

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ЗАКАЧКЕ ЖИДКОСТИ В ПОРИСТУЮ СРЕДУ

А.С. Мельник, С.Б. Турунтаев

В статье рассматривается применение парадигмы Донохо-Джонстона вейвлет-фильтрации с целью выделения слабых сейсмических сигналов на зашумленной записи. Подобраны такие параметры обработки сигнала с помощью вейвлетов, которые позволяют выделять сигналы, плохо разрешаемые пороговым критерием. Методика протестирована на записях акустической эмиссии, полученных в экспериментах по закачке жидкости в пористые нагруженные образцы. По выделенным импульсам созданы каталоги событий акустической эмиссии. Правомерность использования предложенного подхода подтверждается оценками убывания амплитуды импульсов с расстоянием, вычисленными по полученным каталогам, а также построенными по этим данным графиками повторяемости.

Введение

При разработке месторождений углеводородов в результате различных технологических мероприятий нарушается напряженно-деформированное состояние породного массива, содержащего месторождение. Это может привести к развитию в районе разработки деформационных процессов, в том числе сопровождающихся техногенной сейсмичностью.

Слабые сейсмические события, как возбужденные, так и являющиеся следствием естественных деформационных процессов, несут важную информацию о пространственном расположении, механических свойствах и проницаемости активно деформирующихся областей породного массива. Для получения такой информации в районе разрабатываемых месторождений создаются сети сейсмического мониторинга той или иной конфигурации. Сеть сейсмостанций позволяет определять координаты, время и магнитуду сейсмических событий в пределах контролируемой области.

Для определения положения сейсмического источника необходимо найти моменты вступлений Р и S-волн на записях нескольких датчиков. Реальные записи сейсмических волн содержат микросейсмический фон различного происхождения, амплитуда которого может быть значительной, что затрудняет уверенное выделение искомым первых вступлений и понижает точность определения положения гипоцентров сейсмических событий, особенно слабых (и самых многочисленных). Традиционные методы Фурье-фильтрации хорошо справляются с задачами очистки сигналов от гармонических шумов, но плохо работают при выделении полезного сигнала на фоне шумов, имеющих значительную составляющую в диапазоне частот исследуемого сигнала.

В последние годы для выделения и изучения сейсмических импульсных явлений, регистрируемых локальными сейсмическими сетями, все чаще применяются различные методы вейвлет-анализа [Любушин, 2007]. Эти методы имеют ряд преимуществ, наиболее значительным из которых является возможность определения частотной характеристики сигнала локально во времени. Это может оказаться особенно полезным в тех случаях, когда известен временной интервал появления со-

бытия, например, сейсмическое событие уверенно зарегистрировано одной сейсмостанцией и применение методов вейвлет-анализа позволит найти это событие на записях других станций в этот же интервал времени.

В настоящей статье рассматривается возможность применения вейвлет-анализа для понижения порога чувствительности систем сейсмического мониторинга. С этой целью создан набор программ для обработки зашумленных записей с помощью вейвлетов. Для отработки методики используются данные лабораторных экспериментов, на примере которых тестируются несколько вариантов параметров шумоподавления с помощью вейвлет-разложений. Полученные результаты верифицируются путем построения графиков повторяемости и определения зависимости затухания волн акустической эмиссии (АЭ) от расстояния.

Описание эксперимента

Установка представляет собой закрытый стальной резервуар длиной 1 м, по бокам которого размещаются датчики АЭ, давления и напряжения. Резервуар состоит из двух частей: лотка с отверстиями для датчиков и крышки. В собранном состоянии между крышкой и лотком находится мембрана, она герметично прижата по периметру крышкой к ящику. С помощью клапана в крышке, к которому присоединен гидравлический пресс, сверху на мембрану оказывается давление, которое моделирует литостатическое давление. В торцах резервуара находятся отверстия, одно из которых присоединено к насосу, а второе служит стоком жидкости. По длине резервуара просверлены отверстия с резьбой для датчиков. Диаметр отверстий одинаков, так что конфигурация датчиков может быть произвольной. Датчики АЭ расположены в 50, 110, 170, 230, 290 и 410 мм от входного отверстия установки. На расстояниях 50, 170, и 290 мм стоят по три датчика АЭ: два на противоположных стенках и один на дне установки (рис. 1). Верхняя частота полосы пропускания предусилителей при коэффициенте усиления 100 была выбрана существенно ниже частоты Найквиста (итоговая частота дискретизации сигнала – 200 кГц) [Турунтаев, Еремеева, Зенченко, 2009].

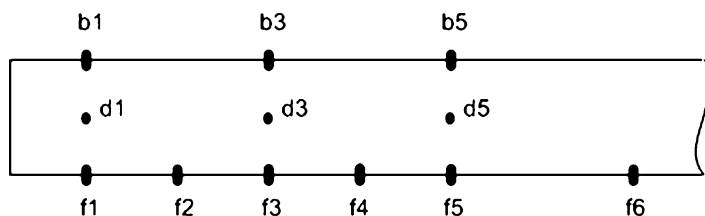


Рис. 1. Схема расположения датчиков.
Датчики b и f находятся на боковых стенках, d – на дне

Для анализа взяты данные эксперимента, в ходе которого в модельный резервуар закачивалась вода с постоянным расходом $0,35 \text{ см}^3/\text{сек}$. Вертикальная нагрузка поддерживалась постоянной. Максимальная вертикальная нагрузка в экспериментах была 10–11 МПа, максимальное поровое давление было на 0,5–1,0 МПа меньше вертикальной нагрузки. После включения нагнетательной установки открывался

входной клапан, и давление в резервуаре начинало расти. При нагнетании давления фиксировались импульсы АЭ.

Метод обработки данных вейвлетами

В отличие от преобразования Фурье, вейвлет-преобразование основано на системе функций, локализованных во времени. Это позволяет выделять в разложении компоненты, соответствующие импульсным событиям.

Вейвлет-разложение дает сходное с оконным преобразованием Фурье частотно-временное описание с некоторыми существенными отличиями. Основное преимущество вейвлет-разложения в том, что, при прочих равных, вейвлет-преобразование дает одновременно достаточно хорошее разрешение: как по частоте, так и по времени. При использовании фурье-преобразования улучшение разрешения по частоте дает ухудшение по времени и наоборот [Добеши, 2001].

В основу метода легла парадигма Донохо-Джонстона, согласно которой сигнал сначала раскладывается на компоненты, после чего происходит пороговая обработка компонент и из отфильтрованных компонент собирается очищенный сигнал [Смоленцев, 2005]. Эта парадигма состоит из трех основных шагов, последовательное применение которых приводит к шумоподавлению. На первом шаге отыскивается одно-, двухуровневое или более глубокое разложение сигнала. На втором шаге к каждому из коэффициентов детализации каждого уровня применяется процедура пороговой обработки (трешолдинга). И затем восстанавливается сигнал, для которого соотношение сигнал/шум выше, чем у исходной записи.

Перед обработкой записей АЭ вейвлетами они были очищены от низкочастотной составляющей (с помощью фильтра Чебышева II рода).

Основные этапы обработки записей заключались в следующем:

- каждая запись разбивается на блоки, и для каждого блока производится вейвлет-фильтрация;

- для каждого найденного импульса ищутся соответствующие ему по времени события на других датчиках. Если известен момент вступления t_i импульса АЭ на датчике i , то момент вступления этого импульса на другом датчике j следует искать в интервале $t_j - R_{ij}/C \leq t_i \leq t_j + R_{ij}/C$ (R_{ij} – расстояние между датчиками i и j , C – скорость звука в среде, у нас $C \approx 2,5 \cdot 10^3$ м/с);

- найденные координаты вступления и амплитуды на всех датчиках заносятся отдельной строкой в каталог событий.

Таким образом, в результате работы программы создается каталог событий, найденных с помощью вейвлетов.

На рис. 2 приведен пример сильного импульса, выделенного на датчике d3, где он был найден пороговым критерием (рис. 2,верху) и этот же импульс, выделенный на другом датчике, f1, где пороговым критерием он не был найден (рис. 2,внизу).

Подбор параметров вейвлет-фильтрации

Для обработки сигнала согласно парадигме Донохо-Джонстона необходимо подобрать такие параметры вейвлет-обработки, чтобы выделялось максимальное число импульсов, и при этом подавлялись помехи. Чтобы подобрать каждый параметр, участок записи, заведомо содержащий импульс АЭ на одном из датчиков, обрабатывался с разными наборами параметров.

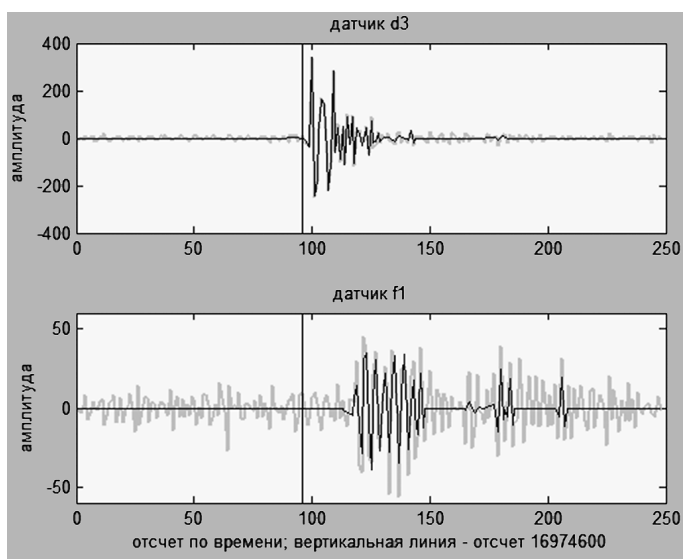


Рис. 2. Черной тонкой линией показан отфильтрованный вейвлетами импульс, серой жирной линией – исходная запись, из которой удален низкочастотный тренд. Вверху – импульс на датчике d3, выделенный пороговым критерием (на картинке – результат вейвлет-обработки). Внизу – тот же импульс на датчике f1, где он не выделяется пороговым критерием при пороге 8σ . Время между двумя соседними отсчетами – 5 мкс. Амплитуда здесь и далее – в условных единицах (если не указано иное)

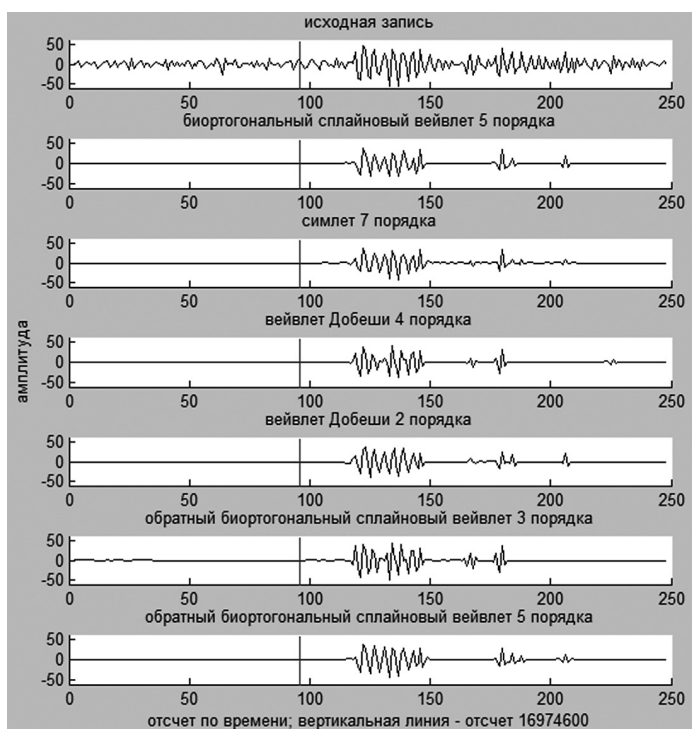


Рис. 3. Сравнение результатов фильтрации разными вейвлетами.

Выбор вейвлетов

На рис. 3 показаны записи, отфильтрованные вейвлетами [Смоленцев, 2005]:

- биортогональный сплайновый вейвлет 5 порядка;
- симлет 7 порядка;
- вейвлет Добеши 4 порядка;
- вейвлет Добеши 2 порядка;
- обратный биортогональный сплайновый вейвлет 3 порядка;
- обратный биортогональный сплайновый вейвлет 5 порядка.

Рассматривались и другие ортогональные вейвлеты, но они давали худшие результаты: больше помех либо худшее выделение полезного сигнала.

Видно, что все использовавшиеся вейвлеты достаточно хорошо выделяют полезный сигнал, но у некоторых из них появляются также «сателлиты». В результате анализа фильтрации участков записи разной длины для дальнейшей работы был выбран вейвлет Добеши 2 порядка, исходя из следующих соображений:

- получаемый сигнал хорошо сохраняет форму исходного импульса;
- в результате фильтрации находятся те сателлиты, которые находят и другие вейвлеты;

– при фильтрации с помощью вейвлета Добеши на записи не появляется «паразитной» синусоиды, как, например, для обратного биортогонального сплайнового вейвлета 3 порядка (рис. 3).

Выбор критерия трешолдинга (способа выбора порога для коэффициентов разложения)

Исходя из рассуждений, аналогичных тем, что приводились для выбора вейвлета, для обработки выбран минимаксный критерий трешолдинга (рис. 4) [Donoho, 1993; 1995; Donoho, Jonstone, 1994].

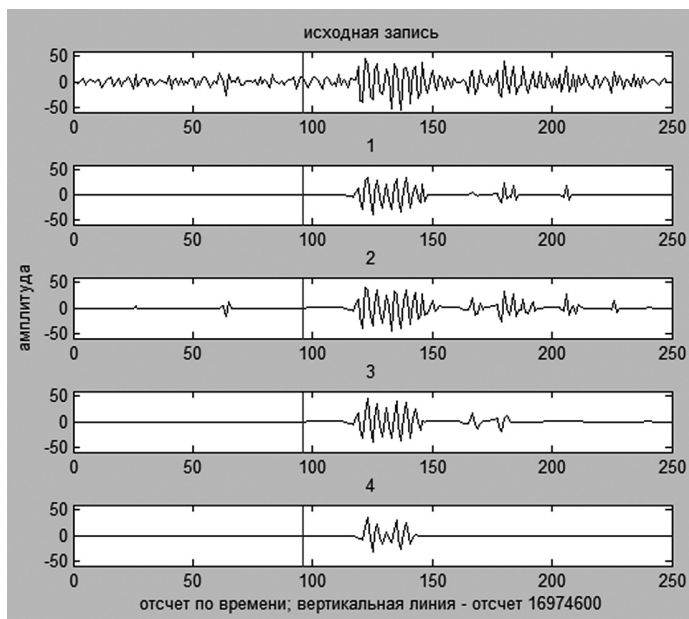


Рис. 4. Сравнение различных критериев трешолдинга.

Вверху – исходная запись. Далее: 1 – минимаксный критерий; 2 – адаптивный порог, использующий принцип Штейна несмещенной оценки риска; 3 – эвристический вариант первого выбора; 4 – порог $\sqrt{2 \log(L)}$, где L – длина интервала фильтрации [Смоленцев, 2005]

Выбор функции трешолдинга

Существует несколько функций трешолдинга (преобразования тех коэффициентов, которые остались в разложении после их пороговой обработки). Самые распространенные – это жесткий и мягкий трешолдинг.

Процедура жесткого трешолдинга предполагает, что коэффициенты, оказавшиеся выше порогового значения, остаются неизменными. У этого способа есть два недостатка. Во-первых, за счет обнуления некоторых коэффициентов в результирующем сигнале могут возникать «паразитные» гармоники. Во-вторых, этот способ не учитывает, что кроме полезного сигнала, в сохранившихся коэффициентах также присутствует шум.

При мягком трешолдинге значения коэффициентов детализации, оказавшиеся выше порога, дополнительно уменьшается на величину порога. Таким образом учитывается наличие шума в оставшихся коэффициентах, однако при этом есть риск подавления слабых информативных коэффициентов.

Мы применяем разновидность мягкого трешолдинга, описанную в [Cutillo et al., 2008; Tao, Vidacovic, 2000] (в русскоязычной литературе иногда уже встречается название «трешолдинг по Видаковичу»).

Функция имеет вид

$$T = \text{sign}(\gamma_l) \sqrt{\gamma_l^2 - \tau^2} I(|\gamma_l| \geq \tau),$$

где γ_l – коэффициенты вейвлет-разложения, τ – порог. Этот способ позволяет лучше разрешать полезные сигналы, чем обычный мягкий трешолдинг, и, с другой стороны, учитывает шумовую компоненту, в отличие от жесткого трешолдинга. На рис. 5 приведен пример записи, отфильтрованной с помощью разных функций: мягкий, жесткий трешолдинг и трешолдинг по Видаковичу.

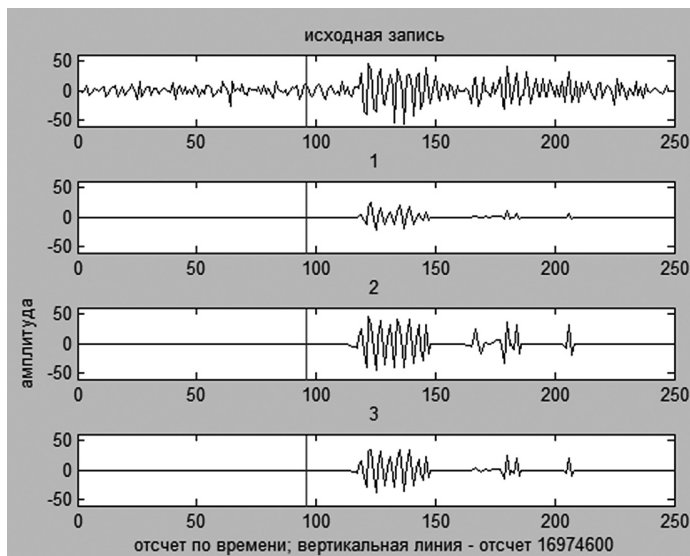


Рис. 5. Сравнение применения разных функций трешолдинга.

Вверху – исходная запись. Далее: 1 – мягкий трешолдинг, 2 – жесткий трешолдинг, 3 – трешолдинг по Видаковичу

Оптимальный интервал для поиска импульсов

При уменьшении интервала фильтрации увеличивается количество помех. Поэтому для фильтрации был выбран возможно больший интервал (мы использовали интервал в 2–4 млн отсчетов).

Результаты

1. Затухание амплитуд импульсов

Для грубой оценки затухания были выбраны импульсы, для которых:

- максимальное значение (найденное на датчике i) сильно отличается от значений на всех остальных (как минимум, в 3–4 раза);
- значения на соседних датчиках, $i + 1$ и $i - 1$, близки друг к другу.

Эти условия обеспечивают близкое расположение источника к датчику i .

Далее все амплитуды были отнормированы таким образом, чтобы амплитуда на датчике i была равна 1. Поскольку приближения затухания волн действительны только на достаточно больших расстояниях, амплитуда импульса, зарегистрированного i -м датчиком, при построении аппроксимации не учитывалась (рис. 6). Получено, что амплитуда убывает пропорционально $1/r^{1,4}$.

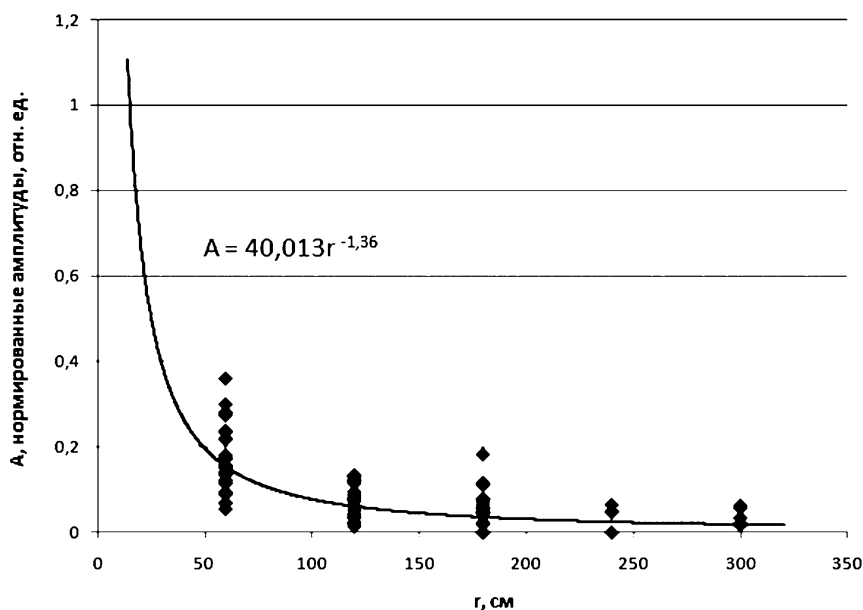


Рис. 6. Амплитуды импульсов на датчиках, находящихся на разных расстояниях от источника. Максимальная амплитуда для каждого импульса нормирована на 1

2. Графики повторяемости

Широко используемым методом оценки качества каталогов сейсмических событий является построение графиков повторяемости. Точка отклонения графика повторяемости от прямой в области малых энергий событий является признаком ограничений чувствительности сейсмической сети соответствующей величиной.

В настоящей работе графики повторяемости строились по амплитудам регистрируемых импульсов АЭ. Графики, построенные по каталогам импульсов, найденных с помощью вейвлетов, сравнивались с графиками, построенными по каталогам импульсов, полученных пороговым критерием при значениях порога 8σ и 5σ .

Количество импульсов, выделяемых вейвлетами, зависит от интервала фильтрации. В таблице приведено количество импульсов, найденных при разных способах фильтрации.

Таблица

Количество импульсов, найденных разными способами

Метод	Количество импульсов
Порог 8σ	216
Порог 5σ	367
Вейвлет-фильтрация по 2 млн отсчетам	1481
Вейвлет-фильтрация по 4 млн отсчетам	726

На рис. 7 приведены графики повторяемости, построенные для двух случаев пороговой обработки и для трех – вейвлет-фильтрации. Из графиков видно, что в области высоких амплитуд графики практически совпадают. Это значит, что в области высоких амплитуд вейвлет-фильтрация дает схожие результаты с пороговым критерием (что подтверждается и прямым сравнением амплитуд импульсов, найденных обоими критериями).

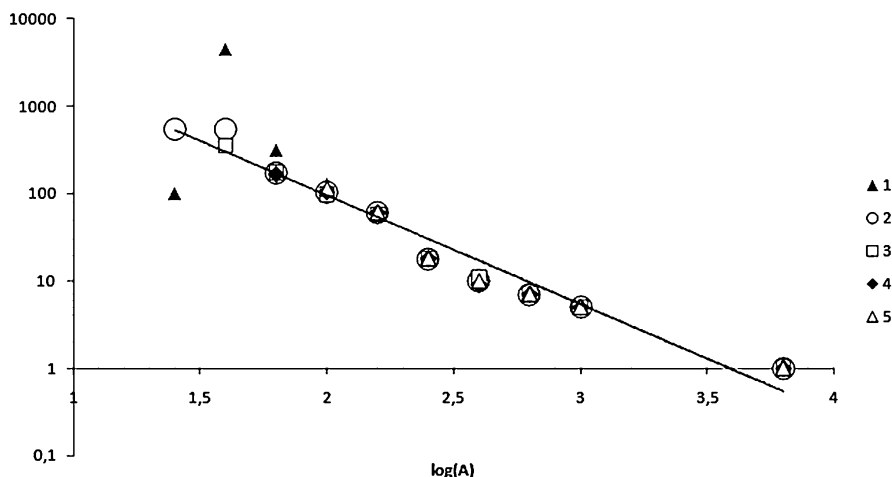


Рис. 7. Графики повторяемости: 1 – вейвлет-фильтрация по 500 000 отсчетам; 2 – вейвлет-фильтрация по 2 млн отсчетов; 3 – вейвлет-фильтрация по 4 млн отсчетов; 4 – порог 5σ ; 5 – порог 8σ

В области же малых амплитуд вейвлеты позволяют найти большее количество импульсов, которые лежат на продолжении графика повторяемости, построенного по импульсам, найденным пороговым критерием.

Поскольку из графика видно, что вейвлеты выделяют как полезные сигналы, так и некоторое количество ложных, до конца не ясно, какой интервал фильтрации считать оптимальным. Однако при уменьшении интервала фильтрации видно, что количество ложных сигналов увеличивается (например, из графика для вейвлет-фильтрации по 500 000 отсчетам выделяется много лишних импульсов с амплитудами порядка 5σ , что соответствует пику серии 1 на рис. 7).

Таким образом, даже для случая порога 5σ и вейвлет-обработки по 4 млн точек удалось выделить вдвое больше импульсов.

Выводы

В работе предлагается применение парадигмы Донохо-Джонстона вейвлет-фильтрации сигналов для увеличения количества импульсов, распознаваемых на зашумленной записи. Оценка затухания импульсов с расстоянием, а также полученное продолжение графика повторяемости в область малых амплитуд позволяют считать методику эффективной для выделения слабых импульсов. Метод позволяет с большой достоверностью выделять импульсы с амплитудами порядка 5σ .

Литература

Cuttillo L., Jung Y.Y., Ruggeri F., and Vidakovic B., 2008, Larger posterior mode wavelet thresholding and applications: Journal of Statistical Planning and Inference, 138, 12, p. 3758–3773.

Donoho D.L., 1993, Progress in wavelet analysis and WVD: a ten minute tour. In: Y. Meyer, S. Roques. Progress in wavelet analysis and applications. Tolouse: Frontières Ed, p. 109–128.

Donoho D.L., 1995, De-noising by soft thresholding: IEEE Trans. on Inf. Theory, 41, 3, p. 613–627.

Donoho D.L., Johnstone I.M., 1996, Neo-classical minimax problems, thresholding, and adaptation: Bernoulli, 1, p. 39–62.

Tao T. and Vidakovic B., 2000, Almost everywhere convergence of general wavelet shrinkage estimators: Applied Computational and Harmonic Analysis, 9, 72–82.

Добеши И., 2001, Десять лекций по вейвлетам. Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 464 с.

Любушин А.А., 2007, Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. – М.: Наука, 228 с.

Смоленцев Н.К., 2005, Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. – М.: ДМК Пресс, – 304 с., с ил.

Турунтаев С.Б., Еремеева Е.И., Зенченко Е.В., Вариации микросейсмической активности во времени как характеристика проницаемости пористой среды. // Проблемы взаимодействующих геосфер: сборник научных трудов ИДГ РАН. – М.: ГЕОС, с. 163–173.