

*К. С. Непейна<sup>1</sup>✉, Е. А. Баталева<sup>1</sup>*

## **Первичные оценки сингулярных спектров компонент магнитотеллурического зондирования 1D вейвлет-лидером**

<sup>1</sup>Научная станция РАН, г. Бишкек, Республика Кыргызстан  
e-mail: nepeina.k@mail.ru

**Аннотация.** В работе тестируются результаты мультифрактального анализа (МФА) на данных магнитотеллурического зондирования (МТЗ) на примере записей до и после Камбаратинского взрыва 2009 г. (Кыргызстан). Тест для получения первых оценок проводился в среде Matlab с применением Кайзеровского окна и вейвлет-преобразования (метод 1D вейвлет-лидеров) для вычисления МФА спектра.

**Ключевые слова:** мультифрактальный анализ, спектр, электромагнитные сигналы, напряженно-деформированное состояние среды, вейвлет-лидер

*K. S. Nepeina<sup>1</sup>✉, E. A. Bataleva<sup>1</sup>*

## **Preliminary estimation of singular spectra for components of magnetotelluric soundings with 1D wavelet-leader**

<sup>1</sup>Research Station RAS, Bishkek, Kyrgyzstan  
e-mail: nepeina.k@mail.ru

**Abstract.** In the paper the results of multifractal analysis (MFA) applied to the magnetotelluric soundings (MTS) on the example before and after Kambarata carrier blast 2009 (Kyrgyzstan) are tested. Test is performed in Matlab with Kaiser window and wavelet transform (method 1D wavelet-leader) for multifractal spectrum calculation.

**Keywords:** multifractal analysis, spectrum, electromagnetic signals, stress-strain state of media, wavelet-leader

### ***Введение***

Многие исследователи сходятся во мнении, что использование Фурье-анализа для сложных нестационарных сигналов слишком упрощает обработку и в итоге не предоставляет достаточно полной информации о сигналах [1-4]. Также, как верно замечено Верзуновым и Лыченко, «для магнитовариационного сигнала непрерывное Вейвлет-преобразование более удобно; его некоторая избыточность, связанная с непрерывным изменением масштабного коэффициента и параметра сдвига, является при этом положительным качеством, так как позволяет более полно и чётко представить и проанализировать содержащуюся в данных информацию» [1]. Использование вейвлетов для частотно-временного анализа временных рядов МТЗ уже применялось как в Научной станции РАН, так и сторонними организациями [2, 3]. Тем самым удобно применять для таких сигналов мультифрактальный анализ (МФА), базирующийся на непрерывном Вейвлет-

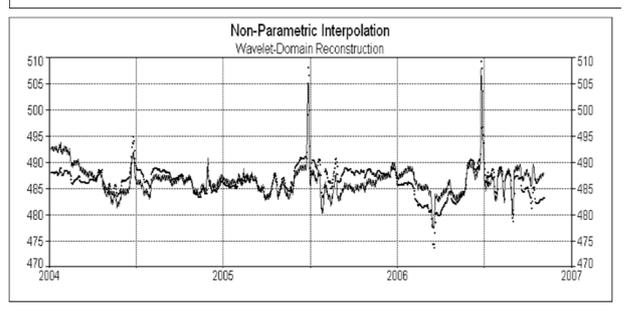
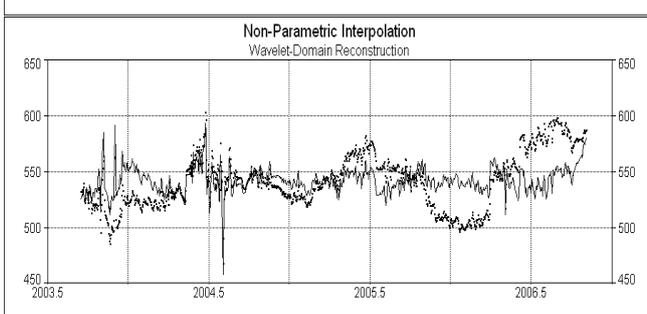
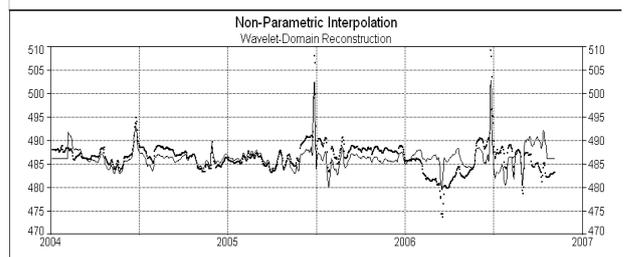
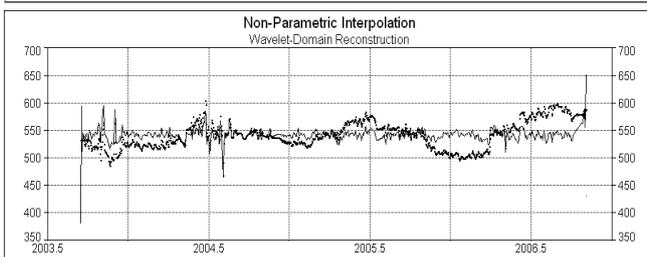
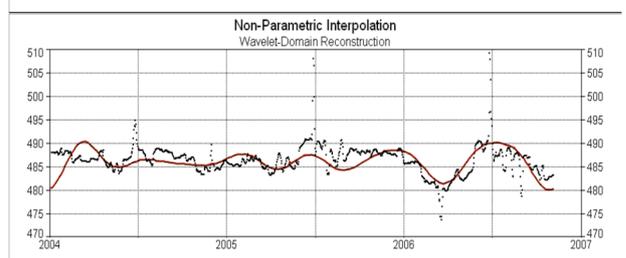
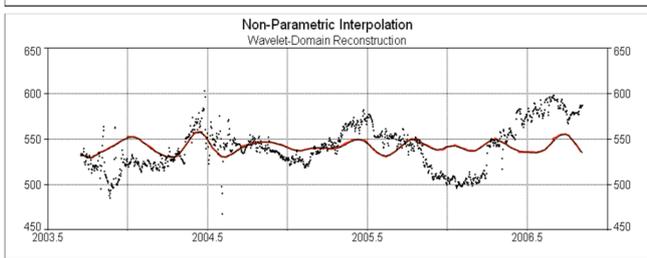
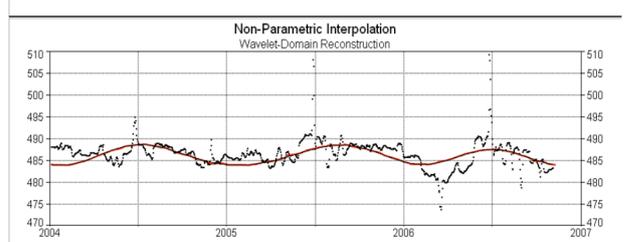
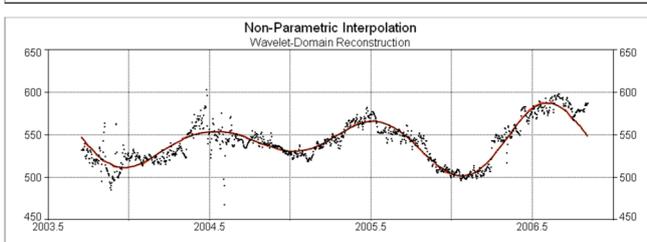
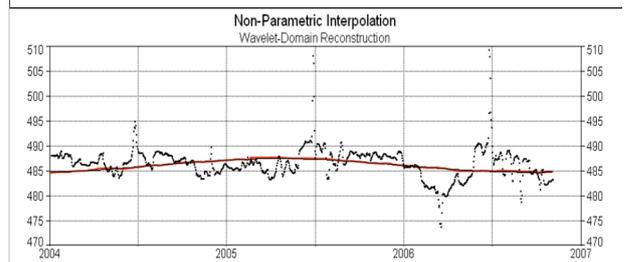
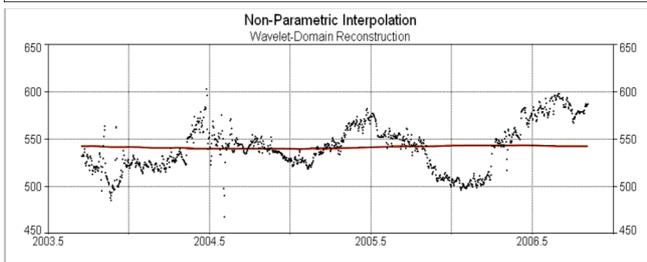
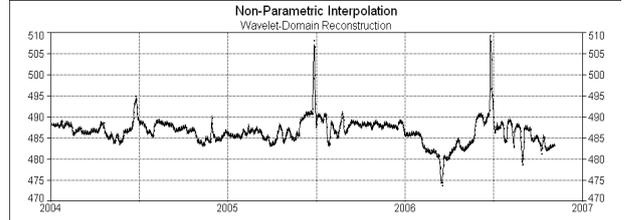
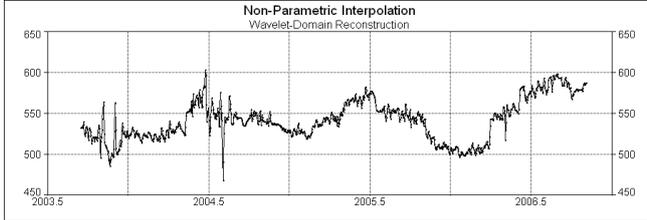
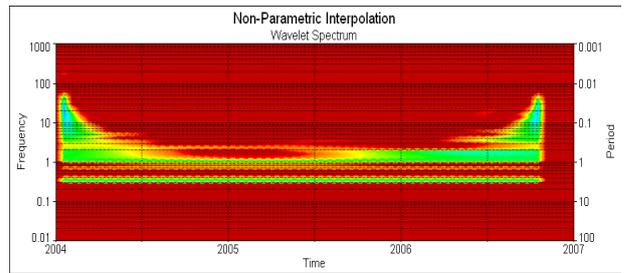
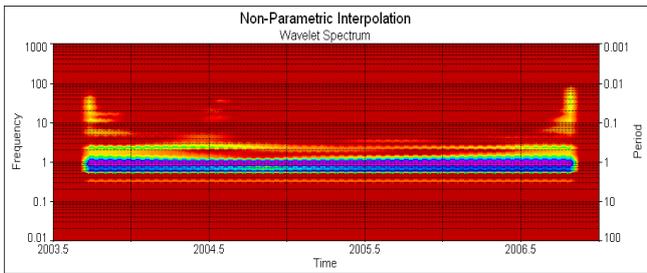
преобразовании. В противоположность Фурье-анализа, Вейвлет-анализ основан на использовании локализованных во времени ядер преобразования, размеры которых согласованы с масштабом изучаемых компонентов ряда. При этом, в отличие от Фурье-анализа, вейвлеты показывают картину эволюции спектра мощности (скалограммы) во времени. 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. Нет сомнений, что изучаемые нами процессы обладают такими свойствами, в связи с чем, Вейвлет-анализ был применен для обработки данных электромагнитного мониторинга.

Основы Вейвлет-анализа были разработаны в середине 1980-х годов как альтернатива преобразованию Фурье для исследования временных (пространственных) рядов с выраженной неоднородностью [4]. Вейвлет-преобразование, обладающее самонастраивающимся подвижным частотно-временным окном, одинаково хорошо выявляет как низкочастотные, так и высокочастотные характеристики сигнала на разных временных масштабах. По этой причине Вейвлет-анализ часто сравнивают с «математическим микроскопом», вскрывающим внутреннюю структуру существенно неоднородных объектов.

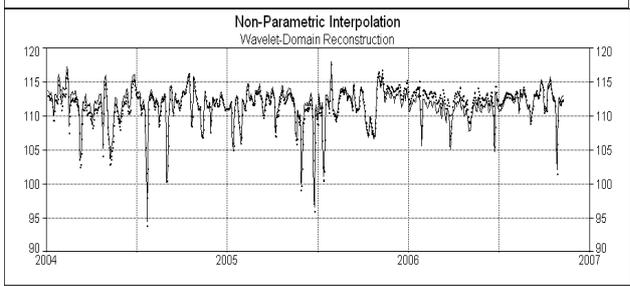
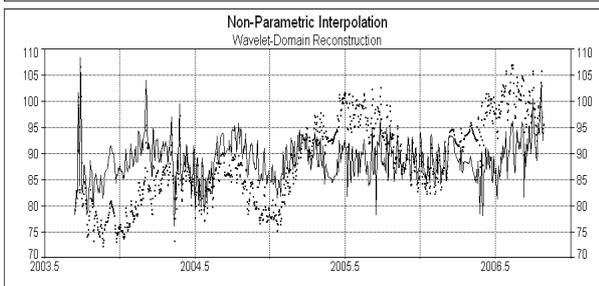
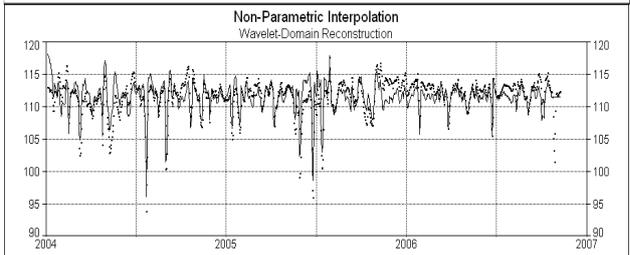
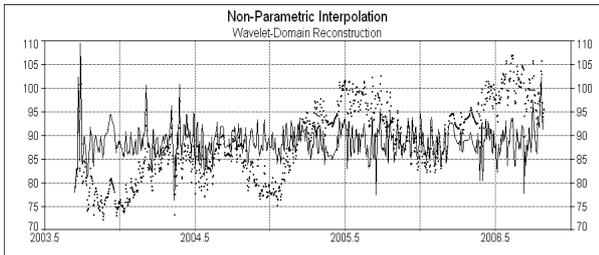
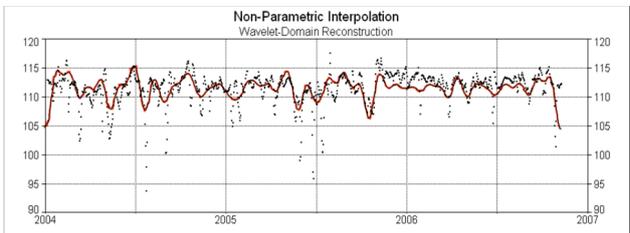
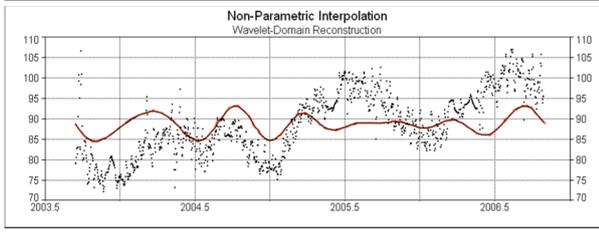
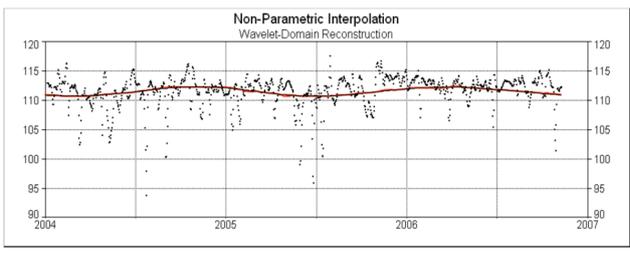
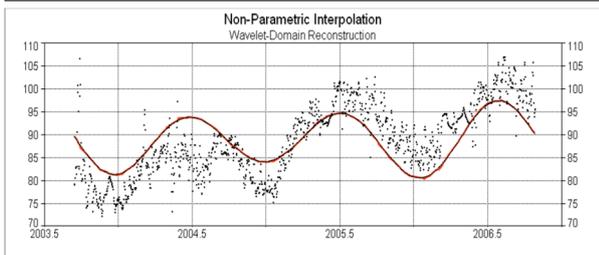
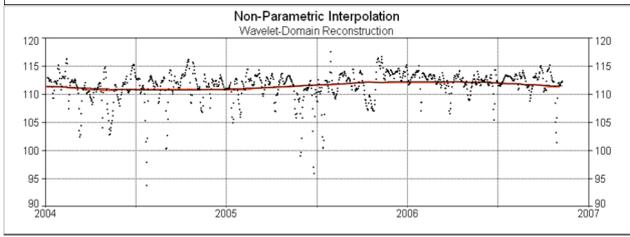
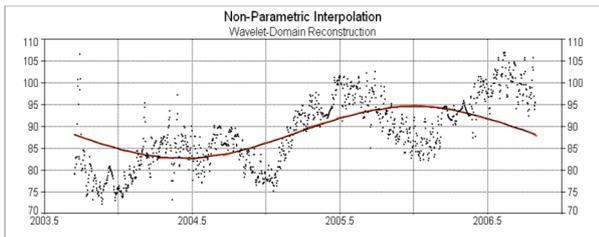
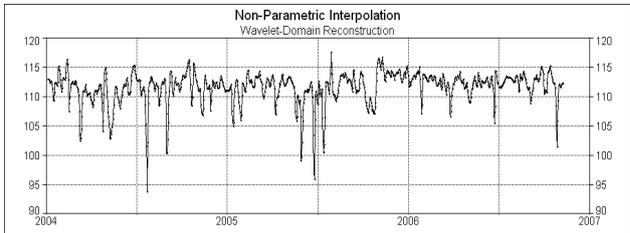
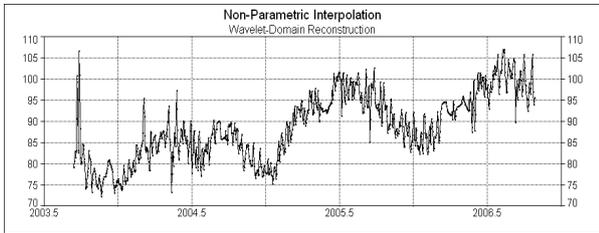
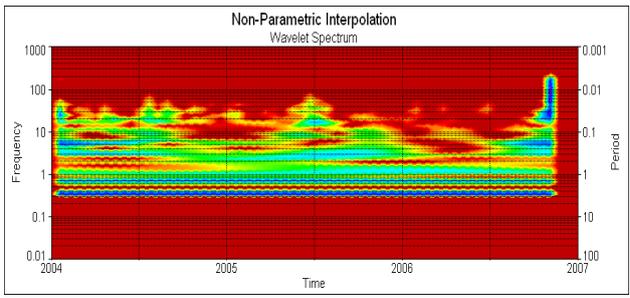
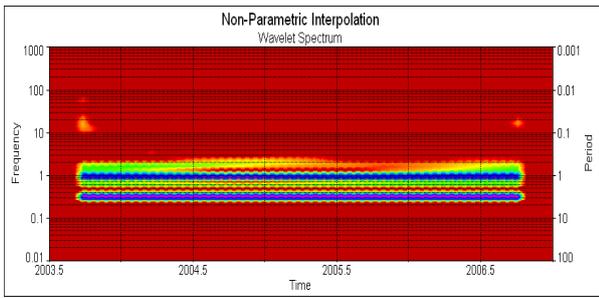
Практика показала, что мультифрактальный анализ (МФА), базирующийся на непрерывном Вейвлет-преобразовании, представляет собой удобный инструмент для анализа частотно-временных рядов мониторинговых данных. Использование мультифракталов больше подходит для природоподобных систем и сигналов, чем монофракталы, представляющие собой идеализированную модель [4-6]. Всё больше появляется работ по использованию МФА на данных (аудио-) магнитотеллурического зондирования (АМТЗ, МТЗ) [3, 7-10].

### *Методы и материалы*

В качестве примера анализа временных рядов электромагнитного мониторинга с использованием вейвлета Морле рассмотрим результаты, полученные Рыбиным А.К. и Брагиным В.Д., в рамках выполнения программы 6 ОНЗ РАН [11]. В верхней части каждой панели рис. 1 представлены скалограммы соответствующих рядов среднесуточных значений кажущегося сопротивления ( $\rho_k$ ), полученные вейвлет разложением. Скалограмма описывает распределение энергии гармонических компонент исследуемого процесса во времени. Темные синие тона скалограммы отражают наиболее интенсивные компоненты спектра. Ниже показаны гармонические составляющие исследуемых рядов  $\rho_k$ , реконструированные с помощью Вейвлет-преобразования и показанные на фоне вариаций исходного ряда.



а) Чун-Курчак (север-юг)



б) Аксу (север-юг)

Рис. 1. Пример результатов Вейвлет-анализа для временных рядов кажущегося сопротивления, представленные тремя панелями в следующем порядке:  
 а) Чун-Курчак (запад-восток)  $T = 0.5$  с,  $t = 3.14$  с; (север-юг)  $T = 0.5$  с,  $t = 3.14$  с;  
 б) Аксу (север-юг)  $T = 5$  с,  $t = 1.38$  с. Каждая панель содержит: слева – результаты МТЗ, справа – результаты ЗС. Сверху-вниз показаны: скалограммы Морле; интерполированный исходный ряд наблюдений; фильтрованные вариации с периодом  $T > 3$  года; фильтрованные вариации с периодом  $1 \text{ год} < T < 3$  года; фильтрованные вариации с периодом 2 месяца  $< T < 1$  год; фильтрованные вариации с периодом  $T < 2$  месяца

При сопоставлении результаты фильтрации рядов кажущегося сопротивления, полученных по методам МТЗ и зондирование становления поля (ЗС) для пунктов мониторинга Аксу и Чун-Курчак. Для обоих пунктов очень выразительно выявились вариации кажущегося сопротивления с периодом около года как МТЗ сопротивлений, так и для ЗС, хотя амплитуды их гармоник несколько отличаются. При этом наблюдается некоторое опережение годовой цикличности в данных МТЗ (в нижней части коры) по отношению к данным ЗС, составляющее по величине приблизительно 2-3 месяца.

Представленные результаты сравнительного анализа материалов непрерывных МТЗ и ЗС наблюдений подтверждают информативность использования электромагнитных полей естественного происхождения для наблюдения за развитием геодинамических процессов в нижней части коры (глубины более 20 км) и полей искусственного происхождения для наблюдения за развитием геодинамических процессов в верхней части коры (глубины менее 25 км).

Для проверки возможностей МФА на данных МТЗ с известным событием были выбраны записи до и после Камбаратинского взрыва (22 декабря 2009 г. мощностью 2.8 Кт в тротиловом эквиваленте), Токтогульский район Джалал-Абадской области Кыргызстана. Запись проводилась 5-канальной аппаратурой Phoenix MTU-5/5A (Торонто, Канада) [12] с частотой измерений 15 Гц. Соответственно, имеются три индукционных датчика МТС-50, записывающих магнитные компоненты ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ), и два электрических канала ( $E_x$ ,  $E_y$ ). Комплекс наблюдений включал в себя сейсмологические, электромагнитные и GPS-наблюдения [13-15]. Стандартная обработка происходит в пакете MT-Corrector [16] на основе теории преобразования электромагнитных компонент [17].

Для начала обработки исходные данные были преобразованы в текстовый формат \*.csv. Затем, были вычтены средние значения и нормированы, из-за крайне низких значений, что характеризует высокую чувствительность регистрирующей аппаратуры. Затем были получены преобразованные значения в виде временных рядов в диапазоне [-1, 1] по каждому из 5 каналов. После чего, подобно работам [7-10], в среде *Matlab* были рассчитаны спектральные плотности мощности (*power spectral density* - PSD) или иначе периодограммы с помощью функции *pwelch* в окне Кайзера. Это одно из распространенных окон для синтеза цифровых КИХ-фильтров и является приближением к вытянутому сфероидальному окну. Параметры длины окна  $n = 10^3$ , относительное затухание бокового лепестка  $\beta = 10$ .

Для получения МФА спектра была применена функция 1D вейвлет-лидера *dwtleader*, позволяющая оценить фрактальные параметры  $dh$ ,  $h$ ,  $cp$ ,  $tauq$ . Вейвлет-

лидеры относятся к МФА бестрендовых колебаний (флуктуаций) *MF DFA* – *Multifractal Detrended Fluctuation Analysis*. Вейвлет-лидеры вида  $d_{jk} = \sup \{ |c_{lh}| : I_{lh} \in 3I_{jk} \}$  – это способ оценки мультифрактальных спектров сингулярностей [18]. «Вейвлет-лидер  $L(j, k)$  представляет собой наибольший коэффициент дискретного Вейвлет-преобразования  $d(j', k')$ , вычисленный в узком временном интервале  $(k-1) \cdot 2^j \leq k' \cdot 2^{j'} \leq (k+1) \cdot 2^j$  на всех масштабах, меньших заданного  $w^{j'} \leq 2^j$ . Вейвлет-лидеры отражают локальные коэффициенты Гельдера, которые можно рассчитать стандартным для МФА способом: построить обобщенную функцию распределения вида  $Z(j, q) \propto \sum_k L(j, k)^q \propto 2^{j \cdot \tau(q)}$ , найти из нее скейлинговые экспоненты  $\tau(q)$ , из которых рассчитать спектр сингулярностей  $D(h)$  при помощи преобразования Лежандра» [19].

Параметр  $dh$  считает спектр сингулярности в виде вектор-матрицы размерности  $1 \times 11$ . Спектр сингулярности оценивает использование функций структуры, определенных в течение линейно распределенных моментов от  $-5$  до  $5$ . Функции структуры вычисляются на основе вейвлет-лидеров, полученных с помощью биоортогонального сплайна в виде вейвлет фильтра.

Показатель Гельдера  $h$  представляет собой скалярный вектор размерности  $1 \times 11$ . Показатели Гельдера характеризуют регулярность сигнала. Чем ближе этот показатель к  $1$ , тем ближе функция к дифференцируемой. И наоборот, чем ближе показатель  $h$  к нулю, тем ближе функция к разрывной.

Показатели степени (ПС) (*cp* – cumulants), относятся к линейно разнесенным моментам от  $-5$  до  $+5$ . ПС скалярный вектор размерности  $1 \times 3$ . Вектор содержит первые три логарифмических степени показателей масштабирования. Первый ПС характеризует линейное поведение масштабных показателей. Вторым и третьим ПС характеризуют отклонение от линейности. Первое значение ПС и почти нулевые значения второго и третьего ПС указывают на то, что локальные компоненты масштабирования (ЛКМ) являются линейной функцией моментов. В этом случае ненулевой второй ПС доказывает, что процесс является мультифрактальным. Вектор-столбцы размерности  $1 \times 11$   $\tau_{iq} = \tau(q)$  называют скейлинговыми экспонентами.

### Результаты

Результаты расчета МФА спектра в среде *Matlab* представлены на рис. 2, где  $D(h)$  спектр сингулярности.

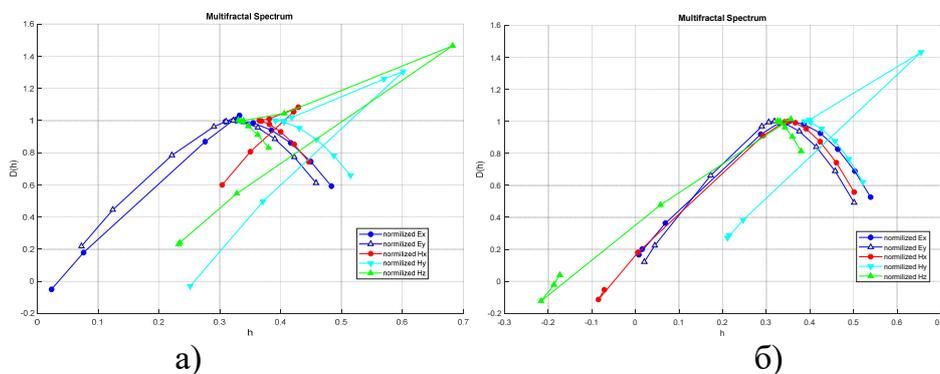


Рис. 2. Результат МФА спектра сингулярности записи Камбаратинского взрыва: а) до взрыва; б) самого взрыва и после него

## *Заключение*

Изучены возможности 1D вейвлет-лидеров для оценки мультифрактальности пяти компонент магнитотеллурического зондирования. Обнаружено, что обе компоненты электрического поля, а также горизонтальная компонента  $H_x$  – представляют собой классический вид мультифрактального процесса. Однако поведение показателя Гёльдера  $h$  компонент  $H_y$  и  $H_z$  имеют вершины, образованные ломаными линиями, образующими угловатую петлю, что для записи до взрыва, что после. Вероятно, некоторые точки не стоит брать в рассмотрение, т.к. они не обладают свойством мультифрактальности. Стоит отметить, что значение показателя  $h$  стало меньше после взрыва – от  $-0.2$  до  $\sim 0.5$ , в то время как до взрыва этот диапазон был от  $0$  до  $0.7$ . Вероятнее всего, этот параметр связан с напряженно-деформированным состоянием среды. Как только произошла разгрузка напряжений – показатель Гёльдера  $h$  снизился для всех компонент кроме  $H_y$ . Это инверсивное поведение  $h(H_y)$  требует отдельного рассмотрения.

## *Благодарности*

Исследование выполняется по теме государственного задания НС РАН Минобрнауки России 1021052806445-4-1.5.1.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Верзунов С.Н., Лыченко Н.М. Разработка автоматизированной системы для анализа геомагнитных вариаций на основе вейвлет-технологий // Математические структуры и моделирование. – 2014. – №4 (32). – С. 185-197.
2. Печенкин М.М. Частотно-временной анализ временных рядов магнитотеллурического зондирования // Записки Горного института. – 2008. – Т. 176. – С. 163-167.
3. Nigmatullin R.R., Bataleva E.A., Nepeina K.S., Matiukov V.E. Quality control of the initial magnetotelluric data: analysis of calibration curves using a fitting function represented by the ratio of 4th-order polynomials // Measurement. – 2023. – Vol. 216. – P. 112914.
4. Grossman A., Morlet J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape // SIAM journal on mathematical analysis. – 1984. – Vol. 15. – № 4. – P. 723-736.
5. Рыбин А.К., Нигматуллин Р.Р., Непеина К.С., Казначеев П.А., Александров П.Н. Аналитическое описание сейсмических сигналов методом фрактального неортогонального амплитудно-частотного анализа // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2019. – № 1 (41). – С. 15-24.
6. Павлов А.Н., Анищенко В.С. Мультифрактальный анализ сложных сигналов // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177. – № 8. – С. 859-876.
7. Долгополов Б.К., Сычев В.Н., Имашев С.А. Динамика мультифрактальных показателей сейсмосигнала во время мощных электромагнитных воздействий на среду, порождающую сигнал // Наука и инновационные технологии. – 2017. – № 1 (3). – С. 149-154.
8. Li J., Zhang X., Tang J., Cai J., Liu X. Audio magnetotelluric signal-noise identification and separation based on multifractal spectrum and matching pursuit // Fractals. – 2019. – Vol. 27. – № 1. – P. 1940007.
9. Лаврухин А.А., Лобов К.В., Туканова А.С., Онуфриев А.С. Поиск оптимального способа получения оценок для автоматизированной системы обработки сигналов магнитотеллурического зондирования // Динамика систем, механизмов и машин. – 2020. – Т. 8. – № 2. – С. 56-62.

10. Вагин С.А. Алгоритм обработки данных магнитотеллурических зондирований в среде МАТЛАБ // Вопросы геофизики. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2009. – № 42. – С. 100–114.
11. Отчет о выполнении работ по Программе 6 ОНЗ РАН «Глубинное строение Земли, геодинамика, магматизм, взаимодействие геосфер». Направление 6. «Современная и новейшая геодинамика и движение земной коры по комплексу геолого – геофизических методов». Тема: «Изучение пространственно-временного распределения деформаций в земной коре на территории Бишкекского полигона электромагнитными методами». ИС РАН. – 2007. – 58 с.
12. Fox L. Satellite-Synchronized 3-D Magnetotelluric System / U.S. Patent. – 2001. – № 6 191 587 B1. – 20.02.2001.
13. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Анализ результатов Камбаратинского эксперимента с привлечением методики синхронных измерений // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2017. – Т. 17. – № 1. – С. 181-184.
14. Брагин В.Д. Электромагнитные исследования эффектов, обусловленных мощным промышленным взрывом в районе Нарынского каскада гидроэлектростанций (Камбарата) // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2011. – Т. 11. – № 4. – С. 46-53.
15. Баталева Е.А., Рыбин А.К., Баталев В.Ю. Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженно-деформированного состояния среды // Геофизические исследования. – 2014. – Т. 15. – № 4. – С. 54-63.
16. Колосов Н.А. Программа просмотра, редактирования и построения гладких сплайн-аппроксимаций частотных зависимостей компонент тензора импеданса ("MT-Corrector") / Свидетельство на программу для ЭВМ. – RU № 2005612195. – 2005.
17. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир, 2009. – 680 с.
18. Serrano E., Figliola A. Wavelet Leaders: A new method to estimate the multifractal singularity spectra // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2009. – Vol. 388. – P. 2793-2805.
19. Гиляров В.Л. Выявление динамических закономерностей эпилептических приступов у детей методами нелинейной механики // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90. – Вып. 3. – С. 508-514.

© К. С. Непеина, Е. А. Баталева, 2025