

УДК 622.271

К.О. Соколов, Л.Л. Федорова, А.В. Омеляненко

**ВЫЯВЛЕНИЕ ГРАНИЦ ПРОДУКТИВНОГО СЛОЯ
АЛМАЗОНОСНОЙ РОССЫПИ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫМ
АНАЛИЗОМ ДАННЫХ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ
МЕРЗЛОГО ГОРНОГО МАССИВА**

Рассмотрен оригинальный подход использования частотно-временного анализа непрерывного вейвлет преобразования сигналов для совершенствования метода георадиолокации. Приведены результаты апробации разработанного программно-методического обеспечения, позволяющего повысить детальность изучения структуры мерзлых горных пород произвольной электропроводности.

Ключевые слова: вейвлет преобразования, георадиолокация, криолитозона.

Семинар № 2

K.O. Sokolov, L.L. Fedorova, A.V. Omeljanenko

REVEALING OF BORDERS OF THE PRODUCTIVE LAYER DIAMOND'S SCATTERINGS THE TIME-AND-FREQUENCY THE ANALYSIS OF THE DATA OF THE GEORADAR-LOCATION FROZEN HILLS

This paper presents originally approach using a frequency-time analysis of the application continuous wavelet transform to improve the GPR method. Showed an example of the use of developed software and methodological support, which enhances the detailed study of a layered structure of frozen massif of rock arbitrary conductivity.

Key words: veivlet transformations, a georadar-location, frozen hills.

Для дистанционного получения оперативной и детальной информации о структуре массива применяются современные методы электроразведки. Как показывают исследования последних лет, из них наиболее перспективным для изучения мерзлых рыхлых отложений является метод георадиолокации [1]. Метод основан на

излучении сверхширокополосных (наносекундных) импульсов метрового и дециметрового диапазона электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства. Георадиолокация успешно применяется при решении широкого круга инженерно-геологических, археологических, строительных и других задач, связанных с изучением строения приповерхностной части геологической среды глубиной до 30 м.

Применение георадиолокации в условиях открытой разработки месторождений криолитозоны затруднено в связи с широким диапазоном свойств исследуемых сред. В частности, по технологическим особенностям проведение полевых геофизических работ по оконтуриванию алмазонасных россыпей выполняется летом, при формировании сезонно-талого слоя и повышенной влажности верхнего слоя перекрывающих пород, что ведет к резкому повышению их проводимости. Сезонно-талый слой для георадиолокации пред-

ставляет собой экранирующий горизонт, маскирующий сигналы от нижних слоев [1]. Для получения качественной информации в этих условиях нами предлагается проводить обработку данных с помощью спектрально-пространственного анализа динамических характеристик принятого сигнала, как более чувствительного к изменениям свойств пород. Учитывая, что георадиолокационные сигналы относятся к нестационарным, т.е. происходит изменение частоты в течение всего времени сигнала, то для выявления локальных особенностей спектрально-временных характеристик принятых сигналов предпочтительно применение одномерного непрерывного вейвлет преобразования сигналов, основанного на фильтрации данных фильтрами конечной длительности, в отличие от классического Фурье-анализа, и позволяющего проследить динамику частотных составляющих вдоль всего сигнала [2].

Английское слово *wavelet* (от французского «*ondelette*») дословно переводится как «короткая (маленькая) волна». Вейвлеты имеют вид коротких волновых пакетов с нулевым интегральным значением, локализованных по оси аргументов (независимых переменных), инвариантных к сдвигу и линейных к операции масштабирования (сжатия/растяжения). По локализации во временном и частотном представлении вейвлеты занимают промежуточное положение между гармоническими (синусоидальными) функциями, локализованными по частоте, и функцией Дирака, локализованной во времени. Основная область применения вейвлетных преобразований – анализ и обработка сигналов и функций, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве, когда результаты анализа должны содержать не только общую частотную характеристику сигнала (распределение энергии сигнала по частотным составляющим), но и сведения об определенных локальных координа-

тах, на которых проявляют себя те или иные группы частотных составляющих, или на которых происходят быстрые изменения частотных составляющих сигнала. По сравнению с разложением сигналов на ряды Фурье, вейвлеты способны с гораздо более высокой точностью представлять локальные особенности сигналов, вплоть до разрывов 1-го рода (скачков). В отличие от преобразований Фурье, вейвлет-преобразование одномерных сигналов обеспечивает двумерную развертку, при этом изменение частоты и времени рассматриваются как независимые переменные, что дает возможность анализа сигналов сразу в двух пространствах.

Базисными функциями вейвлет-преобразований, которые собственно и называются вейвлетами, могут быть самые различные функции с компактным носителем – модулированные импульсами синусоиды, функции со скачками уровня и т.п.

Вейвлет-преобразование (ВП) одномерного сигнала – это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций:

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

сконструированных из материнского (исходного) вейвлета $\psi(t)$, обладающего определенными свойствами за счет операций сдвига во времени (b) и изменения временного масштаба (a) (рис. 2). Масштаб в вейвлет-анализе является аналогом частоты в анализе Фурье. Множитель $1/\sqrt{a}$ обеспечивает независимость нормы этих функций от масштабирующего числа a . Малые значения a соответствуют мелкому масштабу $\psi_{ab}(t)$ или высоким частотам ($\omega \sim 1/a$), большие параметры a – крупному масштабу $\psi_{ab}(t)$, т.е. растяжению материнского вейвлета $\psi(t)$ и сжатию его спектра [3].

Многообразие разработанных вейвлетов позволяет выбрать наиболее подходящий для анализа георадиолокаци-

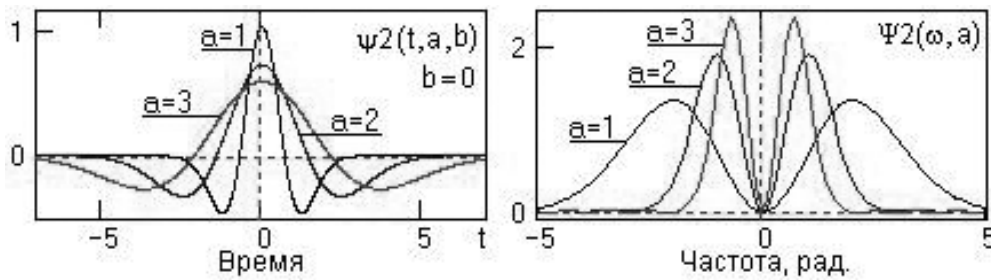


Рис. 1. Вейвлет «Mhat» во временной и частотной областях

онных данных с целью максимального увеличения эффективности их обработки. Основным критерий выбора: вейвлет должен быть максимально приближен к классу функций описывающих сигнал, т.е. необходимо чтобы форма вейвлета отражала поведение сигнала или его составляющих. Для анализа георадиолокационного сигнала нами выбран вейвлет «Mhat» [4]. На рис. 1 он приведен во временной и частотной областях для трех значений масштабных коэффициентов 'a'. Вычисляется по второй производной (n=2) функции Гаусса. Вейвлет симметричен, спектр вейвлета представлен только действительной частью и хорошо локализован по частоте, нулевой и первый моменты вейвлета равны нулю. Применяется для анализа сложных сигналов.

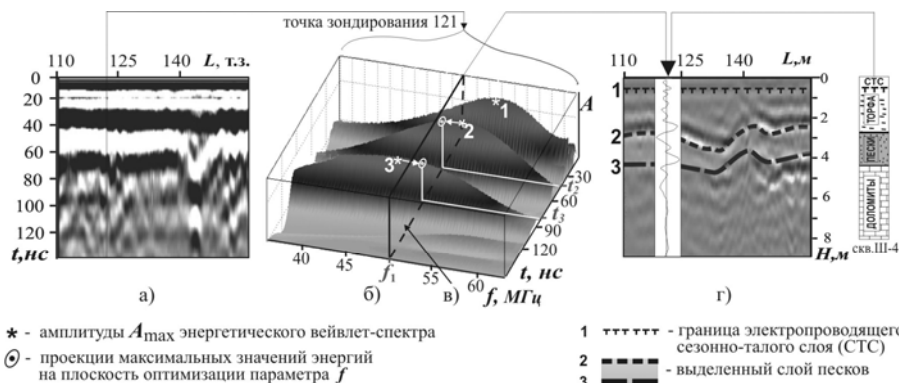
Уравнение вейвлета Mhat:

$$\psi(t,a,b) = \frac{1.031}{\sqrt{2}} \cdot \left\{ \exp\left[-\left(\frac{t-b}{a}\right)^2\right] - 2\left(\frac{t-b}{a}\right)^2 \times \right. \\ \left. \times \exp\left[-\left(\frac{t-b}{a}\right)^2\right] \right\} \quad (2)$$

Процедура преобразования стартует с масштаба $a=1$ и продолжается при увеличивающихся значениях a , т.е. анализ начинается с высоких частот и проводится в сторону низких частот. Вейвлет помещается в начало сигнала ($t=0$), перемножается с сигналом, интегрируется на интервале своего задания и нормализуется на $1/\sqrt{a}$, результат вычисления $S(a,b)$ помещается в точку ($a=1, b=0$) масштабно-временного спектра преобразования. Сдвиг b может

рассматриваться как время с момента $t=0$, при этом координатная ось b , по существу, повторяет временную ось сигнала. Затем вейвлет масштаба $a=1$ сдвигается вправо на значение b и процедура повторяется. Получаем значение, соответствующее $t=b$ в строке $a=1$ на частотно-временном плане. Процедура повторяется до тех пор, пока вейвлет не достигнет конца сигнала. Таким образом получаем строку точек на масштабно-временном плане для масштаба $a=1$. Для вычисления следующей масштабной строки значение a увеличивается на некоторое значение. Начальное значение масштабного коэффициента может быть и меньше 1. В принципе, для детализации самых высоких частот сигнала минимальных размер окна вейвлета не должен превышать периода самой высокочастотной гармоники. Если в сигнале присутствуют спектральные компоненты, соответствующие текущему значению a , то интеграл произведения вейвлета с сигналом в интервале, где эта спектральная компонента присутствует, дает значительную величину. В противном случае - произведение мало или равно нулю, т.к. среднее значение вейвлетной функции равно нулю [2].

Главной особенностью вейвлетов является - анализ сигналов на разных масштабах, что позволяет совершенно точно установить наличие частот в определенном момент времени сигнала. Благодаря этому свойству вейвлетов имеется возможность обнаружения сиг-



а) - исходный георадиолокационный разрез мерзлых горных пород, перекрытых электропроводящим слоем (СТС);
 б) - трехмерный спектральный образ георадиолокационного сигнала (результат вейвлет-преобразования) ;
 в) - плоскость оптимизации параметра фильтрации по частоте f_1 сигналов 2;3 на временном интервале t_2-t_3 ;
 г) - результат интерпретации разреза по профилю L в масштабе глубин H с выделенным слоем песков.

Рис. 2. Пример обработки данных георадиолокации с применением вейвлет анализа

налов от нижних границ на фоне низкочастотной составляющей сигнала, возникающей из-за высокой проводимости пород.

При вейвлет-разложении георадиолокационного сигнала выявляются области максимумов вейвлет-коэффициентов, соответствующих разным частотным диапазонам исследуемого сигнала, в моменты времени, связанные с изменением свойств среды. При этом, местоположение по времени регистрации максимальных значений энергии частот (f) указывает на глубину границ раздела слоев контрастных по проводимости, для выделения этой границы необходимо провести вейвлет преобразование с параметрами соответствующими частоте f . По распределению энергии на конкретных частотах (f) по временной развертке можно оценить свойства этих слоев, учитывая, что широкополосные сигналы испытывают дисперсию частот, т.е. искажение своей формы, в зависимости от значения проводимости. Так, при распространении сигнала в средах с высокой проводимостью наблюдается более интенсивное затухание высоких частот.

При прохождении сверхширокополосного сигнала через границу раздела сред, частотное наполнение отраженных сигналов и их амплитуды зависят от индивидуальной реакции каждой частоты на эту границу, определяемой свойствами среды. Исходя из этого, в георадиолокационном сигнале каждой границе соответствует импульс определенной длительности и амплитуды. Однозначное определение отражений от реальных геологических границ гарантируется специализированным аппаратно-программным обеспечением [1] и использованием процедур предварительной обработки данных [5], исключая шум и переотражения.

Разработанное программно-методическое обеспечение георадиолокационных исследований с использованием вейвлет-анализа успешно применено для разделения торфов и песков на алмазоносных россыпях месторождениях севера Якутии.

На рис. 2, а представлен фрагмент исходного георадиолокационного разреза, полученного при зондированиях георадаром ОКО-2 с АБДЛ-Тритон с частотой 30 МГц (ООО Логические

системы, г. Раменское), на котором не представляется возможным изучение геологической структуры массива на глубинах до 5 м. Георадиолокационные сигналы на этом разрезе являются суперпозицией сигналов отраженных от границ проводящего слоя. На рис. 2, б представлен результат непрерывного вейвлет преобразования - частотно-временной образ георадиолокационного сигнала, полученного в точке зондирования 121. Имеется 3 максимума, соответствующие границе сезонного слоя, верхней и нижней границам продуктивного слоя. Вейвлет-коэффициенты, полученные анализирующим вейвлетом с частотой f_1 , позволяют выявить границы продуктивного слоя. На рис. 2, г представлен ре-

зультат вейвлет-обработки георадиолокационного разреза с параметром f_1 . Результаты георадиолокационных исследований подтверждены данными бурения.

В результате проведенных исследований разработано программно-методическое обеспечение обработки и интерпретации данных георадиолокации, основанное на частотно-временном анализе вейвлет-преобразования сигналов, позволяющее повысить детальность изучения слоистой структуры мерзлых горных пород произвольной электропроводности, что открывает возможность определения параметров мало-мощных продуктивных горизонтов перекрытых обводненными и техногенными отложениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Омельяненко А.В.* Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород/ А.В.Омельяненко, Л.Л. Федорова.- Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. - 136 с.
2. *Короновский А.А.* Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения/ А.А. Короновский, А.Е. Храмов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 176 с.
3. *Дьяконов В.П.* Вейвлеты. От теории к практике. Изд. 2-е, перераб. И доп.- М.: СОЛОН-Пресс, 2004. - 400 с.
4. *Федорова Л.Л., Соколов К.О.* Решение задач обработки и интерпретации георадиолокационных данных на основе вейвлет-анализа / Л.Л. Федорова, К.О. Соколов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008. - №8. - С.153-158.
5. *Владов М.Л.* Введение в георадиолокацию/ М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. Учебное пособие - М.: Изд-во МГУ, 2004. - 153 с. **ИДБ**

Коротко об авторах

Соколов К.О. – аспирант, Института горного дела Севера СО РАН им. Н.В. Черского, _ksokolov@mail.ru
Федорова Л.Л. – кандидат технических наук, доцент, Институт горного дела Севера СО РАН, l.l.fedorova@igds.yzn.ru
Омельяненко А.В. – доктор технических наук, Институт горного дела Севера СО РАН, alex@igds.yzn.ru

