

**РЕЗУЛЬТАТЫ ГЛЯЦИО-ГЕОРАДАРНЫХ
ОПЫТНО-МЕТОДИЧЕСКИХ РАБОТ НА МОРСКОМ ЛЬДУ
В РАЙОНЕ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ПОЛЕВОЙ БАЗЫ МОЛОДЕЖНАЯ
В СЕЗОН 60-й РАЭ (2014/15 г.)**

д-р геол.-минерал. наук С.В. ПОПОВ¹, нач. отряда РАЭ С.П. ПОЛЯКОВ²

¹— *Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, e-mail: sporov67@yandex.ru*

²— *ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: poliakov@aari.ru*

В настоящей работе рассматриваются результаты опытно-методических работ, выполненных на морском льду в районе российской полевой базы Молодежная (Восточная Антарктида). Исследования включали в себя георадарное профилирование на частоте 900 МГц и керновое бурение. В ходе работ удалось отработать методику совместных работ буровой и георадарной групп, удостовериться, что имеющейся георадар, несмотря на столь высокую частоту (900 МГц), способен успешно лоцировать морской лед, получить гляцио-георадарные данные и построить геофизический разрез по одному из маршрутов в районе торосов.

Ключевые слова: георадиолокация, морской лед, Антарктида, обработка георадарных данных, керновое бурение.

ВВЕДЕНИЕ

Определение толщины морского льда и изучение его строения дистанционными методами является важной не столько научной, сколько прикладной задачей, прежде всего для судоходства, синоптических прогнозов и прогнозов ледовитости акваторий. В настоящее время толщину льда и его строение определяют посредством керна бурения с последующим анализом образцов. Однако это весьма длительный и дорогостоящий способ. Дистанционные методы несравнимо мобильнее и дешевле. Наиболее предпочтительным из них является радиолокационный метод. Он основан на зондировании среды короткими электромагнитными импульсами и последующем анализе отражений от различных диэлектрических неоднородностей (Богородский и др., 1983; Мачерет, 2006; Финкельштейн и др., 1977). Исследования показали, что диэлектрическая проницаемость связана с плотностью снежно-фирновой и ледяной толщи и ее влажностью (Robin, 1955; Богородский и др., 1983; Мачерет, 2006; Рудаков, Богородский, 1960). Таким образом, радиолокационные зондирования вполне позволяют выявить именно те особенности строения ледника, которые являются наиболее важными с научных, как фундаментальных, так и прикладных позиций.

Основная сложность интерпретации радиолокационных данных состоит в пересчете временного разреза в глубинный. Для этого требуется наличие скоростной модели среды. Имеется четыре основных способа ее формирования: (1) на основе

априорных представлений и использования табличных значений; (2) по анализу дифрагированных волн от локальных неоднородностей (Владов, Старовойтов, 2004; Мачерет, 2006; Попов, 2002); (3) путем проведения специальных исследований методом наклонных зондирований (Роров et al., 2003; Богородский и др., 1983; Попов и др., 2001) и (4) путем изучения среды прямыми методами, т.е. выполнением кернового бурения. Первый метод, по понятным причинам, является приближенным. Два других вполне позволяют сформировать скоростную модель на основе косвенных геофизических измерений, однако лишь в рамках упрощенных моделей слоисто-однородных сред. Только последний метод является наиболее надежным и позволяет сформировать корректную скоростную модель даже в самых сложных и неожиданных случаях.

В настоящей публикации обсуждаются результаты гляцио-георадарных опытно-методических работ, выполненных на антарктическом морском льду в сезон 60-й РАЭ (2014/15 г.).

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ И ХАРАКТЕРИСТИКА АППАРАТУРЫ

В ходе летнего полевого сезона 60-й РАЭ (2014/15 г.) были выполнены комплексные гляцио-георадарные исследования на морском льду в районе отечественной полевой базы Молодежная. Работы носили опытно-методический характер и выполнялись 20 декабря 2014 г. в пункте с координатами $67^{\circ} 14,8'$ ю.ш.; $44^{\circ} 28,3'$ в.д. (рис. 1) во время стоянки НЭС «Академик Федоров». Их цель состояла в выяснении возможностей георадарного профилирования применительно к вопросам изучения строения морского льда. Исследования, помимо георадарного профилирования, включали бурение с последующим описанием отобранного керна, измерением его плотности и солёности.

Бурение с отбором керна (рис. 2а) производилось механическим буром Kovacs (Kovacs Enterprises, USA). Диаметр скважины составлял 17 см, при диаметре керна $14 \pm 0,3$ см. В ходе одной проходки происходит отбор керна длиной до 100 см. Керны были описаны, сфотографированы и распилены на фрагменты. Затем была определена их плотность и солёность.

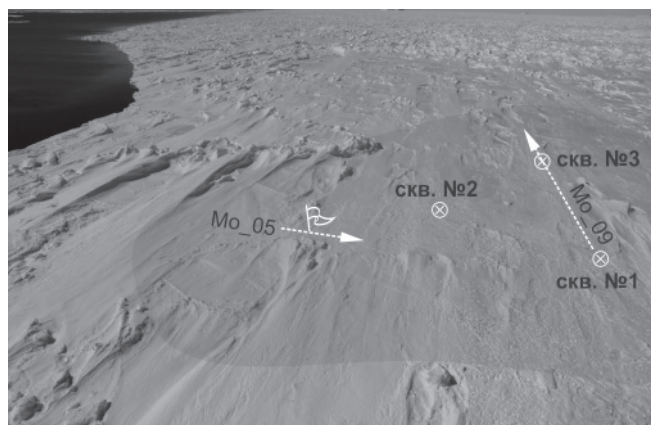


Рис. 1. Место проведения работ на припайном льду в р-не п/б Молодежная. Район работ показан затемненным тоном; белыми пунктирными линиями показаны георадарные маршруты и их номера; кружками с крестом отмечены пункты бурения.



Рис. 2. Выполнение буровых (а) и георадарных (б) работ на морском льду в районе п/б Молодежная. Фото С.С. Пряхина.

Плотность определялась как отношение веса фрагментов керна к их объему. Образцы взвешивались на электронных весах Fisherman OCS-20K с точностью 20 г, при среднем весе около 2 кг. Образцы имели почти правильную цилиндрическую форму. Их типичная длина для взвешивания составляла около 20 см. Относительная погрешность определения плотности составила не хуже 6 %. Соленость измерялась солемером AUTOSAL 8400B (Guildline Instruments Ltd., Canada) с точностью $10^{-3}\%$; электропроводность — с точностью 10^{-5} См/м. Георадарное профилирование выполнялось промышленным георадаром GSSI (Geophysical Survey Systems Inc., USA); частота зондирования 900 МГц (рис. 2б). Технические характеристики прибора изложены в работе (GSSI Antennas Manual, 2014).



Рис. 3. Керны, взятые на морском льду в районе п/б Молодежная: а — керн № 1; б — керн № 2; в — керн № 3. Фото С.С. Пряхина.

СТРОЕНИЕ МОРСКОГО ЛЬДА ПО ДАННЫМ КЕРНОВОГО БУРЕНИЯ

Ледяное поле имело явные признаки торошения. Визуально наблюдалось наличие отдельных плит, относительно небольших размеров, смерзшихся между собой. Между ними виднелись трещины, заполненные снегом. Многие из плит были надвинуты одна на другую, образуя торосы. Столь непростая конфигурация ледяных образований являлась фактором, осложняющим процесс интерпретации георадарных данных.

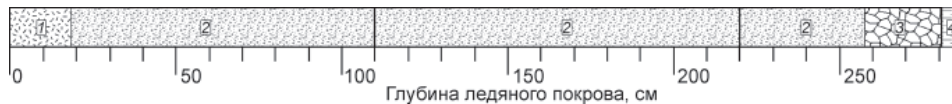


Рис. 4. Стратиграфическое описание керна № 2, взятого на морском льду в районе п/б Молодежная: 1 — сухой снег; 2 — морской лед; 3 — очень рыхлый лед, или плотная шуга; 4 — морская вода.

Тонкими линиями показаны границы между средами, утолщенными — границы между блоками.

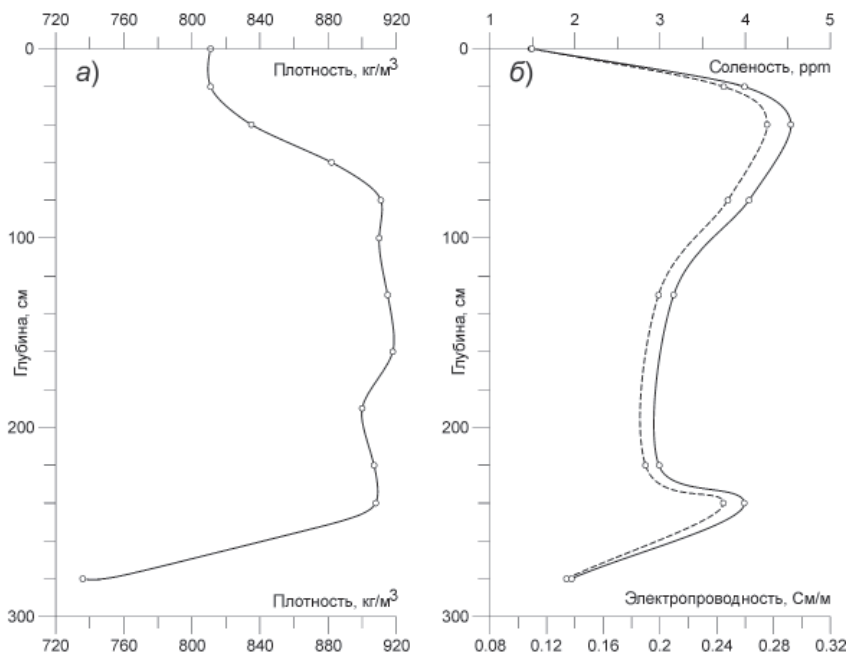


Рис. 5. Вертикальные профили плотности (а), солёности и электропроводности (б) морского льда по керна № 2.

На секции б профиль электропроводности показан утолщенной линией, профиль солёности — пунктирной.

На морском льду в районе п/б Молодежная, на территории приблизительно 200×200 м (рис. 1) было отобрано три керна длиной 305 см, 280 см и 270 см (рис. 3а, б, в). В пунктах бурения № 1 и № 2 толщина консолидированного слоя составила 204 см и 240 см соответственно. В пункте отбора керна № 3 имеется разрыв, вызванный наличием прослойки морской воды толщиной около 75 см (рис. 3в). Толщина консолидированного слоя составила 143 см. Все это демонстрирует высокую изменчивость и неоднородность ледяного поля. Стратиграфическое описание керна № 2 приведено на рис. 4.

По керну № 2 были построены вертикальные профили плотности, солености и проводимости (рис. 5).

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОРАДАРНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Интерпретация временного георадарного разреза сводится к выяснению двух основных аспектов: (1) формированию скоростной модели среды, на основе которой временной разрез пересчитывается в глубинный, и (2) к попытке объяснения того, как и чем сформировано наблюдаемое волновое поле.

Скоростная модель среды. Керновое бурение имеет самостоятельную научную значимость в плане изучения ледникового покрова, но для георадарных исследований оно является основой для создания наиболее точной скоростной модели лоцируемой среды. Все прочие методы ее построения, в частности по результатам выполнения наклонных зондирований (Роров et al., 2003; Мачерет, 2006; Попов и др., 2001) или по годографу дифрагированных волн (Владов, Старовойтов, 2004; Мачерет, 2006; Попов, 2002), будут уступать ей по качеству.

Морской лед состоит главным образом из трех слоев: снег, пресный и морской льды (Патерсон, 1984). Последние, при прочих равных условиях, различаются значениями мнимой части диэлектрической проницаемости, которая связана с удельным поглощением электромагнитных волн в среде. При этом вещественная часть диэлектрической проницаемости, которая связана со скоростью распространения электромагнитных волн в среде, также изменяется (Мачерет, 2006; Финкельштейн и др., 1977). Диэлектрические проницаемости снега и льда различны (Мачерет, 2006), ввиду чего на этой границе раздела формируется отраженная волна, регистрируемая на временном георадарном разрезе. Таким образом, применительно к морскому льду мы можем рассматривать двуслойную слоисто-однородную скоростную модель среды, в которой вещественная часть диэлектрической проницаемости каждого слоя будет характеризоваться некоторыми средними эффективными значениями $\bar{\epsilon}_1$ (снег) и $\bar{\epsilon}_2$ (лед). Согласно (Никольский, 1973), средняя скорость распространения электромагнитных волн в i -й среде \bar{v}_i такова, что

$$\bar{v}_i = c(\bar{\epsilon}_i)^{-1/2},$$

где c — скорость распространения электромагнитных волн в вакууме, равная 30 см/нс.

Вещественная часть диэлектрической проницаемости сухого снега, в зависимости от плотности, изменяется приблизительно от 1,5 до 2,5 (Robin, 1975). Для ледников, в зависимости от соотношения льда и снежно-фирновой толщи, эта величина изменяется в пределах приблизительно от 3,0 до 3,3 (Богородский и др., 1983; Мачерет, 2006). Однако ситуация кардинально меняется при температуре, близкой к температуре фазового перехода. В этом случае снег и лед становятся влажными и их вещественная часть диэлектрической проницаемости может увеличиться в несколько раз. В предельном случае (таяя вода) она достигает значений, близких к 81 (Мачерет, 2006).

Лед, как и снежно-фирновая толща, обладает слоистой структурой. Каждый слой по-разному формирует отраженный сигнал. Поэтому, ввиду большого разброса значений $\bar{\epsilon}_1$ и $\bar{\epsilon}_2$, однозначно выявить, какому из отражений соответствует граница между снегом и льдом, в ряде случаев бывает затруднительно без априорной информации.

Чтобы лучше разобраться в структуре волнового поля, был проведен натурный эксперимент. На границе снега и льда на глубине 40 см было заглублено два металли-

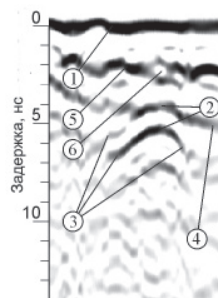


Рис. 6. Фрагмент временного радиолокационного разреза по маршруту Мо_05 через заглубленные металлические контейнеры (район п/б Молодежная).

1 — нулевая отметка; 2 — верхняя часть дифрагированной волны; 3 — ветви дифрагированной волны; 4 — отражение от границы «снег–лед»; 5 — отражение от прослойки льда в снежной толще; 6 — отражение, вызванное нарушением целостности прослойки льда.

ческих цилиндрических контейнера длиной 12 см и диаметром 6,5 см, положенных один на другой. Лунка была засыпана снегом, затем через нее был выполнен георадарный маршрут Мо_05, фрагмент которого представлен на рис. 6. Местонахождение контейнера и фрагмента маршрута показано на рис. 1.

Интенсивное отражение 1, выявляемое на георадарном разрезе (рис. 6) является нулевой отметкой и маркирует положение антенны на снежной поверхности. Ниже располагаются две группы дифрагированных волн, сформированных от контейнеров. Их вершины 2 соответствуют глубинному положению поверхности рефлектора. Отражения 3 являются мнимыми и представляют собой фрагменты дифрагированных волн. Таким образом, рельефное и интенсивное отражение 4 сформировано от границы раздела «снег–лед». Если наши рассуждения верны, то $\bar{\epsilon}_1 \approx 2,3$. Полученное значение не противоречит ожидаемому.

Интенсивное отражение 5, вероятно, сформировано прослойкой льда, которая залегает в приповерхностном слое снега на глубине около 20 см, что составляет 2,02 нс. Обсуждаемое отражение как раз соответствует этой величине (2,1 нс по временному разрезу). Кроме того, непосредственно над контейнерами имеется нарушение целостности слоя 6, что также косвенно подтверждает наши выводы.

Анализ волнового поля. По организационным причинам георадарный профиль через скважину № 2 выполнить не удалось. КERN именно этой скважины был описан, и именно по нему были составлены профили плотности, проводимости и солёности (рис. 5). Однако, как было указано выше, пространственная неоднородность гляциологических параметров ледяного поля столь велика, что распространять полученные результаты измерений на соседние участки в данном конкретном случае представляется малоперспективным.

Обратимся к временному георадарному разрезу, выполненному по маршруту Мо_09 (рис. 7а). Он начинается вблизи скважины № 1, но не проходит через нее и заканчивается в районе скважины № 3, пересекая ее. Маршрут не пересекает скважину № 1, потому что к моменту его выполнения она была уже пробурена и поднявшаяся по ней морская вода исказила бы временной георадарный разрез. Бурение скважины № 3 было произведено после выполнения георадарного профилирования, и разрез в этой части искажен не был. Положение маршрута приведено на рис. 1. В количественном описании волнового поля будем опираться лишь на верхний фрагмент керна

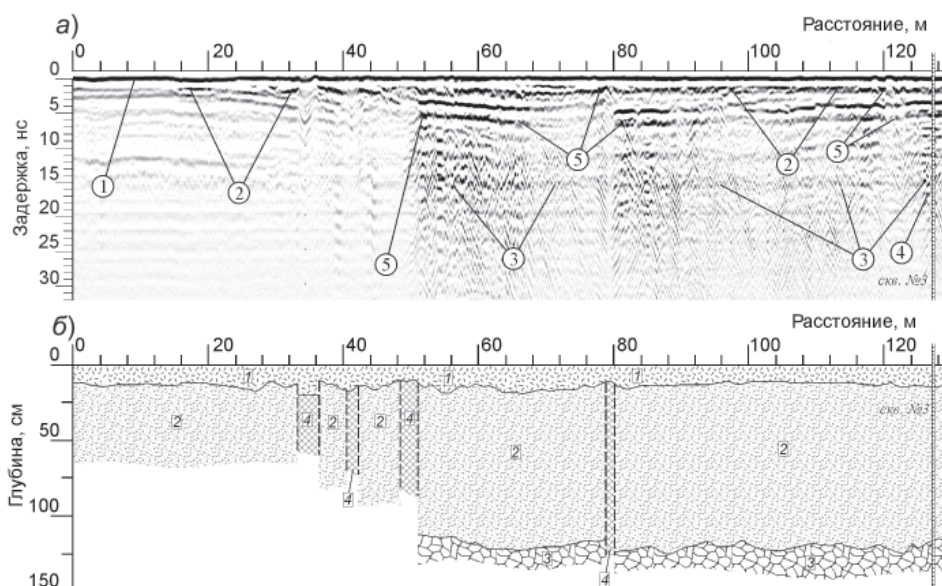


Рис. 7. Временной георадарный (а) и геофизический (б) разрезы по маршруту Мо_09 (район п/б Молодежная).

На георадарном разрезе (а): 1 — нулевая отметка; 2 — отражение от границы «снег–лед»; 3 — отражение от поверхности рыхлого льда или шуги; 4 — предполагаемая граница нижней части морского льда; 5 — дифрагированные волны, связанные с трещинами или краями ледяных плит. На геофизическом разрезе (б) 1 — сухой снег; 2 — морской лед; 3 — очень рыхлый лед, или плотная шуга; 4 — пространство между ледяными блоками, заполненное колотым льдом и снегом. Тонкими линиями показаны границы между средами, утолщенными пунктирными — зоны трещин. Положение маршрута приведено на рис. 1.

(рис. 3в), в силу того, что морская вода является экраном для электромагнитных волн, тем более при столь высоких частотах зондирования.

На временном георадарном разрезе (рис. 7а) интенсивное отражение 1 соответствует положению антенны на снежной поверхности. Ниже по разрезу располагается интенсивное отражение 2, связанное с границей «снег–лед». В районе скважины временная задержка составляет около 1,95 нс. Согласно данным керна (рис. 8), эта граница залегает на глубине около 20 см (против 40 см в предыдущем случае). Это означает, что диэлектрическая проницаемость снежной толщи в этом районе составляет около $\bar{\epsilon}_1 \approx 2,2$. С учетом погрешности и пространственной неоднородности среды, это вполне соответствует характеристике снега для рассмотренного

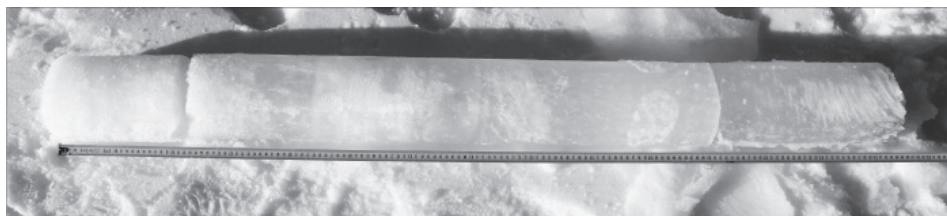


Рис. 8. Верхний фрагмент керна, взятого из скважины № 3 в районе п/б Молодежная. Фото С.С. Пряхина.

выше временного разреза (рис. 6). Отражение 2 выглядит размытым. Это связано с неровностью границы, что подтверждается визуальным анализом керна (рис. 8).

Определимся с положением нижней границы ледяного поля на временном разрезе, проанализировав керн № 2. Согласно плотностному разрезу, имеется скачок плотности на глубине 240 см (рис. 5). Он, в свою очередь, должен вызвать скачок диэлектрической проницаемости (Мачерет, 2006), что приведет к формированию достаточно интенсивного отраженного сигнала. Исходя из общегляциологических представлений, можно ожидать, что диэлектрическая проницаемость морского льда, соленостью 3–4 ‰ вблизи фазового перехода может варьировать в достаточно широких пределах: от 3,1 до 4–5 (Мачерет, 2006; Финкельштейн и др., 1977). Таким условиям соответствует группа отражений 3. Если наше предположение верно, то диэлектрическая проницаемость вышележащего слоя льда составляет около 3,5.

Нижняя поверхность морского льда, вероятнее всего, не регистрируется на георадарном разрезе, во всяком случае, убедительных доказательств ее наличия авторы привести не могут. Данное обстоятельство не должно вызывать изумления, поскольку нижняя часть всех кернов без исключения (рис. 3, рис. 8) характеризуется наличием зоны пористой среды, по которой поднимается соленая морская вода. В ней происходит интенсивное затухание электромагнитных волн. Можно лишь высказать не очень обоснованное предположение, что нижней поверхности льда может соответствовать группа отражений 4 (рис. 7), поскольку ниже их другие отражения отсутствуют.

Вдоль по всему разрезу в промежутке между 2 и 3 наблюдается ряд интенсивных отражений. Анализ показывает, что, вероятнее всего, они сформированы не кратными волнами, а реальными рефлекторами. К сожалению, полученных данных недостаточно для того, чтобы высказывать обоснованные суждения о генезисе данных границ.

Временной разрез изобилует дифрагированными волнами 5. Наиболее интенсивные из них сформированы от краев ледяных плит; менее интенсивные образованы от приповерхностных и придонных трещин. Деформация 2 вблизи зон трещин свидетельствует о том, что их кровля заполнена снегом, что подтверждается на практике.

В первой трети и в середине разреза (в районе 70-го метра) имеется участок, характеризующийся значимым ослаблением отраженного сигнала. Можно с уверенностью предположить, что этот феномен связан с проникновением морской воды вверх вдоль ледяного массива. При этом происходит интенсивное затухание электромагнитных волн. В первой трети маршрута (до 50-го метра) затухание столь велико, что уверенные отражения, сформированные слоями и трещинами, расположенными ниже границы «снег–лед», отсутствуют.

Описание разреза морского льда. Геофизический разрез по маршруту Мо_09 составлен по временному георадарному разрезу с учетом данных керна. Рассматривая разрез (рис. 7б) в целом, можно с уверенностью утверждать, что съемочный маршрут Мо_09 располагается в пределах пяти сmerzшихся плит разного размера. Между ними имеются трещины, засыпанные снегом так, что визуально они не проявляются. В силу гляциологической обстановки, уверенные отражения от нижней части ледяного массива имеются лишь начиная с 50-го метра маршрута.

Мощность снежной толщи практически постоянна по всему маршруту и составляет около 20 см. Исключение составляют участки сочленения плит, где мощность снега возрастает, хотя и незначительно. Ниже располагается массив соленого морского льда мощностью приблизительно от 100 до 120 сантиметров. Исключением являет-

ся участок приблизительно первой трети маршрута, на котором мощности ледника определить не удалось. Ниже располагается слой рыхлого льда, или плотной шуги, который непосредственно контактирует с морской водой. Уверенные отражения от нижней границы льда не получены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прежде всего надо отметить, что заторошенный морской лед является не самым лучшим участком для проведения опытно-методических работ, однако поблизости иной гляциологической ситуации не наблюдалось. С другой стороны, торосы — это вполне обычное явление на полярных морских акваториях. В течение 2,5 часов в пункте стоянки НЭС «Академик Федоров», на морском льду был выполнен значительный комплекс опытно-методических работ. Несмотря на столь ограниченное время, удалось добиться следующих результатов: (1) отработать методику совместных работ буровой и георадарной групп; (2) удостовериться, что имеющейся георадар, несмотря на столь высокую частоту (900 МГц), способен успешно лоцировать морской лед; (3) получены гляцио-георадарные данные и построен геофизический разрез по одному из маршрутов в районе торосов.

Относительно методики георадарного профилирования можно сделать вывод о том, что привлекательная с позиций детальности построения разреза частота зондирования 900 МГц велика именно для морского льда. В ряде случаев она не позволяет получать отражения от его нижней кромки. Для получения полного разреза целесообразно выполнять лоцирование дополнительно на более низкой частоте (например, 270 МГц). Подобная комбинация обеспечит требуемую глубинность, с одной стороны, а с другой — детальность верхней части гляциологического разреза.

Авторы благодарят руководство Российской антарктической экспедиции и НЭС «Академик Федоров» за помощь в организации настоящих работ; гидрохимика НЭС «Академик Федоров» Н.Р. Ишкильдину за выполнение измерений электропроводности и солености морского льда; сотрудников РАЭ С.В. Кашина, А.И. Куцурубубу и С.С. Пряхина за активную помощь в выполнении работ.

S.V. POPOV, S.P. POLJAKOV

RESULTS OF THE GLACIOLOGICAL AND GPR TESTS ON THE SEA ICE IN THE REGION OF MOLODEZHNYAYA ANTARCTIC FIELD BASE IN THE 60-TH RAE (2014/15)

Main results of the glaciological and GPR tests on the marine ice not far from the Russian field base Molodezhnaya are discussed in this paper. Radio-echo sounding was carried out on the frequency of 900 MHz. The methodic of joint glaciological and GPR investigations has been formed. It was found out the 900 MHz GPR is suitable to investigate the marine ice in spite of the height frequency. Geophysical section along one profile formed on GPR and the ice core data is discussed in the paper.

Keywords: GPR technique, marine ice, Antarctica, processing of GPR data, ice core drilling.