

УДК 553.9; 51-74

ДИАГНОСТИКА И ФИЛЬТРАЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВОЛНОВЫХ КОМПОНЕНТ ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ НАЗЕМНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТНОГО АНАЛИЗА

© А.Е. Филатова, А.Н. Павлов, А.А. Короновский, А.Е. Храмов

Ключевые слова: автоматическая диагностика; вейвлетный анализ; цифровой сигнал; сейсморазведка; звуковые и поверхностные волны.

В работе разработан метод анализа и автоматической диагностики характерных компонент сейсмической записи цифровых данных наземной сейсморазведки на основе непрерывного вейвлетного преобразования. Предложены методы фильтрации на основе дискретного вейвлет-преобразования с быстрым (пирамидальным) алгоритмом разложения. Приведены результаты обработки экспериментальных данных.

Современные математические методы исследования, анализа и диагностики различных нелинейных режимов, динамики и волновых компонент, присутствующих в сложных колебательных процессах, активно развиваемые в теории колебаний и волн в радиофизике, находят все большее применение в самых различных областях естествознания. Одним из важных аспектов развития методов изучения сложных сигналов является проблема анализа структуры нестационарных процессов при наличии помех, актуальная как при проведении фундаментальных научных исследований в физике, физиологии, геофизике, социологии, так и при изучении экспериментальных данных в различных практических приложениях науки и техники.

Геофизические исследования являются одним из ярких примеров практической необходимости развития и создания новых методик изучения структуры и фильтрации различных компонент сложных экспериментальных сигналов, востребованных как с точки зрения развития теоретической геологии и геофизики, так и практических нужд поисковых работ. На сегодняшний день наиболее активно развивающимися областями геофизики являются отрасли, связанные с поиском и разведкой залежей различных природных ископаемых и, в наибольшей степени, нефтяных и газовых месторождений. Лидирующее место по объему ежегодных полевых поисковых и разведочных работ с последующими камеральными исследованиями полученных данных занимает сейсмическая разведка метода отраженных волн (МОВ) методики общей глубинной точки (МОГТ). Сейсмическая разведка, обеспечивая весьма большую глубинность исследований земной коры при достижении высокой детальности информации, играла и играет важную, а подчас и превалирующую роль в задачах прогнозирования нефтегазоносности глубоко залегающих отложений при освоении крупнейших нефтегазоносных провинций на территории Российской Федерации в Западной и Восточной Сибири, Поволжье, Прикаспийской впадине, Тимано-Печорском регионе [1, 2].

Спектр актуальных для поисковых геофизических работ задач анализа и фильтрации весьма широк. В него входят проблемы полевого экспресс-анализа и первичной обработки больших объемов результатов полевых работ, очистка цифровых данных от случайных шумов, дифференциация полезных и паразитных компонент сложных сигналов, которые, отметим, могут быть вызваны практически неразличимыми с точки зрения физики процессами, и т. д. [2]. Применяемые для изучения зарегистрированной сейсмической информации методики обработки определяют финальную успешность всех проводимых этапов сейсмической разведки и, в конечном итоге, величину ее финансового показателя и соответствующую экономическую выгоду. Большая стоимость проводимых полевых исследований требует высочайшего качества обработки экспериментальных материалов в целях получения максимально возможной информации о литологическом строении земной коры района работ. Таким образом, обработка временных рядов полевых данных может играть роль своеобразной испытательной площадки для современных алгоритмов и методов анализа, фильтрации и выделения различных компонент сложных сигналов. Несмотря на то, что за последние десятилетия был достигнут значительный прогресс в развитии методов изучения динамики систем с меняющимися во времени характеристиками [3–8], задача развития нового и совершенствования уже существующего инструментария для адекватной расшифровки информации, содержащейся в сигналах таких систем, остается одной из важнейших для экспериментальных исследований. В значительной степени это связано с ограничениями применяемых в настоящее время специальных методов анализа нестационарной динамики. В применении к конкретной области обработки полевых данных в геофизических исследованиях актуальными проблемами являются, в частности, задачи исключения паразитных компонент сейсмозаписей без искажения полезной информации, автоматизация различных стадий динамической обработки и диагностики различных

волновых компонент материала. Следует отметить, что сигналы, полученные при проведении геофизических поисково-разведочных работ, являются принципиально многокомпонентными, характеризуются существенной нестационарностью, их спектральный состав и амплитуда меняются с течением времени. Именно поэтому представляется весьма перспективным применение для их исследования вейвлетного преобразования [9–11], хорошо приспособленного для анализа таких нестационарных сложных процессов. Известен ряд удачных применений вейвлетного преобразования для анализа и обработки нестационарных сигналов геофизической природы, в частности для сжатия данных и кратномасштабного анализа в задачах очистки сигналов от высокочастотных шумов [10], классификации данных [12], для разработки оптимальных фильтров на основании одномерного вейвлет-преобразования с материнскими функциями DOG-семейства [13] и мн. др.

В настоящей работе предложены новые методы диагностики и фильтрации различных волновых компонент на полевых данных наземной сейсмической разведки МОВ МОГТ на основе непрерывного вейвлетного анализа. Среди основных достоинств предлагаемых методик можно особо подчеркнуть следующие: возможность автоматизации процесса обработки, одноканальность разработанных алгоритмов, незначительные затраты машинного времени, высокая точность и устойчивость к шумам.

На рис. 1 показана типичная сейсмограмма общего пункта взрыва (ОПВ), полученная при проведении наземных сейсмических исследований методом отраженных волн в Саратовском Поволжье. Рассматриваемая сейсмограмма образована совокупностью 180 сейсмических трасс, каждая из которых является временным рядом, т. е. может быть численно описана набором амплитуд упругих колебаний с шагом дискретизации по времени, в данном случае равным 2 миллисекунды. Каждая сейсмическая трасса имеет длину 3 секунды, что составляет 1500 отсчетов. Таким образом, показанное на рисунке сейсмическое изображение может быть представлено в виде матрицы, состоящей из 180 столбцов и 1500 строк. Нетрудно подсчитать, что при использовании четырехбайтового формата записи каждого отсчета для записи всей сейсмограммы в памяти компьютера потребуется около 1 мегабайта информации. При проведении современной сейсморазведки наблюдения выполняются по профилям, длина каждого из которых может составлять десятки и даже сотни километров. Как правило, сейсмограммы регистрируются с интервалом по профилю, равным 50 метрам. Следовательно, для записи только одного сейсмического профиля может потребоваться количество памяти, исчисляемое гигабайтами. Для детального геологического изучения небольших месторождений нефти и газа, характерных для европейской части России, в частности Саратовского Поволжья, иногда необходимо использовать тысячи погонных километров сейсмопрофилей. Подводя итог этим несложным вычислениям, можно заключить, что только для хранения первичной сейсмической информации требуются десятки и сотни гигабайт памяти. Учитывая то обстоятельство, что наиболее полная и точная геологическая интерпретация данных сейсморазведки возможна только после многих десятков процедур подавления волн-помех,

количество вариантов обработки сейсмограмм может увеличиваться в геометрической прогрессии. Отсюда следует, что для выполнения обработки сейсмических данных, используемых для геологического изучения только одного месторождения, требуются уже терабайты памяти. В связи с вышеизложенным становится понятным, что стоящая в центре данной статьи задача разработки новых высокоэффективных алгоритмов диагностики и фильтрации волн-помех в автоматическом режиме становится особенно актуальной.

Обратимся к представленному на рис. 1 полевому материалу. Отметим, что ключевым понятием в теории сейсморазведки является понятие годографа [1]. Годографом называется зависимость времени прихода волны в точку наблюдения от координат этой точки. Сейсмический годограф представляет собой ось синфазности, т. е. линию, соединяющую точки на разных трассах, колеблющиеся в одинаковой фазе. При простом визуальном анализе первичной сейсмограммы, приведенной на рис. 1, хорошо видно, что кроме полезных однократно отраженных волн, характеризующихся гиперболическими годографами, сейсмическая запись содержит в себе множество волн других типов. При работах МОВ МОГТ все остальные типы волн относятся к помехам.

По устоявшейся классификации волн-помех различают регулярные и нерегулярные волны-помехи. Регулярные волны характеризуются высокой устойчивостью кинематических и динамических параметров в пределах области наблюдения. К регулярным волнам относятся электрические наводки, звуковая волна и сейсмические волны, которые, в свою очередь, подразделяются на низкоскоростные, среднескоростные и высокоскоростные помехи. К низкоскоростным волнам принято относить прямую волну и поверхностные волны Рэлея и Лява. Среднескоростные помехи обусловлены перераспределением энергии падающей волны на границах раздела упругих свойств среды (обменные волны) и явлением закритического отражения (головные волны). Наконец, к высокоскоростным помехам относят волны, претерпевшие многократные отражения от сейсмогеологических границ. На первых вступлениях рассматриваемой сейсмограммы отчетливо выделяются прямолинейные годографы прямой и головной волн-помех, а также гиперболический годограф волны, отраженной от первой акустически жесткой границы. Выделить гиперболические годографы волн, отраженных от более глубоких геологических границ, не представляется возможным. Это связано с тем, что на больших удалениях от источника (от центральной части сейсмограммы) отраженные волны интерферируют с многократно отраженными помехами. На малых удалениях (в центре сейсмограммы) однократно отраженные волны попадают в зону регистрации звуковой и поверхностных волн. Звуковая волна представляет собой запись акустических колебаний, распространяющихся от источника сейсмических волн по воздуху. Скорость распространения этой волны-помехи имеет вполне определенную величину, равную скорости звука в воздухе. Звуковая волна характеризуется линейным годографом, по наклону которого может быть определена скорость. Кроме регулярной составляющей на сейсмограммах всегда присутствуют нерегулярные колебания (шум), вызванные различными причинами:

ветер, дождь, движение транспорта, пешеходов, скота и т. д. Отметим, что на данном полевом материале, являющемся типичным для наземной сейсморазведки, весьма выражен конус регистрации помех звукового и поверхностного типов на центральных каналах данной сейсмограммы ОПВ (рис. 1).

В настоящей работе представляется новый метод для оценки различных волновых компонент, присутствующих в полевом материале помех, на основе непрерывного вейвлетного преобразования [6]. Вейвлетный анализ, первоначально предложенный в качестве альтернативы классическому спектральному анализу, хорошо зарекомендовал себя в качестве инструмента прикладных исследований практически во всех естественных науках и многих областях техники [6–9].

Непрерывное вейвлетное преобразование с комплексным материнским вейвлетом для хаотического временного ряда $x(t)$ осуществляется [6]:

$$W(s, t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi_{s, t_0}^*(t) dt, \quad (1)$$

где $\Psi_{s, t_0}(t)$ – вейвлетная функция, получающаяся из материнского вейвлета:

$$\Psi_{s, t_0}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi_0\left(\frac{t-t_0}{s}\right). \quad (2)$$

Параметр s , называемый масштабом вейвлетного преобразования ($s \in \mathfrak{R}^+$), отвечает за ширину вейвлета $\Psi_{s, t_0}(t)$, а $t_0 \in \mathfrak{R}$ – параметр сдвига, определяющий положение вейвлета на временной оси t . В формуле (1) символ «*» означает комплексное сопряжение. Необходимо отметить, что при проведении вейвлетного анализа термин «временной масштаб» используется вместо термина «частота», традиционного для Фурье-анализа.

В настоящей работе в качестве материнского вейвлета (2) выбран вейвлет Морле

$$\Psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} \exp(j\omega_0 \eta) \exp(-\eta^2/2), \quad (3)$$

где ω_0 – параметр вейвлета. Морлет-вейвлет обладает хорошо локализованным в реальном и фурье-пространстве базисом, причем с увеличением ω_0 растет разрешение в фурье-пространстве, но ухудшается локализация во времени. Для задач, поставленных в данной работе, параметр ω_0 был выбран равным π . Выбор материнского вейвлета обусловлен близостью его формы к виду регистрируемого при данных полевых работах сейсмического импульса, а также простотой перехода от масштабного представления к спектральному.

На рис. 2 представлено соответствие зарегистрированной волновой активности геофизического сигнала сейсмической разведки (рис. 1) наблюдаемым паттернам на скалограммах, построенных с помощью непрерывного вейвлетного преобразования на основе базиса Морле.

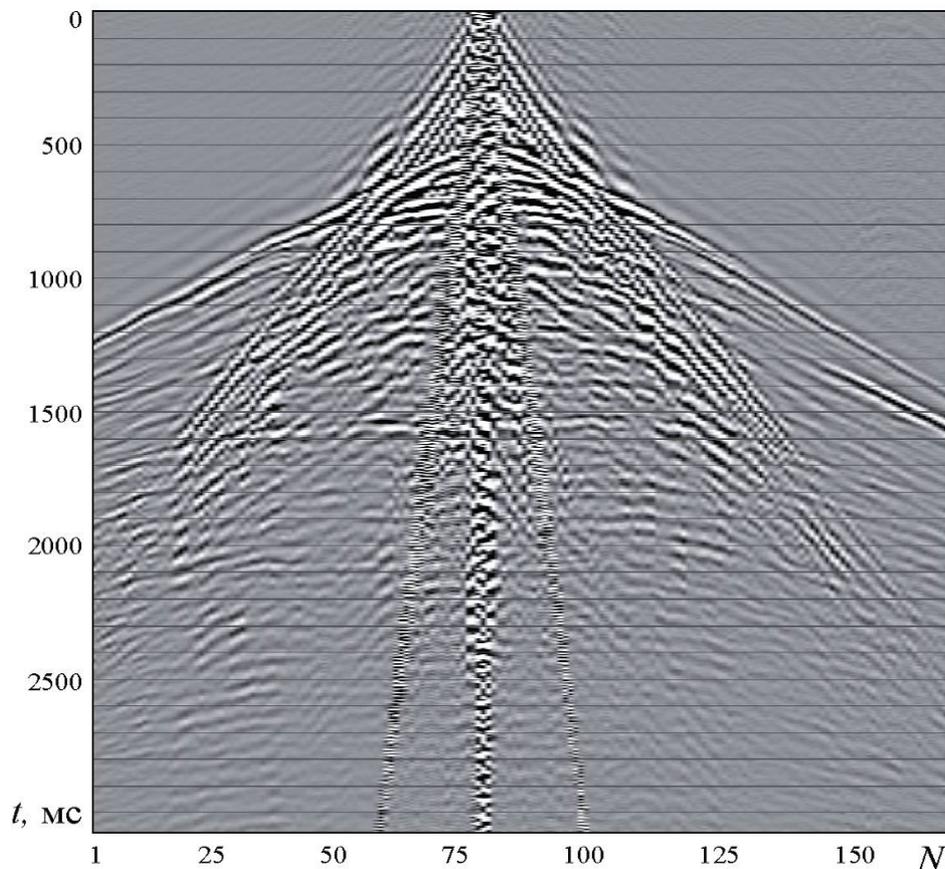


Рис. 1. Сейсмограмма общего пункта возбуждения волнового поля первичного полевого материала. По оси абсцисс отложен номер трассы \underline{N} , по оси ординат – время t

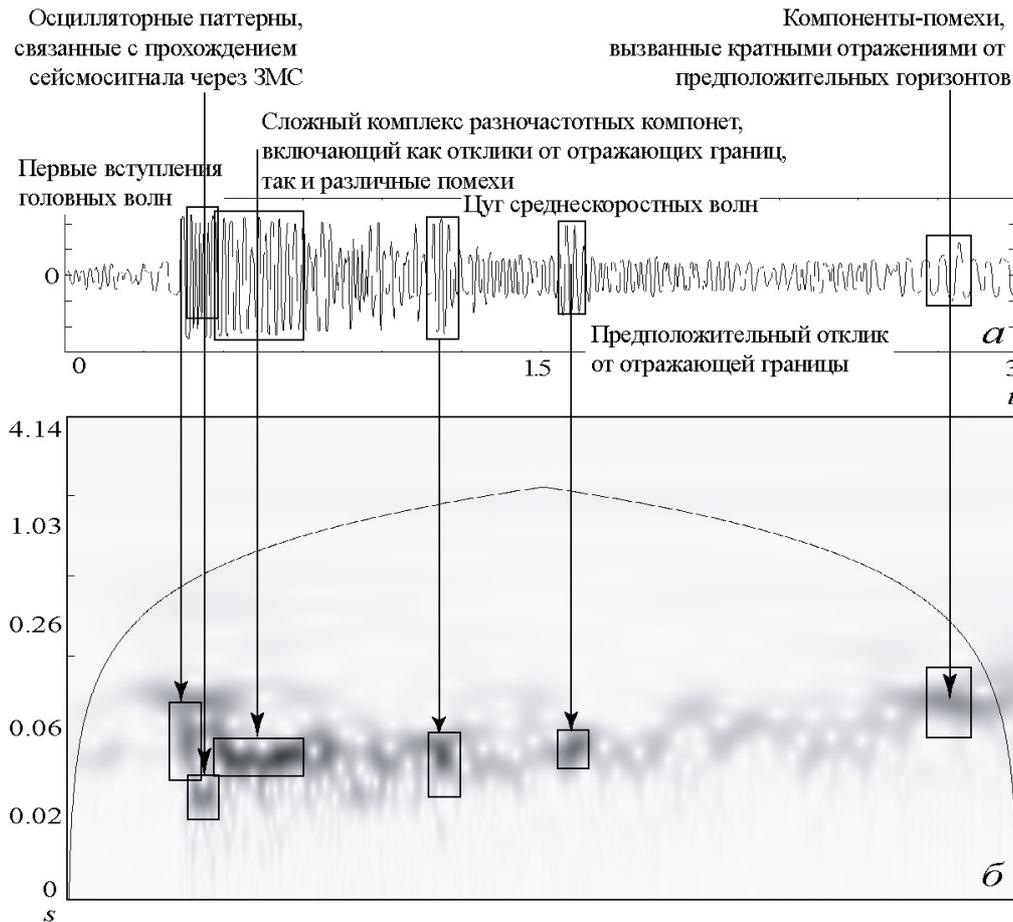


Рис. 2. Вид временной реализации трассы № 122 полевого материала (а) и соответствие наблюдаемым осцилляторным паттернам сигнала на проекции распределения амплитуды коэффициентов вейвлетного преобразования с базовым морлет-вейвлетом $\omega_0 = 2\pi$ (б). Длительность обработанной временной реализации $N = 2^{11}$ отсчетов, $\Delta t = 0,002$. Полевой материал показан на рис. 1

Необходимо отметить, что проведенный визуальный анализ позволил выделить основные компоненты сейсмического сигнала геофизической разведки. На рисунке 2б на масштабнo-временной плоскости удается идентифицировать основные типы зарегистрированных отражений. Отметим, что для первичной выборки наблюдаемых на трассе осцилляторных паттернов необходимо параллельно проводить визуальный анализ полевого материала, поэтому для практических целей настройку распознавания осцилляторных паттернов трассы и скалограммы необходимо проводить на характерном для данных сейсмогеологических условий в точке взрыва (ПВ) массива полевого материала.

Для анализа и диагностики характерных компонент сейсмической записи необходимо осуществить классификацию наблюдаемых паттернов. Первым очевидным подходом к классификации осцилляторных паттернов является их варьирование по интенсивности. В первую очередь, на фоне шумовой составляющей хорошо визуализируются первые вступления зарегистрированной полезной сейсмической информации. Данный факт может быть использован для задания формы динамического мьютинга по сейсмограммам ОПВ в автоматическом режиме.

Затем необходимо выделить метод классификации осцилляторных паттернов на основании их различий в

частотном (или, формализовано, масштабном) составе. На полевого материала, продемонстрированном на рис. 2, хорошо прослеживаются зарегистрированные отражения полезных сигналов. Отметим, что верхние отражающие геологические границы дают более высокочастотный отклик, чем лежащие в нижних толщах геологической среды. Очевидно, что для проведения успешной динамической обработки данная фильтрация высоких частот толщей земной коры должна быть компенсирована, что может быть достигнуто, например, грамотным проведением поверхностно-согласованной деконволюции, автоматическую настройку параметров которой было бы удобно проводить по выбранным с помощью подобного вейвлетного анализа для каждой трассы частотно-временным характеристикам полезных отраженных волн от предполагаемых горизонтов.

Сочетание двух описанных подходов – одновременный анализ частотного состава и амплитудного уровня компонент – позволяет выделить ряд помех, присутствующих на полевых материалах. Например, на рис. 2 продемонстрированы среднескоростные и кратные волны-помехи.

Таким образом, проведенный с помощью непрерывного вейвлетного преобразования анализ полевого материала позволяет выделить различные волновые компоненты, присутствующие в сейсмозаписях. Обра-

тимся теперь к возможности создания и повышения быстродействия вейвлетных фильтров при обработке данных сейсморазведки. С этой целью может быть применен подход, основанный на процедуре дискретного вейвлет-преобразования с быстрым (пирамидальным) алгоритмом разложения. Дискретное преобразование имеет следующие преимущества по сравнению с непрерывным преобразованием:

1) применение ортогональных базисных функций в рамках дискретного преобразования позволяет ограничиться меньшим числом коэффициентов разложения. При этом отсутствуют сильно коррелированные компоненты, что упрощает процедуру идентификации коэффициентов, ответственных за различные особенности формы анализируемого сигнала;

2) использование пирамидального алгоритма разложения, использующего идеологию субполосной фильтрации [14], обеспечивает возможность проведения расчетов в режиме реального (или почти реального) времени. Именно это обстоятельство привело к широкому применению дискретного вейвлет-преобразования в различных областях техники [7–10].

Среди особенностей дискретного преобразования следует выделить отсутствие аналитической формы записи для применяемых базисных функций – если при непрерывном преобразовании существуют формулы, задающие вейвлет, то в рамках дискретного преобразования известны только таблицы коэффициентов [15]. Формально эти коэффициенты могут быть вычислены путем решения некоторых алгебраических уравнений, но традиционно на практике исследователи работают с матрицами чисел, соответствующих выбору того или иного семейства функций разложения сигнала. Чаще всего это семейство образует ортонормированный базис, вследствие чего разложение по вейвлетам в рамках дискретного преобразования не является избыточным. Избыточные преобразования могут применяться в задачах, связанных с передачей и обработкой информации, но при этом важно отметить, что использование ортонормированных функций обеспечивает более точное представление сигнала. В частности, при выборе ортонормированного базиса упрощается процедура обратного преобразования (восстановления сигнала по коэффициентам разложения).

Применительно к проблемам обработки данных сейсмической разведки ограничимся кратким изложением основных принципов разложения по вейвлетам с использованием пирамидального алгоритма. В отличие от непрерывного преобразования, предусматривающего произвольный выбор параметров масштаба и сдвига, в рамках дискретного преобразования масштаб

задается выражением $a = 2^j$, а сдвиг соответствует целому числу шагов дискретизации анализируемого сигнала. Данный сигнал, представляющий собой дискретизованную функцию времени $x(n) = x(n\Delta t)$, поступает на вход фильтра нижних частот, частотную характеристику которого обозначим $g(n)$. Сигнал на выходе фильтра представляет собой свертку

$$y[n] = (x * g)[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]g[n-k]. \quad (4)$$

Одновременно сигнал $x(n)$ проходит через фильтр верхних частот, являющийся взаимосвязанным с НЧ-фильтром

$$g[n] = (-1)^n h[2M - n - 1], \quad (5)$$

где M – длина области задания вейвлета. Учитывая данную взаимосвязь НЧ- и ВЧ-фильтров, их часто называют квадратурными зеркальными фильтрами [14].

Далее два временных ряда, полученных на выходе фильтров, прореживают, оставляя только четные или нечетные отсчеты. Возможность осуществления такой выборки связана с тем, что при фильтрации зеркальными фильтрами в два раза уменьшается частотный диапазон сигнала, поэтому, согласно теореме Котельникова, отсчеты можно в два раза проредить. В результате на выходе фильтров будут получены две последовательности отсчетов:

$$y_{НЧ}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \cdot g[2n - k], \quad (6)$$

$$y_{ВЧ}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \cdot h[2n - k].$$

Вследствие прореживания в два раза ухудшается разрешение по времени каждой последовательности, но одновременное наличие обеих последовательностей позволяет восстановить исходный сигнал. Отметим, что каждый процесс (6) характеризуется только половиной ширины полосы частот по сравнению с исходным сигналом $x(n)$. Процедуру фильтрации и прореживания можно продолжить, что приведет к последующему уменьшению вдвое ширины полосы частот выходного процесса после каждого этапа фильтрации. Вследствие этого изначально число отсчетов дискретизованного сигнала $x(n)$ должно составлять 2^m .

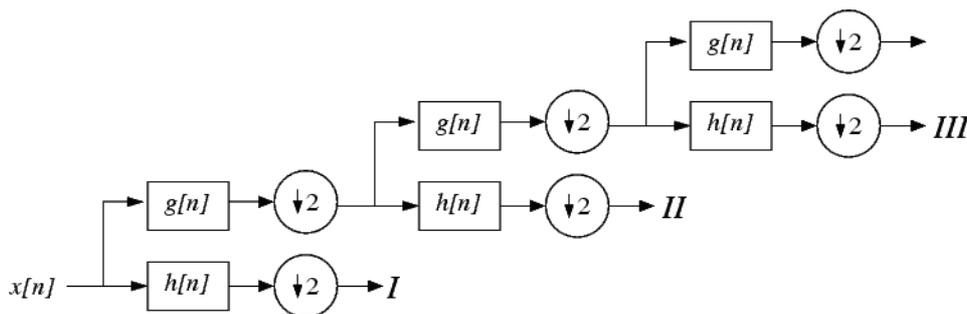


Рис. 3. Схема дискретного вейвлет-преобразования с помощью банка НЧ и ВЧ фильтров

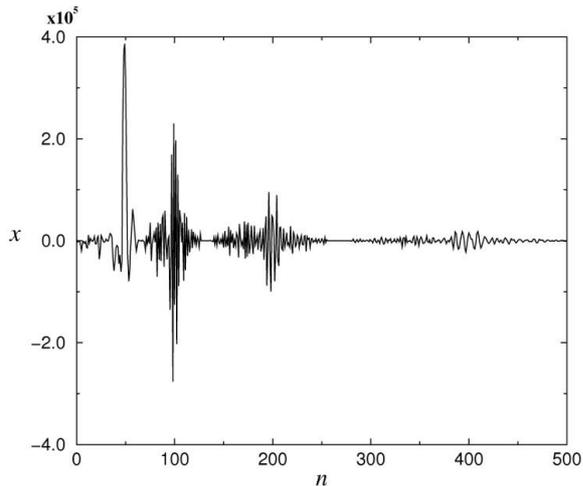


Рис. 4. Коэффициенты дискретного преобразования, соответствующие разложению сигнала (трасса № 82 сейсмограммы общего пункта возбуждения, рисунок 1) в базисе вейвлетов Добеши D^8

Схематично многоступенчатая процедура фильтрации изображена на рис. 3, где *I*, *II*, *III* обозначают 3 уровня разложения, каждый из которых приводит к уменьшению вдвое частотного диапазона исходного процесса. Максимальное число таких уровней определяется длительностью сигнала, а именно, показателем степени *m*.

Обратимся теперь к анализу экспериментальных данных, в качестве которых была выбрана трасса № 82 сейсмограммы общего пункта возбуждения, изображенной на рис. 1. Данная трасса помимо полезного сигнала содержит помехи (поверхностные и звуковые волны), имеющие большую амплитуду и локализованные в диапазоне [1,0; 1,3] секунд. Так как данные помехи превосходят по мощности сейсмический сигнал, проведение его детального анализа в их присутствии представляется достаточно сложной задачей, и для адекватной расшифровки информации, содержащейся в сейсмических данных, необходимо вначале осуществить фильтрацию волн-помех. Такая фильтрация должна, с одной стороны, быть узкополосной (т. е. частотные диапазоны полезного сигнала и помехи являются близкими). С другой стороны, фильтрацию нужно проводить только в пределах ограниченного по времени фрагмента экспериментальных данных.

Применение фильтров на основе Фурье-анализа неэффективно для устранения локализованных особенностей исследуемого процесса. В данной ситуации целесообразнее применять вейвлетную фильтрацию. При этом можно воспользоваться простым амплитудным критерием для идентификации коэффициентов вейвлет-преобразования, которые соответствуют помеховым волнам. На рис. 4 изображены значения коэффициентов дискретного преобразования, соответствующие разложению сигнала (трассы № 82 сейсмограммы общего пункта возбуждения, представленной на рис. 1) в базисе вейвлетов Добеши D^8 [15]. По оси абсцисс отложен номер коэффициента (вначале для коэффициентов аппроксимации НЧ-фильтра, затем – для детализирующих коэффициентов ВЧ-фильтра). Анализ данных коэффициентов позволил установить, что ритми-

ческая активность, связанная с наличием помеховых волн, характеризуется преимущественно большими значениями вейвлет-коэффициентов (превышающими уровень $2 \cdot 10^{-5}$), которые расположены вблизи $n = 50$. Выбирая порог для амплитудного детектирования, исследователь получает возможность влиять на качество фильтрации помех. В частности, если приравнять нулю значения коэффициентов в диапазоне $n = [35, 65]$, то это приведет к снижению уровня помехи в сигнале (рис. 5а). Отметим, что на рис. 5а обеспечивается локализованная фильтрация помеховых волн, при которой фрагменты сигнала, не содержащие помех, остаются неискаженными. Это обстоятельство принципиальным образом отличает фильтры на основе вейвлетов и классического преобразования Фурье (позволяющего осуществлять полосовую фильтрацию путем проведения прямого и обратного преобразований с обнулением коэффициентов, характеризующих искажения сигнала). При реализации вейвлет-преобразования частотная фильтрация сигнала сочетается с временной избирательностью фильтра.

Для осуществления более качественной фильтрации помеховых волн наряду с амплитудным критерием дополнительно был проведен анализ коэффициентов, находящихся за пределами диапазона $n = [35, 65]$. С этой целью была реализована процедура пирамидального разложения сигнала в базисе вейвлетов Добеши D^8 только для участка, содержащего помехи, что позволило идентифицировать коэффициенты, характеризующие помеховые волны, в общей последовательности коэффициентов разложения сигнала (рис. 5а). Уменьшение амплитуды соответствующих коэффициентов обеспечивает улучшение отношения сигнал/шум. Данная ситуация проиллюстрирована на рис. 5б, где показано, что путем корректировки коэффициентов, соответствующих помеховым волнам, происходит уменьшение амплитуды данных волн и повышается эффективность вейвлетной фильтрации.

Вместе с тем необходимо отметить, что в случае дискретного вейвлет-преобразования приравнивание нулю части коэффициентов, имеющих большую амплитуду, приводит к появлению дополнительных искажений формы сигнала, что является одним из недостатков данного подхода. Искажения формы проиллюстрированы на рис. 5: вместо гладкой функции времени, которая была зарегистрирована в эксперименте (рис. 5, сплошная линия), после вейвлет-фильтрации с использованием дискретного преобразования получен сильно изрезанный сигнал (рис. 5, пунктир).

Очевидной причиной подобных искажений является наличие резких обрывов на краях спектральной характеристики фильтра по аналогии с известными проблемами классического спектрального анализа – эффектами утечки энергии, для устранения которых традиционно применяются оконные функции [14, 15]. Приравнивание нулю ряда коэффициентов в ограниченной частотной области фактически означает наличие разрыва при переходе от отличных от нуля коэффициентов к коэффициентам, которые обнуляются при фильтрации. В соответствии с классическим спектральным анализом существование разрывов сигнала во временной области приводит к появлению зависимостей вида $(\sin t)/t$ в области частот. По аналогии, разрывы спектральной функции сопровождаются

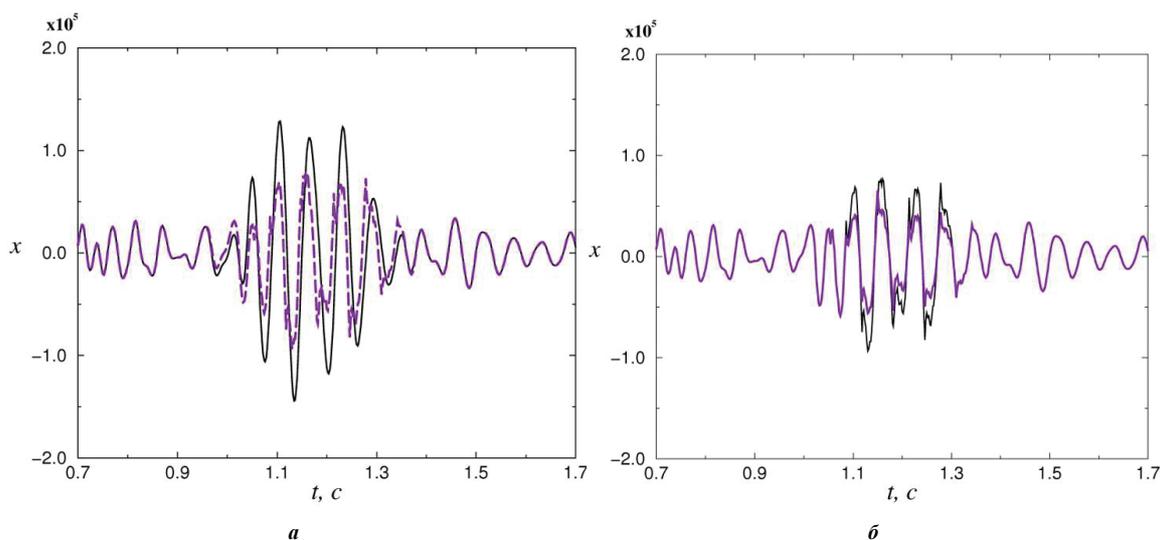


Рис. 5. Искажения формы сигналов: *a* – фильтрация помеховых волн путем амплитудного детектирования вейвлет-коэффициентов; *б* – улучшение качества фильтрации (улучшение отношения сигнал/шум) путем уменьшения амплитуд вейвлет-коэффициентов, находящихся вне диапазона $n = [35, 65]$ и соответствующих участку присутствия помехи

искажениями сигнала при проведении обратного преобразования Фурье. Различные приемы сглаживания соответствующих разрывов за счет, например, ухудшения частотного разрешения позволяют корректировать эффекты утечки энергии. Аналогичный подход целесообразно применять и при вейвлетной фильтрации, особенно при дискретном преобразовании, где данные эффекты могут быть выражены сильнее. Это, возможно, связано с тем, что базисные функции непрерывного преобразования частот имеют экспоненциальный спад на бесконечности, тогда как дискретные вейвлеты, такие как широко применяемые на практике вейвлеты Добеши, обладают компактным носителем. В рамках выполнения данных численных расчетов использовался прием, основанный на применении оконной функции Ханна [16] для сглаживания коэффициентов дискретного вейвлет-преобразования на этапе удаления коэффициентов, характеризующих помехи. Полученные при этом результаты, представленные, например, на рис. 5, свидетельствуют о том, что данный прием фильтрации позволяет вносить меньше искажений в отфильтрованный сигнал.

Достоинством процедуры фильтрации на основе дискретного вейвлет-преобразования является быстродействие алгоритма и простота реализации процедуры обратного восстановления сигнала по его коэффициентам разложения. Возможность многократно повысить скорость вычислений важна для анализа волновых полей сейсмограммы, содержащих большое количество трасс. В этом случае дискретное вейвлет-преобразование может быть применено для предварительной (быстрой) обработки данных волновых полей в целях удаления помех, например, в полевой экспресс-обработке. Вместе с тем для проведения более качественного анализа экспериментальных данных и повышения эффективности устранения помеховых волн представляется целесообразным в некоторых случаях базироваться на непрерывном вейвлет-преобразовании, которое приводит к меньшим искажениям процесса после проведения процедуры фильтрации.

Таким образом, предлагаемый метод одноканальной фильтрации на основе дискретного вейвлетного преобразования позволяет исключить влияние зоны зарегистрированных высокоинтенсивных волн звукового и поверхностного типа. Кроме того, наличие четких критериев, по которым можно выделить требуемые помехи на поверхности распределения амплитуды $|W(T_0, s)|$ непрерывного вейвлетного преобразования, а именно – возрастание интенсивности мод колебаний и четкая локализация по времени и шкале временных масштабов, дает возможность в дальнейшем проведения необходимой фильтрации в автоматическом режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурвич И.И., Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка. М.: Недра, 1980.
2. Бондарев В.И., Крылатков С.М. Основы обработки и интерпретации данных сейсморазведки. Екатеринбург: Изд-во УГГА, 2001.
3. Kumar P., Foufoula-Georgiou E. Wavelet analysis for geophysical applications // Reviews in Geophysics. 1997. V. 35. P. 385.
4. Бондарев В.И., Крылатков С.М. Основы обработки и интерпретации данных сейсморазведки. Екатеринбург: Изд-во УГГА, 2001.
5. Albora M., Bal A., Ucan O.N. A new approach for border detection of Dumluca (Turkey) iron ore area // Pure and Applied Geophysics. 2007. V. 164. P. 199.
6. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003.
7. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их применение // УФН. 2001. Т. 171. С. 465.
8. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // УФН. 1996. Т. 166. С. 1145.
9. Holschneider M. Wavelets: An analysis tool. Oxford: Oxford University Press, 1995.
10. Филатова А.Е., Артемьев А.Е., Короновский А.А., Павлов А.Н., Храмов А.Е. Успехи и перспективы применения вейвлетных преобразований для анализа нестационарных нелинейных данных в современной геофизике // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика 2010. Т. 18 (3). С. 3.
11. Филатова А.Е., Овчинников А.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Применение вейвлетного преобразования для диагностики волн помех звукового и поверхностного типов по цифровым данным наземной сейсморазведки // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2010. Т. 15. Вып. 2. С. 524.

12. *Sitnikova E.Yu., Hramov A.E., Koronovskii A.A., van Luitelaar G.* // J. of Neuroscience Methods. 2009. V. 180. P. 304.
13. *Kumar P., Foufoula-Georgiou E.* Wavelet analyses for geophysical applications // Reviews of Geophysics. 1997. V. 35. P. 385.
14. *Abbate A., DeCusatis C., Das P.K.* Wavelets and subbands. Fundamentals and applications. Boston: Birkhäuser, 2002.
15. *Daubechies I.* Ten lectures on wavelets. Philadelphia: S.I.A.M., 1992.
16. *Meyer Y.* Wavelets and operators. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы».

Поступила в редакцию 16 ноября 2010 г.

Filatova A.Ye., Pavlov A.N., Koronovskiy A.A., Khramov A.Ye. Diagnostics and filtration of various wave components of digital data of land seismic survey on base of wavelet analysis

In the work the method of analysis and automatic diagnostics specific for components of seismic recording of digital data of land seismic survey on the base of continuous wavelet transformation is developed. The methods of filtration on the base of discrete wavelet-transformation with fast (pyramid) algorithm of decomposition are offered. The results of processing of experimental data are given.

Key words: automatic diagnostics; wavelet analysis; digital signal; seismic survey; wave and surface waves.