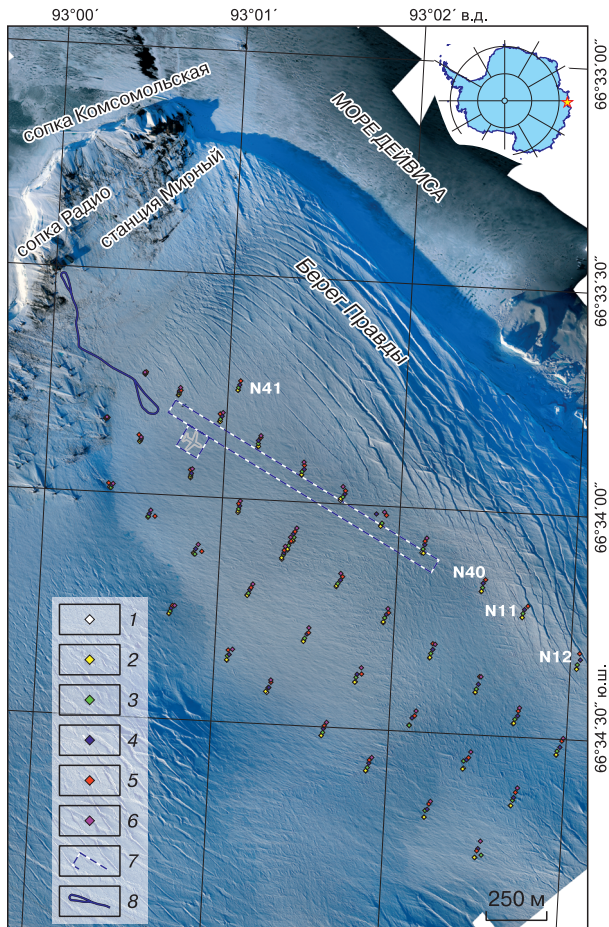


Рис. 4. Движение вех в районе посадочной площадки станции Мирный.

Положение вех: 1 – январь 2016 г., 2 – февраль 2016 г., 3 – май 2016 г., 4 – август 2016 г., 5 – ноябрь 2016 г., 6 – февраль 2017 г.; 7 – контур посадочной площадки; 8 – снеговая трасса, соединяющая станцию и посадочную площадку. Фотоплан актуален на 11 января 2015 г.

рения планового положения вех с помощью GNSS приемников TRIMBLE 4700 (*Trimble Navigation Ltd, USA*). Базовая станция была установлена в пункте MIR3, в районе сопки Комсомольская. Наблюдения на ней осуществлялись в течение всего полевого сезона. Авторы полагают, что это позволит достичь точности определения планового положения вех порядка первых сантиметров. Измерения выполнялись с интервалом около 10 дней, что, исходя из ожидаемой скорости течения ледника, позволит определить поле скоростей с высокой точностью. В этих работах применялась геодезическая аппаратура, любезно предоставленная Институтом планетарной геодезии Дрезденского технического университета, где в настоящее время осуществляется обработка полученных данных.

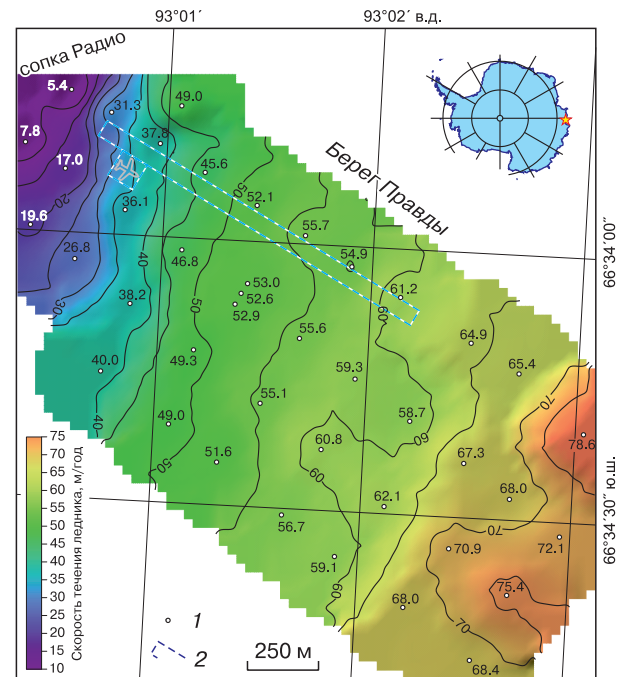


Рис. 5. Схема скоростей течения ледника в районе действующей посадочной площадки.

1 – положение вех на май 2016 г. и значение среднегодовой скорости; 2 – действующая посадочная площадка. Сечение изолиний 5 м/год.

Модель диэлектрической проницаемости ледника

Как уже отмечалось, для корректного пересчета временного разреза в глубинный необходимо выбрать модель диэлектрической проницаемости среды. Для этого в зависимости от поставленных задач и требуемой точности имеется три основных подхода: 1) использование табличных значений на основе априорных представлений о характере лоцируемых сред; 2) применение годографов дифрагированных волн от неоднородностей [Глазовский, Мачерет, 2014; Попов, 2017]; 3) выполнение специализированных измерений, в частности наклонных зондирований [Владов, Старовойтов, 2004; Мачерет, 2006; Глазовский, Мачерет, 2014; Попов et al., 2003]. Второй подход получил широкое распространение в силу своей простоты и эффективности. Но он не всегда может быть применен на практике, поскольку для этого требуется наличие дифрагированной волны с протяженными ветвями, чтобы они могли быть обчислительны с достаточной точностью. Помимо этого для получения качественных результатов требуется высокоточная плановая привязка каждого пункта зондирования, что далеко не всегда осуществляется на практике. Наклонные зондирова-

ния выгодно отличаются, так как могут быть выполнены в любом месте. Высокая точность достигается разметкой профиля. Таким образом, лишь наклонные зондирования, выполненные по системе ОГТ (общей глубинной точки) или ОТВ (общей точки возбуждения) [Боганик, Гурвич, 2006], могут претендовать на формирование наиболее точной модели диэлектрической проницаемости среды, а значит, и скорости распространения электромагнитных волн в ней.

Ранее, в ходе работ полевых сезонов 60-й и 61-й РАЭ, были обчислены годографы дифрагированных волн, сформированных от выявленных трещин. По этим данным удалось построить модель двуслойной среды, согласно которой приповерхностная часть ледника сложена как снежно-фирновой толщей, так и льдом атмосферного происхождения с диэлектрической проницаемостью в интервале от 1.6 до 3.2 [Попов и др., 2016, 2017]. Столь большой разброс связан с различными условиями формирования снежного покрова и протеканием процессов фирнизации. Эффективное значение диэлектрической проницаемости этого слоя составляет 2.43 [Попов и др., 2016]. Согласно

данным кернового бурения [Попов и др., 2017], ниже лежащий слой представляет собой лед с фирновыми прослойками. Его эффективная диэлектрическая проницаемость равна 3.0 [Попов и др., 2016].

Для выполнения наклонных зондирований использовался георадар ОКО-2 (ООО «Логические системы», Россия) с раздвижными антеннами и частотой зондирующих импульсов 150 МГц (рис. 6). Конструктивной особенностью является наличие оптоволоконного кабеля, соединяющего обе антенны. Для выполнения работ использовался кабель длиной 10 м, что определило максимальную длину расстановки антенн.

Чтобы выбрать наиболее подходящие места выполнения наклонных зондирований вначале проводилось георадарное профилирование. Предпочтение отдавалось тем участкам, на которых имелись субгоризонтальные, наименее рельефные и шероховатые границы. Последние два обстоятельства имели наибольшее значение, поскольку последующая обработка осуществлялась в рамках наклонно-слоистой среды [Попов, 2017]. При этом значительные отклонения конфигурации границ



Рис. 6. Выполнение наклонных зондирований по системе ОГТ.

Фотографии И.Г. Савченко (а) и С.В. Попова (б, в), январь–февраль 2017 г.

от модельных могли привести к ошибкам в расчетах. После выбора места наклонные зондирования осуществлялись по стандартной методике, изложенной в [Боганик, Гурвич, 2006; Попов и др., 2018].

В ходе летнего полевого сезона 62-й РАЭ с целью уточнения строения приповерхностной части ледника в районе действующей посадочной площадки были выполнены наклонные зондирования. Они осуществлялись по методикам ОГТ и ОТВ.

В пункте R1 (см. рис. 1) 17 января 2017 г. были осуществлены наклонные зондирования обоих видов. Зондирования по методу ОГТ пред-

полагают выполнение последовательных измерений при раздвижении приемной и передающей антенн на одинаковое расстояние от центра расстановки [Боганик, Гурвич, 2006]. Радарограмма приведена на рис. 7, а. Здесь же нанесен и теоретический годограф. Соответствующая ему модель диэлектрической проницаемости приведена на рис. 7, б. Ход лучей показан на рис. 7, в.

На представленной радарограмме выявляется пять достаточно контрастных отражений (см. рис. 7, а). Выполненный вдоль расстановки георадарный профиль показал, что границы залегают горизонтально. Радарограмма была обчислена в

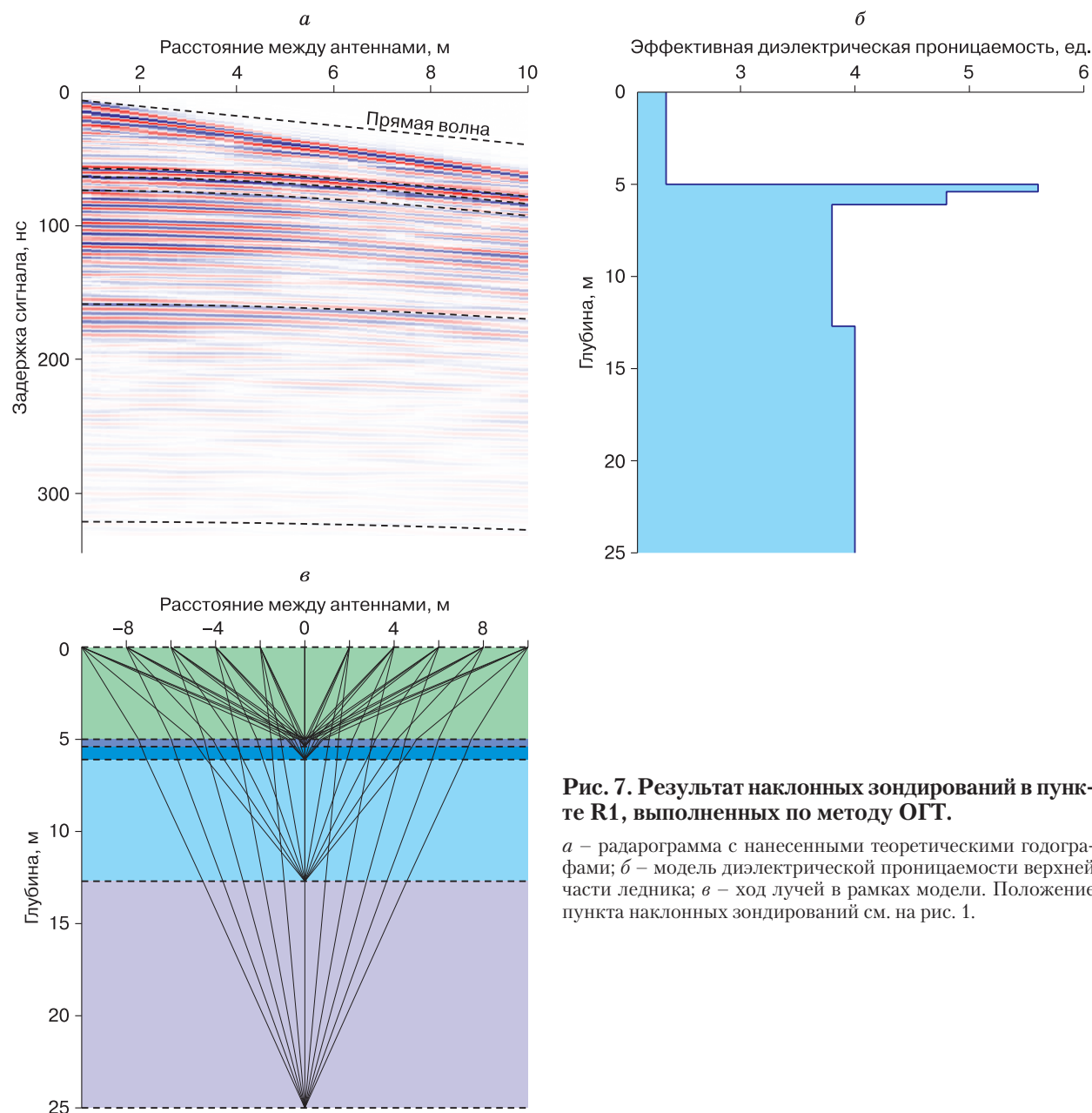


Рис. 7. Результат наклонных зондирований в пункте R1, выполненных по методу ОГТ.

а – радарограмма с нанесенными теоретическими годографами; б – модель диэлектрической проницаемости верхней части ледника; в – ход лучей в рамках модели. Положение пункта наклонных зондирований см. на рис. 1.

рамках модели слоисто-горизонтальной среды [Попов, 2017], что упростило задачу. Однако изначально она решалась в общем виде для наклонных границ, для чего в рамках настоящего исследования было создано новое программное обеспечение.

Первый (верхний) слой характеризуется мощностью 5 м и эффективной диэлектрической проницаемостью 2.35. Это позволяет отождествить его с плотной снежно-фирновой толщей. Как указывалось выше, обсчет годографов дифрагированных волн, сформированных от трещин, позволил построить схему диэлектрической проницаемости этого слоя. В пункте R1 она составила 2.34 [Попов и др., 2016], т. е. совпадала в пределах погрешности с величиной, полученной по данным наклонных зондирований. Значительная интенсивность нижней границы этого слоя указывает на наличие влаги. Это вполне соответствует результатам визуальных наблюдений, выполненных в сезоны 60-й и 61-й РАЭ [Попов, Поляков, 2016].

Второй слой характеризуется мощностью 0.4 м. Его нижняя граница залегает на глубине 5.4 м. Этот тонкий слой характеризуется эффективной диэлектрической проницаемостью 5.6. Столь высокое значение указывает на то, что им может быть лишь *влажный лед*, т. е. лед, находящийся вблизи температуры фазового перехода. Это вполне соотносится с полученными ранее результатами [Попов и др., 2016, 2017]. Лед гораздо менее проницаем для влаги, чем вышележащая снежно-фирновая толща [Глазовский, Мачерет, 2014], поэтому талая вода скапливается на границе раздела этих слоев. В то же время она повышает влажность льда, что приводит к росту его диэлектрической проницаемости ($\tilde{\epsilon}$). В работе Х. Луэнга [Looyenga, 1965] приводится соотношение, связывающее параметр $\tilde{\epsilon}$ с объемным содержанием влаги w для двухкомпонентной смеси лед-вода с диэлектрическими проницаемостями каждого из них (ϵ_i и ϵ_w):

$$\tilde{\epsilon} = \left[\epsilon_i^{1/3} + w \left(\epsilon_w^{1/3} - \epsilon_i^{1/3} \right) \right]^3. \quad (1)$$

При этом предполагается, что водяные включения имеют сферическую форму. Графически соотношение (1) показано на рис. 4 в работе [Попов и др., 2018]. Как следует из соотношения (1), полученному значению соответствует лед с влажностью 15 %. Столь большая величина связана с наличием талой воды в свободном виде.

Третий слой характеризуется мощностью 0.7 м. Его нижняя граница залегает на глубине 6.1 м. Слой характеризуется меньшей эффективной диэлектрической проницаемостью, которая составляет 4.8, что, согласно (1), соответствует льду с объемным содержанием влаги 7.5 %. Понижение влажности льда указывает на то, что основная часть талой воды канализируется вышележащим слоем.

Четвертый слой имеет мощность 6.6 м, его нижняя граница залегает на глубине 12.7 м. Его эффективная диэлектрическая проницаемость еще меньше и составляет 3.8. Полученное значение, согласно (1), соответствует льду с объемным содержанием влаги 3.5 %. Последовательное понижение количества влаги свидетельствует о еще меньшем проникновении ее в тело ледника.

Пятый слой характеризуется мощностью 12.3 м, его нижняя граница залегает на глубине 25.0 м. Его эффективная диэлектрическая проницаемость составляет 4.0. Рост этого параметра и, как следствие, повышение влажности льда до 4.1 % может быть связано с повышением температуры ледника из-за близости каменного основания.

В пункте R2 (см. рис. 1) 31 января 2017 г. были осуществлены наклонные зондирования по системе ОТВ. Они предполагают выполнение последовательных измерений при фиксированном положении передающей антенны и перемещении приемной антенны на равные расстояния [Боганик, Гурвич, 2006]. Согласно ранее полученным георадарным данным и результатам кернового бурения, строение ледника, а следовательно, и процесс его формирования, отличаются от района пункта R1 [Попов и др., 2016, 2017]. Этим и обусловлено выполнение наклонных зондирований в данном месте.

По данным наклонных зондирований выявлено три наиболее контрастных отражения, которые связаны с тремя нижними границами слоев в теле ледника.

Первый слой характеризуется мощностью 4.6 м и эффективной диэлектрической проницаемостью 2.8. Это позволяет отождествить его с плотной снежно-фирновой толщей. Согласно ранее проведенным работам, диэлектрическая проницаемость этого приповерхностного слоя, определенная по годографам дифрагированных волн, составила 2.1 [Попов и др., 2016]. Сложно сказать, с чем связано столь значительное несоответствие цифр. Маловероятно, что оно вызвано ошибками при выполнении работ: в радиусе 80 м от R2 имеется четыре трещины, дифрагированные волны от которых были взяты для обработки. Полученные значения диэлектрической проницаемости составляют 2.02, 2.06, 2.12 и 2.12 [Попов и др., 2016]. Возможно иное объяснение. Геофизические съемки 60-й и 61-й РАЭ выполнялись в начале полевого сезона, после декабрьских и январских снегопадов, что резко уменьшило диэлектрическую проницаемость приповерхностного слоя. Наклонные зондирования сделаны в самом конце аномально теплого полевого сезона: за время работ не было ни одного снегопада и было лишь несколько облачных дней. Таким образом, ввиду интенсивного таяния приповерхностный слой вполне мог пропитаться влагой, что ускорило его фирнизацию.

Второй слой характеризуется мощностью 3.3 м. Его нижняя граница залегает на глубине 9.9 м. Эффективная диэлектрическая проницаемость этого слоя равна 3.5. Согласно соотношению (1), объемное содержание влаги в нем составляет около 1.5 %.

Третий слой имеет мощность 14.9 м. Его нижняя граница залегает на глубине 22.8 м. Этот слой характеризуется эффективной диэлектрической проницаемостью 3.2, т. е. практически соответствует классическому значению 3.17 для холодного чистого льда [Мацерец, 2006].

Видимое различие между скоростными моделями пунктов R1 и R2, отражающее различие в строении ледника, является вполне закономерным. Оно подтверждается всеми полученными к настоящему моменту георадарными данными, а также результатами кернового бурения [Попов и др., 2016, 2017]. Еще в ходе рекогносцировочных работ 59-й РАЭ отмечалось, что, согласно полученным георадарным данным, в этом районе имеется водоносный горизонт, который затем исчезает (не опубликовано). Последующие работы подтвердили правильность этого предположения [Попов, Поляков, 2016; Попов и др., 2016, 2017]. Эта граница, разделяющая области с различными процессами ледообразования, располагается примерно в 360 м от начала ВПП, а пункты R1 и R2 расположены по обе стороны от нее.

Отдельно следует обсудить вопрос о погрешности определения диэлектрической проницаемости по данным зондирования, выполняемых по методике ОГТ или ОТВ. Задача решается методом подбора параметров в рамках модели наклонно-слоистой среды. При этом поверхности аппроксимируются плоскостями, параметры которых определяются методом наименьших квадратов [Попов, 2017]. Однако реальные поверхности характеризуются, порой, значительными шероховатостями, а сами слои – локальными неоднородностями. Все это приводит к тому, что наблюдаемый годограф отличается от теоретического и различия возрастают с ростом шероховатости и неоднородности. На это указывалось, в частности, в [Попов и др., 2018], когда было получено аномально низкое значение диэлектрической проницаемости морской воды, равное 75 (примерно на 15 % меньше ожидаемого), по годографу отражения от нижней кромки морского льда. Следует отметить, что столь значимые неоднородности совершенно не характерны для внутриледниковых границ, и, следовательно, точности должны быть существенно выше. Имеется и весьма положительный опыт. Наклонные зондирования, выполненные в районе станции Восток (Восточная Антарктида) при почти 4-километровой мощности ледника дали погрешность менее 0.5 % [Popov et al., 2003], что подтвердилось результатами кернового бурения с последующим проникновением в озеро Восток [Попов и др., 2012].

В нашем же случае оценка погрешности осуществлялась по степени сходимости теоретических и наблюдаемых годографов, которые и были выбраны исходя из наилучшего их соответствия. Анализ ошибок позволяет оценивать полученные значения диэлектрической проницаемости не хуже 5 %.

ВЫВОДЫ

Проведенные работы являются логическим продолжением ранее начатых. В ходе полевого сезона осуществлено визуальное и инструментальное (посредством георадара) обследование посадочной площадки, которое показало, что она пригодна для функционирования. Образующиеся после 787-го метра трещины характеризуются незначительными размерами и вполне могут быть устранены путем засыпания с последующей утрамбовкой.

Осуществлен широкий комплекс гляциогеофизических работ. Оценена скорость течения ледника на основе круглогодичного мониторинга движений вех. Недостатком является использование приборов негеодезического класса, что компенсируется длительностью наблюдений и высокой скоростью течения ледника. Кроме того, высокоточные спутниковые измерения специализированной аппаратурой были выполнены, а полученные данные обрабатываются.

Следующим достоинством проведенных работ является выполнение наклонных зондирований, которые позволяют независимым образом получить вертикальные модели диэлектрической проницаемости ледника. В ходе предыдущих работ аналогичные модели были построены на основе обсчета дифрагированных волн, сформированных от приповерхностных трещин [Попов и др., 2016, 2017]. В целом результаты, полученные двумя независимыми методами, не противоречат друг другу. При этом наклонные зондирования позволили получить более сложную модель строения ледника, существенно дополняющую и уточняющую предыдущие результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные результаты исследований носят прикладной характер и служат для решения одной из задач, поставленных в “Стратегии развития деятельности Российской Федерации в Антарктике на период до 2020 года и на более отдаленную перспективу”, утвержденной распоряжением Правительства РФ № 1926-р от 30.10.2010 г. Она предполагает создание аэродрома и инфраструктуры на станции Мирный. Эта задача была выполнена в ходе предыдущего полевого сезона, и 10 февраля 2016 г. на него был принят среднемагистральный

самолет DC-3T (BT-67) “Турбобаслер” компании ALCI (г. Кейптаун, ЮАР), пилотируемый канадским экипажем авиакомпании “Kenn Borek Air Ltd”. Но мало найти пригодное место и создать аэродром и посадочную площадку, их нужно поддерживать и обеспечивать безопасное функционирование. А это означает, что мониторинг движения вех и наблюдения за трещинами следует продолжать, особенно это важно в свете быстро меняющихся прибрежных ледников из-за эффектов, вызванных глобальным потеплением.

Авторы благодарят сотрудников зимовочного состава 61-й РАЭ станции Мирный Медведева Е.В. и Овечкина Д.П., а также ведущего специалиста по информатике Савченко И.Г., которые участвовали в работе на различных этапах; начальника станции Мирный 61-й РАЭ Виноградова В.М. и 62-й РАЭ Панфилова А.В. за помощь в организации и проведении полевых работ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-55-12003 ННИО_а).

Литература

- Боганик Г.Н.** Сейсморазведка / Г.Н. Боганик, И.И. Гурвич. Тверь, АИС, 2006, 744 с.
Boganik, G.N., Gurchich, I.I., 2006. Seismic Exploration. Izd-vo AIS, Tver, 744 pp. (in Russian)
- Владов М.Л.** Введение в георадиолокацию / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 153 с.
Vladov, M.L., Starovoirov, A.V., 2004. Introduction to the GPR Technique. Moscow University Press, Moscow, 153 pp. (in Russian)
- Глазовский А.Ф.** Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований / А.Ф. Глазовский, Ю.Я. Мачерет. М., ГЕОС, 2014, 528 с.
Glazovsky, A.F., Macheret, Yu.Ya., 2014. Water in Glaciers. Methods and Results of Geophysical and Remote Sensing Studies. GEOS, Moscow, 528 pp. (in Russian)
- Мачерет Ю.Я.** Радиозондирование ледников. М., Науч. мир, 2006, 392 с.
Macheret, Yu.Ya., 2006. Radio-echo Sounding of Glaciers. Nauchnyi Mir, Moscow, 392 pp. (in Russian)
- МГА СССР.** ВСН37-76. Инструкция по проектированию, строительству и оценке эксплуатационной пригодности снежных и снежноледовых аэродромов Антарктиды. Л., Мин-во гражданской авиации СССР, 1976, 67 с.
MCA USSR, 1976. VCN37-76: Guidelines for design, construction and estimation of safety of snow and ice runways in Antarctica. Ministry of civil aviation (MCA) USSR, Leningrad, 67 pp. (in Russian)
- Минтранс РФ.** Нормы годности к эксплуатации в СССР гражданских аэродромов (НГЭА СССР) (включены поправки к НГЭА СССР ГА с 1 по 25). М., Минтранс РФ, 1993, 79 с.
Mintrans, RF, 1993. Norms of approvals for civilian airfields operations (CAFO) in the USSR (including CAFO adjustments 1–25, CA USSR). Mintrans RF, Moscow, 79 pp. (in Russian)
- Минтранс РФ.** Руководство по эксплуатации гражданских аэродромов Российской Федерации (РЭГА РФ-94). Новосибирск, Минтранс РФ, 1999, 233 с.
Mintrans, RF, 1999. The Russian Federation Civil Aerodromes Handling Manual (REGA RF-94). Mintrans RF, Novosibirsk, 233 pp. (in Russian)
- Минтранс РФ.** Приказ Министерства транспорта РФ от 4 марта 2011 года № 69 Об утверждении Федеральных авиационных правил “Требования к посадочным площадкам, расположенным на участке земли или акватории”. М., Минтранс РФ, 2011, с. 153–159.
Mintrans, R.F., 2011. The Ministry of Transport of the Russian Federation Order No. 69 dated March 4, 2011 “On approval of requirements for civilian airfields located on onshore/offshore sites”. Mintrans RF, Moscow, pp. 153–159. (in Russian)
- Попов С.В.** Определение диэлектрической проницаемости по годографам дифрагированных волн в рамках модели наклонно-слоистой среды // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 3, с. 83–87.
Popov, S.V., 2017. Determination of dielectric permittivity from diffraction traveltime curves within a dipping-layer model. Earth's Cryosphere XXI (3), 75–79.
- Попов С.В., Кузнецов В.Л., Прыхин С.С., Кашкевич М.П.** Результаты георадарных исследований морского льда Нелла-фиорда (район станции Прогресс, Восточная Антарктида) в сезон 2016/17 года // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 3, с. 18–26.
Popov, S.V., Kuznetsov, V.L., Pryakhin, S.S., Kashkevich, M.P., 2018. Results of ground-penetrating radar investigations on the Nella Fjord sea ice (Progress station area, East Antarctica) in the 2016/17 austral summer field season. Earth's Cryosphere XXII (3), 16–23.
- Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М.** Отечественные сейсмические, радиолокационные и сейсмологические исследования подледникового озера Восток // Лед и снег, 2012, № 4 (120), с. 31–38.
Popov, S.V., Masolov, V.N., Lukin, V.V., Popkov, A.M., 2012. Russian seismic, radio and seismological investigations of subglacial Vostok Lake. Led i Sneg [Ice and Snow] 4 (120), 31–38.
- Попов С.В., Межонов С.В., Поляков С.П., Мартыанов В.Л., Лукин В.В.** Гляциогеофизические инженерные изыскания для подготовки летного поля в районе российской станции Мирный, Восточная Антарктида // Лед и снег, 2016, т. 56, № 3, с. 413–426.
Popov, S.V., Meznonov, S.V., Polyakov, S.P., Martyanov, V.L., Lukin, V.V., 2016. Glaciological and geophysical investigations aimed at organization of a new airfield at the Station Mirny (East Antarctica). Led i Sneg [Ice and Snow] 56 (3), 413–426.
- 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.
Popov, S.V., Polyakov, S.P., 2016. Ground-penetrating radar sounding of ice crevasses in the area of the Russian Progress and Mirny stations (East Antarctica) during the field season of 2014/15. Earth's Cryosphere XX (1), 82–90.
- Попов С.В., Поляков С.П., Прыхин С.С., Мартыанов В.Л., Лукин В.В.** Строение верхней части ледника в районе планируемой взлетно-посадочной полосы станции Мирный, Восточная Антарктида (по материалам работ 2014/15 года) // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 1, с. 73–84.
Popov, S.V., Polyakov, S.P., Pryakhin, S.S., Martyanov, V.L., Lukin, V.V., 2017. The structure of the upper part of the glacier in the area of a snow-runway of Mirny station, East Antarctica (based on the data collected in 2014/15 field season). Earth's Cryosphere XXI (1), 67–77.
- Прыхин С.С., Попов С.В., Сандалюк Н.В., Мартыанов В.Л., Поляков С.П.** Аэрофотосъемка районов российской

ских антарктических станций Мирный и Прогресс в сезон 2014/15 г. // Лед и снег, 2015, т. 55, № 4, с. 107–113.

Pryakhin, S.S., Popov, S.V., Sandalyuk, N.V., Martyanov, V.L., Polyakov, S.P., 2015. Aerial photography of Russian Antarctic stations Mirny and Progress in summer of 2014/15. *Led i Sneg* [Ice and Snow] 55 (4), 107–113.

Попов С.В., Эберляйн Л. Опыт применения георадара для изучения строения снежно-фирновой толщи и грунта Восточной Антарктиды // Лед и снег, 2014, т. 54, № 4, с. 95–106.

Popov, S.V., Eberlein, L., 2014. Investigation of snow-firn thickness and ground in the East Antarctica by means of geophysical radar. *Led i Sneg* [Ice and Snow] 54 (4), 95–106.

Саватюгин Л.М. Российские исследования в Антарктике. Т. III. 31 САЭ – 40 РАЭ. СПб., Гидрометеоздат, 2001, 344 с.

Savatyugin, L.M., 2001. Russian Research in Antarctica. Vol. III. 31 SAE – 40 RAE. Gidrometeoizdat, St. Petersburg, 344 pp. (in Russian)

Looyenga, H. Dielectric constants of heterogeneous mixture // *Physica*, 1965, vol. 31, No. 3, p. 401–406.

Попов, С.В., Шеремет'ев, А.Н., Масолов, В.Н., Лукин, В.В., Мironov, А.В., Лuchininov, В.С. Velocity of radio-wave propagation in ice at Vostok station, Antarctica // *J. Glaciol.*, 2003, vol. 49, No. 165, p. 179–183.

*Поступила в редакцию 23 июля 2017 г.,
после доработки – 15 июня 2018 г.,
принята к публикации 5 сентября 2018 г.*