

# ТЕМАТИЧЕСКИЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ



## Интерпретация временного радиолокационного разреза с использованием модели распространения сферических электромагнитных волн в трехмерном пространстве

С.В. Попов

Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург

*Статья поступила в редакцию 10 августа 2007 г.*

*Представлена членом редколлегии Ю.Я. Мачеретом*

Интерпретация радиолокационных разрезов выполнена для шельфового ледника с придонными трещинами, подледникового водоема и равнинного ландшафта с каньоном.

Качество результатов любых исследований определяется, как известно, правильной интерпретацией данных экспериментов или полевых работ. Радиолокационное профилирование — один из основных методов изучения литосферы, позволяющий мобильно, с высокой детальностью и достоверностью картировать рельеф областей, перекрытых ледником. Однако все последующие построения верны ровно настолько, насколько правильно истолкован временной радиолокационный разрез и насколько верны наши представления о характере распространения отраженных электромагнитных волн от фрагментов подледной поверхности. Хотя эти вопросы обсуждаются во многих отечественных и зарубежных публикациях [2-5, 7, 11, 13, 15-19], представляется целесообразным обсудить некоторые аспекты с помощью математического моделирования.

### Описание модели

Основа модели — распространение сферической электромагнитной волны в трехмерном пространстве над заданной поверхностью, перекрытой однородным и изотропным ледником. Зондирование выполняется вдоль прямолинейного маршрута,

имитирующего условия наземного радиолокационного профилирования. При его проведении электромагнитные волны распространяются нормально к поверхности ледника, независимо от ее конфигурации, поэтому в модели она представляет собой горизонтальную плоскость с задаваемой абсолютной высотой. На дневной поверхности прокладывается маршрут, на котором через равные расстояния располагаются пункты зондирования. Поскольку линейные размеры приемно-передающей системы значительно меньше мощности ледника, предполагается, что возбуждение волн и их прием происходит в одном и том же пункте. Эти пункты проецируются на подледную поверхность и служат центрами кругов заданного радиуса, которые, касаясь, повторяют ее конфигурацию. На круги накладывается регулярная сеть с некоторым шагом. Ее узлы являются источниками вторичных (отраженных) сферических волн. Последние, распространяясь в пространстве, формируют изменяющееся во времени волновое поле. Такие колебания возбуждают электрические сигналы на приемной антенне, которые усиливаются логарифмическим усилителем (с задаваемыми характеристиками).

Принимаемый отраженный сигнал — результат суперпозиции вторичных волн, приходящих на антенну в течение всего периода регистрации. В модели не учтен набег фазы при сложении волн, так как волновая картина формируется от дискретных источников. Это, в свою очередь, означает, что характер волнового поля при моделировании и при аналитическом решении задачи всегда будет различаться в нюансах. Поэтому учет фазы отраженных сигналов скорее внесет путаницу, чем реально улучшит модель.

Таким образом, отраженный сигнал формируется посредством суммирования амплитуд каждой пришедшей волны с учетом задержки  $\tau_i$ , которая равна отношению удвоенного расстояния от пункта зондирования до узла образования вторичной волны  $L_i$  к скорости распространения волны в среде  $v$  [3]:

$$\tau_i = 2 \frac{L_i}{v}.$$

На формирование отраженного сигнала влияют четыре основных фактора, которые и были заложены в настоящую модель:

- 1) расхождение фронта сферической волны  $\frac{1}{4\pi(2L_i)^2}$  [6];
  - 2) ее затухание в леднике  $10^{-\frac{2L_i\xi}{20}}$ , где  $\xi$  — удельное поглощение (в дБ/м) [3, 14]; 3) потери на отражение от ложа ледника  $\bar{R}_b \cos \gamma$ , где  $\bar{R}_b$  — эффективный коэффициент отражения от подледной поверхности, а  $\gamma$  — угол между нормалью подледной поверхности в узле формирования вторичной волны и направлением на пункт приема [14]; 4) диаграмма направленности антенны  $2\Theta(\alpha)$ , где  $\alpha$  — угол между направлением главного излучения антенны и направлением на узел формирования вторичной волны [1].
- Окончательно, отношение амплитуды отраженной  $A_i$  и прямой  $A_0$  волн имеет следующий вид:

$$\frac{A_i}{A_0} \sim \frac{10^{-\frac{\xi L_i}{10}}}{8\pi L_i^2} \bar{R}_b \Theta(\alpha) \cos \gamma. \quad (1)$$

В приемном тракте (как в реальном, так и в моделируемом) полный отраженный сигнал  $A(\tau)$ , сформированный одним зондированием (суперпозицией всех принятых отраженных волн амплитудой  $A_i$ )

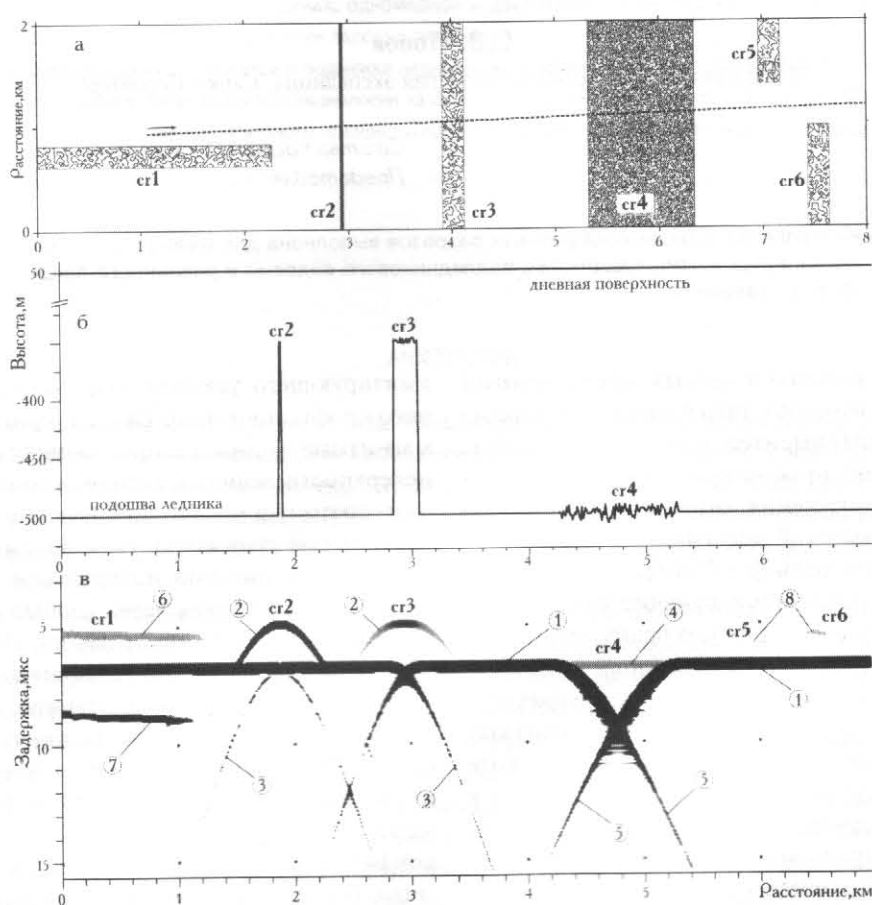


Рис. 1. Моделирование временного радиолокационного разреза в районе шельфового ледника: а — схема расположения маршрута; б — разрез ледника по маршруту; в — временной радиолокационный разрез. Цифры в кружках: 1 — отражения от поверхности воды; 2, 3, 5 — гиперболические отражения; 4 — отражения от придонной трещины; 6, 7, 8 — боковые отражения; cr 1...cr 6 — трещины

Fig. 1. Modeling formation of the RES record in an ice shelf area: а — location map of the radar line; б — ice sheet cross-section along the route; в — RES record. 1 — reflections from the ice-water interface; 2, 3, 5 — hyperbolic reflections; 4 — reflections from the bottom crevasse; 6, 7, 8 — lateral reflections; cr 1...cr 6 — crevasses

усиливается логарифмическим усилителем с заданной передаточной характеристикой  $\Xi(u, \zeta, r)$ , которая имитирует приемник ледового лоатора РЛС-60-98 [10]:

$$\Xi(u, \zeta, r) = \begin{cases} \zeta, & u > r \\ \zeta \frac{\exp(u/10) - 1}{\exp(r/10)}, & u \leq r \end{cases}$$

где  $\zeta$  — максимальное выходное напряжение усилителя, а  $r$  — входное напряжение, при котором кривая усиления переходит в насыщение. Таким образом,  $\tilde{A}(\tau) = \Xi(A(\tau), \zeta, r)$ , где  $\tilde{A}(\tau)$  — окончательный отраженный сигнал, который и формирует временной радиолокационный разрез. Зондирующий сигнал имеет синусоидальную форму, близкую к реальной.

Основные технические характеристики ледового лоатора РЛС-60-98 следующие: несущая частота 60 МГц, мощность в импульсе 60 кВт, частота следования зондирующих импульсов 600 Гц, длительность зондирующего импульса 0,5 мкс, полоса приемного канала 3 МГц, чувствительность приемника 116 дБ/В, шаг дискретизации эхосигнала по времени 50 нс, шаг квантования эхосигнала по амплитуде 0,24 мВ, электропитание 220 В, 50 Гц, потребляемая мощность 1,5 кВт [10].

Временной радиолокационный разрез строится в оттенках серых тонов. Его интенсивность  $J$  пропорциональна значению первой производной от амплитуды усиленного полного отраженного сигнала  $\tilde{A}(\tau)$  по задержке  $\tau$  [8]:

$$J \sim H \left( \frac{d\tilde{A}(\tau)}{d\tau} \right) \frac{d\tilde{A}(\tau)}{d\tau},$$

где  $H(x)$  — функция Хевисайда:

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

В обсуждаемой модели предполагается постоянство удельного поглощения в леднике  $\xi = 0,01$  дБ/м и коэффициента его диэлектрической проницаемости  $\epsilon_i = 3,18$  [3,14].

На основе изложенной выше модели ниже рассматривается формирование временных радиолокационных разрезов для типичных подледниковых объектов.

### Шельфовый ледник с придонными трещинами

Пусть имеется ледяная плита мощностью 500 м (моделируется район шельфового ледника Эймери, Восточная Антарктида) с абсолютной высотой 50 м. Нижняя поверхность плиты гладкая. Поскольку наша цель заключается сейчас в выяснении влияния формы подледной поверхности на формирование временного радиолокационного разреза, коэффициент диэлектрической проницаемости всей подледной поверхности  $\epsilon_b$  соответствует воде (т.е.  $\epsilon_b = 81$  [3, 14]).

Радиолокационный маршрут располагается вблизи трех придонных трещин и пересекает еще три (рис. 1, а). Все они имеют гладкие вертикальные стенки. Глубина трещин  $cr1$ ,  $cr3$ ,  $cr5$  и  $cr6$  равна 150 м, а ширина 200 м. Их верхняя поверхность сильно расчленена: перепады высот составляют около 10 м. Трещина  $cr2$  имеет ту же глубину при ширине 20 м. Ее верхняя поверхность гладкая. Объект  $cr4$ , представляет собой зону придонных трещин шириной 1 км. Перепады высот составляют 20 м. Разрез ледникового покрова по указанному маршруту представлен на рис. 1, б.

На временном радиолокационном разрезе (рис. 1, в) наблюдается субгоризонтальное отражение 1, сформированное от нижней поверхности ледника. Его высокая интенсивность обусловлена отсутствием шероховатости. Отражения 2 — ветви гипербол, и связаны с привершинной частью трещин  $cr2$  и  $cr3$ , пересекающих маршрут, причем первое из них интенсивнее второго. Это обусловлено различиями в морфометрических характеристиках и, прежде всего, в степени расчлененности привершинных частей указанных трещин. С их ростом повышается рассеяние отраженного сигнала, что, в свою очередь, приводит к ослаблению интенсивности отражений от границ, регистрируемых на временном радиолокационном разрезе. Гиперболические отражения 3 связаны с придонной частью трещин  $cr2$  и  $cr3$ . Отражение 4 формируется от зоны трещин  $cr4$  и является характерным проявлением изменения интенсивности отраженного сигнала в зависимости от шероховатости поверхности. Гиперболические отражения 5 маркируют границы объекта  $cr4$ .

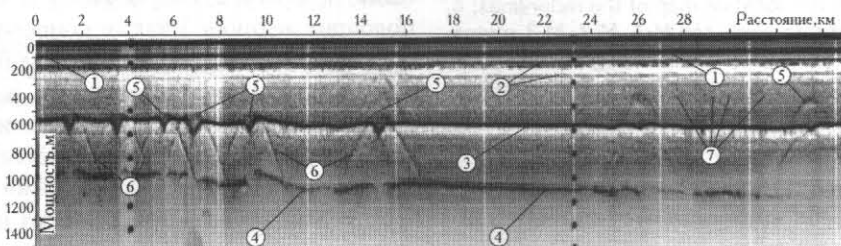


Рис. 2. Временной радиолокационный разрез, полученный в районе шельфового ледника Эймери: Цифры в кружках: 1 — отражения от поверхности ледника; 2 — кратные отражения от поверхности ледника; 3 — отражения от поверхности воды; 4 — кратные отражения от поверхности воды; 5, 6 — отражения от трещин; 7 — отражения неуставленного генезиса

Fig. 2. Radar transect recorded in the Amery Ice Shelf area: 1 — reflections from the glacier surface; 2 — multiple reflections from the ice surface; 3 — reflections from the ice-water interface; 4 — multiple reflections from the ice-water interface; 5, 6 — reflections from the crevasses; 7 — reflections of unidentified genesis

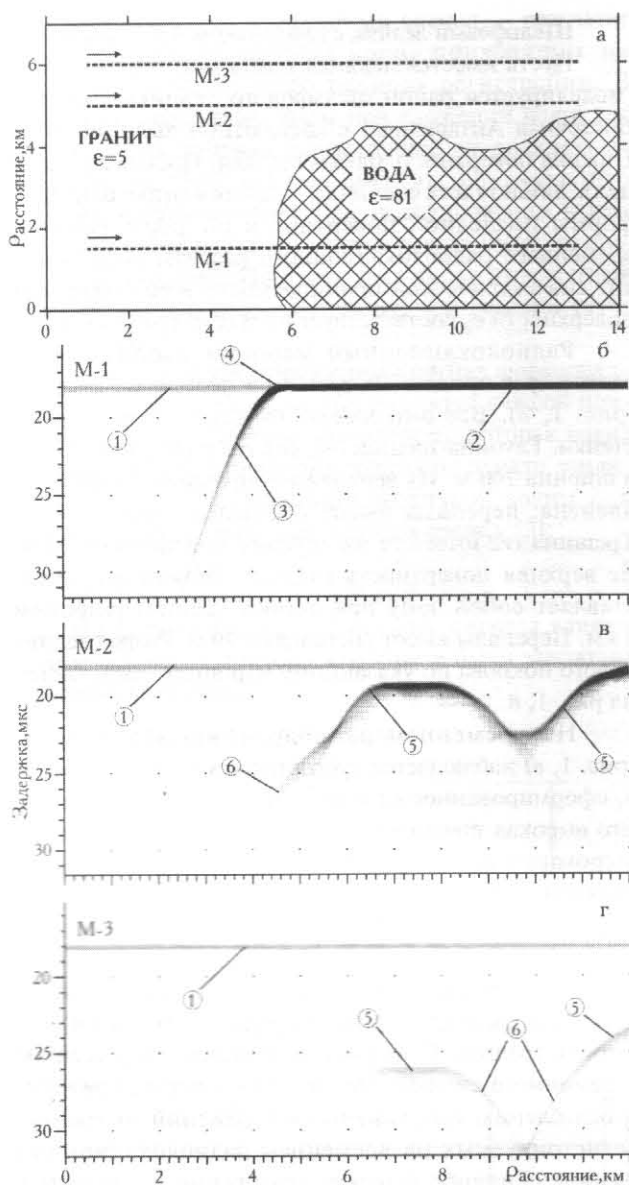


Рис. 3. Моделирование временного радиолокационного разреза в районе подледникового водоема: а — схема расположения маршрутов; б, в, г — временные радиолокационные разрезы по маршрутам М-1, М-2 и М-3, соответственно. Цифры в кружках: 1 — отражения от шероховатой гранитной поверхности; 2 — отражения от поверхности воды; 3, 6 — гиперболические отражения; 4 — граница водоема; 5 — боковые отражения от водоема

Fig. 3. Modeling formation of the RES record in a subglacial water cavity area: а — location map of the radar lines; б, в, г — radar transects along the М-1, М-2, М-3 routes, respectively. 1 — reflections from rough granite surface; 2 — reflections from the water surface; 3, 6 — hyperbolic reflections; 4 — water cavity boundary; 5 — lateral reflections from the water cavity

Обращает на себя внимание отсутствие каких-либо следов отражений от стенок трещин. Это связано с тем, что интенсивность отраженного сигнала пропорциональна косинусу угла между направлением распространения волны и нормалью к рассматриваемой поверхности (1). Таким образом, при больших углах  $\gamma$  энергетические потери при отражении от

объектов столь существенны, что это препятствует регистрации вторичных волн. Кроме того, в таком случае сигнал дополнительно ослабляется диаграммой направленности.

Рассматриваемый модельный маршрут начинается в стороне от протяженной трещины  $cr1$  и заканчивается между трещинами  $cr5$  и  $cr6$  (см. рис. 1, а). Сферическая волна, сформированная на передающей антенне, распространяясь в теле ледника, взаимодействует с указанными объектами. При этом, в полном соответствии с принципом Гюйгенса—Френнеля: «каждая точка, до которой дошло возмущение сама становится источником вторичных волн», формируется отраженная волна [6]. Маршрут в плане располагается таким образом, что при движении по нему возрастает латеральное отклонение от трещины  $cr1$ . Это приводит к увеличению дальности от источника до указанного объекта, в результате чего, в свою очередь, появляются наклонные отражения 6 и 7 на временном радиолокационном разрезе. Первое из них сформировано от привершинной, а второе — от придонной частей трещины  $cr1$ . Гиперболические отражения 8 образованы от одинаковых объектов трещин ( $cr5$  и  $cr6$ ). Однако поскольку они располагаются на разных расстояниях от маршрута, дальность до них также неодинакова. Соответственно на временном радиолокационном разрезе они отображаются на различных дальностях.

Визуально воспринимается, что объекты  $cr1$ ,  $cr3$ ,  $cr5$  и  $cr6$  имеют разные высоты. Однако это не так. Как будет показано далее, истинные высоты объектов, расположенных в стороне от маршрутов, можно определить только при выполнении площадных работ, т.е. только при наличии сети маршрутов. На начальном этапе обработки радиолокационных материалов необходимо выявить и исключить из рассмотрения (если нет иных причин) по возможности все боковые отражения.

В качестве иллюстрации к выполненному моделированию на рис. 2 приведен фрагмент реального временного радиолокационного разреза, полученного при аэро радиолокационном профилировании в районе шельфового ледника Эймери (Восточная Антарктида) в 1989 г. [11]. На нем наблюдается интенсивное отражение 1, сформированное от поверхности ледника, и его кратные отражения 2. Отражение от подошвы ледника 3 также сопровождается кратным отражением 4. На приведенной записи зарегистрированы многочисленные трещины. В большинстве случаев наблюдаются отражения от их привершинных частей 5, которые сопровождаются гиперболическими отражениями 6, маркирующими границы трещин.

В ряде случаев отражения от приповерхностных частей трещин не зарегистрированы. Причина заключается прежде всего в наличии сильно расчлененной поверхности. Кроме того, как показывают наблюдения автора, выполненные в районе обсерваторий Мирный (не опубликовано), стенки реальной трещины имеют сложную конфигурацию, и она сама может

быть полностью или частично заполнена кусками колотого льда. Все это приводит к существенно большему, по сравнению с моделируемым, затуханию электромагнитных волн.

На временном радиолокационном разрезе может присутствовать ряд отражений 7, генезис которых сложно определить без дополнительных данных, в том числе по соседним маршрутам. Это могут быть фрагменты слабо выраженных трещин или границы раздела атмосферного и конжеляционного морского льда или что-либо еще.

#### Подледниковый водоем

Рассмотрим плоскую гранитную ( $\epsilon_b = 5$ ) поверхность, перекрытую ледником мощностью 1500 м. Как и в реальных условиях, она не является идеально гладкой. Случайным образом в нее введены неровности амплитудой до 1 м (средняя величина 30-50 см). На указанной поверхности располагается водоем ( $\epsilon_b = 81$ ), который никак не выражен в рельефе. Поверхность водоема зеркальная.

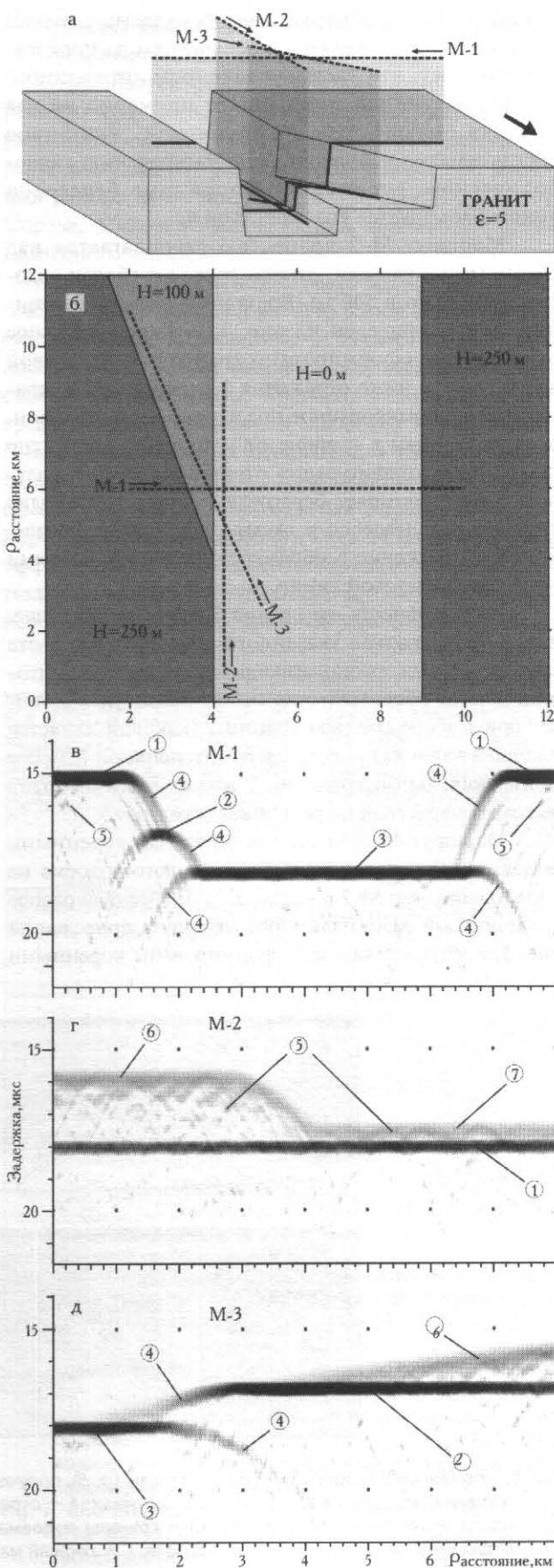
На рис. 3, а приведена схема расположения модельных маршрутов. Первый из них (М-1) начинается над коренными породами, а затем пересекает подледниковый водоем. Временной радиолокационный разрез приведен на рис. 3, б. Горизонтальное отражение 1 сформировано коренными породами. Далее следует интенсивное отражение 2, образованное поверхностью водоема, но интерес представляет гиперболическое отражение 3. На первый взгляд, его наличие кажется странным, однако обратимся к расчетам. Коэффициент отражения электромагнитных волн от подледной поверхности  $R_b$  определяется как [3, 6, 14]

$$R_b = \frac{\sqrt{\epsilon_i} - \sqrt{\epsilon_b}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_b}}. \quad (2)$$

Согласно (2), величина  $R_b$  для границ раздела «лед-гранит» и «лед-вода» составляет 0,11 и 0,67 (т.е. в последнем случае она в 6 раз выше) соответственно. Различия в значениях эффективных коэффициентов отражения  $\bar{R}_b$  еще больше. Если применительно к обсуждаемой модели для границы раздела «лед-вода»  $\bar{R}_b = R_b$  (по причине зеркального отражения), то для границы «лед-гранит»  $\bar{R}_b$  отличается от  $R_b$  в несколько раз (вследствие рассеяния электромагнитных волн на неровностях подледного

Рис. 4. Моделирование временного радиолокационного разреза в районе равнины, осложненной каньоном: а, б — схемы расположения маршрутов; в, г, д — временные радиолокационные разрезы по маршрутам М-1, М-2 и М-3, соответственно. Цифры в кружках: 1 — отражения от равнины; 2 — отражения от террасы; 3 — отражения от дна каньона; 4 — гиперболические отражения; 5 — отражения от неровностей рельефа; 6 — боковые отражения от равнины; 7 — боковые отражения от террасы

Fig. 4. Modeling formation of the RES record in plane area with a canyon; а, б — location map of the radar lines; в, г, д — radar transects along the M-1, M-2, M-3 routes, respectively. 1 — reflections from the plane; 2 — reflections from the terrace; 3 — reflections from the bottom of the canyon; 4 — hyperbolic reflections; 5 — reflections from the relief undulations; 6 — lateral reflections from the plain; 7 — lateral reflections from the terrace



рельефа). Таким образом, для обсуждаемых границ раздела  $\bar{R}_b$  будут отличаться больше чем на порядок. Это означает, что удельная мощность отраженного сигнала от водной поверхности примерно на два порядка больше, чем от гранитной. Указанное обстоятельство и приводит к формированию гиперболического отражения. Положение береговой линии маркируется его вершиной 4.

Маршрут М-2 полностью располагается над коренными породами, однако проходит вблизи водоема (примерно в 500 м). Временной радиолокационный разрез приведен на рис. 3, в. Горизонтальное отражение 1 сформировано гранитами. В правой части разреза ниже отражения 1 располагается отражение 5, сформированное подледниковым водоемом, расположенным в стороне от маршрута. Как видно на рисунке, конфигурация отражения 5 в генеральном плане повторяет береговую линию, что вполне логично вписывается в схему, изложенную выше. Боковое отражение 6 образовано более удаленными участками береговой линии.

Интенсивность отражения 5 значительно выше, чем 1. При анализе указанного маршрута без учета всех остальных, располагающихся на этой территории, данное обстоятельство может привести к ошибке: при выборе целевой границы (каковой является подошва ледника) вместо слабоинтенсивной и менее привлекательной границы 1 может быть выбрана высококонтрастная и «рельефная» граница 5.

Маршрут М-3 также проходит над коренными породами. Он удален от подледникового водоема на 1 км дальше, чем М-2 (см. рис. 3, а). Временной радиолокационный разрез для этого маршрута приведен на рис. 3, г. Отражения 1 и 5 сформированы коренными

породами и подледниковым водоемом, соответственно. Поскольку подледниковый водоем располагается на значительном удалении от маршрута, интенсивность отраженного от него сигнала резко уменьшается. По этой же причине ухудшается проработка береговой линии: отчетливо наблюдаются только ее фрагменты 5. Отражения 6 сформированы, как и в предыдущем случае, от более удаленных участков береговой линии.

#### Равнинный ландшафт с каньоном

Рассмотрим более сложный случай. Предположим, что имеется равнина, которую пересекает каньон глубиной 250 м, шириной 5 км и крутизной около  $11^\circ$  (200 м/км). Один склон прямой, другой осложнен клиновидной террасой высотой 100 м. Как и в предыдущем примере, коренные породы сложены гранитами ( $\epsilon_b = 5$ ) с шероховатой поверхностью. Высота неровностей не превышает 1 м при средней величине 30–50 см (рис. 4, а, б). Указанная территория перекрыта ледником мощностью 1500 м. Такие объекты повсеместно встречаются как в прибрежных, так и в центральных районах Восточной Антарктиды. В частности, средняя высота склонов подледниковых озер Восток и Пионерское составляет около 300 и 420 м, соответственно при заложении около 1,5 км [10, 20]. Имеются и более масштабные объекты, например горы Гамбурцева, Голицына и желоб Ламберта, где перепады высот превышают 500 м [9, 11, 21].

Маршрут М-1 проходит ортогонально каньону, пересекая его и клиновидную террасу (см. рис. 4, а, б). Временной радиолокационный разрез приведен на рис. 4, в. Интенсивные отражения 1, 2 и 3 сформированы равнинной поверхностью, террасой и дном

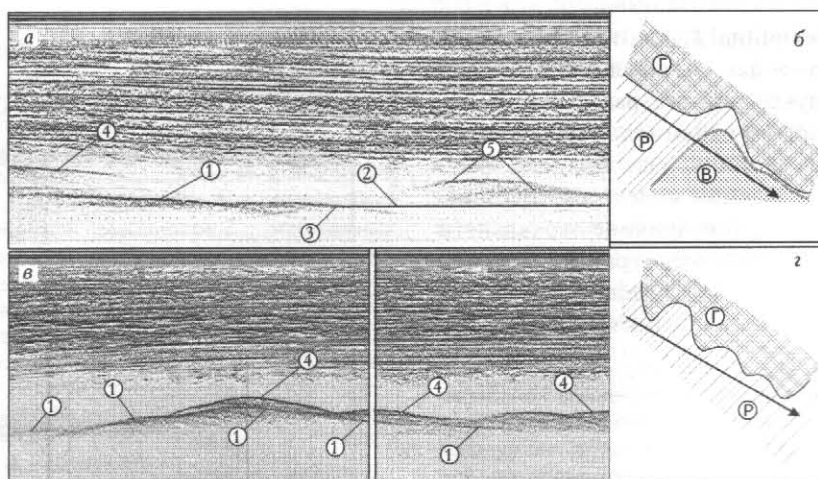


Рис. 5. Временные радиолокационные разрезы (а, г), полученные в районе подледникового озера Восток и схемы расположения маршрутов (б, з). Цифры в кружках: 1 — отражения от подледной поверхности; 2 — отражение от поверхности подледникового водоема; 3 — граница водоема; 4 — боковые отражения от горного массива; 5 — боковые отражения от острова или полуострова. Г — горный массив; Р — подледная равнина; В — водная поверхность; утолщенной линией показано положение маршрута

Fig. 5. RES records (a, g) obtained in the subglacial Lake Vostok area and the location chart of the radar routes (b, z). 1 — reflections from the underlying rock surface; 2 — reflections from the water table; 3 — water reservoir contours; 4 — lateral reflections from the ridge environments; 5 — lateral reflections from the island or peninsula. Г — subglacial ridge; Р — subglacial plane; В — water table; the bold line is the RES route

каньона, соответственно. Границы указанных объектов маркируются гиперболическими отражениями 4. Кроме того, менее выраженные гиперболические отражения 5 образуются от неровностей рельефа. Они присутствуют как на предыдущих (см. рис. 3, б, в, г), так и на обсуждаемом временных радиолокационных разрезах, однако на последнем выражены четче. При равной высоте дневной поверхности равнина в рассматриваемом примере приподнята на 250 м. Это приводит к уменьшению потерь за счет поглощения в леднике и расхождения фронта волны, а, следовательно, амплитуда отраженных сигналов увеличивается.

Маршрут М-2 располагается параллельно склону каньона (см. рис. 4, а, б). На всем протяжении временного радиолокационного разреза (рис. 4, г) наблюдается отражение от его дна 1, при формировании которого вторичные волны образуются с некоторой поверхности. При этом, как следует из расположения маршрута, примерно половина ее приходится на дно каньона, а вторая — на склон и участок равнины. Приблизительно с середины маршрута в формирование отраженного сигнала вовлекаются фрагменты террасы, что приводит к существенному уменьшению интенсивности отраженного сигнала от дна каньона 3, а также к образованию боковых волн от равнины 6 и от террасы 7. Повсеместно наблюдаются гиперболические отражения 5, сформированные неровностями подледной поверхности.

Маршрут М-3 начинается над дном каньона и проходит над террасой, осложняющей его склон (см. рис. 4, а, б). Эти объекты формируют отражения 3 и 2, соответственно (рис. 4, д). Их границы маркируются гиперболическими отражениями 4. Пересекая террасу, маршрут постепенно приближается к равнине, от которой формируется наклонное отражение 6. При этом, по мере приближения к равнине, интенсивность отражения 3 падает, а 4 возрастает.

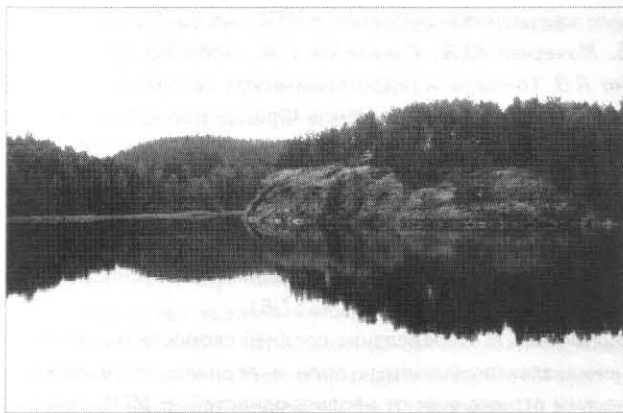


Рис. 6. Район Лахденпохья, северный берег Ладожского озера. Фото автора, август 2004 г.

Fig. 6. Lahdenpohya region, the northern side of Lake Ladoga. Author's photo, August 2004

### Анализ реальных временных радиолокационных разрезов

Используем результаты проведенного моделирования для истолкования реальных данных. На рис. 5 приведены типичные фрагменты временных радиолокационных разрезов, полученных при изучении района подледникового оз. Восток [10, 13, 20]. Справа, в качестве иллюстрации, приводится схема подледного ландшафта.

На всем протяжении первого временного радиолокационного разреза (рис. 5, а) в нижней части прослеживается непрерывное отражение. По своим внешним признакам (морфологии) оно подразделяется на два фрагмента. Фрагмент 1 характеризуется средней интенсивностью и наличием многочисленных гиперболических отражений в нижней части. Согласно результатам моделирования, отражение 1 сформировано от шероховатых коренных пород. Вариации его интенсивности — следствие изменения эффективного коэффициента отражения, что свидетельствует либо о колебаниях средней амплитуды неровностей рельефа, либо об изменении  $\epsilon_b$  пород

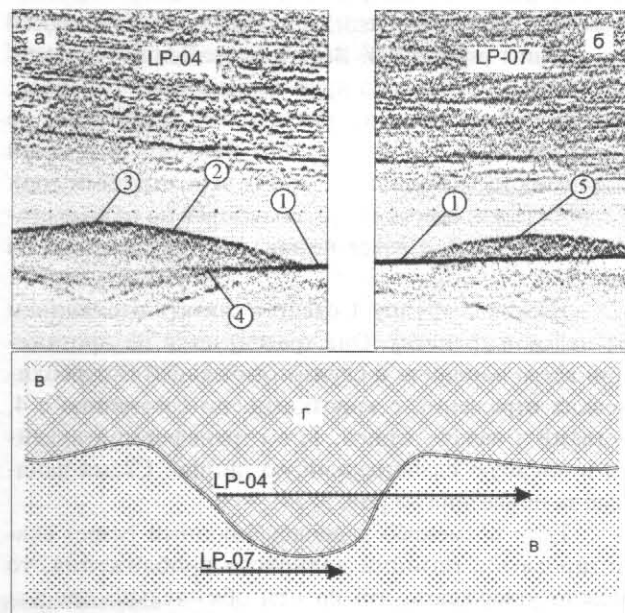


Рис. 7. Временные радиолокационные разрезы (а, б), полученные в районе подледникового оз. Пионерское и схема расположения маршрутов (г): Цифры в кружках: 1 — отражение от поверхности подледникового водоема; 2 — боковое отражение от горного массива; 3 — отражение от привершинной части горного массива; 4 — граница водоема; 5 — боковое отражение от острова или полуострова. Г — горный массив; В — водная поверхность; утолщенной линией показано положение маршрутов

Fig. 7. RES records (а, б) obtained in the Lake Pionerskoe area and location chart of the radar routes (г): 1 — reflections from the water table; 2 — lateral reflections from the ridge environments; 3 — reflection from the summit area of the mountain ridge; 4 — water reservoir contours; 5 — lateral reflection from the island or peninsula. Г — subglacial ridge; В — water table; the bold line is the RES route

(или того и другого вместе). Из вышеизложенного, в частности, следует, что при детальном анализе радиолокационных данных можно получить геологическую информацию о подледной поверхности.

Далее по разрезу следует ровное высокоинтенсивное отражение 2. Оно может быть сформировано только поверхностью воды, которая имеет высокий  $\epsilon_r$  и характеризуется плавными формами. Границей указанных фрагментов (берегом) служит вершина гиперболического отражения 3.

В левой части разреза наблюдается боковое отражение 4. Оно находится выше отражения от коренных пород 1 и, вероятно, сформировано склоновой или привершинной частью горного массива, располагающегося в стороне от маршрута. В правой части записи отчетливо прослеживается сходное отражение 5, образованное от высокого берега озера: острова или полуострова. Схема подледного рельефа представлена на рис. 5, б. Подобный временной радиолокационный разрез мог бы быть получен во фьордах в районе Лахденпохья на северном берегу Ладожского озера (рис. 6) в эпоху оледенения Фенноскандии.

Временной радиолокационный разрез, приведенный на рис. 5, в, интересен своей сложной волновой картиной. Как и в предыдущем случае, наблюдаются две группы отражений. Верхнее отражение 4 подразделяется на несколько ярко выраженных гиперболических отражений, которые сформированы различными (возможно, не связанными друг с другом) фрагментами подледной поверхности (например, холмами или отрогами гор). Теоретически, они могут располагаться по разные стороны маршрута, а вовсе не так, как представлено на рис. 5, в.

Нижнюю группу 1 следует считать отражением от целевой границы. Она трассируется на протяжении всего маршрута и служит огибающей гиперболических отражений с короткими, по сравнению с 4, ветвями в начале записи, затем трансформирующейся в плавную слабонаклонную линию. Схема ландшафта приведена на рис. 5, г.

Если временной радиолокационный разрез анализировать с позиции волнового приближения, то можно утверждать, что на нем обязательно присутствуют отражения, полученные непосредственно снизу, какую бы сложную конфигурацию не имела подледная поверхность. Распространяемая ледовым локатором сферическая волна непременно дойдет до каждого ее фрагмента (если, разумеется, он не затенен какими-либо объектами и располагается в пределах ширины диаграммы направленности). Образовавшаяся при этом вторичная волна будет принята антенной. Будет ли она (а, точнее, результат интерференции с другими вторичными волнами) зарегистрирована или нет, зависит исключительно от технических характеристик аппаратуры.

На рис. 7 приведены временные радиолокационные разрезы по маршрутам LP-04 (рис. 7, а) и LP-07 (рис. 7, б), полученные при изучении подледникового оз. Пионерское [9, 12, 20]. Первый из них начинается

над горным хребтом и заканчивается над поверхностью подледникового водоема (рис. 7, в). Отражение 1 сформировано от его поверхности. Большая часть отражения 2 является боковым отражением, и только отражение 3 образовано привершинной частью хребта. Берег водоема располагается в точке 4, где интенсивность отражения 1 резко уменьшается.

Маршрут LP-07 (рис. 7, б) полностью проходит над поверхностью водоема. Сформированное от него отражение 1 характеризуется высокой интенсивностью и прослеживается вдоль всего маршрута. В правой части записи наблюдается боковое отражение 5, сформированное горным массивом, который располагается вблизи маршрута и непосредственно примыкает к водоему (рис. 7, в).

Таким образом, очевидно, что корректная интерпретация временного радиолокационного разреза — сложная, но выполнимая задача. Существенную помощь в этом могут оказать совместная обработка данных по соседним маршрутам съемки и численное моделирование формирования распространения вторичных волн от заданной поверхности. Последнее дает возможность лучше понять природу отражений, что, в свою очередь, позволит определить глубинное положение целевых границ с большей достоверностью.

В заключение автор приносит благодарность Ю.Я. Мачерету, Ю.Б. Черноглазову и О.Б. Соболеву за конструктивную критику.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 07-05-00401.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Корбанский И.Н. Антенны. М., «Энергия», 1973, 336 с.
2. Мачерет Ю.Я. Некоторые результаты радиолокационного зондирования ледников Западного Шпицбергена в 1974 г. — МГИ, вып. 26, 1976, с. 158-164.
3. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М., «Научный мир», 2006, 392 с.
4. Мачерет Ю.Я., Василенко Е.В. Особенности внутреннего строения и режима ледников Северо-Восточной Земли по данным аэроадиозондирования. — МГИ, вып. 63, 1988, с. 44-56.
5. Мачерет Ю.Я., Синькевич С.А., Боброва Л.И., Санкина Л.В. Толщина и гидротермическое состояние ледникового купола Лунный на Земле Франца-Иосифа по данным радиозондирования. — МГИ, вып. 77, 1993, с. 97-104.
6. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. М., «Наука», 1973, 608 с.
7. Попов С.В. Методика обработки аналоговых материалов радиолокационного профилирования. — Российский геофиз. журнал, т. 23-24, 2001, с. 57-61.
8. Попов С.В. Определение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике по гиперболическим отражениям от неоднородностей. — МГИ, вып. 92, 2002, с. 223-225.
9. Попов С.В., Москатов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Современные исследования сейсмо-радиолокационные исследования в Центральной Антарктиде в преддверии

Международного полярного года. — Симпозиум «Гляциология в канун Международного полярного года», Пушкинские Горы, 9-12 октября 2006 г. 2006, с. 9.

10. Попов С.В., Миронов А.В., Шереметьев А.Н. Результаты наземных радиолокационных исследований подледникового озера «Восток» в 1998-2000 гг. — МГИ, вып. 89, 2000, с. 129-133.

11. Попов С.В., Поздеев В.С. Ледниковый покров и коренной рельеф района гор Принс-Чарльз (Восточная Антарктида). — МГИ, вып. 93, 2002, с. 205-214.

12. Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Об открытии подледникового озера в районе станции Пионерская (Восточная Антарктида). — МГИ, вып. 100, 2006, с. 165-167.

13. Попов С.В., Шереметьев А.Н., Масолов В.Н., Лукин В.В. Береговая черта подледникового озера Восток и прилегающие водоемы: интерпретация данных радиолокационного профилирования. — МГИ, вып. 98, 2005, с. 73-80.

14. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация. М., «Радио и связь», 1994, 216 с.

15. Berry M. V. Theory of radio echo from glacier beds. — Journ. of Glaciology, № 73, 1975, p. 65-74.

16. Dowdeswell J.A., Drewry D.J., Cooper A.P.R. et al. Digital mapping of Nordaustlandet ice caps from airborne geophysical investigations. — Annals of Glaciology, v. 8, 1986, p. 51-58.

17. Dowdeswell J.A., Drewry D.J., Liestol O., Orheim O. Radio echo-sounding of Spitsbergen glaciers: problems in

the interpretation of layer and bottom returns. — Journ. of Glaciology, v. 30, № 104, 1984, p. 16-21.

18. Hagen J.O., Saetrang A. Radio-echo soundings of sub-polar glaciers with low-frequency radar. — Polar Research, v. 9, № 1, 1991, p. 99-107.

19. Harrison C.H. Radio echo sounding of horizontal layers in ice. — Journ. of Glaciology, v. 12, № 66, 1973, p. 383-397.

20. Popov S. V., Masolov V.N. Forty-seven new subglacial lakes in the 0°–110° sector of East Antarctica. — Journ. of Glaciology, v. 53, № 181, 2007, p. 289-297.

21. Popov S. V., Leitchenkov G.L., Moskalevsky M. Yu. et al. The BEDMAP Consortium. ABRIS Project: new bedrock topography map for central Antarctica. — Proc. of the 10th ISAES. USGS Open-File Report 2007-1047, Extended Abstract 026, 4 p.

## SUMMARY

This work is related to the problem of the radio-echo sounding (RES) data interpretation. The paper considers a model for radar transect image induced by spherical electromagnetic waves propagating in the isotropic and homogeneous 3-D space. The RES patterns for three typical objects: an ice shelf with crevasses, subglacial water cavity, and plane landscape with a canyon are simulated. They are used to analyze the RES observations in the vicinities of the subglacial lakes Vostok and Pionerskoe (East Antarctica).



## Читайте в следующем выпуске

В следующем выпуске «Материалов гляциологических исследований» мы посмертно публикуем работу М.Г. Гросвальда «Оледенение Русского Севера и Северо-Востока в эпоху последнего великого похолодания». В этой книге Михаил Григорьевич продолжил разработку своей концепции, согласно которой последняя ледниковая система, существовавшая на территории Евразии почти сто тысяч лет (между 110-115 и 8-10 тыс. лет назад), в периоды своего максимального развития представляла собой сплошной Евразийский покров. Он состоял из Скандинавского, Баренцево-Карского, Восточно-Сибирского, Берингийского и Охотского ледниковых щитов и объединявших их шельфовых ледников, которые простирались вплоть до Северного полюса и далее.

Концепция М.Г. Гросвальда основывается на комплексе взаимосвязанных доказательств и не противоречит общей картине развития природы в четвертичном периоде. В ней следы древнего рельефа и оледенения исследуются с точки зрения существовавшего тогда климата и сопровождаются компьютерным моделированием с учетом всей суммы наших знаний о природе и развитии этих территорий. Предлагаемая читателям книга Гросвальда, как и все предыдущие, написана с полемическим задором. Он работал над этой книгой в течение нескольких последних лет и дописал ее почти до конца. Редакция полагает, что последняя публикация Михаила Григорьевича будет интересна многим читателям.