

## ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотрена возможность частотно-временного анализа данных магнитотеллурического зондирования с использованием вейвлета Морле.

Article give an account of results magnetotelluric data analysis with application of Morle wavelet.

Электроразведка является инструментом, с помощью которого можно успешно решать целый круг задач, связанных с поисками залежей углеводородов; она существенно дополняет сейсморазведку, а в ряде случаев и решает задачи, которые трактуются сейсморазведкой неоднозначно или их решение обходится слишком дорого, либо сейсморазведка не может выполнить работы в определенном районе из-за экологических, геологических, климатических и других условий. Несмотря на огромные успехи развития сейсморазведки в последние несколько десятилетий, она не в состоянии на 100 % гарантировать наличие углеводородов в предполагаемой ловушке. Дополнительная информация, получаемая с помощью других геофизических методов, и в первую очередь электроразведки, которая оценивается в 10-20 % от стоимости сейсморазведочных работ, может существенно уменьшить степень риска бурения [3].

Магнитотеллурические методы основаны на изучении естественного поля Земли (магнитотеллурического поля). К достоинствам этих методов относятся большая глубинность исследований, низкая стоимость и безопасность работ (в связи с отсутствием мощных источников тока), портативность и мобильность аппаратуры [5]. Современное развитие электронных вычислительных систем позволило повысить скорость и качество обработки и интерпретации данных магнитотеллурического зондирования (МТЗ).

В процессе проведения полевых работ методом МТЗ возникает масса вопросов,

важнейшими из которых являются следующие: в какое время лучше регистрировать «высокие» частоты, в какое – «низкие» частоты, а в какое – «средние»? Как выделить из шумоподобных, нестационарных измеряемых сигналов полезную составляющую, несущую информацию о структуре проводимости подстилающей среды в виде набора гладких функций, отражающих электрические свойства земли?

Частично на эти вопросы может дать ответы использование на стадии анализа и обработки полевых данных Фурье-преобразования. Но при работе с нестационарными сигналами Фурье-анализ сталкивается с рядом проблем, важнейшей из которых является неспособность традиционного преобразования Фурье анализировать сигналы, локализованные на некотором временн<sup>ом</sup> интервале, так как в процессе Фурье-преобразования теряется информация о временных характеристиках сигнала. Решение этой проблемы связано с использованием частотно-временного анализа, который реализуется с помощью вейвлетов.

Классическое преобразование Фурье (непрерывное или дискретное) является весьма полезным математическим аппаратом для анализа и синтеза сигналов. Преобразования Фурье обладают замечательной способностью фокусировать в точку «размазанную» во времени информацию о периодичности сигнала при переходе из временной области в частотную. Достигается это за счет того, что ядро преобразования Фурье не локализовано во времени, но имеет пре-

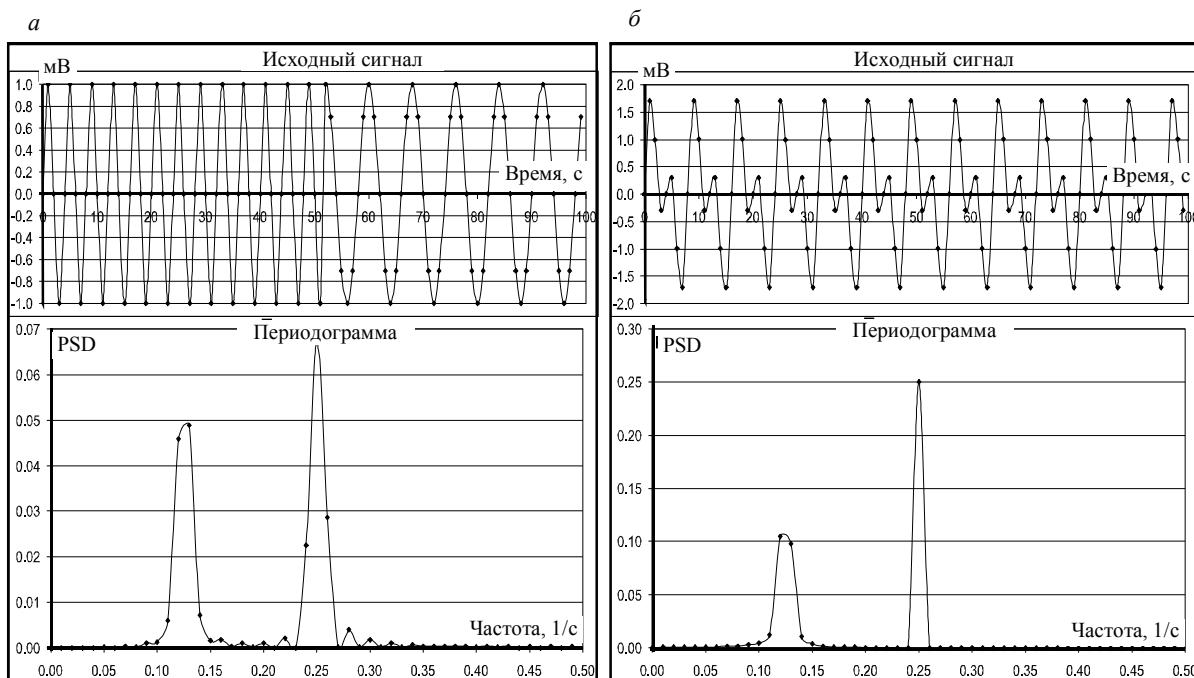


Рис.1. Модельные сигналы двух синусоид с разными частотами и их периодограммы

дельную локализацию в частотной области. Это и делает преобразование Фурье прекрасным инструментом для изучения процессов, характеристики которых не меняются со временем [4]. Однако оно иногда оказывается недостаточно эффективным при обработке сложных сигналов. Преобразование Фурье, например, не различает сигналы из двух синусоид с разными частотами, один из которых представляет собой последовательно следующие друг за другом синусоиды (рис.1, а), второй – сумму двух синусоид (рис.1, б). В обоих случаях их спектр выглядит как два пика на двух фиксированных частотах (рис.1). Следовательно, преобразование Фурье в своем традиционном виде не приспособлено для анализа нестационарных сигналов, в том числе локализованных на некотором временном интервале, так как теряется информация о временных характеристиках сигнала.

Следовательно, спектральный анализ реальных сигналов необходимо осуществлять как по частоте, так и во времени. Преимущества такого анализа очевидны. На практике чаще всего приходится иметь дело с нестационарными процессами, в которых

информационным является сам факт изменения частотно-временных характеристик сигнала. Примером таких сигналов и является магнитотеллурическое поле.

Для выполнения анализа требуются базисные функции, обладающие способностью выявлять в анализируемом сигнале как частотные, так и временные характеристики. Другими словами, сами базисные функции должны обладать определенными свойствами, называемыми частотно-временной локализацией сигнала [2].

Вейвлет-преобразование как раз и относится к этому типу преобразований. Оно обеспечивает частотно-временное разрешение сигнала, поскольку основано на использовании локализованных во времени ядер преобразования, размеры которых согласованы с масштабом изучаемых компонентов ряда.

Основная идея вейвлет-преобразования отвечает специфике многих временных рядов, демонстрирующих эволюцию во времени своих основных характеристик: среднего значения, дисперсии, периодов, амплитуд и фаз гармонических компонентов.

Данный анализ временного ряда магнитотеллурического сигнала основан на исполь-

зовании интегрального вейвлет-преобразования, которое для функции  $f(t) \in L^2(R)$  задается следующим образом:

$$W(a, b) = \frac{1}{|a|^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \times \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

где  $a, b \in R$ ,  $a \neq 0$ .

Входящая в выражение (1) функция  $\psi(t)$  – вейвлет,  $f(t)$  – анализируемый сигнал; символом «\*» обозначена процедура комплексного сопряжения. Параметр  $a$  называется масштабом и определяет размер вейвлета. Параметр  $b$  задает временную локализацию вейвлета и называется сдвигом.

В работе был использован вейвлет Морле:

$$\psi(t) = e^{-t^2/2} e^{i2\pi t}.$$

Поскольку при обработке результатов измерений объектами преобразований являются не функции, заданные на всей оси времени, а временные ряды, длина которых всегда конечна, введенным определением интегрального вейвлет-преобразования на практике воспользоваться нельзя. По этой причине вместо теоретических понятий вводятся их практические аналоги.

Наш анализируемый временной ряд задан значениями функций, следующими друг за другом с постоянным шагом  $\Delta t$ :

$$f_k = f(t_k), \quad t_k = \Delta t k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1.$$

Для оценки вейвлет-преобразования этой последовательности необходимо воспользоваться следующим выражением:

$$W_A(a, b) = \frac{1}{n(a, b)} \sum_{k=0}^{N-1} f_k \psi^*\left(\frac{t_k - b}{a}\right), \quad (2)$$

$$\text{где } n(a, b) = \sum_{k=0}^{N-1} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t_k - b}{a}\right)^2}.$$

Функция (2) вычисляется для дискретных значений аргументов  $a_i$  и  $b_j$ ,  $i = 0, \dots, N_a - 1$ ;  $j = 0, \dots, N_b - 1$ . Используя формулу (2), можно ввести оценку локального спектра энергии

$$S(a_i, b_j) = |W_A(a_i, b_j)|^2.$$

Эту функцию называют скалограммой. Она описывает распределение энергии по масштабам.

Бывает так, что широкие контуры линий гармонических компонент в скалограмме мешают проследить за эволюцией их частот во времени. Чтобы отсечь влияние контуров, можно выделить те точки скалограммы, в которых она имеет максимумы по переменным  $a$  и  $b$ :

$$S_c(a_{i,b_j}) = \begin{cases} S_{ij}, & \text{если } S_{i-1,j} < S_{ij} > S_{i+1,j} \\ & \text{и } S_{i,j-1} < S_{ij} > S_{i,j+1}; \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (3)$$

Функцию (3) принято называть скелетоном.

В случае синусоидального сигнала точки скелетона располагаются вдоль линий, идущих параллельно оси времени. Если в данных имеются гармонические или квазигармонические компоненты, то топографическая карта будет состоять из линий, ориентированных вдоль оси  $b$ . В случае шумового компонента линии скелетона вытягиваются в перпендикулярном направлении, т.е. параллельно оси  $a$ . Если в данных присутствуют и гармонические компоненты и шум, то карта скелетона позволяет увидеть их раздельно [1].

Рассмотрим график временного ряда магнитотеллурического зондирования в промежутке от 0 до 430 с (рис.2). Изучение этого ряда во временной области показывает следующие характерные особенности: амплитуда и среднее значение гармонических колебаний постоянно изменяются, период колебаний также постоянно изменяется во времени, что говорит о нестационарности данного процесса. Следовательно, характеристики ряда постоянно изменяются во времени и анализ Фурье не является адекватным методом исследования. На периодограмме исследуемого временного ряда, построенной по данным анализа Фурье, можно увидеть, что сигнал представляет собой сложный процесс, в котором участвуют вариации с различными периодами колебаний (рис.3). Основная энергия сигнала распределена в интервале 0,01-0,1 Гц. И это, в общем-то, все, что может дать при исследовании анализ Фурье.

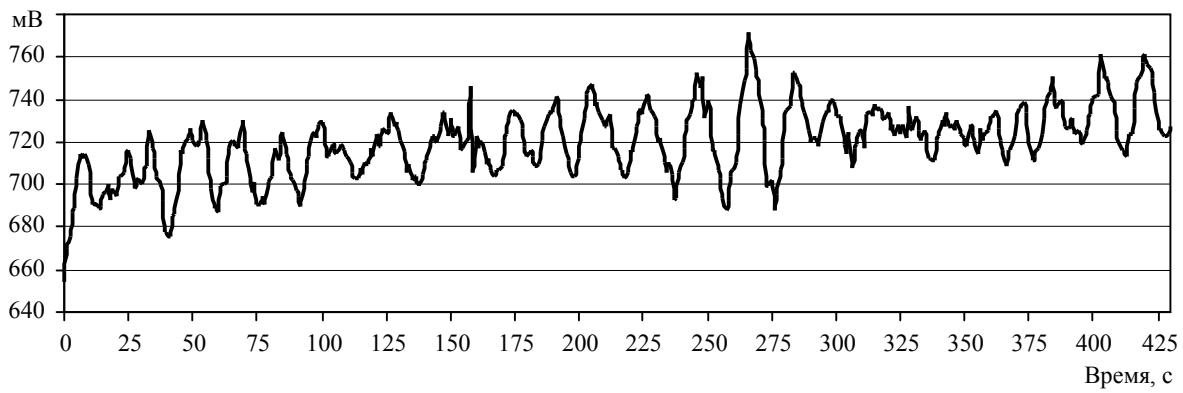


Рис.2. Исследуемый временной ряд магнитотеллурического зондирования

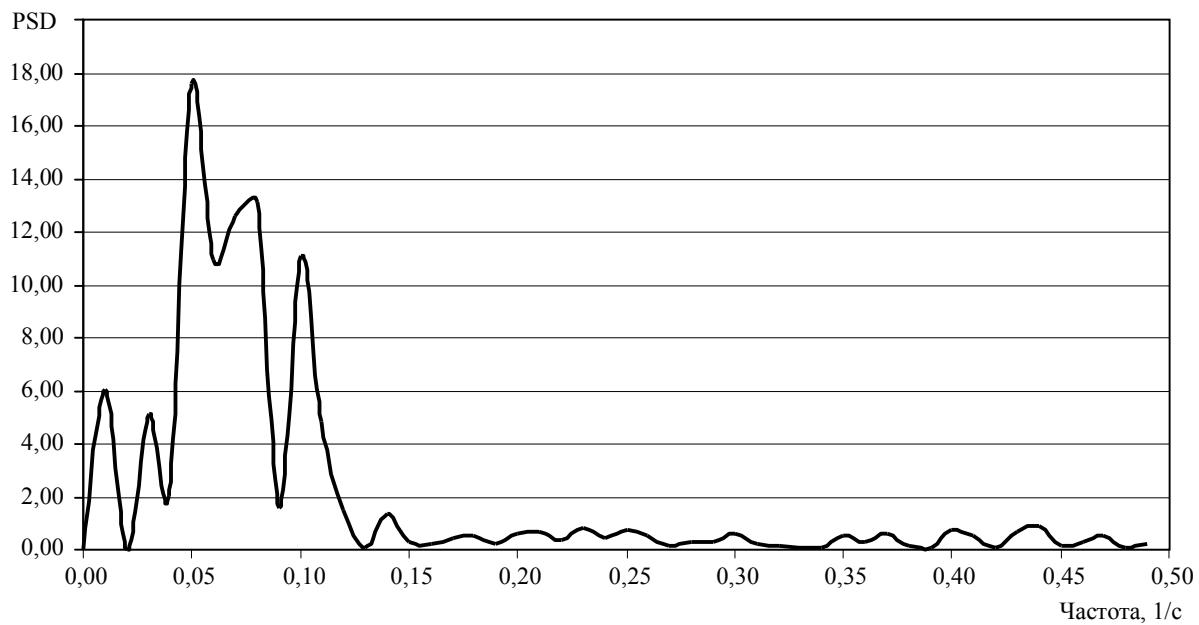


Рис.3. Периодограмма исследуемого сигнала, построенная по данным анализа Фурье

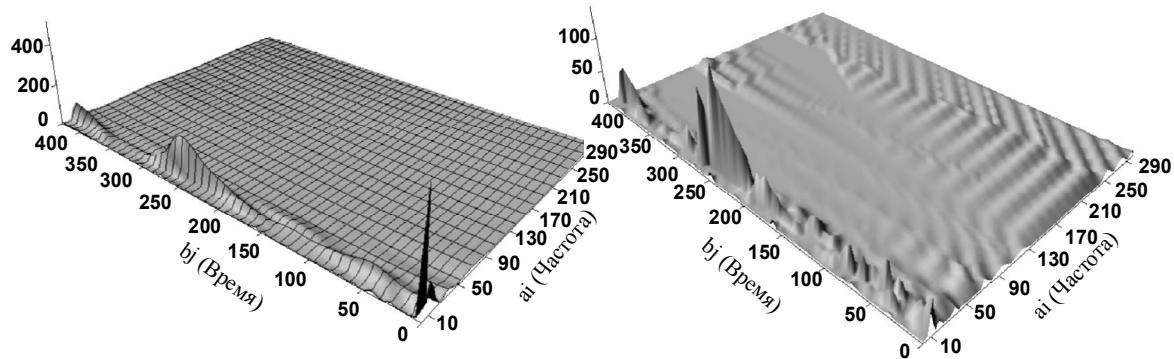


Рис.4. Скалограмма исследуемого сигнала

Рис.5. Скелетон скалограммы исследуемого сигнала

Применение вейвлет-анализа исследуемого временного ряда позволяет увидеть не только концентрации мощности на известных масштабах, но и проследить за их развитием во времени. По скалограмме, вычисленной с применением вейвлета Морле в диапазоне 0-320 с (рис.4), можно сказать, что основное распределение энергии приходится на масштабы от 10 до 40 с, что соответствует частоте 0,025-0,1 Гц. Но в отличие от спектра Фурье хорошо видно, что время и амплитуды спектральных линий изменяются во времени. Характерной особенностью является резкое падение амплитуды спектральных линий в период со 100 до 150 с, сопровождающееся одновременным изменением периода. На скелетеоне скалограммы исследуемого временного ряда (рис.5) можно довольно четко выделить полезную часть сигнала и его шумовую составляющую. Полезная часть сигнала выражена в виде линий вытянутых вдоль оси сдвигов *b* и расположена в интервале периодов от 10 до 40 с (0,025-0,1 Гц) на протяжении всего времен-

ного ряда и в интервале периодов 100-160 с (0,00625-0,01 Гц) во временном отрезке 250-430 с. Шумовая составляющая исследуемого временного ряда ориентирована вдоль оси масштабов *a* и локализована в интервале периодов 130-240 с (0,00416-0,0076 Гц) во временном отрезке от 0 до 350 с. Зная о времени локализации полезной части сигнала, можно избавиться от шумовой составляющей с применением различных процедур фильтрации данных.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов: Учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ, 2001. 61 с.
2. Витязев В.В. Вейвлет-анализ солнечной активности за 300 лет // НИАИ им. В.В.Соболева. СПб: Изд-во СПбГУ. 9 с.
3. Ингеров О. Применение электроразведочных методов при поисках залежей углеводородов // Зап. Горного института. 2005. Т.162. С.15-26.
4. Поликар Роби. Введение в вейвлет преобразование. СПб: АВТЭКС, <http://www.autex.spb.ru>
5. Электроразведка: Справочник геофизика / Под ред. В.К.Хмелевского, В.М.Бондаренко. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1989. Кн.1. 438 с.