

УДК 621.396.96:51

**ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ РАЗРЕЗОВ
НА ОСНОВЕ НЕПРЕРЫВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

К. О. Соколов

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,
E-mail: _ksokolov@mail.ru, просп. Ленина, 43, г. Якутск, 677980, Россия*

Предложен способ обработки георадиолокационных разрезов на основе непрерывного вейвлет-преобразования для оценки поглощения электромагнитной энергии в изучаемой среде. С помощью разработанного метода показана возможность локализации неоднородностей мерзлого горного массива повышенной электропроводимости.

Георадиолокация, вейвлет-анализ, криолитозона, неоднородности горного массива

Дистанционное изучение свойств горных пород является одной из основных задач геофизики. Большое разнообразие существующих геофизических методов обусловлено их ограниченными возможностями по получению полной информации (свойства, местоположение и геометрия) об объекте исследования. Как правило, один метод дает сведения лишь о горизонтальных границах раздела, другой — о вертикальных, третий позволяет оценить свойства объекта, когда известны лишь его геометрические размеры, и т. д. [1]. По этой причине при разведке полезных ископаемых используют несколько геофизических методов. В настоящее время известно много примеров эффективного комплексирования различных методов геофизики. Большой интерес вызывает задача получения информации о свойствах и строении мерзлого горного массива одним геофизическим методом. Эту информацию можно получить, используя волновые методы геофизики (георадиолокация и сейсморазведка), позволяющие изучать строение многолетнемерзлых пород по отраженным от их границ волнам, частотно-временные характеристики которых зависят и от некоторых свойств горных пород (влажность, плотность и др.).

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД НА ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫЙ СИГНАЛ

Рассмотрим возможности дистанционного изучения свойств горных пород методом георадиолокации, основанным на способности электромагнитных волн распространяться в гетерогенных средах и отражаться от границ раздела сред с различными электрофизическими свойствами. Длительность, форма и амплитуда сверхширокополосного зондирующего георадиолокационного импульса при распространении в среде зависят от ее электропроводимости (обратной величины удельного электрического сопротивления), что обусловлено зависимостью комплексной диэлектрической проницаемости $\hat{\epsilon}$, электропроводимости σ и затухания A от частоты [2]:

$$\hat{\epsilon}(\omega) = \epsilon' + i \left(\frac{\sigma(\omega)}{\epsilon_0 \omega} \right), \quad A = \frac{\sqrt{\sigma(\omega)}}{\sqrt{\lambda}},$$

где ε' — электростатическая диэлектрическая проницаемость; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; λ — длина электромагнитной волны в среде.

В зоне распространения многолетнемерзлых горных пород существует много локальных зон повышенной электропроводимости (талики, криопэги и пр.), которые зависят от минерального состава, влажности, физико-механических и других свойств горных пород [3]. В настоящее время разработано несколько способов определения свойств горных пород методом георадиолокации [4–7], но они имеют ограничения по глубине, площади и строению исследуемого участка массива горных пород, из-за которых не применяются в повсеместной обработке георадиолокационных данных.

Для разработки способа обработки георадиолокационных разрезов с целью изучения свойств горных пород по всей глубине зондирования на основе однократных измерений горного массива, включающего зоны повышенной электропроводимости, предлагается использовать зависимость затухания электромагнитных волн от частоты.

ОСОБЕННОСТИ ТРЕХМЕРНЫХ ВЕЙВЛЕТ-СПЕКТРОВ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Хорошо известный и широко распространенный в геофизике частотный анализ, основанный на изучении результатов оконного преобразования Фурье, позволяет оценить изменение частотного состава сигнала со временем. Недостатком этого метода является то, что его можно эффективно использовать только в том случае, когда априорно известен фурье-спектр той области радарограммы, который следует рассматривать. Вейвлет-анализ, как дальнейшее развитие фурье-анализа, позволяет решить эту проблему.

На данный момент различные виды вейвлет-преобразований в основном применяются для удаления шумов и помех из сигналов [8, 9]. Трехмерный результат непрерывного вейвлет-преобразования (НВП), который наглядно показывает изменение частотного состава георадиолокационного сигнала [10], может использоваться для изучения свойств зондируемой среды. К сожалению, отсутствует возможность такого представления всей радарограммы, так как для этого понадобилось бы отобразить данные в четырехмерном виде. Однако это можно сделать, представляя данные четвертого измерения (частоты) различными цветами. Для этого необходимо заменить амплитудно-временные формы сигналов радарограммы на их частотно-временные аналоги. Допустим, что георадиолокационный сигнал имеет структуру, показанную на рис. 1а. Результаты НВП, представленные на рис. 1б, показывают, что максимумы вейвлет-спектра демонстрируют преобладающие частоты в разные промежутки времени.

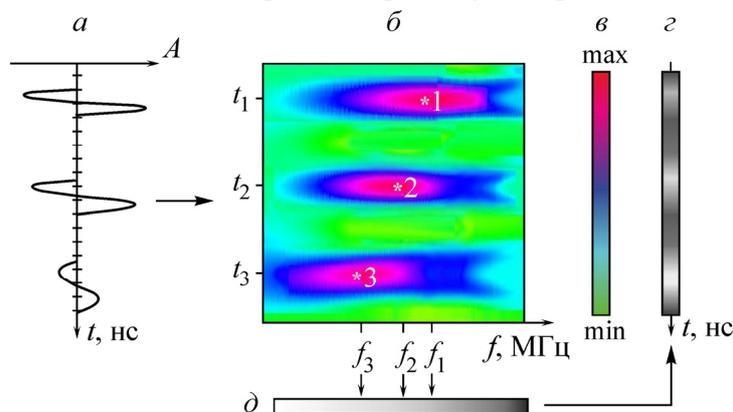


Рис. 1. Частотно-временное представление георадиолокационного сигнала: а — георадиолокационный сигнал; б — трехмерный вейвлет-спектр сигнала; в — цветовая шкала, соответствующая значениям амплитуд коэффициентов вейвлет-спектра; г — частотно-временное представление сигнала; д — шкала соответствия цвета и частоты сигналов; *1, *2, *3 — максимумы вейвлет-спектра

Незначительное смещение преобладающей частоты f_2 второго сигнала относительно частоты f_1 первого сигнала характеризует небольшое поглощение электромагнитной энергии в слое, соответствующем временному интервалу $t_1 - t_2$. На интервале $t_2 - t_3$ поглощение гораздо выше, так как разница между частотами f_3 и f_2 больше, чем между f_2 и f_1 .

Назначим каждой частоте свой цвет (рис. 1д) и в соответствии с временными положениями максимумов заменим амплитуды сигнала (рис. 1а) на цвет, соответствующий частоте сигнала (рис. 1з). Промежутки между $t_1 - t_2$ и $t_2 - t_3$ можно заменить как цветом, назначенным частотам f_2, f_3 , так и равномерным перетеканием из f_1 в f_2 и из f_2 в f_3 . Первый вариант более удобен для выделения слоев горных пород на георадиолокационном разрезе, второй более точно показывает, как происходит поглощение электромагнитной энергии в горном массиве.

Возможности предлагаемого подхода для обработки данных апробированы на синтетическом георадиолокационном разрезе, содержащем сигналы различного частотного состава.

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ СИНТЕЗИРОВАННОГО ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО РАЗРЕЗА НА ОСНОВЕ НВП

Рассмотрим синтетический георадиолокационный разрез, который отражает строение горного массива (рис. 2).

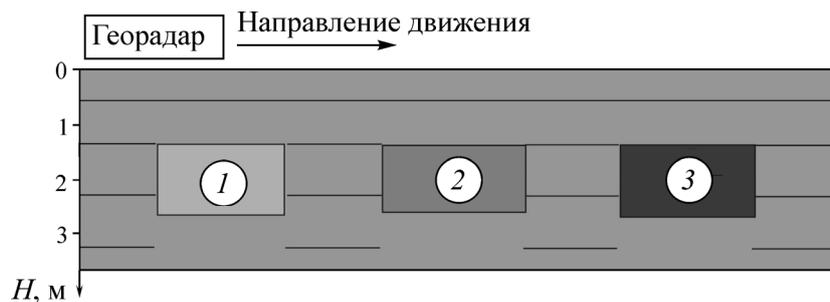


Рис. 2. Схема структуры мерзлого горного массива: 1–3 — локальные неоднородности с повышенной электропроводимостью во вмещающей диэлектрической среде

В горизонтально-слоистом массиве, представляющем собой диэлектрическую среду, характерную для мерзлых горных пород, расположены три одинаковых по размеру участка с разной электропроводимостью ($\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$), что может соответствовать, например, песку с различной объемной влажностью или засоленностью. Условно будем считать, что зондирования проводятся георадаром с центральной частотой 200 МГц. Синтетический георадиолокационный разрез состоит из модулированных синусоид (далее мы будем называть их просто “сигналы”). Разрез содержит сигналы ($f = 200$ МГц), отраженные от границ раздела слоистых сред и верхних границ неоднородностей, а также сигналы от нижних границ неоднородностей частотой 90, 60, 50 МГц соответственно. Разные частоты сигналов, отраженных от нижних границ неоднородностей, обусловлены различным затуханием в них электромагнитных волн, так как чем больше электропроводимость, тем больше затухание и сильнее уменьшаются по амплитуде высокочастотные составляющие зондирующего георадиолокационного сигнала. Амплитуды сигналов низкой частоты уменьшаются менее интенсивно, что вызывает смещение центральной частоты спектра в область низких частот, которое приводит к увеличению длительности сигнала и визуально проявляется как его расширение. Частотная зависимость затухания для разных сред рассмотрена, например, в [11], где показано наличие этой зависимости начиная с 0.1 МГц.

Выбор конкретных частот, отраженных от нижних границ неоднородностей, сделан исходя из результатов, опубликованных в [2, 12]. Они соответствуют сигналам от суглинистых неоднородностей толщиной 1 м с электропроводимостями, См/м: $\sigma_1 = 0.03$, $\sigma_2 = 0.04$, $\sigma_3 = 0.044$.

Обработка разреза (рис. 3а) по описанному алгоритму с использованием вейвлета “*gaus2*” проведена в MATLAB, и ее результат представлен на рис. 3б. Темно-серым цветом обозначена самая высокая частота ($f = 200$ МГц) и для удобства выделения неоднородностей пространство между границами слоев вмещающей среды заполнено тем же цветом в соответствии со вторым способом окрашивания временных интервалов между сигналами. Так, между сигналами с одинаковой частотой ($f = 200$ МГц) цвет будет однородным. Наличие черного оттенка в верхней части разреза объясняется наложением прямых сигналов, прошедших по воздуху и подстилающей породе. Приведенные на рис. 2 три неоднородности с электропроводимостями $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ в частотно-временном представлении будут выглядеть как три области с различным цветом в зависимости от их частоты (рис. 3а). Первая неоднородность, имеющая наименьшую электропроводимость ($f_1 = 90$ МГц), показана оттенками серого цвета, самый светлый из которых расположен на отметке глубины, соответствующей местоположению георадиолокационного сигнала, отраженного от нижней границы этой неоднородности. Вторая неоднородность характеризуется более низкой частотой ($f_2 = 60$ МГц) и показана оттенками серого, плавно переходящими в узкую полосу белого цвета. Третья неоднородность, представленная на рис. 3а самой светлой областью с широкой белой полосой, говорит о самой низкой частоте ($f_3 = 50$ МГц) и соответственно самой высокой электропроводимости.

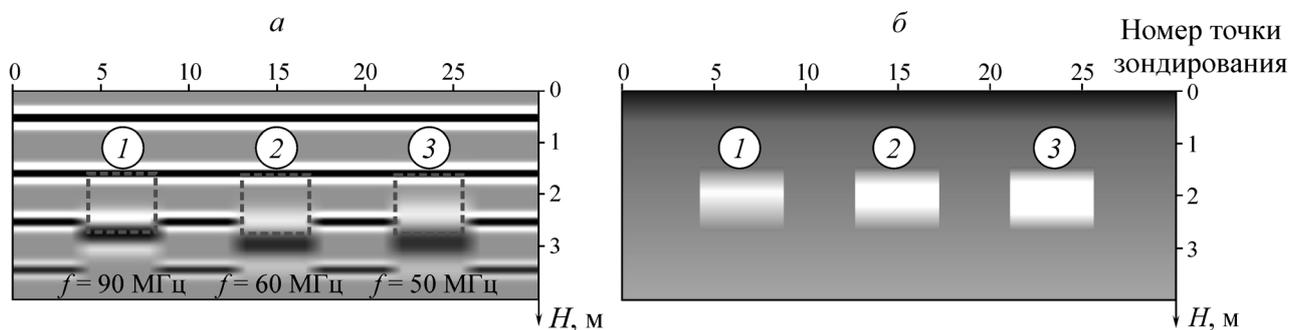


Рис. 3. Синтетический георадиолокационный разрез (а) и его частотно-временное представление (б);
 ----- границы неоднородностей

Таким образом, с помощью предлагаемого способа частотно-временного представления георадиолокационных данных поиск зон повышенной электропроводимости в мерзлом горном массиве сводится к выявлению на радарограммах участков с более светлой окраской.

Чувствительность метода к изменению частоты зависит от рассматриваемой полосы частот и используемого вейвлета. Например, на рис. 3б в интервале частот 50–200 МГц можно различить частоты с разницей 10 МГц, что видно по белой линии, соответствующей каждой неоднородности. Количество белого цвета, т. е. толщина линии, обратно пропорционально частоте. При необходимости полоса частот может быть сужена или расширена для изменения разрешающей способности по частоте. В данном варианте частотно-временного представления используется плавный переход частот между максимумами трехмерного вейвлет-спектра. Предлагаемый способ дистанционного изучения свойств горных пород на основе вейвлет-преобразования данных георадиолокации по сравнению с существующими методами обработки дает возможность повысить

информативность исследований без проведения многократных измерений [4], не требует наличия особенностей георадиолокационного разреза в виде гипербол для расчета скоростных характеристик среды [7] и может быть использован для анализа разреза по всей глубине, а не только приповерхностного слоя [5]. Отслеживание частотного состава георадиолокационных сигналов по глубине позволит выявлять зоны с повышенным затуханием электромагнитной энергии, которые далее могут быть интерпретированы в соответствии с априорными данными.

ВЫВОДЫ

Предлагаемый способ частотно-временного представления данных георадиолокации горного массива криолитозоны можно рассматривать как возможный инструмент выявления неоднородностей повышенной электропроводимости, которые могут быть приурочены, например, к зонам талых пород, или установления нарушений температурного режима пород вокруг выработок на шахтах и рудниках криолитозоны. Достоинствами данного способа являются простота его интерпретации и программной реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелевской В. К., Горбачев Ю. И., Калинин А. В., Попов М. Г., Селиверстов Н. И., Шевнин В. А. Геофизические методы исследований: учеб. пособие. — Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2004.
2. Изюмов С. В., Дручинин С. В., Вознесенский А. С. Теория и методы георадиолокации: учеб. пособие. — М.: Горная книга, МГУ, 2008.
3. Манштейн А. К. Малоглубинная геофизика: пособие по спецкурсу. — Новосибирск: Изд-во НГУ, 2002.
4. Нерадовский Л. Г. Методическое руководство по изучению многолетнемерзлых пород методом динамической георадиолокации: избр. тр. Рос. школы по проблемам науки и технологий. — М.: Изд-во РАН, 2009.
5. Куляндин Г. А., Федорова Л. Л., Омеляненко А. В., Оленченко В. В. Определение электрофизических свойств пород горного массива методом георадиолокационного каротажа // ГИАБ. — 2011. — № 8.
6. Хакиев З. Б. Определение свойств грунта георадиолокационным методом // Радиолокация и радиосвязь: докл. III Всерос. конф. — М., 2009.
7. Денисов Р. Р., Капустин В. В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме // Геофизика. — 2010. — № 4.
8. Irving J. D., Knight R. J. Removal of wavelet dispersion from ground-penetrating radar data, *Geophysics*, 2003, Vol. 68, No. 3.
9. Baili J., Lahouar S., Hergli M., Amimi A., Besbes K. Application of the Discrete Wavelet transform to Denoise GPR Signals, J. Baili, Second International Symposium on Communications, Control and Signal Processing, Marrakech, 13-15 March 2006.
10. Федорова Л. Л., Соколов К. О. Георадиолокация массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны, перекрытого электропроводящим слоем // ГИАБ. — 2011. — № 8.
11. Финкельштейн М. И., Карпунин В. И., Кутев В. А., Метелкин В. Н. Подповерхностная георадиолокация. — М.: Радио и связь, 1994.
12. Дручинин С. В., Лещанский Ю. И., Подшибякин Н. Г. Влияние проводимости грунта на форму и амплитуду импульсных сигналов георадиолокатора // Проблемы дифракции и распространения волн: междувед. сб. — М.: МФТИ, 1994.