

УДК 550.344:519.246.8

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ.
ЧАСТЬ 2. ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕЙСМОСИГНАЛА**

С.А. Имашев, В.Н. Сычев

Показано, что изменения фрактальных свойств сейсмосигнала позволяют определить момент прихода сейсмической волны. При наступлении сейсмического события меняются как значения, так и диапазон флуктуаций параметра Херста высокочастотного сейсмического шума.

Ключевые слова: фрактальный анализ; вейвлет-анализ; фрактальная размерность; параметр Херста; сейсмический сигнал.

**FEASIBILITY ASSESSMENT OF APPLICATION OF FRACTAL ANALYSIS METHODS
FOR GEOPHYSICAL DATA.
PART 2: FRACTAL ANALYSIS OF SEISMIC SIGNAL**

S.A. Imashev, V.N. Sychev

It is shown that changes of fractal analysis of a seismic signal allow to define the moment of seismic wave arrival. At approach of the seismic event, both values, and range of fluctuations of Hurst parameter of high-frequency seismic noise change.

Keywords: fractal analysis; wavelet analysis; fractal dimension; Hurst's parameter; seismic signal.

В первой части статьи был проведен обзор различных методов оценки параметра Херста. В данной части рассмотрим в качестве примера сейсмический сигнал и попробуем выделить приход Р-волны исходя из геометрического смысла параметра Херста. На рисунке 1 представлена запись землетрясения 31.08.2015 с $K = 9,6$ на станции СНМ сети KNET по ННЗ компоненте с частотой 100 Нз (горизонтальная ось – номер отсчета, вертикальная – скорость в нм/с). Участок А характеризуется относительно гладким видом по сравнению с участком непосредственного события (участок В), который отличается от первого осцилляциями. Если пройти скользящим окном и рассчитать в этом окне параметр Херста, то первый участок (А) будет характеризоваться большими его значениями, тогда как второй участок (В), более изрезанный, будет иметь диапазон H с меньшими значениями.

С точки зрения фрактальной размерности [1] участок А будет иметь фрактальную размерность, близкую к топологической ~ 1 , а участок В – близкую к 2. Для расчета фрактальной размерности D воспользуемся известным выражением:

$$D = 2 - H,$$

где H – есть параметр Херста, рассчитанный по одному из рассмотренных выше методов. На рисунке 2 показан ход фрактальной размерности сейсмосигнала (рисунок 1), рассчитанный в окне шириной 128 отсчетов с помощью метода нормированного размаха.

Как и предполагалось, участок А имеет более низкие значения фрактальной размерности, по сравнению с участком В, что является следствием присутствия низкоамплитудного шума, который делает его более изрезанным. Для придания участку А более “гладкого” вида необходимо отфильтровать шумовую компоненту. Для этой цели хорошо подходит пороговая нелинейная фильтрация с помощью дискретного вейвлет-преобразования [2]. Для этого делается предположение, что шум в основном сосредоточен в вариациях на первом, самом высокочастотном уровне детализации, за исключением небольшого числа точек, в котором сконцентрированы высокочастотные особенности поведения полезного сигнала и которым, следовательно, соответствуют большие значения вейвлет-коэффициентов 1-го уровня [3, 4].

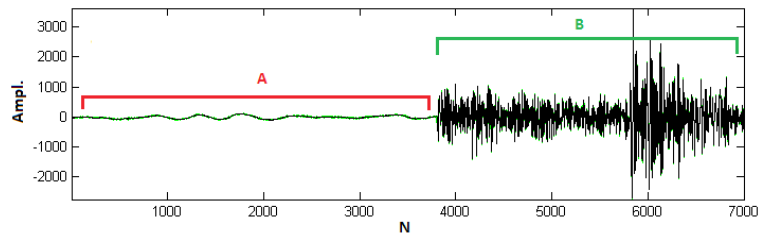
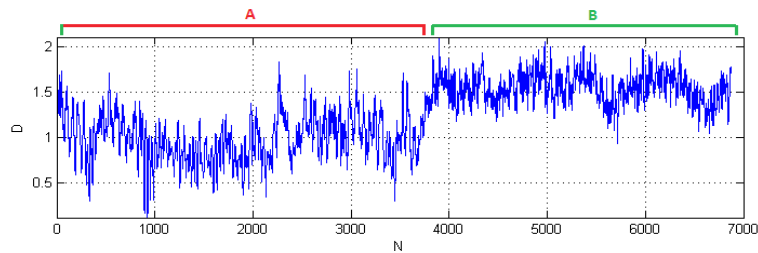
Рисунок 1 – Запись землетрясения 31.08.2015 с $K = 9,6$ на станции СНМ сети KNET по NNZ компоненте

Рисунок 2 – Оценка фрактальной размерности исходного сейсмического сигнала в скользящем окне методом нормированного размаха

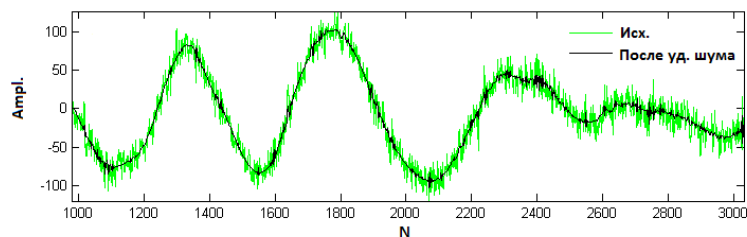


Рисунок 3 – Участок исходного сейсмического сигнала и результат применения пороговой нелинейной фильтрации высокочастотного шума на основе дискретного вейвлет-преобразования

Параметры фильтрации: вейвлет – Добеши 6-порядка, количество уровней детализации – 6, алгоритм выбора порога фильтрации – универсальный (sqrtwolog) на основе одиночной оценки шума по коэффициентам первого уровня декомпозиции. На рисунке 3 показана часть участка А ($N = 1000-3000$) исходного сейсмического сигнала и результат применения фильтрации высокочастотного шума.

Нужно отметить, что в данном случае достаточно оказалось применение так называемой “мягкой” фильтрации (soft thresholding), когда значения порога вычитались из коэффициентов, значения которых больше чем сам порог [2]. Очевидно, что после того как участок А стал более гладким, значения фрактальной размерности будут более компактно группироваться вокруг значения 1, т. е. будет приближаться к значению своей топологической размерности. На рисунке 4 представлена оценка фрактальной размерности исследуемого сейсмосигнала после применения фильтрации высокочастотного шума.

Отметим, что в обоих случаях время прихода Р-волны выделяется довольно отчетливо. Однако этот метод, как и другие методы, основанные на вариации дисперсии, эксцесса и т. д., работают хорошо, когда полезный сигнал выделяется довольно хорошо на фоне сейсмического шума [5].

Временные ряды систем геофизического мониторинга, если из них вычленишь детерминированные циклические тренды сезонного характера и воздействие приливов, проявляют основные черты самоподобного поведения на различных временных масштабах [4], а именно, прямолинейный график спектра мощности в двойном логарифмическом масштабе, эффекты длительной памяти о прошлых состояниях и т. д. Положительное качество фрактального анализа – его способность исследовать сигналы, которые с точки зрения ковариационной и спектральной теории не содержат никакой информации и являются “шумом” либо “белым”, либо “цветным”.

Известно, что шумовой сигнал, подчиняющийся степенному закону $1/f^b$, является самофинным

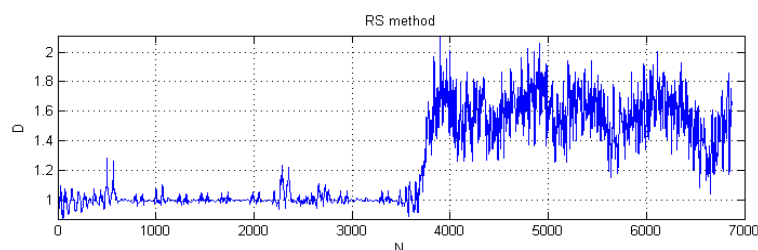


Рисунок 4 – Оценка фрактальной размерности отфильтрованного сейсмического сигнала в скользящем окне методом нормированного размаха

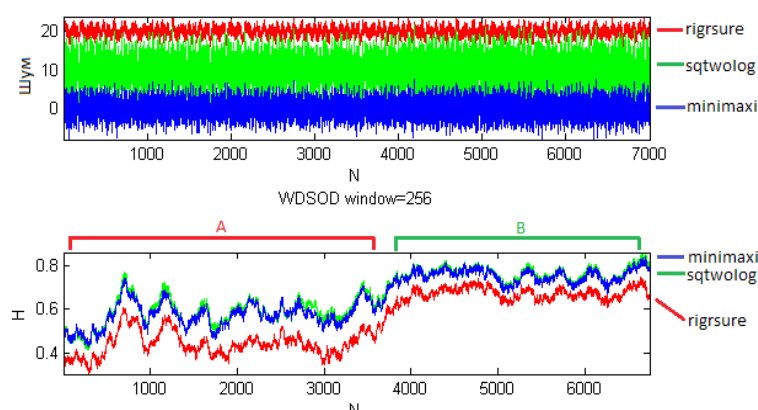


Рисунок 5 – Высокочастотный шум, полученный с помощью различных порогов нелинейной фильтрации и результат оценки параметра Херста этих шумовых сигналов методом WDSOD с шириной окна 256 отсчетов

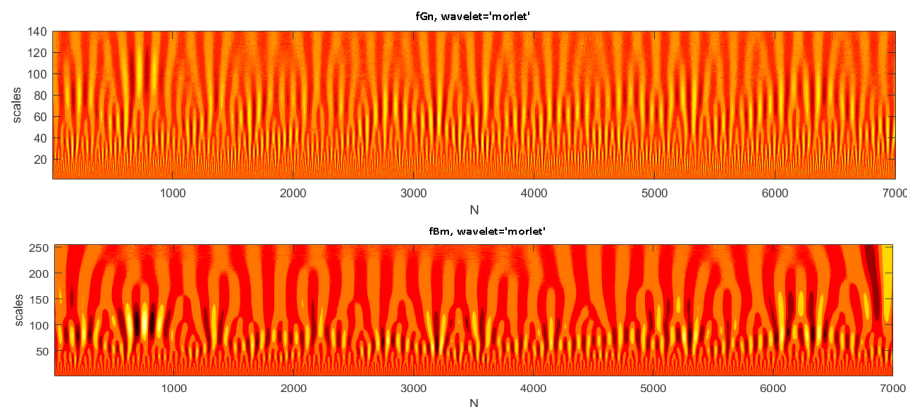


Рисунок 6 – Вейвлет-спектрограмма сейсмического шума в исходной форме (fGn) и в форме фрактального броуновского движения (fBm)

фракталом [1]. Такой сигнал (шум) можно описать с помощью фрактальной размерности или параметра Херста. Микросейсмический шум может нести в себе информацию об изменениях фрактальных свойств, происходящих в результате усиления сейсмической активности [6].

На рисунке 5 шумовые компоненты выделены с помощью пороговой фильтрации на основе оценок порога методами 'rigrsure', 'sqtwolog'

и 'minimax' и соответствующих им оценок параметра Херста методом WDSOD со скользящим окном 256 точек.

Из этих оценок следует несколько важных выводов. Во-первых, фоновая шумовая компонента (участок A) в целом дает меньшие значения параметра Херста по сравнению со значениями на участке прихода сейсмических волн. Увеличение значений параметра Херста (рост персистентности)

на участке прихода сейсмической волны может быть результатом роста степени согласованности различных компонент сигнала. Во-вторых, необходимо отметить, что наряду с увеличением значений параметра Херста, одновременно происходит их более компактная группировка относительно некоторой средней величины, т. е. наблюдается переход с мультифрактального режима со значительными флуктуациями параметра Херста к монофрактальному режиму.

На рисунке 6 приведены спектрограммы непрерывного вейвлет-преобразования высокочастотного сейсмического шума в исходном виде (верхний рисунок) и после преобразования в вид фрактального броуновского движения (нижний рисунок) с помощью вейвлета Морле.

Из рисунка 6 видно отсутствие какого-либо перехода в окрестности 3800-го отсчета и в целом участок на спектрограмме, соответствующий участку А (0-3800), не отличается от участка В (4000–7000). Как отмечалось ранее, представление шумового сигнала в виде фрактального броуновского шума дает более наглядное представление, что видно на нижней картине рисунка 6. Вейвлет-спектрограмма хорошо демонстрирует иерархическую структуру флуктуаций сигнала. Каждое дробление масштаба отмечено появлением в распределении коэффициентов характерных “вилочек” – раздвоением локальных максимумов, что отражает наличие степени самоподобия в сигнале [7].

Для участка А стандартное отклонение для всех типов выбора порога фильтрации равно ~ 0.06 , тогда как для участка В оно в два раза меньше (~ 0.03). Отмеченная особенность позволяет выделить участок с присутствием сейсмических волн на сигналах, где нет существенного увеличения параметра Херста по сравнению с участком фонового шума.

На рисунке 7 приведены расчетные кривые для методов RS, AWC-CWT и DFA, где угол наклона аппроксимационной линии и есть параметр Херста H . На графиках видно, что данный ряд не может характеризоваться одним значением угла наклона, и на разных масштабах присутствует различная степень самоподобия.

Отмеченные особенности требуют более детального исследования на основе мультифрактального анализа с рассмотрением таких характеристик как: верхняя и нижняя граница спектра сингулярности, обобщенный показатель Херста и ширина спектра сингулярности [4, 8].

На рисунке 8 приведена запись землетрясения 31.08.2015 с $K = 9,6$ на станциях сети KNET по NHZ компоненте: а – ААК; б – АМЛ; в – UCH; г – EKS2 и соответствующие оценки параметра Херста

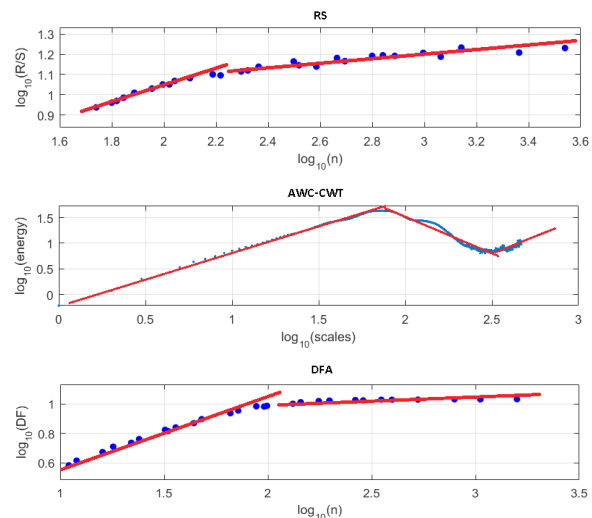


Рисунок 7 – К оценке параметра Херста сейсмического шума методами нормированного размаха (RS), средних вейвлет-коэффициентов (AWC-CWT) и методом анализа флуктуаций после исключения масштабно-зависимых трендов (DFA)

ста сейсмического шума методом WDSOD. В качестве метода выбора порога фильтрации взят расчет порога $sqrtwolog$.

Поведение оценок параметра Херста высокочастотных шумов сейсмограмм на этих кривых показало уменьшение флуктуаций при наличии сейсмических волн (значение среднеквадратичного отклонения уменьшается почти вдвое) и рост самих значений относительно фонового участка.

Выводы. Проверка геометрической трактовки параметра Херста на примере задачи определения прихода первичной волны (P-wave) на сейсмограмме методом нормированного размаха (Rescaled Range Analysis) (RS) показала, что участок, показывающий присутствие сейсмических волн (участок В) отражается ростом фрактальной размерности (D) по отношению к участку фонового сейсмического шума (участок А). Исключение высокочастотного шума из сейсмограммы методами нелинейной пороговой фильтрации с помощью дискретного вейвлет-преобразования делает более четким переход от гладкого и более регулярного участка А, характеризуемого фрактальной размерностью $D \approx 1$, к участку В, характеризуемого более высокими значениями фрактальной размерности со значительными вариациями $D \approx 1.1-1.2$.

Спектрограммы непрерывного вейвлет-преобразования сейсмического шума, преобразованного в вид фрактального броуновского движения, показали наличие фрактальной структуры, но не смогли выделить на временной шкале участки А и В.

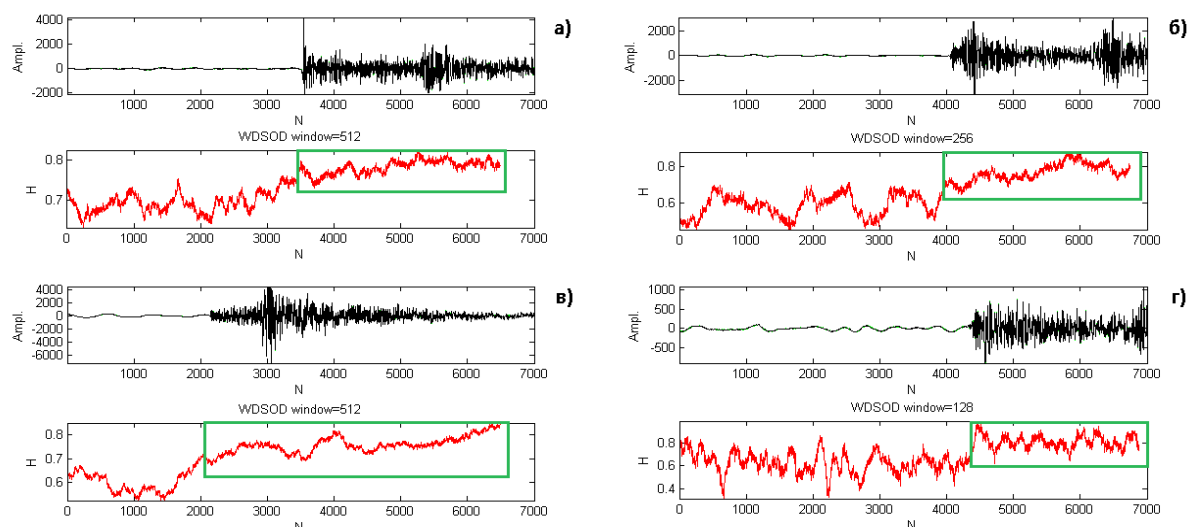


Рисунок 8 – Запись землетрясения 31.08.2015 с $K = 9,6$ на станциях сети KNET по HHZ компоненте: а – AAK; б – AML; в – UCH; г – EKS2 и оценка параметра Херста высокочастотного шума методом WDSOD с различной шириной окна

Оценка параметра Херста в скользящем окне с использованием метода WDSOD показала наличие перехода от фонового участка к участку сейсмических волн ростом значений параметра Херста и уменьшением его флуктуаций на этом участке. Сокращение почти вдвое среднеквадратичного отклонения вариаций параметра Херста может свидетельствовать о переходе от мультифрактального к более согласованному, монофрактальному режиму. Наличие мультифрактальности также показывают участки с различными углами наклона на расчетных кривых методов RS, DFA и AWC-CWT. Таким образом, выявлено, что выделенный высокочастотный сейсмический шум несет в себе скрытую информацию о структурировании шумов на участках прихода сейсмических волн. Полученная информация требует дальнейшего исследования этих сигналов на основе мультифрактального подхода, а именно – анализа обобщенного показателя Херста и ширины спектра сингулярности.

Авторы выражают благодарность заведующей лабораторией комплексных исследований ИС РАН В.Д. Брагину за предоставление цифровых записей и каталога сейсмических событий.

Исследование осуществлено в рамках выполнения государственного задания ИС РАН, тема № 78, а также частично поддержано грантом РФФИ 15-05-06857а.

Литература

1. Feder J. *Fractals* / J. Feder // Springer, 1988. 284 p.
2. Mallat S.G. *A wavelet tour of signal processing: the sparse way* / S.G. Mallat // Academic Press. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2009. 805 p.
3. Donoho D.L. *Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage* / D.L. Donoho, J.M. Johnstone // *Biometrika*. 1994. Vol. 81. N 3. P. 425–455.
4. Любушин А.А. *Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга* / А.А. Любушин. М.: Наука, 2007. 227 с.
5. Padhy S. *Rescaled range fractal analysis of a seismogram for identification of signals from an earthquake* / S. Padhy // *Current science*. 2004. Vol. 87. N 5. P. 637–641.
6. Cao M.-S. *A method of detecting seismic singularities using combined wavelet with fractal* / M.-S. Cao, Q.-W. Ren, H.-H. Wang, T. Gong // *Chinese J. Geophys.* 2005. Vol. 48. N 3. P. 740–749.
7. Abry P. *Self-similarity and long-range dependence through the wavelet lens* / P. Abry, P. Flandrin, M.S. Taqqu, D. Veitch // *Theory and applications of long-range dependence*. 2003. P. 527–556.
8. Sheng H., Chen Y., Qiu T. *Fractional Processes and Fractional-Order Signal Processing* / H. Sheng, Y. Chen, T. Qiu. London: Springer London, 2012. 295 p.