Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 3, с. 18–26 **http://www.izdatgeo.ru**

УДК 551.324 DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-3(18-26)

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОРАДАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОРСКОГО ЛЬДА НЕЛЛА-ФИОРДА (РАЙОН СТАНЦИИ ПРОГРЕСС, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА) В СЕЗОН 2016/17 ГОДА

С.В. Попов[1], В.Л. Кузнецов[2], С.С. Пряхин[2], М.П. Кашкевич[3]

[1]*Полярная морская геолого-разведочная экспедиция (ПМГРЭ), 198412, Санкт-Петербург, Ломоносов, ул. Победы, 24, Россия; spopov67@yandex.ru*
[2]*Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Россия*
[3]*Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9, Россия*

Представлены результаты георадарного профилирования на частотах 150, 270, 400 и 900 МГц, а также георадарных зондирований методом общей глубинной точки на припайном морском льду акватории Нелла-фиорда (Восточная Антарктида) в ходе летнего полевого сезона 62-й Российской антарктической экспедиции (2016/17 г.). Работы сопровождались измерением солености морской воды. Выяснено, что наиболее эффективное лоцирование морского льда мощностью около 1 м осуществляется на частотах метрового диапазона длин волн. На временном георадарном разрезе, помимо отражений от нижней кромки льда, выявляется граница между пресной и морской водой. Ее положение подтверждается океанографическими данными. Георадарные зондирования по методике общей глубинной точки позволили построить скоростную модель среды, согласно которой эффективная диэлектрическая проницаемость льда равна 10. Столь значительная величина вызвана интенсивным приповерхностным таянием и переизбытком пресной воды внутри льда. Эффективная диэлектрическая проницаемость слоя пресной воды составляет 75, что связано, вероятно, с шероховатостью нижней кромки льда.

Восточная Антарктида, станция Прогресс, георадарное профилирование, морской лед, метод общей глубинной точки, соленость морской воды

RESULTS OF GROUND-PENETRATING RADAR INVESTIGATIONS ON THE NELLA FIORD SEA ICE (PROGRESS STATION AREA, EAST ANTARCTICA) IN THE 2016/17 AUSTRAL SUMMER FIELD SEASON

S.V. Popov[1], V.L. Kuznetsov[2], S.S. Pryakhin[2], M.P. Kashkevich[3]

[1]*Polar Marine Geosurvey Expedition (PMGE), 24, Pobeda str., Lomonosov, St. Petersburg, 198412, Russia; spopov67@yandex.ru*
[2]*Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Bering str., St. Petersburg, 199397, Russia*
[3]*Saint-Petersburg University, 7-9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia*

The paper presents the main results of the field investigations using multi-frequency (150 MHz, 270 MHz, 400 MHz and 900 MHz) ground-penetrating radar profiling and georadar sensing by the common depth point method.The investigations have been carried out on the fast sea ice of Nella Fiord (Eastern Antarctica) during the 2016/17 austral summer field season. The studies have included the seawater salinity measurements. The sounding of about 1 m thick sea ice have proved to be most effective at the radar frequencies which correspond to the wavelengths in a meter range. Besides the intensive reflections from the lower edge of sea ice, the ground-penetrating radar data have revealed a boundary between fresh and salt water whose position has been corroborated by salinity measurements. The ground-penetrating radar common depth point technique has served as a basis for the subsurface velocity model showing that effective dielectric constant for sea ice equals 10, which is accounted for intense near-surface internal melting and for the ice being exceedingly saturated with fresh water. The effective dielectric permittivity of the fresh water layer is found to be 75 that may have been prompted by roughness of the lower ice boundary.

East Antarctica, Progress Station, ground-penetrating radar sounding, sea ice, common depth point, seawater salinity

ВВЕДЕНИЕ

Пристальное внимание к изучению морского льда Арктики и Антарктики тесно связано как с фундаментальными научными проблемами, так и с сугубо прикладными задачами использования его для организации разгрузки судов, посадочных площадок для приема самолетов и прочих видов логистического обеспечения. Отдавая дань керновому бурению как наиболее точному методу изучения природных сред, необходимо отметить его трудоемкость. Кроме того, этот метод предоставляет информацию лишь в отдельных пунктах, в то время как геофизические исследования позволяют получить полную информацию по профилю. В этом смысле электромагнитные зондирования

© С.В. Попов, В.Л. Кузнецов, С.С. Пряхин, М.П. Кашкевич, 2018

весьма привлекательны ввиду своей эффективности и экономичности.

Георадарным исследованиям морского льда посвящено значительное количество публикаций, отражающих не только результаты натурных измерений, но и теоретические аспекты этого метода. Из современных и наиболее значимых можно отметить публикации [*Финкельштейн и др., 1977; Лебедев, Сухоруков, 2001; Бобров и др., 2008; Haas et al., 1997, 2009; Haas, 2004; Galley et al., 2009; Holt et al., 2009; Panzer et al., 2010, 2013; Lee et al., 2011*]. Однако георадиолокация при всех своих достоинствах прогрессивного геофизического метода имеет и ряд недостатков. В частности, морская вода, характеризующаяся значительной проводимостью, является экраном для электромагнитных волн. Данное обстоятельство сильно сужает спектр использования георадаров в рамках обсуждаемой тематики. Кроме того, прикладной интерес к морскому льду появляется главным образом в ходе летнего полевого сезона, на который приходится пик логистической активности. Однако в это время в силу особенностей полярных широт начинается его интенсивное приповерхностное таяние, что приводит к значительной насыщенности морского льда пресной водой и, как следствие, к опреснению приповерхностного слоя морской воды. Пресная вода, понижая соленость, а тем самым и проводимость, уменьшает экранирующие свойства морской воды, делая возможным эффективное использование электромагнитных методов.

Проверке экспериментальным путем представленных выше рассуждений и были посвящены опытно-методические работы (ОМР), выполненные в ходе летнего полевого сезона 62-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ, 2016/17 г.) на морском льду Нелла-фиорда в районе отечественной станции Прогресс (Восточная Антарктида). Они завершили аналогичные исследования, начатые в сезон 60-й РАЭ (2014/15 г.) в районе полевой базы Молодежная [*Попов, Поляков, 2015*] и продолженные в сезон 61-й РАЭ (2015/16 г.).

МНОГОЧАСТОТНОЕ ГЕОРАДАРНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ

Работы выполнялись 5 января 2017 г. на многолетнем океанографическом профиле ААНИИ в пункте с координатами 69°22.869′ ю.ш., 76°21.777′ в.д. (рис. 1, *а*). Для проведения ОМР был размечен маршрут общей длиной 20 м. Центр его располагался в непосредственной близости от майны, оставшейся после океанографических измерений, проведенных днем ранее (рис. 1, *б*). Георадарное профилирование выполнялось на нескольких частотах: 150, 270, 400 и 900 МГц. В первом и третьем случаях использовался георадар “ОКО-2” (ООО “Логические системы”, Россия) с антеннами АБ-150 и АБ-400М соответственно [*Радиотехнический прибор..., 2009*]. Раздвижная антенна АБ-150 может быть использована для выполнения зондирований с переменной базой. Лоцирование на частотах 270 и 900 МГц осуществлялось георадаром GSSI (Geophysical Survey Systems Inc., США) с системным модулем SIR-3000 и антеннами 50270S и 3101 соответственно [*GSSI..., 2014*]. Приборы перемещались по профилю равномерно пешим порядком.

На рис. 2, *а* представлен временной георадарный разрез, полученный при лоцировании на частоте 150 МГц. Ввиду наличия коррелированной помехи, возникшей по невыясненной причине, произведена горизонтальная фильтрация в окне размером 100 трасс. Наблюдаемые отражения характеризуются мозаичной структурой, в которой слабо выделяются две частично подавленные фильтрацией границы *1* и *2*, расположенные в не-

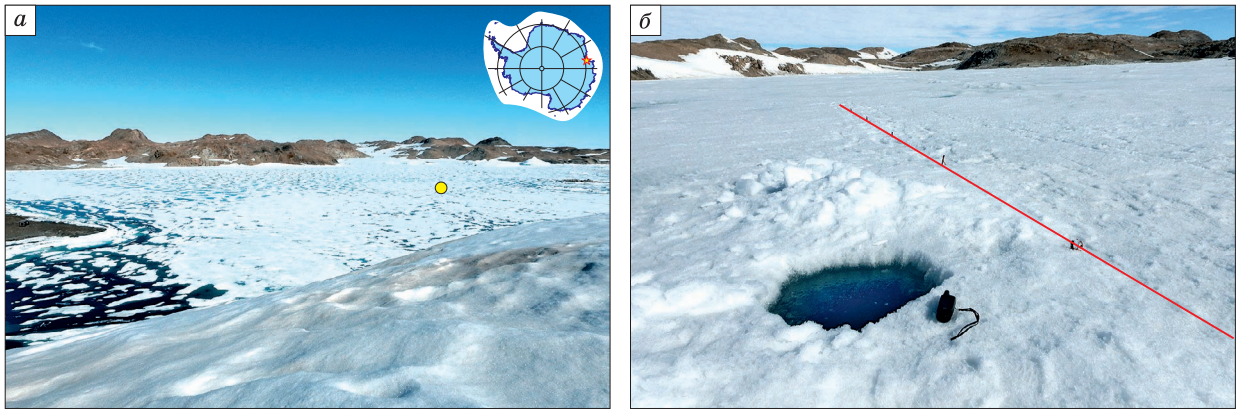

Рис. 1. Расположение района опытно-методических работ на морском льду Нелла-фиорда.

Район работ показан желтым кружком, красной линией – фрагмент маршрута вблизи майны. Фото С.В. Попова, январь 2017 г.

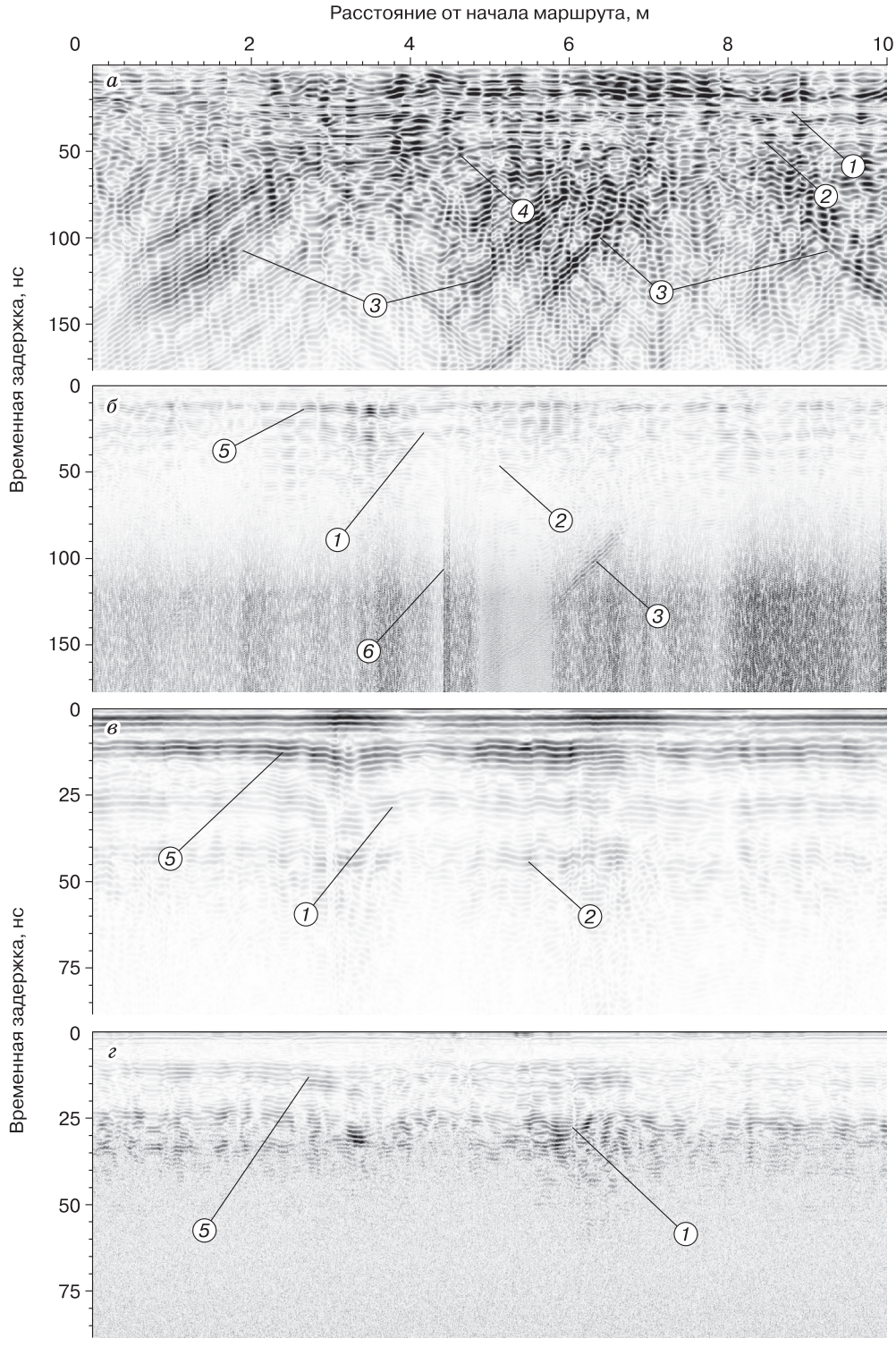

Рис. 2. Временные георадарные разрезы по маршрутам, пройденным в ходе работ на льду Нелла-фиорда при лоцировании на частотах 150 МГц (*а*), 270 МГц (*б*), 400 МГц (*в*) и 900 МГц (*г*).

1 – граница между морским льдом и водой; *2* – граница между пресной и соленой водой; *3* – дифрагированные волны от неоднородностей; *4* – дифрагированная волна, предположительно сформированная нижней частью майны; *5* – граница внутри морского льда; *6* – помеха от переносной радиостанции. Район работ см. на рис. 1.

посредственной близости от майны на задержках 26.6 и 42.3 нс соответственно (см. рис. 2, *а*).

В нижней части имеется большое количество дифрагированных волн *3*, обусловленных, по-видимому, дифракцией от ледяных глыб у нижней кромки морского льда. По мнению океанолога станции Мирный А.Л. Новикова (*частное сообщение*), они могут быть связаны с донным льдом, по тем или иным причинам всплывшим под поверхность. Точки дифракции на разрезе явно не видны. Однако если продлить вверх ветви гипербол дифрагированных волн, то они окажутся в интервале между границами *1* и *2*. Из этого можно заключить, что первая из них связана с границей раздела "лед–вода".

На временном разрезе имеется дифрагированная волна *4* (см. рис. 2, *а*). Она располагается в центре профиля, чуть ниже границы *2*, и, вероятно, сформирована нижней частью майны. Смещение вершины *4* ниже предполагаемой границы раздела "лед–вода" может быть обусловлено тем, что георадарный маршрут располагается чуть в стороне от майны, а не проходит непосредственно над ней (см. рис. 2, *б*). Это приводит к увеличению пути пробега волны до рефлектора [*Попов, Кашкевич, 2015*]. Кроме того, вполне возможно, что отражение связано не с майной как таковой, а с кусками льда, образованными в ходе ее прорубания, которые расположены в низкоскоростной водной толще. Иных признаков майны на временном разрезе не наблюдается.

На рис. 2, *б* представлен временной георадарный разрез, полученный при лоцировании на частоте 270 МГц, после применения горизонтальной фильтрации размером 100 трасс. На нем наблюдаются многочисленные субгоризонтальные отражения (в том числе, вероятно, и переотражения), сформированные как толщей морского льда, так и, предположительно, водной средой. Среди них имеются границы *1* и *2*, выявленные ранее. Следует отметить, что они представляют собой серию субгоризонтальных отражений и располагаются в интервале шириной около 4 нс. Их средние части отмечаются примерно при тех же временных задержках. Особенно хорошо это заметно после применения горизонтальной фильтрации. Помимо *1* и *2* в верхней части разреза имеется интенсивная граница *5*. По-видимому, она связана с верхним положением горизонта, из которого сочится пресная вода, образованная в ходе интенсивного приповерхностного таяния морского льда. Эта граница также представляет собой серию субгоризонтальных отражений, располагающихся в интервале шириной около 4 нс и положением средней части в районе майны на задержке около 12.3 нс. На предыдущем временном разрезе (см. рис. 2, *а*) она, очевидно, также присутствует, но явным образом не выделяется в мозаичной структуре волнового поля. Кроме того, длина волны обсуждаемого лоцирования почти в 2 раза меньше предыдущего. Это, в свою очередь, означает, что разрешение по разрезу в первом случае почти в 2 раза хуже, чем во втором. Данное обстоятельство также может быть причиной видимого отсутствия контрастной границы *5* на предыдущем разрезе (см. рис. 2, *а*).

Дифрагированные волны *3*, сформированные, вероятно, от ледяных глыб, на временном разрезе отсутствуют, за исключением одной. Вертикальная полоса *6* вызвана помехой от работы переносной радиостанции.

На рис. 2, *в* представлен временной георадарный разрез, полученный при лоцировании на частоте 400 МГц. На нем также наблюдаются многочисленные субгоризонтальные отражения, включая *1* и *5*. Для визуализации границы *2* приемлемого качества потребовалось нелинейное усиление отраженного сигнала. Для этого профиль усиления задавался таким образом, чтобы усиливалась лишь вторая половина разреза (от задержки 50 нс и ниже) на величину 16 дБ. Удельное поглощение электромагнитных волн в диссипативных средах растет с частотой [*Финкельштейн и др., 1977; Лебедев, Сухоруков, 2001; Мачерет, 2006*], поэтому с ее ростом ниже границы *1* наблюдается все меньше и меньше отражений (см. рис. 2). В то же время пресная вода даже с небольшой минерализацией характеризуется значительным удельным поглощением электромагнитных волн [*Богородский и др., 1970а,б*]. В частности, для воды Ладожского озера (Ленинградская область) этот параметр составляет 21 дБ/м на частоте 400 МГц, 38 и 40 дБ/м на частоте 900 МГц для разных серий экспериментов и 48 дБ/м на частоте 1500 МГц [*Попов и др., 2017*]. Из вышесказанного можно заключить, что среда, расположенная между границами *1* и *2*, с большой долей вероятности является талой водой с малой минерализацией. Границы *1*, *2* и *5* залегают в тех же интервалах задержек, что и предыдущие. Дифрагированные волны на временном разрезе отсутствуют.

На рис. 2, *г* представлен временной георадарный разрез, полученный при лоцировании на частоте 900 МГц. На нем, как и на всех остальных, наблюдается серия субгоризонтальных отражений *1* и *5*. Отражения ниже *1* не наблюдаются в связи со значительным поглощением волн, а также их рассеянием на неоднородностях.

СКОРОСТНАЯ МОДЕЛЬ СРЕДЫ

При выполнении георадарных работ важным, а порой, и принципиальным вопросом является выбор скоростной модели среды для корректного пересчета временного разреза в глубинный. При этом именно информация о скорости (диэлектрической проницаемости) позволяет отождествлять

выявляемые по георадарным данным объекты с тем или иным вещественным комплексом. Для определения этих параметров, если не принимать в расчет табличные значения, имеется два способа: использование годографов дифрагированных волн от неоднородностей [*Глазовский, Мачерет, 2014*] и выполнение зондирований с переменной базой [*Шереметьев, 1989; Попов и др., 2001; Владов, Старовойтов, 2004; Мачерет, 2006; Глазовский, Мачерет, 2014; Popov et al., 2003*]. Первый способ получил широкое распространение в силу своей простоты и эффективности, однако он не всегда применим на практике. Для использования данного метода необходимо наличие, как минимум, дифрагированной волны с протяженными ветвями, которые могли бы обеспечить расчеты с достаточной точностью. Однако опыт показывает, что подобные особенности дифрагированных волн скорее исключение, чем правило. При этом рефлекторы должны располагаться по всей глубине изучаемого разреза, что встречается достаточно редко. Помимо этого для получения качественной скоростной модели среды требуется высокоточная плановая привязка каждого пункта зондирования, что далеко не всегда осуществляется на практике и зависит от задач проводимых работ.

Зондирования с переменной базой, осуществляемые по методу общей глубинной точки (ОГТ) или общей точки возбуждения (ОТВ), выгодно отличаются от вышеизложенного подхода, поскольку могут быть выполнены практически в любом месте. Высокая точность достигается разметкой профиля. Таким образом, лишь зондирования, проводимые по этим методикам, могут претендовать на формирование наиболее точной скоростной модели среды. В качестве примера можно привести результаты изучения подледникового озера Восток (Восточная Антарктида), где этим способом была измерена мощность ледника в районе пункта бурения скважины 5Г [*Попов и др., 2001; Popov et al., 2003*]. После проникновения в озеро выяснилось, что относительная погрешность выполненных измерений составила менее 0.5 % [*Попов и др., 2012*].

Метод ОГТ предполагает проведение последовательных измерений при перемещении приемной и передающей антенн на одинаковое расстояние от центра расстановки. При использовании метода ОТВ фиксируется положение одной из антенн, а вторая смещается по профилю с одной и с другой стороны от нее [*Боганик, Гурвич, 2006*]. Сложно однозначно оценить, какая из них лучше, применительно к георадиолокации. С одной стороны, вторая проще в реализации, позволяет получить вдвое больший годограф и более качественно учесть наклоны целевых границ. С другой стороны, при выполнении работ по этой методике точки отражения и преломления волн перемещаются по границам раздела сред в значительно большем интервале, чем в первом случае. Это, в свою очередь, приводит к тому, что степень отклонения их конфигурации от прямолинейной влияет на качество результата для системы ОТВ в большей степени, чем для ОГТ.

Антенны АБ-150 отечественного георадара “ОКО-2” являются раздвижными. Их конструктивная особенность предполагает наличие оптоволоконного кабеля, соединяющего обе антенны. Для выполнения работ использовался кабель длиной 10 м, что позволяет выполнять зондирования любым из указанных методов и определить максимальную длину расстановки.

В работах на морском льду применялся метод ОГТ при минимальном расстоянии между антеннами 80 см и максимальном 980 см, что определялось конструктивными особенностями антенн. Смещение каждой из них по профилю составляло 10 см. Расчеты выполнялись в рамках модели слоисто-наклонной среды, математическое описание которой дано в [*Попов, 2017*].

На рис. 3, *а* представлена радарограмма, полученная в ходе зондирований по системе ОГТ при лоцировании на частоте 150 МГц. Как видно на рис. 2, *а*, временной разрез, полученный на той же аппаратуре, изобилует волнами-помехами, маскирующими целевые границы. Они настолько интенсивные, что для более надежного разрешения разреза пришлось выполнить горизонтальную фильтрацию. Эти помехи, правда в меньшей степени, наблюдаются и на радарограмме, полученной в ходе зондирований по системе ОГТ (см. рис. 3, *а*), однако в этом случае их достаточно сложно подавить. Требуемые годографы выбирались как наиболее контрастные отражения, при этом задержки отраженного сигнала при минимальном разносе антенн должны были совпадать с границами, выявляемыми в ходе профилирования (см. рис. 2).

Теоретический годограф *1* на радарограмме рис. 3, *а* соответствует прямой волне, т. е. электромагнитной волне, распространяющейся по воздуху между антеннами. Она очень слабая, поскольку излучается и регистрируется боковыми лепестками, и становится заметной на радарограмме лишь при очень большом усилении.

Теоретический годограф *2* на рис. 3, *а* соответствует границе, залегающей на глубине 1.1 м, и *эффективной* диэлектрической проницаемости вышележащей среды $\tilde{\varepsilon} = 10$. В работе Х. Луэнга [*Looyenga, 1965*] приводится соотношение, связывающее этот параметр с объемным содержанием влаги w для двухкомпонентной смеси “лед–вода” с диэлектрическими проницаемостями ε_i и ε_w соответственно:

$$\tilde{\varepsilon} = \left[\varepsilon_i^{1/3} + w\left(\varepsilon_w^{1/3} - \varepsilon_i^{1/3} \right) \right]^3 .$$

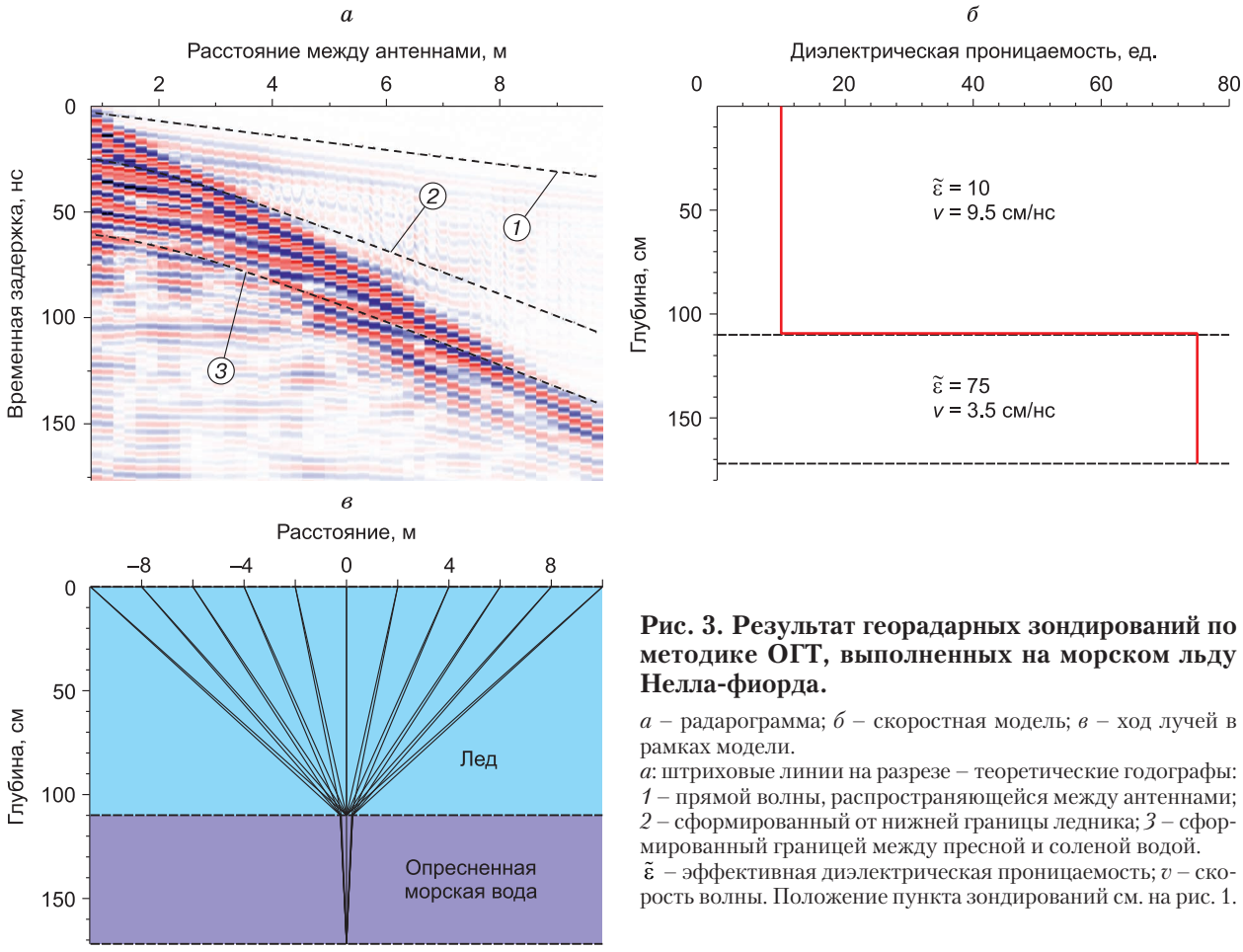

Рис. 3. Результат георадарных зондирований по методике ОГТ, выполненных на морском льду Нелла-фиорда.

а – радарограмма; *б* – скоростная модель; *в* – ход лучей в рамках модели.
а: штриховые линии на разрезе – теоретические годографы: *1* – прямой волны, распространяющейся между антеннами; *2* – сформированный от нижней границы ледника; *3* – сформированный границей между пресной и соленой водой.
$\tilde{\varepsilon}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость; *v* – скорость волны. Положение пункта зондирований см. на рис. 1.

При этом предполагается, что водяные включения имеют сферическую форму. Графически это соотношение представлено на рис. 4. Согласно указанной модели, полученному значению диэлектрической проницаемости соответствует лед с объемным содержанием воды 23.5 %. Такое высокое значение объясняется тем, что, согласно натурным наблюдениям, в приповерхностной части ледника было много талой воды, она сочилась и выливалась в майну.

Теоретический годограф *3* на рис. 3, *а* соответствует границе, залегающей на глубине 1.72 м, и эффективной диэлектрической проницаемости вышележащей среды $\tilde{\varepsilon} = 75$. Полученное высокое значение может быть связано лишь с талой водой. С другой стороны, оно слишком низкое для нее. В работе П. Рэя [*Ray, 1972*] приводится эмпирическое соотношение зависимости диэлектрической проницаемости воды ε_w от температуры T:

$$\varepsilon_w = 78.54\left(1 - 4.579\cdot 10^{-3}\tilde{T} + \right.$$
$$\left. + 1.19\cdot 10^{-5}\tilde{T}^2 - 2.8\cdot 10^{-8}\tilde{T}^3\right),$$

где $\tilde{T} \equiv T - 25$.

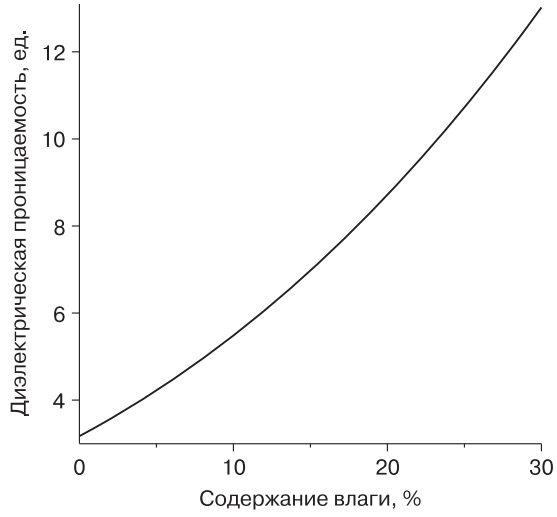

Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости двухкомпонентной смеси лед–вода от объемного содержания влаги [*Looyenga, 1965*].

Близкие значения могут быть получены по эмпирической формуле Г.Я. Черняка [*1987*]:

$$\varepsilon_w = 80 / [1 + 0.0048(T - 20)].$$

Зависимости $\varepsilon_w(T)$ для каждого из этих соотношений в метровом и дециметровом диапазоне волн приведены на рис. 5. Из него следует, что при температуре таяния диэлектрическая проницаемость воды составляет $\varepsilon_w \approx 88$.

Имеющееся различие можно объяснить тем, что нижняя поверхность льда не является ровной. В частности, на это указывают дифрагированные волны, приведенные на рис. 3, *а*, и конфигурация целевых границ, представленных на рис. 2. Наличие ледяных глыб, характеризующихся высокой скоростью распространения электромагнитных волн, вполне способно уменьшить эффективную диэлектрическую проницаемость всего вышележащего слоя.

Однако для шероховатости целевых границ (см. рис. 2) есть и иное объяснение. Даже если физические границы и гладкие (хоть это и маловероятно), вдоль разреза может меняться эффективная диэлектрическая проницаемость, а значит, и эффективная скорость распространения электромагнитных волн. Как известно, эти величины весьма чувствительны к содержанию влаги [*Мачерет, 2006*]. Таким образом, рельефность границ вполне может быть обусловлена неравномерностью распределения вдоль по разрезу свободной воды по глубине. Она может быть связана не только с особенностями строения ледника, но и с *боковой фильтрацией* талой воды в майну. В частности, пробуренная скважина в водоносном или нефтеносном пласте приводит к тому, что жидкость устремляется в нее [*Пятибрат, 2012*], это и наблюдалось на практике. В свою очередь это означает, что после возникновения скважины (или майны) в нашем случае обязательно произойдет изменение распределения талой воды во льду, что вызывает деформацию целевых границ на временном георадарном разрезе. Аналогичные изменения наблюдались авторами в открытых трещинах [*Попов, Поляков, 2016*].

Тем не менее нет никаких сомнений в том, что указанный слой малой мощности является распресненной морской водой. Скоростная модель среды приведена на рис. 3, *б*. На рис. 3, *в* показан ход лучей в среде.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Маршрут для выполнения ОМР был размечен в одном из пунктов океанографических работ ААНИИ, на котором за день до этого выполнялись измерения температуры и солености морской воды автономным профилографом SeaCAT 19 plus V2 (Sea-Bird Scientific, США). Профиль последней приведен на рис. 6. Из него следует, что в интервале глубин от 1.6 до 2.0 м имеется достаточно контрастная граница между распресненной и морской водой. Согласно теоретическим воззрениям на процессы распространения электромагнитных волн, она должна наблюдаться на временном георадарном разрезе, что и подтвердили результаты работ.

Антарктическое лето 2016/17 г. было достаточно теплым. Это привело к интенсивному приповерхностному таянию морского льда и, как следствие, к значительной насыщенности его

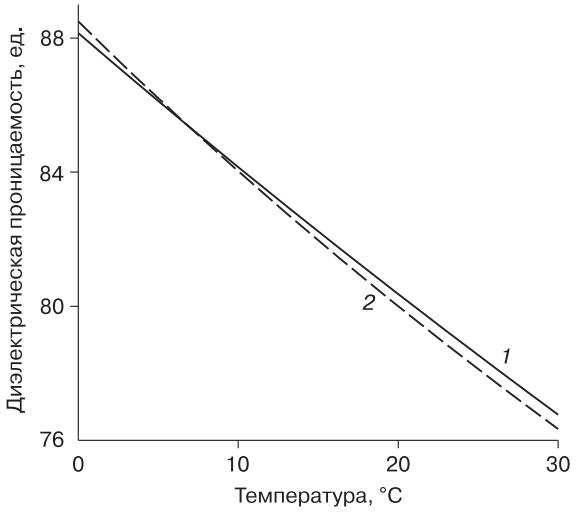

Рис. 5. Зависимость вещественной части диэлектрической проницаемости пресной воды от температуры для разных эмпирических моделей:

1 – по [*Ray, 1972*]; *2* – по [*Черняк, 1987*].

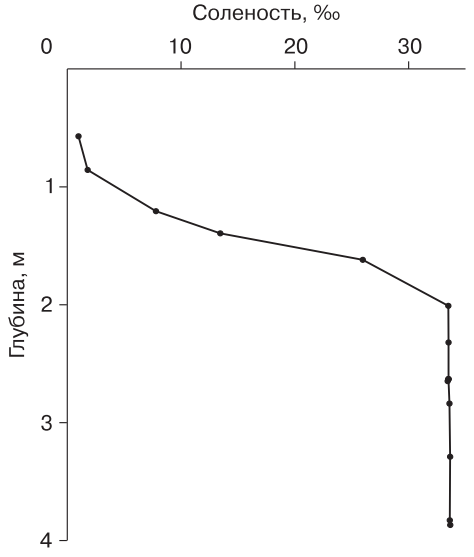

Рис. 6. Профиль солености приповерхностной части Нелла-фиорда.

пресной водой, а также к опреснению приповерхностного слоя морской воды. Этот процесс нашел отражение как в георадарных, так и в океанографических данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в ходе летнего полевого сезона 62-й РАЭ (2016/17 г.) комплексные геофизико-океанографические работы подтвердили перспективность использования метода электромагнитных зондирований промышленными георадарами для изучения морского льда и определения мощности опресненного слоя морской воды. Они показали, что лоцирование относительно тонкого (около 1 м) морского льда осуществляется на низких частотах до 400 МГц. Ожидается, что более мощные льды будет целесообразно изучать на частотах метрового диапазона. Кроме того, в ходе исследований подтверждена возможность определения положения границы между пресной и морской водой дистанционными электромагнитными методами.

Как указывалось выше, георадарные исследования проводились ранее в районе полевой базы Молодежная [*Попов, Поляков, 2015*]. Следует отметить, что если обсуждаемые в настоящей статье работы осуществлялись практически в идеальных условиях (все границы были субгоризонтальными и относительно ровными), то исследования в районе базы Молодежная выполнялись на торошенном льду. Это весьма неблагоприятно сказывается на любых дистанционных исследованиях. Тем не менее даже в этом случае отражения от нижней поверхности льда, пусть не слишком контрастные и уверенные, все же были получены [*Попов, Поляков, 2015*]. Это свидетельствует о больших возможностях метода георадиолокации применительно к изучению морского льда. Однако имея в виду, что соленая морская вода является безусловным экраном для электромагнитных волн, следует заключить, что положительные результаты в обоих случаях были достигнуты лишь благодаря интенсивному приповерхностному таянию. Это, в свою очередь, привело к опреснению верхней части водного слоя и сделало его прозрачным для электромагнитных волн. Маловероятно, что в зимний период при отсутствии опреснения столь качественные результаты могут быть получены.

Авторы благодарят руководство Российской антарктической экспедиции и начальника станции Прогресс А.В. Миракина, а также своих коллег – участников 62-й РАЭ Г.Г. Аршакяна, Д.П. Бляхарского, А.В. Дробязко, А.И. Куцурубу и Н.В. Сандалюка за помощь при выполнении настоящих исследований. Авторы выражают признательность сотрудникам редакционной группы журнала Н.В. Арутюнян и Е.Ю. Соколовой за правки, которые безусловно сделали нашу статью лучше.

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

Литература

Бобров Н.Ю., Дмитриев В.В., Крылов С.С. и др. О возможности применения георадиолокации при гидрологических исследованиях в устьевых зонах рек // Вестн. СПбГУ. Сер. 7, 2008, вып. 2, с. 76–81.

Bobrov, N.Yu., Dmitriev, V.V., Krylov, S.S., et al., 2008. New possibilities for GPR application to hydrogeological investigations of freshwater reservoirs. Vestnik SPbGU, Series 7, issue 2, pp. 76–81.

Боганик Г.Н. Сейсморазведка / Г.Н. Боганик, И.И. Гурвич. Тверь, Изд-во АИС, 2006, 744 с.

Boganik, G.N., Gurvich, I.I., 2006. Seismic Exploration. Izd-vo AIS, Tver, 744 pp. (in Russian)

Богородский В.В., Трепов Г.В., Федоров Б.А. и др. Использование электромагнитных волн, распространяющихся в пресной воде, для активной локации и других целей // Тр. ААНИИ, 1970а, т. 295, с. 116–119.

Bogorodskii, V.V., Trepov, G.V., Fedorov, B.A., et al., 1970a. The use of EM wave propagation in fresh water for active detection and other purposes. Tr. AANII, vol. 295, pp. 116–119. (in Russian)

Богородский В.В., Трепов Г.В., Федоров Б.А. и др. Радиолокационное зондирование пресной воды // Тр. ААНИИ, 1970б, т. 295, с. 185–187.

Bogorodsky, V.V., Trepov, G.V., Fedorov, B.A., et al., 1970b. Radar sounding measurements in fresh water. Tr. AANII, vol. 295, pp. 185–187. (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., Starovoitov, A.V., 2004. Introduction to GPR survey. 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, 527 с.

Glazovskii, A.F., Macheret, Y.Y., 2014. Water in Glaciers. Methods and results of geophysical and remote investigations. GEOS, Moscow, 527 pp. (in Russian)

Лебедев Г.А. Распространение электромагнитных и акустических волн в морском льду / Г.А. Лебедев, К.К. Сухоруков. СПб., Гидрометеоиздат, 2001, 82 с.

Lebedev, G.A., Sukhorukov, K.K., 2001. EM and Acoustic Waves Propagation in Sea Ice. Gidrometeoizdat, Saint Petersburg, 82 pp. (in Russian)

Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М., Науч. мир, 2006, 392 с.

Macheret, Y.Y., 2006. Radio echo sounding of Glaciers. Nauchny Mir, Moscow, 392 pp. (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., Кашкевич М.П. Двухпозиционные зондирования в георадиолокации: границы применимости и возможности метода // Пробл. Арктики и Антарктики, 2015, т. 105, № 3, с. 99–110.

Popov, S.V., Kashkevich, M.P., 2015. Two-position sounding in ground-penetrating radar technique: restrictions and possibilities. Probl. Arktiki i Antarktiki 105 (3), 99–110.

Попов С.В., Кашкевич М.П., Кашкевич В.И. и др. Удельное поглощение электромагнитных волн дециметрового диапазона в воде Ладожского озера, Ленинградская область // Пробл. Арктики и Антарктики, 2017, т. 112, № 2, с. 43–49.

Popov, S.V., Kashkevich, M.P., Kashkevich, V.I., et al., 2017. Absorption of UHF electromagnetic waves in the water of Lake Ladoga (Leningrad region). Problemy Arktiki i Antarktiki 112 (2), 43–49.

Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В. и др. 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., et al., 2012. Russian seismic, radio and seismological investigations of subglacial Vostok Lake. Led i Sneg 4 (120), 31–38.

Попов С.В., Миронов А.В., Шеремет'ев А.Н. и др. Измерение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике в районе станции Восток // Материалы гляциол. исслед., 2001, вып. 90, с. 206–208.

Popov, S.V., Mironov, A.V., Sheremet'yev, A.N., et al., 2001. Measurements of mean velocity of EM wave propagation in glacier ice at Vostok station. Mater. glyatsiol. issled. Iss. 90, pp. 206–208.

Попов С.В., Поляков С.П. Результаты гляцио-георадарных опытно-методических работ на морском льду в районе антарктической полевой базы Молодежная в сезон 60-й РАЭ (2014/15 г.) // Пробл. Арктики и Антарктики, 2015, т. 106, № 4, с. 54–62.

Popov, S.V., Polyakov, S.P., 2015. Results of glaciological GPR research and methodology works in the area of the Antarctic field base Molodezhnaya station in the season of the 60th RAE (2014/15). Problemy Arktiki i Antarktiki 106 (4), 54–62.

Попов С.В., Поляков С.П. Георадарное лоцирование трещин в районе российских антарктических станций Прогресс и Мирный (Восточная Антарктида) в сезон 2014/15 года // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 1, с. 90–98.

Popov, S.V., Polyakov, S.P., 2016. GPR sounding of ice crevasses of the area of the Russian Progress and Mirny stations (East Antarctica) during the field season of 2014/2015. Earth's Cryosphere XX (1), 82–90.

Пятибрат В.П. Основы подземной гидромеханики. Ухта, УГТУ, 2012, 123 с.

Pyatibrat, V.P., 2012. Foundations of Subsurface Hydromechanics. UGTU, Ukhta, 123 pp. (in Russian)

Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) "ОКО-2": Техн. описание. Раменское, ООО "Логические системы", 2009, 94 с.

Radiotechnical device OKO-2 for subsurface scanning (Ground Penetrating Radar, GPR), 2009. Technical specification. OOO Logicheskie Sistemy (Logical Systems), Ramenskoye, 94 pp. (in Russian)

Финкельштейн М.И. Радиолокация слоистых земных покровов / М.И. Финкельштейн, В.Л. Мендельсон, В.А. Кутев. М., Сов. радио, 1977, 176 с.

Finkelshtein, M.I., Mendelson, V.L., Kutev, V.A., 1977. The Radar Observations of Layered Ground Covers. Sovetskoye radio, Moscow, 176 pp. (in Russian)

Черняк Г.Я. Электромагнитные методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М., Недра, 1987, 211 с.

Chernyak, G.Ya., 1987. Electromagnetic Methods in Hydrogeology and Engineering Geology. Nedra, Moscow, 211 pp. (in Russian)

Шеремет'ев А.Н. Измерение скорости распространения электромагнитных волн в леднике на Куполе "В" в Антарктиде // Электрофизические и физико-механические свойства льда / Ред. В.В. Богородский, В.П. Гаврило. Л., Гидрометеоиздат, 1989, с. 59–64.

Sheremetiev, A.N., 1989. Measuring velocity of electromagnetic waves propagation in glacier on Dome B in Antarctica. In: Bogorodskii, V.V., Gavrilov, V.P. (Eds.). Elektrofizicheskie i fizikomekhanicheskie svoistva lda (Electro-physical and physicomechanical properties of ice). Gidrometeoizdat, Leningrad, pp. 59–64. (in Russian)

Galley, R.J., Trachtenberg, M., Langlois, A., et al. Observations of geophysical and dielectric properties and ground penetrating radar signatures for discrimination of snow, sea ice and freshwater ice thickness // Cold Reg. Sci. Technol., 2009, vol. 57, No. 1, p. 29–38, DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.01.003.

GSSI Antennas Manual. Geophysical Survey Systems, Inc., Salem, NH, MN30-903 Rev. E, 2014, 99 p.

Haas, C. Late-summer sea ice thickness variability in the Arctic Transpolar Drift 1991–2001 derived from ground-based electromagnetic sounding // Geophys. Res. Lett., 2004, vol. 31, p. L09402, DOI: 10.1029/2003GL019394.

Haas, C., Gerland, S., Eicken, H., et al. Comparison of sea-ice thickness measurements under summer and winter conditions in the Arctic using a small electromagnetic induction device // Geophysics, 1997, vol. 62, No. 3, p. 749–757.

Haas, C., Lobach, J., Hendricks, S., et al. Helicopter-borne measurements of sea ice thickness, using a small and lightweight, digital EM system // J. Appl. Geophys., 2009, vol. 67, No. 3, p. 234–241.

Holt, B., Kanagaratnam, P., Gogineni, S.P., et al. Sea ice thickness measurements by ultrawideband penetrating radar: First results // Cold Reg. Sci. Technol., 2009, vol. 55, No. 1, p. 33–46.

Lee, Y.J., Lim, W.K., Ewe, H.T. A study of an inversion model for sea ice thickness retrieval in Ross Island, Antarctica // Prog. Electromagn. Res., 2011, vol. 111, p. 381–406.

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

Panzer, B., Gomez-Garcia, D., Leuschen, C., et al. An ultra-wideband, microwave radar for measuring snow thickness on sea ice and mapping near-surface internal layers in polar firn // J. Glaciol., 2013, vol. 59, No. 214, p. 244–254.

Panzer, B., Leuschen, C., Patel, A., et al. Ultra-wideband radar measurements of snow thickness over sea ice // Proc. of 2010 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp., 2010, p. 3130–3133, DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5654342.

Popov, S.V., Sheremet'ev, A.N., Masolov, V.N., et al. Velocity of radio-wave propagation in ice at Vostok station, Antarctica // J. Glaciol., 2003, vol. 49, No. 165, p. 179–183.

Ray, P.S. Broadband complex refractive indices of ice and water // Appl. Opt., 1972, vol. 11, No. 8, p. 1836–1844, DOI:10.1364/AO.11.001836.

Поступила в редакцию
23 марта 2017 г.