

Ледники и ледниковые покровы

УДК 550.8.056

Радиолокационное зондирование неглубоких подледниковых водоёмов: теоретические предпосылки и практические результаты

© 2010 г. С.В. Попов

Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург

spopov67@yandex.ru

Статья принята к печати 16 февраля 2010 г.

Антарктида, подледниковые водоёмы, радиолокационное профилирование.
Antarctica, radio-echo sounding, subglacial water bodies.

Рассматривается проблема радиолокационного зондирования неглубоких пресноводных подледниковых водоёмов. Приводится модель формирования временного радиолокационного разреза при распространении сферических электромагнитных волн в трёхмерном пространстве и трёхслойной среде. Выполнено математическое моделирование и оценены характеристики сред для получения отражений от их придонной части. Дан временный радиолокационный разрез, полученный в районе одного из подледниковых водоёмов Восточной Антарктиды. Исследования показали, что на разрезе могут присутствовать отражения, сформированные от его дна.

Введение

В течение последних десяти лет автор исследует подледниковые водоёмы центральной части Восточной Антарктиды. За это время обнаружено около 50 подобных объектов [18]. Исследования показали, что с помощью соответствующей радиолокационной аппаратуры возможно успешное их лоцирование, которое при глубине водоёмов до 10–15 м позволяет получать уверенные отражения от их дна. Аналогичные работы велись ещё в 1970-х годах сотрудниками отдела физики льда ААНИИ [2, 3]. Выполнены подобные работы и зарубежными коллегами [16]. Морфология подлёдного рельефа в районе выявленных подледниковых водоёмов показывает, что их глубина, вероятно, соответствует этой величине [16]. Так, глубина подледникового оз. Пионерское (Восточная Антарктида), в районе которого выполнена крупномасштабная радиолокационная съёмка [11, 9, 18], по данным метода отражённых волн составляет не более 30 м (А.М. Попков, частное сообщение).

Тем не менее, на временных радиолокационных разрезах, полученных в процессе полевых работ, границ, которые могли бы соответствовать дну водоёмов, установлено не было. Этот факт уже содержит в себе важную информацию, например, о том, что

вода в водоёмах имеет значительную минерализацию (поэтому коэффициент поглощения электромагнитных волн в ней существенно увеличивается) или что дно водоёмов сложено рыхлыми отложениями (в результате коэффициент отражения электромагнитных волн от его дна уменьшается). Однако имеется и иное объяснение: на получаемых временных радиолокационных разрезах отражения от дна водоёмов имеются, но принятый граф обработки не позволяет их правильно толковать. Выяснению данного вопроса и посвящена настоящая работа.

Оценка возможности успешного лоцирования подледниковых водоёмов

Прежде всего выясним, можно ли теоретически зарегистрировать отражение от дна подледникового водоёма с помощью имеющейся на сегодняшний день радиолокационной аппаратуры. Для этого оценим соотношение амплитуд отражённых сигналов от водного зеркала водоёма A_1 и от его дна A_2 при разных параметрах. В результате получим соотношение мощностей принятого и излучённого сигналов (соответственно P_1 и P_2) для двухслойной однородной изотропной диссипативной среды при однопозиционном зондировании (т.е. когда передающая и приёмная антенны располагаются в одном пункте).

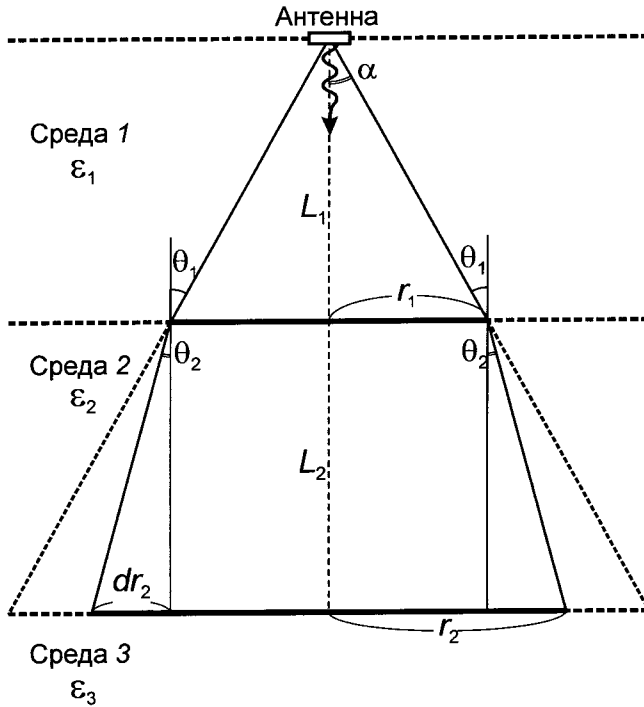


Рис. 1. Схема распространения электромагнитных волн в трёхслойной среде

Fig. 1. Chart of radio wave propagation in 3-layer space

Обратимся к рис. 1. Сферическая электромагнитная волна формируется на передающей антенне, которая характеризуется некоторым коэффициентом усиления $\Psi(\alpha)$, зависящим от угла зондирования α . Последний определяется диаграммой направленности антенны и служит её главной характеристикой. При распространении в пространстве происходит геометрическое расхождение фронта волны, пропорциональное квадрату расстояния. Оно равно $4\pi L_1^2$. Взаимодействие волны и границы раздела сред порождает отражённую (или вторичную) волну, которая формируется на некотором участке поверхности площадью σ_1 (эффективная площадь рассеяния). При этом отражается только часть энергии, которая в общем случае определяется коэффициентом рассеяния по мощности \bar{R}_1^2 . В соответствии с принципом Гюйгенса – Френеля отражающая поверхность становится источником вторичной волны, которая распространяется в пространстве и достигает приёмной антенны. Характер взаимодействия с последней определяется эффективной площадью апертуры приёмной антенны A_r . Кроме того, среда, в которой распространяется волна, относится к диссипативной, т.е. в ней происходит её поглощение, определяемое параметром N_1 . Таким образом, мы получили уравнение дальности радиолокации, впервые выведенное Керром [19]:

$$\frac{P_1}{P_T} = \Psi(\alpha) A_r \sigma_1 \bar{R}_1^2 \frac{N_1^2}{(4\pi L_1^2)^2}. \quad (1)$$

Получим энергетическое соотношение для аналогичной трёхслойной среды. На границе раздела часть энергии проходит из среды 1 в нижележащую среду 2, распространяется в ней, отражается от границы раздела сред 2 и 3, распространяется обратно и в конечном итоге достигает приёмной антенны (см. рис. 1). Проникновение волны через границу раздела сопровождается её преломлением и регламентируется коэффициентом преломления Френеля по мощности Q_2^2 . При переходе через границу раздела сред происходит также дополнительное расхождение (при попадании в менее диэлектрически плотную среду) или схождение (при попадании в более диэлектрически плотную среду) фронта волны. Последнее (правда, применительно к радиолокационному зондированию с воздушного носителя) известно как «фактор фокусировки». Его суть показана на рис. 1. При распространении волны в среде 2 на расстояние L_2 происходит геометрическое расхождение фронта $4\pi(L_1 + L_2)^2$. Достигая границы раздела сред 2 и 3, на некотором участке площадью σ_2 формируется отражённая волна. Характер этого процесса, как и в предыдущем случае, определяется коэффициентом рассеяния по мощности \bar{R}_2^2 . В среде 2 происходит поглощение, определяемое поглощением во второй среде N_2 . Таким образом,

$$\frac{P_2}{P_T} = \Psi(\alpha) A_r \sigma_2 \bar{R}_2^2 Q_2^4 \frac{N_1^2 N_2^2}{(4\pi(L_1 + L_2)^2)^2}. \quad (2)$$

В случае общей антенны для передачи и приёма или их схожести (что реализуется на практике) A_r и $\Psi(\alpha)$ связаны соотношением [12, с. 11]

$$\Psi(\alpha) = 4\pi A_r / \lambda_0^2, \quad (3)$$

где λ_0 – длина волны в воздухе. Ослабление при распространении волны в диссипативной среде по мощности при двукратном прохождении составляет $2\xi_i L_i$, где ξ_i – удельное поглощение в i -й среде, дБ/м. После соответствующих преобразований получаем выражение для величины затухания по мощности в единицах СИ:

$$N_i^2 = 10^{-\xi_i \frac{L_i}{5}}. \quad (4)$$

Обобщим (1) и (2) с учётом (3) и (4) на i -е число слоёв:

$$\frac{P_i}{P_T} = \frac{\Psi^2(\alpha) \lambda_0^2 \sigma_i \bar{R}_i^2}{(4\pi)^3 (\sum_{j=1}^i L_j)^4} \prod_{j=1}^i \left[Q_j^4 10^{-\frac{L_j}{5} \xi_j} \right]; Q_1 = 1. \quad (5)$$

Взаимодействие волны с границей раздела сред i в общем случае регулируется коэффициентами рассеяния \bar{R}_i и преломления Q_{i+1} Френеля. Первый из них, согласно закону диффузного отражения Ламберта, пропорционален косинусу угла падения, т.е. может быть представлен как $\bar{R}_i = R_i(0) \cos \theta$. При

горизонтальной поляризации, которая имеет место на практике,

$$R_i = \frac{\dot{W}_{i+1} \cos \theta_i - \dot{W}_i \cos \theta_{i+1}}{\dot{W}_{i+1} \cos \theta_i + \dot{W}_i \cos \theta_{i+1}},$$

где \dot{W}_i – комплексное волновое сопротивление i -й среды; в рассматриваемом нами случае немагнитных сред $\dot{W}_i = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_i}}$. Углы падения и преломления в узле

формирования вторичной волны, подчиняющиеся закону Снеллиуса, $\frac{\sin \theta_{i+1}}{\sin \theta_i} = \frac{\sqrt{\epsilon_i}}{\sqrt{\epsilon_{i+1}}}$, где ϵ_i – ком-

плексные коэффициенты диэлектрической проницаемости [5, 6, 13]. Таким образом, после соответствующих преобразований получаем:

$$R_i = \frac{\sqrt{\epsilon_i} \cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_{i+1}} \cos \theta_{i+1}}{\sqrt{\epsilon_i} \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_{i+1}} \cos \theta_{i+1}} = \frac{\sqrt{\epsilon_i - \epsilon_i \sin^2 \theta_i} - \sqrt{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i \sin^2 \theta_i}}{\sqrt{\epsilon_i - \epsilon_i \sin^2 \theta_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i \sin^2 \theta_i}}, \quad (6)$$

$$\bar{R}_i = \frac{\sqrt{\epsilon_i} - \sqrt{\epsilon_{i+1}}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}} \cos \theta_i, \quad (7)$$

$$Q_{i+1} = 1 - R_i = \frac{2\sqrt{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i \sin^2 \theta_i}}{\sqrt{\epsilon_i - \epsilon_i \sin^2 \theta_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i \sin^2 \theta_i}}. \quad (8)$$

Оценка эффективной площади рассеяния σ_i – наиболее сложный вопрос. Она выполняется главным образом экспериментально и представляет собой область, в которой формируются вторичные волны. Следуя [1, с. 74], в качестве эффективной площади рассеяния на границе раздела 1-й и 2-й сред будем рассматривать область, равную половине площади первой зоны Френеля. Её радиус r_1 зависит от длины волны в среде λ_1 :

$$r_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda_1 L_1}, \quad (9)$$

$$\sigma_1 = \frac{\pi}{4} \lambda_1 L_1.$$

Для расчёта радиуса области, соответствующей σ_2 , возьмём за основу зону взаимодействия волны и границы раздела сред 1 и 2 радиуса r_1 . Она служит основанием конуса, электромагнитное поле внутри которого формирует отражённый сигнал на приёмной антенне. Продолжим его образуя до пересечения с границей раздела сред 2 и 3 с учётом законов преломления и получим радиус r_2 области формирования отражённой волны (см. рис. 1). Исходя из геометрических построений,

$$dr_2 = L_2 \frac{r_1 \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2(r_1^2 + L_1^2) - \epsilon_1 r_1^2}},$$

$$r_2 = r_1 \left(1 + \frac{L_2 \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2(r_1^2 + L_1^2) - \epsilon_1 r_1^2}} \right). \quad (10)$$

Распространим (10) на произвольное число слоёв i с учётом (9) и $\lambda_i = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_i}}$, где c – скорость света в вакууме, f – частота зондирующих импульсов. Тогда

$$r_i = \sqrt{c \epsilon_1} \sum_{j=1}^i \frac{L_j}{\sqrt{\epsilon_j (c + 4f L_1 \sqrt{\epsilon_1}) - c \epsilon_1}} \quad \text{и} \quad (11)$$

$$\sigma_i = \pi c \epsilon_1 \left(\sum_{j=1}^i \frac{L_j}{\sqrt{\epsilon_j (c + 4f L_1 \sqrt{\epsilon_1}) - c \epsilon_1}} \right)^2. \quad (12)$$

Рассчитаем соотношение амплитуд отражённых сигналов от первого и второго слоёв (соответственно A_1 и A_2) при вертикальном зондировании и зеркальном отражении. Для этого воспользуемся соотношением (5) с учётом выражений (8), (11), (12) и $A_i \sim \sqrt{P_i}$. Рассматриваемый процесс полностью подчиняется лучевому приближению, поэтому заменим коэффициент рассеяния \bar{R}_i коэффициентом отражения R_i (6). Тогда

$$\frac{A_2}{A_1} \Big|_{\theta_1=0} = \frac{\sqrt{\sigma_2} R_2 Q_2^2}{\sqrt{\sigma_1} R_1} \frac{L_1^2}{(L_1 + L_2)^2} N_2,$$

$$\frac{A_2}{A_1} \Big|_{\theta_1=0} = 10^{\xi_{210}} \frac{4 \epsilon_3 (\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}) (\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_3}) L_1^2}{(\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}) (\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_3})^3 (L_1 + L_2)^2} \times$$

$$\times \left(\frac{L_1 \sqrt{\epsilon_2 (c + 4f L_1 \sqrt{\epsilon_1}) - c \epsilon_1} + 2 L_2 \sqrt{f L_1 \epsilon_1 \sqrt{\epsilon_1}}}{L_1 \sqrt{\epsilon_2 (c + 4f L_1 \sqrt{\epsilon_1}) - c \epsilon_1}} \right). \quad (13)$$

Подставим в выражение (13) известные значения коэффициентов диэлектрической проницаемости льда ($\epsilon_1 = 3,17$) и воды ($\epsilon_2 = 81$) [5, 13]. Исходя из общегеологических представлений, дно подледникового водоёма вероятнее всего выполнено рыхлыми осадочными отложениями ($\epsilon_3 \sim 25$) или, что менее вероятно, сложено твёрдыми кристаллическими породами ($\epsilon_3 \sim 5$). Оценим, в каких условиях могут встречаться данные объекты. Согласно результатам международного проекта BEDMAP, посвящённого картографированию Антарктиды, на гистограмме мощности антарктического ледника имеются два ярко выраженных пика, которые соответствуют значениям 400 и 2800 м [17, рис. 6]. Первый из них отвечает шельфовым ледникам, второй – внутренним районам континента. На рис. 2 приведена гистограмма мощности ледника, перекрывающего 176 водоёмов, обнаруженных в Антарктиде к 2007 г. [18, 20]. Она показывает, что эти объекты располагаются преимущественно в областях с мощностью ледника от 3000 до 4000 м. Для последующих расчётов применим выражение (13) при мощности ледника 3500 м.

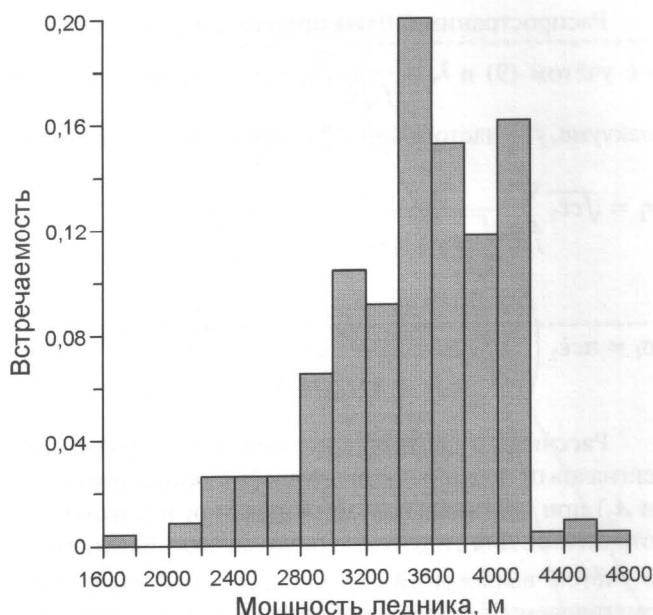


Рис. 2. Гистограмма мощности ледника над известными подледниковыми водоёмами, по [18, 20]

Fig. 2. Ice thickness histogram over the known subglacial water caves, after [18, 20]

В работах [2, 3] приведены результаты теоретических расчётов, основанных на измерениях диэлектрических характеристик пресной природной воды, и результатов натурных исследований распространения электромагнитных волн в водах оз. Краснофлотское (Ленинградская обл.). Использовался локатор с частотой зондирующих импульсов 45 МГц [3]. Согласно указанным источникам, удельное поглощение в пресной природной воде составляет 0,02–2 дБ/м [2, рис. 1]. По данным натурных измерений, этот параметр для вод оз. Краснофлотское равен 1,4 дБ/м. Аналогичные работы проведены под руководством автора в 2008 г. в районе Свирской губы (Ленинградская обл.) в рамках проекта РФФИ 08-05-10038к. По результатам лабораторных исследований, удельное поглощение в среде составило 1,1 дБ/м. Однако указанный параметр для природной воды из йодисто-радонового святого источника Введено-Оятского монастыря (Ленинградская обл.), по собственным измерениям автора, равен 77,3 дБ/м. Вероятно, для природной неминерализованной воды удельное поглощение находится в пределах 0,5–1,5 дБ/м, что вполне согласуется с принятыми на сегодняшний день данными [5, 13].

Чтобы отражённый сигнал мог быть зарегистрирован, его амплитуда должна быть выше шумового фона от разного рода помех. Вместе с тем при малой глубине водоёма отражённый от дна сигнал может выделяться вследствие «налезания» на сигнал, сформированный от водного зеркала. Обратимся к фак-

тическим данным. На рис. 3 приведена амплитудная запись отражённого сигнала, полученная при изучении района подледникового оз. Восток над акваторией своего рода «подлёдной реки», обнаруженной при полевых работах 51 РАЭ (2005/06 г.) [18]. На ней имеется отражение 1, сформированное от водного зеркала. На дальности 0,32 мкс от него наблюдается второе отражение 2, которое вполне может быть образовано от дна «реки». Если это предположение справедливо, то её глубина в данном пункте составляет около 5 м. Определение амплитуды сигнала, отражённого от дна, осложнено тем, что протяжённость зондирующего импульса в воде больше глубины водоёма. В этом случае отряжённый от дна сигнал «налезает» на сигнал, отражённый от водного зеркала, что делает энергетические расчёты приближёнными. Это, в свою очередь, не позволяет с требуемой точностью рассчитать коэффициенты отражения.

Изложенное обобщено на рис. 4, на котором приводится зависимость отношения амплитуд отражённых сигналов от поверхности подледникового водоёма и от его дна. Расчёты выполнены при мощности ледника $L_1 = 3500$ м, $\epsilon_1 = 3,17$, $\epsilon_2 = 81$, $\epsilon_3 = 5$ и 25 и удельного поглощения в воде $\xi_2 = 0,5$ и 1,5 дБ/м. Из него следует, что при благоприятных условиях (низкий уровень шума, гладкие поверхности) возможно успешное лоцирование подледниковых водоёмов глубиной до 10–15 м. Это утверждение не противоречит выводам, сделанным в работах [2, 3, 16].

Для выяснения основных особенностей формирования отражённого сигнала и временного радио-

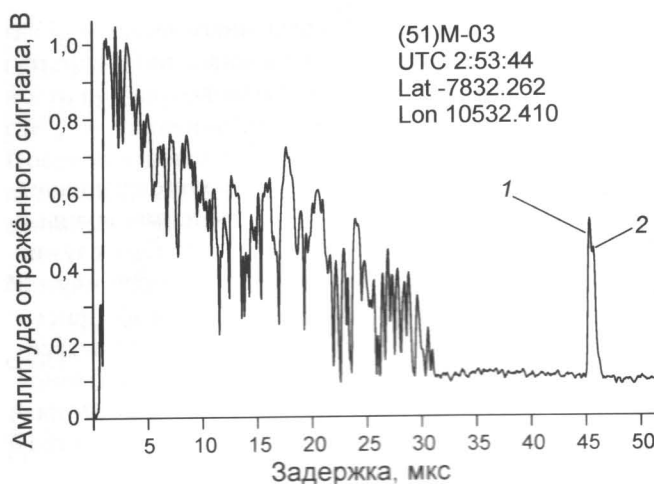


Рис. 3. Амплитудная запись отражённого сигнала:

1 – отражение от водной поверхности; 2 – отражение, предположительно сформированное от дна «подлёдной реки»

Fig. 3. Amplitude record of the reflected signal:

1 – reflection from the water-table; 2 – reflection hypothetically formed from the bottom of the «subglacial river»

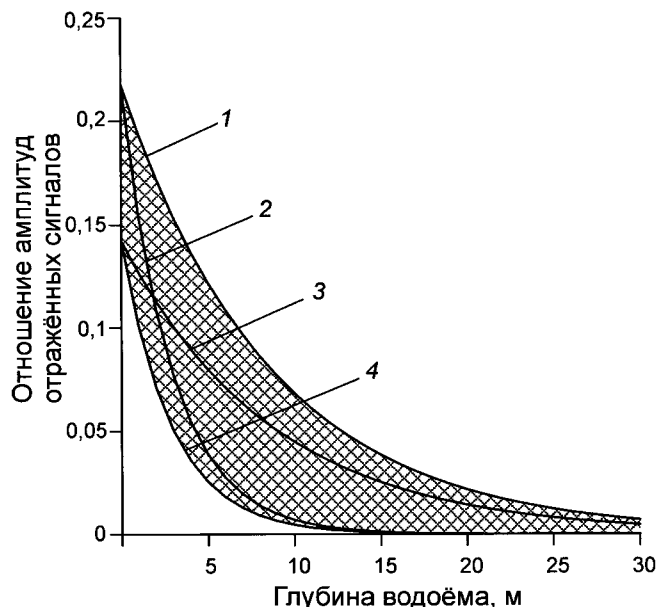


Рис. 4. Условия успешного лоцирования подледниковых водоёмов (построения выполнены при $L_1 = 3500$ м, $\dot{\epsilon}_1 = 3,17$, $\dot{\epsilon}_2 = 81$):

1 — $\xi_2 = 0,5$ дБ/м, $\dot{\epsilon}_3 = 25$; 2 — $\xi_2 = 0,5$ дБ/м, $\dot{\epsilon}_3 = 5$; 3 — $\xi_2 = 1,5$ дБ/м, $\dot{\epsilon}_3 = 25$; 4 — $\xi_2 = 1,5$ дБ/м, $\dot{\epsilon}_3 = 5$; штриховкой показана область характеристик, при которых возможно успешное лоцирование водоёма

Fig. 4. Conditions of the successful sounding of the subglacial water caves assuming $L_1 = 3500$ m, $\dot{\epsilon}_1 = 3,17$, $\dot{\epsilon}_2 = 81$:

1 — $\xi_2 = 0,5$ dB/m, $\dot{\epsilon}_3 = 25$; 2 — $\xi_2 = 0,5$ dB/m, $\dot{\epsilon}_3 = 5$; 3 — $\xi_2 = 1,5$ dB/m, $\dot{\epsilon}_3 = 25$; 4 — $\xi_2 = 1,5$ dB/m, $\dot{\epsilon}_3 = 5$; parameters of the successful sounding is shown by hatched area

локационного разреза обратимся к математическому моделированию.

Описание модели

Обсуждаемая модель представляет собой усовершенствованный более ранний вариант [7]. По сравнению с ним она корректнее учитывает энергетические преобразования на границах раздела сред и при распространении самой электромагнитной волны. Существенным шагом вперёд стало рассмотрение трёх слоёв с произвольной формой границ. Как и ранее [7], в основу модели положено распространение сферической электромагнитной волны в трёхмерном пространстве, состоящем в общем случае из трёх сред, разделённых границами произвольной формы и имеющих произвольные коэффициенты диэлектрической проницаемости ϵ_i и удельного поглощения ξ_i . Пункты зондирования находятся на равных расстояниях относительно друг друга, вдоль по прямолинейному маршруту. При этом имитируются условия наземного радиолокационного профилирования, близкие к реальным. Линейные размеры приёмо-передающей системы значительно меньше

мощности ледника, поэтому предполагается, что возбуждение волн и их приём выполняются в одном и том же пункте.

Пункты зондирования проецируются на подлёдную поверхность и представляют собой центры кругов радиусом \mathcal{R} . Круги, касаясь поверхности, повторяют её конфигурацию. Эти круги служат областью формирования вторичных волн, т.е. определяют эффективную площадь рассеяния, радиус которой принят нами из предположений зеркального отражения от горизонтальной плоскости (9). Правда, анализ временных радиолокационных разрезов, полученных в процессе полевых работ, показывает, что реально эта область значительно больше.

На рис. 5 дан фрагмент временного радиолокационного разреза по маршруту (51)LPM-13, полученный при изучении подледникового оз. Пионерское (Восточная Антарктида) с использованием ледового лоатора РЛС-60-98 [11]. Согласно (9), при частоте зондирующих импульсов 60 МГц и мощности ледника 1500 м радиус половины первой зоны Френеля r_1 составляет около 32 м. Вообще говоря, при наземной съёмке отражений на задержках более 18,3 мкс (что примерно соответствует мощности ледника 1532 м) регистрироваться не должно. Тем не менее, на рис. 5 отчётливо наблюдаются ветви гиперболических отражений от неоднородностей подлёдной поверхности вплоть до задержек 30 мкс (~2530 м), т.е. радиус реальной эффективной площади рассеяния при этом составляет около 2 км, что приблизительно в 62 раза больше расчётной величины. Не останавливаясь на анализе причин этого несоответствия, примем в нашей модели за радиус эффективной площади рассеяния задаваемую величину \mathcal{R} , которая будет изменяться от 1 до 5 км. При этом соотношение для r_2 останется прежним (10).

На круги накладывается регулярная сеть с некоторым заданным шагом. Её узлы в соответствии с принципом Гюйгенса—Френеля служат источниками отражённых сферических волн. При наличии ещё одного слоя, располагающегося ниже подлёдной поверхности, каждый узел круга представляет собой и источник преломлённой волны. Для оптимизации процесса моделирования предполагается, что преломление волн в подлёдную среду и их последующее отражение выполняются по законам лучевого приближения.

Распространяясь в подлёдной среде, преломлённая волна достигает границы раздела со следующей. Однако в этом случае область формирования вторичной волны не создаётся. Вместо этого на поверхности раздела сред в рамках лучевого приближения определяется точка отражения, для которой выпол-

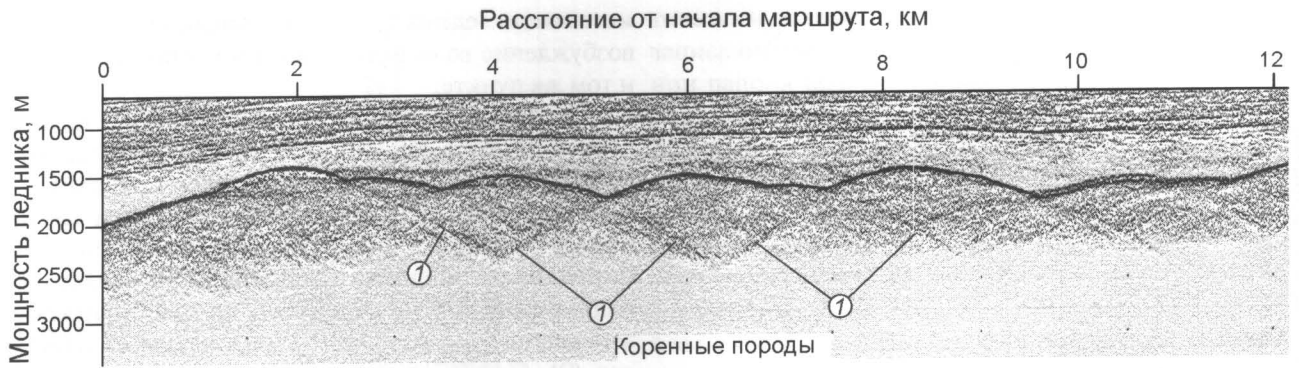


Рис. 5. Временной радиолокационный разрез, полученный в районе подледникового оз. Пионерское (Восточная Антарктида), иллюстрирующий оценку эффективной площади рассеяния:

1 – гиперболические отражения

Fig. 5. Radio-echo time-section (collected in the area of Pionerskoe Subglacial Lake, East Antarctica) that illustrates the estimation of the scattering cross-section:

1 – hyperbolic reflection

няются вычисления как для волны. Таким образом, волновое поле в средах, расположенных ниже первой, формируется по упрощённой схеме.

Все вторичные волны, распространяясь в пространстве, формируют изменяющееся во времени волновое поле. Эти электромагнитные колебания возбуждают электрические сигналы на приёмной антенне, которые усиливаются логарифмическим усилителем (с задаваемыми характеристиками) и регистрируются. На окончательном этапе отражённые сигналы формируют временной радиолокационный разрез.

Принимаемый отражённый сигнал есть результат суперпозиции вторичных волн, приходящих на антенну за весь период регистрации. В модели не учитывается набег фазы. Результаты сложения волн от дискретных источников при моделировании и при аналитическом решении задачи всегда будут немного различаться. Поэтому учёт фазы отражённых сигналов реально модель не улучшит.

За основу энергетических соотношений при моделировании возьмём выражение (5). С учётом (7), (8), (10) и ранее изложенных дополнений получим следующие выражения для относительных амплитуд отражённых сигналов от первой и второй границ раздела сред:

$$\frac{A_1}{A_T} = 10^{-\frac{L_1 \xi_1}{10}} \frac{c\Psi(\alpha)}{8\pi f L_1^2} \mathcal{R} \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \cos \theta_1; \quad (14)$$

$$\frac{A_2}{A_T} = 10^{-\frac{1}{10}(L_1 \xi_1 + L_2 \xi_2)} \frac{c\Psi(\alpha)}{2\pi f (L_1 + L_2)^2} \mathcal{R} \left(1 + \frac{L_2 \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2}(r_1^2 + L_1^2) - \epsilon_1 r_1^2} \right)$$

$$\times \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_3}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_3}} \cos \theta_2 \frac{\epsilon_3 - \epsilon_2 \sin^2 \theta_2}{(\cos \theta_2 \sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_3} - \epsilon_2 \sin^2 \theta_2)^2}. \quad (15)$$

В приёмном тракте полный отражённый сигнал $A_\Sigma(\tau) = \sum_{i=1}^N A_i$, сформированный одним зондированием, усиливается логарифмическим усилителем с заданной передаточной характеристикой $\Xi(a, u, \zeta, r)$, которая имитирует приёмник ледовых локоаторов РЛС-60-98 и РЛС-60-06 [10]:

$$\Xi(a, u, \zeta, r) = \begin{cases} \zeta, & u > r \\ \zeta \frac{\exp\left(\frac{au}{10}\right) - 1}{\exp\left(\frac{ar}{10}\right)}, & u \leq r \end{cases}$$

где a – коэффициент усиления; ζ – максимальное выходное напряжение усилителя; u – входное напряжение; r – пороговое входное напряжение, при котором кривая усиления переходит в насыщение.

Таким образом, окончательно амплитуда регистрируемого отражённого сигнала

$$\tilde{A}_\Sigma(\tau) = \Xi(a, A_\Sigma(\tau), \zeta, r).$$

Временной радиолокационный разрез формируется в оттенках серых тонов. Как показывает опыт автора, использование цветовой гаммы реальной пользы не приносит. Интенсивность пикселей J пропорциональна положительному значению первой производной от амплитуды отражённого сигнала $\tilde{A}_\Sigma(\tau)$ по задержке τ [8]:

$$J \sim \mathcal{H} \left(\frac{d\tilde{A}_\Sigma(\tau)}{d\tau} \right) \frac{d\tilde{A}_\Sigma(\tau)}{d\tau}, \quad (16)$$

где $\mathcal{H}(x)$ – функция Хевисайда: $\mathcal{H}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$.

Рассмотрим модели трёхслойных сред для ситуаций, наиболее часто встречающихся в природе.

Равнинный подледниковый водоём с наклонным дном малой глубины

В этой модели рассматривается плоская гранитная ($\epsilon_2 = 5$) поверхность, перекрытая ледником ($\epsilon_1 = 3,17$; $\xi_1 = 0,01$ дБ/м) мощностью 1000 м. Она, как и в реальных условиях, не идеально гладкая. В неё случайным образом введены неровности амплитудой до 1,5 м. На поверхности располагается водоём прямоугольной формы ($\epsilon_2 = 81$) с наклонным дном, которое также сложено гранитными породами ($\epsilon_3 = 5$). Его поверхность – зеркальная. Уклон дна незначительный и составляет 10 м/км ($\sim 35'$). Для получения более контрастного изображения здесь и далее будем считать, что вода в водоёме пресная, т.е. $\xi_2 = 0,1$ дБ/м. На рис. 6, а приведена схема расположения модельных маршрутов.

Маршруты М-1, М-2 и М-3 располагаются параллельно относительно друг друга на расстояниях 700 и 350 м соответственно. Их протяжённость одинакова и равна 4,24 км. Первый из них начинается над коренными породами и пересекает подледниковый водоём в его наиболее мелкой части. Временной радиолокационный разрез М-1 приведён на рис. 6, б. На нём наблюдается слабоинтенсивное горизонтальное отражение 1, сформированное от коренных пород. В средней части разреза имеется высокоинтенсивный участок 2. Он образован от поверхности подледникового водоёма. Его границы маркируются гиперболическими отражениями 3, которые обычно формируются от структур, хорошо выраженных в рельефе.

Согласно выражению (6), коэффициенты отражения R_1 при вертикальном зондировании зеркальных границ раздела «лёд – гранит» и «лёд – вода» составляют 0,11 и 0,67 соответственно, т.е. отличаются в 6 раз. Кроме того, первая из них в отличие от второй – шероховатая, поэтому рассеяние на ней будет тоже выше. Таким образом, различия в так называемых *эффективных коэффициентах отражения*

будет ещё больше, что подтверждается моделированием и оценками [14, 15]. Всё это означает, что удельная мощность отражённого сигнала от водной поверхности примерно на 1,5 порядка больше, чем от коренной (в нашем случае гранитной, что не принципиально ввиду близости значений ϵ [5, 13]). Указанное обстоятельство и приводит к формированию

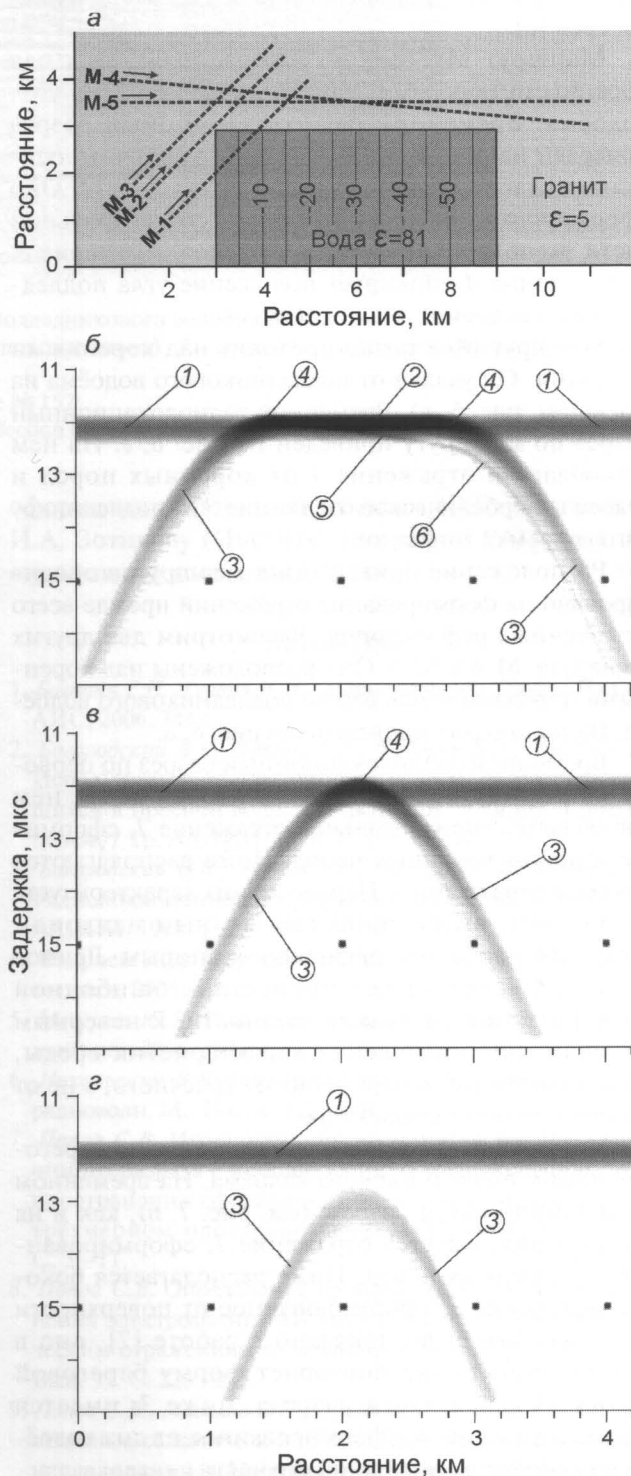


Рис. 6. Модельные маршруты над плоской поверхностью и клиновидным дном подледникового водоёма:

а – схема расположения маршрутов; б–г – временные радиолокационные разрезы по маршрутам соответственно М-1 – М-3; 1 – отражения от ровной поверхности коренных пород; 2 – отражения от поверхности подледникового водоёма; 3 – боковые гиперболические отражения; 4 – вершины гиперболических отражений; 5 – отражения от дна водоёма; 6 – боковые отражения от дна водоёма; сечение изолиний за пределами акватории – 1 м, придонной части водоёма – 5 м

Fig. 6. RES profiles over the plane and wedge-shaped bottom of the water cave:

а – location scheme; б–г – radio-echo time-sections on M-1 – M-3; 1 – reflections from the bedrock; 2 – reflections from the water-table; 3 – lateral reflections; 4 – tops of the hyperbolic reflections; 5 – reflections from the water cave bottom; 6 – lateral reflections from the bottom of the water cave; contour space outside the water cave is 1 m; contour space inside the water cave is 5 m

гиперболического отражения 3. Положение береговой линии маркируется его вершиной 4.

На временном радиолокационном разрезе наблюдается также слабоинтенсивное наклонное отражение 5, переходящее в гиперболическое 6 в районе береговой линии. Они сформированы от придонной и присклоновой частей подледникового водоёма. Наклон ветвей гипербол 3 и 5 различен и регулируется кинематическими характеристиками сред [8].

Маршрут М-2 полностью располагается над коренными породами, однако проходит через угол водоёма. Временной радиолокационный разрез приведён на рис. 6, в. На нём наблюдается относительно слабое горизонтальное отражение 1. Оно сформировано от коренных пород. В центральной части располагается гиперболическое отражение 3. Его вершина 4 маркирует положение угла подледникового водоёма.

Маршрут М-3 также проходит над коренными породами. Он удалён от подледникового водоёма на 350 м (см. рис. 6, а). Временной радиолокационный разрез по маршруту приведён на рис. 6, г. На нём наблюдается отражение 1 от коренных пород и слабое гиперболическое отражение 3 от подледникового водоёма.

Расположение приведённых маршрутов ориентировано на формирование отражений прежде всего от точечных рефлекторов. Рассмотрим два других маршрута: М-4 и М-5. Они расположены над коренными породами вдоль берега подледникового водоёма. Их положение приведено на рис. 6, а.

Временной радиолокационный разрез по первому из них (М-4) приведён на рис. 7, а. На нём наблюдается горизонтальное отражение 1, сформированное от коренных пород. Ниже располагаются боковые отражения 3. Первое из них характеризуется большей интенсивностью и иным наклоном ветви гиперболы по сравнению со вторым. Данное обстоятельство может привести к ошибочной интерпретации разреза, в частности, к неверным оценкам кинематических характеристик среды, если принять его за отражение от точечного, а не от распределённого рефлектора.

Маршрут М-5 расположен параллельно береговой линии подледникового водоёма. На временном радиолокационном разрезе (см. рис. 7, б), как и на предыдущих, имеется отражение 1, сформированное от коренных пород. Ниже располагается боковое отражение 3, сформированное от поверхности водоёма. Как было показано в работе [7], оно в генеральном плане повторяет форму береговой линии. В левой части разреза, ниже 3, имеется слабое отражение 6, сформированное от дна водоёма в наиболее мелководной его части.

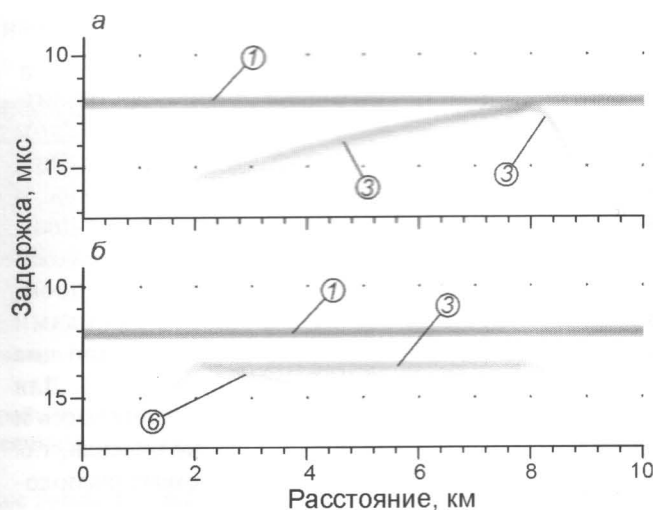


Рис. 7. Модельные маршруты над плоской поверхностью и клиновидным дном подледникового водоёма:

а, б — временные радиолокационные разрезы по маршрутам соответственно М-4 и М-5; усл. обозначения см. на рис. 6

Fig. 7. RES profiles over the plane and wedge-shaped bottom of the water cave:

а, б — radio-echo time-sections on М-4 and М-5; conventional signs see in Fig. 6

Обсуждение

Проведённое исследование показало принципиальную возможность регистрации отражений от придонной части водоёмов, перекрытых мощным слоем ледника. Это, несомненно, является шагом вперёд. Вместе с тем при моделировании установлено, что выявление отражений от дна водоёмов на фоне помех — весьма сложная задача. Вероятно, именно по этой причине данная тема не получила широкого обсуждения в печати. Тем не менее, проанализировав имеющийся материал по наземному радиолокационному профилированию, можно выделить некоторые участки подледниковых водоёмов, где имеются отражения, которые могли быть сформированы от их придонной части.

На рис. 8 приведён временной радиолокационный разрез фрагмента подледникового водоёма № 152, расположенного в восточной части района оз. Восток (Восточная Антарктида) [18]. На нём устанавливается интенсивное отражение от поверхности водоёма 1. Ниже располагается светлая область 2, которая увеличивается по мере удаления от берега. Данное обстоятельство нельзя объяснить особенностями аппаратуры. Однако слой воды однороден для электромагнитных волн, поэтому рефлекторы в нём отсутствуют. Таким образом, различную протяжённость светлой области 2 можно объяснить разной глубиной водоёма. Отсутствие чёткой и трассируемой границы от его

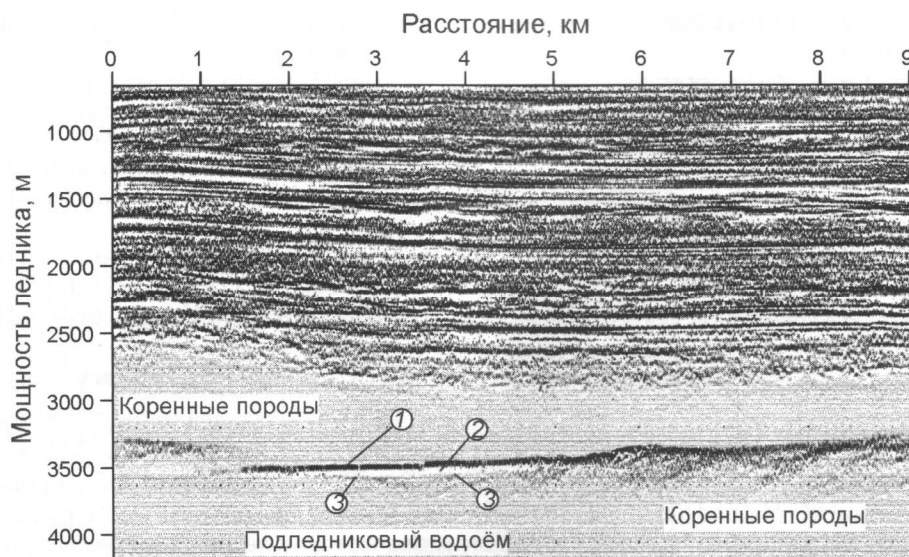


Рис. 8. Временной радиолокационный разрез с фрагментом подледникового водоёма № 152:

1 – отражение от поверхности водоёма; 2 – водное тело (предположительно); 3 – отражения от придонной части (предположительно)

Fig. 8. Radio-echo time-section through the subglacial water cave № 152:

1 – reflection from the water-table; 2 – water (hypothetically); 3 – reflection hypothetically formed from the bottom of the water cave

дна связано со значительным ослаблением отражённого сигнала. Если это предположение верно, то максимальная глубина водоёма составляет около 12 м, что не противоречит ранее изложенному (см. рис. 4).

Заключение

Выполненное исследование открывает новые перспективы использования этого геофизического метода. В настоящей работе рассмотрена достаточно узкая проблема лоцирования подледниковых водоёмов. Однако очевидно, что подобную методику можно применять и для решения более общих задач геолого-геофизического содержания, в частности, изучения расслоенности рыхлых отложений или составления схем эффективных коэффициентов отражения подлёдной поверхности (радиолокация с успехом применяется в инженерных целях [4, 13]). Их анализ совместно с геолого-геоморфологической интерпретацией без сомнения позволит лучше понять строение подлёдного рельефа.

Благодарности. Работа выполнялась в рамках проекта 4 подпрограммы «Антарктика» ФЦП «Мировой океан» при финансовой поддержке РФФИ (гранты РФФИ № 07-05-00401а и № 08-05-10038к). Автор приносит благодарность Ю.Б. Черноглазову (ПМГРЭ) и В.В. Харитонову (ААНИИ) за детальное обсуждение и конструктивную критику настоящей работы; П.И. Лунёву (ПМГРЭ) за помощь в

оформлении статьи; рецензентам Ю.Я. Мачерету и И.А. Зотикову (Институт географии РАН) за конструктивные замечания.

Литература

1. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка. Тверь: Изд-во АИС, 2006. 744 с.
2. Богородский В.В., Трепов Г.В., Федоров Б.А., Хохлов Г.П. Использование электромагнитных волн, распространяющихся в пресной воде, для активной локации и других целей // Тр. ААНИИ. 1970. Т. 295. С. 116–119.
3. Богородский В.В., Трепов Г.В., Федоров Б.А., Хохлов Г.П. Радиолокационное зондирование пресной воды // Тр. ААНИИ. 1970. Т. 295. С. 185–187.
4. Вопросы подповерхностной радиолокации. М: Радиотехника, 2005. 416 с.
5. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
6. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1973. 608 с.
7. Попов С.В. Интерпретация временного радиолокационного разреза с использованием моделирования распространения сферических электромагнитных волн в трёхмерном пространстве // МГИ. 2008. Вып. 105. С. 3–11.
8. Попов С.В. Определение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике по гиперболическим отражениям от неоднородностей // МГИ. 2002. Вып. 92. С. 223–225.
9. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Отечественные сейсмические и наземные радиолокационные исследования в Центральной Антарктиде накануне

- Международного полярного года 2007–2008 // МГИ. 2007. Вып. 103. С. 107–117.
10. Попов С.В., Миронов А.В., Шереметьев А.Н. Результаты наземных радиолокационных исследований подледникового озера «Восток» в 1998–2000 гг. // МГИ. 2001. Вып. 89. С. 129–133.
11. Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Об открытии подледникового озера в районе станции Пионерская (Восточная Антарктида) // МГИ. Вып. 100. 2006. С. 165–167.
12. Справочник по радиолокации: Т. 1. Основы радиолокации. М.: Советское радио, 1976. 456 с.
13. Финкельштейн М.И., Карпунин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация: М.: Радио и связь, 1994. 216 с.
14. Ament W.S. Toward a theory of reflection by a rough surface // Proc. IRE. 1953. V. 41. P. 142–146.
15. Fabbro V., Bourlier C., Combes P.F. Forward propagation modeling above gaussian rough surfaces by the parabolic shadowing effect // Progress in Electromagnetic Research. 2006. V. 58. P. 243–269.
16. Gorman M.R., Siegert M.J. Penetration of Antarctic subglacial lakes by VHF electromagnetic pulse: Information on the depth and electrical conductivity of basal water bodies // Journ. of Geophys. Research. 1999. V. 104. № B12. P. 29 311–29 320.
17. Lythe M.B., Vaughan D.G. and the BEDMAP Consortium. BEDMAP: A new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica // Journ. of Geophys. Research. 2002. V. 106. № B6. P. 11 335–11 351.
18. Popov S.V., Masolov V.N. Forty-seven new subglacial lakes in the 0° – 110°E sector of East Antarctica // Journ. of Glaciology. 2007. V. 53. № 181. P. 289–297.
19. Propagation of short radio waves // MIT Radiation Laboratory Series. V. 13. N.Y.: McGraw-Hill Book Company, 1951.
20. Siegert M.J., Carter S., Tabacco I., Popov S., Blankenship D. A revised inventory of Antarctic subglacial lakes // Antarctic Science. 2005. V. 17. № 3. P. 453–460.

Summary

This work is related to the problem of the radio-echo sounding (RES) of the fresh, shallow subglacial water bodies. The model of the radio-echo time-section formation induced by spherical electromagnetic waves propagating in the isotropic, homogeneous 3-layer 3-D space has been discussed in the paper. The RES modeling and estimation of the media characteristics for successful sounding (receiving of the radio-echo returns from the bottom of the caves) of the subglacial water caves were performed. The radio-echo time-section collected over one of the water in East Antarctica was analyzed. The analysis of the data demonstrated the reflections from the bottom of the water cave can be present in the record.