



МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ НЕПРЕРЫВНОГО ВЕЙВЛЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВОЛНОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СЛОЖНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ ГЕОФИЗИКИ*

*А.Е. Филатова, А.Е. Артемьев, А.А. Овчинников,
А.А. Короновский, А.Е. Храмов*

В работе предложен новый, использующий непрерывное вейвлетное преобразование, метод диагностики определенных осцилляторных паттернов на полевых данных наземной сейсмической разведки для экспресс-анализа полевых данных и автоматизации процесса диагностики искомым паразитных компонент сейсмозаписи. Эффективность предложенного метода проиллюстрирована как на примере эталонной модели теории колебаний (системе Лоренца, демонстрирующей перемежающееся поведение), так и на реальных геофизических данных.

Ключевые слова: Автоматическая диагностика, вейвлетный анализ, цифровые сигналы, сейсморазведочные работы, звуковые и поверхностные волны.

Введение

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 геофизики, так и для практических

*Статья написана по материалам доклада на IX Международной школе «Хаотические автоколебания и образование структур», Саратов, Россия, 4–9 октября, 2010.

нужд поисковых работ. На сегодняшний день наиболее активно прогрессирующими 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 методом отраженных волн. Сейсмическая разведка, обеспечивая весьма большую глубинность исследований земной коры при достижении высокой детальности информации, играла и играет важную, а подчас и преобладающую 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 этапов сейсмической разведки и, в конечном итоге, величину ее финансовых показателей и соответствующую экономическую выгоду. Большая стоимость полевых исследований требует высочайшего качества обработки экспериментальных материалов в целях получения максимально возможной информации о геологическом строении земной коры района работ. Таким образом, новые современные алгоритмы и методы анализа, фильтрации и выделения различных компонент сложных сигналов могут решить многие проблемы, существующие в различных аспектах обработки временных рядов полевых данных. Несмотря на то, что за последние десятилетия был достигнут значительный прогресс в развитии методов изучения динамики систем с меняющимися во времени характеристиками [3–13], 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, поэтому представляется перспективным применение для их исследования вейвлетного анализа [14–17], 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 [18, 19], классифи-

кации данных [20], для разработки оптимальных фильтров на основании одномерного вейвлет-преобразования с материнскими функциями DOG-семейства [21–24], для диагностики в реальном времени состояния систем [25], для расчета и анализа атрибутов сейсмических записей [26–28]. Кроме того, весьма перспективным является использование вейвлетного анализа при подготовке полевых сейсмических данных к процедурам AVO-анализа [29–32]. Метод AVO-анализа (Amplitude Variation with Offset) – метод изучения зависимости амплитуд отраженной волны от удаления – широко применяется в мировой практике в процессе обнаружения, разведки и разработки, в основном, газовых месторождений, а иногда и нефтяных [33–35]. Благоприятными условиями для применения этой методики являются разрезы, сложенные относительно молодыми, слабо консолидированными терригенными породами мезозойского и кайнозойского возраста [36, 37]. На основании наблюдающихся в последние десятилетия достижений в исследовании сейсмических амплитуд для определения углеводородов, можно сделать предположения, что дальнейшие успехи направления AVO-анализа будут напрямую связаны с улучшением качества предобработки сейсмической информации для повышения соотношения сигнал–помеха, включая усовершенствование способов исключения влияния на амплитуды промежуточной сложно построенной толщи и учета наклона и кривизны отражающих границ путем глубинной миграции до суммирования. Очевидно, что в таком случае современная обработка сейсмических данных должна проводиться с сохранением истинного соотношения амплитуд сейсмических записей [38]. Согласно пункту 7.4.2.3 технической инструкции по сейсморазведке [38], для проведения обработки с сохранением амплитудных соотношений, из графа обработки исключаются процедуры автоматической регулировки амплитуд и процедура одноканальной нормализации амплитуд в заданном временном окне. Они заменяются процедурой регулировки амплитуд с учетом граничных (поверхностных) условий, когда амплитудный коэффициент для каждой трассы рассчитывается с учетом влияния расположения пунктов взрыва и приема, общей глубинной точки отражения, а также расстояния между пунктами взрыва и приема сигнала. Кроме этого, вместо одноканальной деконволюции используется деконволюция с учетом поверхностных условий, когда оператор деконволюции для каждой трассы рассчитывается также с учетом влияния расположения общей глубинной точки, пунктов взрыва и приема сигнала и расстояния между ними. В свою очередь, отказ от традиционных для сейсморазведки процедур регулировки усиления порождает ряд новых задач фильтрации различных помех и шумов сейсмоматериала и, в частности, проблему аккуратного подавления волн-помех звукового и поверхностного типов.

Целью настоящей работы являлось создание нового метода диагностики на основе непрерывного вейвлетного преобразования определенных осцилляторных паттернов в режиме реального времени на полевых данных наземной сейсмической разведки методом отраженных волн. Основные достоинства предложенного метода, как показано дальше, – это возможность использования его для экспресс-анализа полевых данных и автоматизации на его основе процесса диагностики искомых паразитных компонент сейсмозаписи, соответствующих волнам-помехам звукового и поверхностного типов. Также к достоинствам предложенного метода следует отнести незначительные затраты машинного времени, требуемые для такой обработки, что позволяет эффективно реализовать многоканальный анализ данных по сейсмическому профилю в реальном времени.

1. Метод автоматической диагностики различных компонент сложного нестационарного сигнала

Непрерывное вейвлетное преобразование с комплексным материнским вейвлетом для хаотического временного ряда $x(t)$ осуществляется следующим образом [3]:

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

где $\psi_{s, t_0}^*(t)$ – вейвлетная функция, получающаяся из материнского вейвлета $\psi_0(t)$ –

$$\psi_{s, t_0}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi_0\left(\frac{t - t_0}{s}\right). \quad (2)$$

Параметр s , называемый масштабом вейвлетного преобразования ($s \in \mathbb{R}^+$), отвечает за ширину вейвлета, а $t_0 \in \mathbb{R}$ – параметр сдвига, определяющий положение вейвлета на 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 [3]

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} \exp(j\omega_0\eta) \exp(-\eta^2/2). \quad (3)$$

Параметр вейвлет-функции ω_0 был выбран равным 2π , что, с одной стороны, обеспечивает хорошее соотношение между локализациями вейвлет-функции во времени и фурье-пространстве [3], а с другой стороны, позволяет легко сопоставлять временные масштабы s вейвлет-преобразования (1) с частотами f спектрального представления сигнала, поскольку для данного значения параметра ω_0 выполняется соотношение $s \approx 1/f$ [3,4]. Выбор материнского вейвлета был также обусловлен близостью его формы к виду регистрируемого при наземных сейсморазведочных полевых работах сейсмического импульса.

По аналогии со спектром мощности фурье-преобразования можно ввести в рассмотрение мгновенное

$$E(s, t_0) = |W(s, t_0)|^2 \quad (4)$$

и интегральное

$$\langle E(s) \rangle = \int |W(s, t_0)|^2 dt_0 \quad (5)$$

распределение энергии по временным масштабам [3].

Поскольку в весьма широком смысле поведение системы во время преобладания различных волновых компонент различается, то и структура вейвлет-поверхности $W(t, s)$ в области регистрации различных режимов динамики также будет существенно различна [3, 39–41]. Иными словами, вид зависимости мгновенной энергии вейвлет-спектра $E(s, t)$, рассчитанной для каждого конкретного момента времени t , будет определяться динамикой волновой компоненты сложного сигнала $x(t)$, преобладающей на данном временном промежутке. Если для сигнала можно выделить несколько характерных режимов волновой динамики, то и мгновенная энергия $E(s, t)$ демонстрирует соответствующий набор выраженных зависимостей. Таким образом, можно перейти от анализа структуры вейвлетной поверхности $W(s, t)$

к анализу распределения энергии вейвлетного спектра по характерным временным масштабам.

Для выделения различных компонент сигнала в каждый момент времени t определяется суммарное значение энергии вейвлет-спектра $w(t)$, приходящейся на выбранный диапазон характерных временных масштабов $s \in S = (s_1; s_2)$

$$w(t) = \int_S E(t_0, s) ds. \quad (6)$$

Диапазон характерных временных масштабов S , по которым будет находиться величина $w(t)$, определяется рассматриваемыми волновыми компонентами исследуемого сигнала, и в каждом конкретном случае выбирается на основании мгновенных распределений энергии вейвлетного спектра для различных режимов динамики. В ряде случаев может сложиться ситуация, когда необходимо рассматривать несколько диапазонов временных масштабов S_i , которые однозначно позволили бы оценить и охарактеризовать волновую динамику по численным данным. В этом случае интегрирование (6) должно проводиться по объединению $S = \bigcup_i S_i$ соответствующих диапазонов временных масштабов.

2. Анализ различных частотных компонент динамики модельной нелинейной системы

Для демонстрации сущности и возможностей данного метода в области изучения сложных нестационарных многокомпонентных сигналов обратимся к рассмотрению временной динамики одной из классических систем нелинейной динамики, а именно системы Лоренца [39]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sigma(y - x), \\ \dot{y} &= rx - xz - y, \\ \dot{z} &= xy - bz, \end{aligned} \quad (7)$$

где x , y и z – независимые динамические переменные, а σ , r и b – управляющие параметры системы. Эта система вначале была введена как первое нетривиальное галеркинское приближение для задачи о конвекции морской воды в плоском слое, подогреваемом снизу, однако, впоследствии было показано, что данная система является хорошей моделью и для многих других физических явлений (например, модель динамики одномодового лазера, описание диссипативного осциллятора с инерционной нелинейностью и т.д.).

Известно, что при значениях управляющих параметров $\sigma = 10$; $b = 8/3$ и при $r < r^* \cong 166.07$ временная реализация $x(t)$ представляет собой устойчивое периодическое движение. При превышении порога r^* регулярные колебания $x(t)$ (ламинарная фаза) прерываются хаотическими всплесками, которые с ростом r становятся все более и более длительными, пока движение полностью не хаотизируется. Перемежаемость в данной системе классифицируется как перемежаемость I типа [42].

На рис. 1 показана временная реализация $x(t)$ системы Лоренца (7) при значении бифуркационного параметра $r = 166.07$ и соответствующая ей проекция

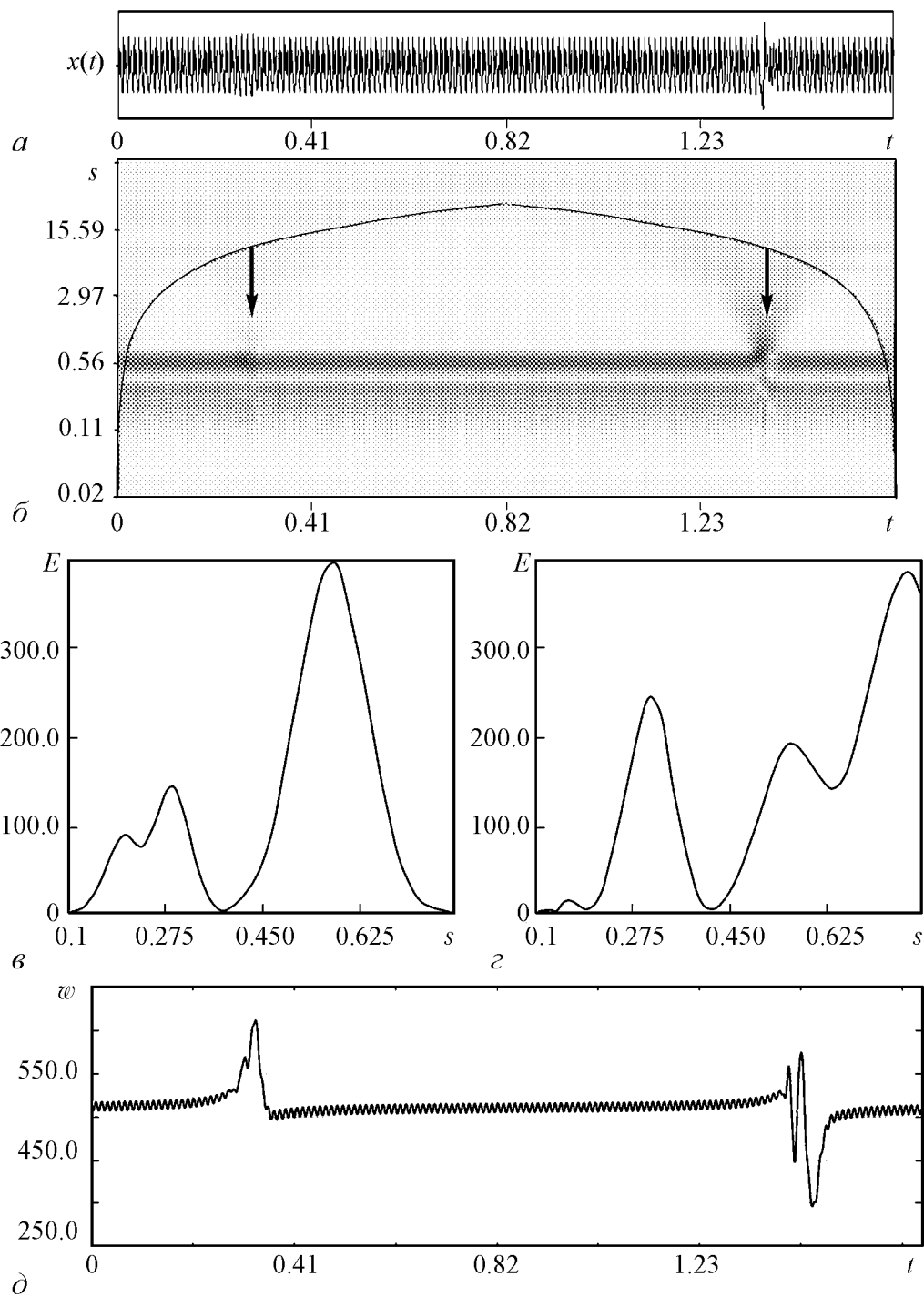


Рис. 1. *a* – Временная реализация $x(t)$ системы Лоренца (7) при $r = 166.07$. *б* – Проекция распределения амплитуды вейвлет-преобразования $|W(t, s)|$, рассчитанного по временной реализации $x(t)$, на пространственно-временную плоскость (t, s) . Интенсивность градаций серого цвета пропорциональна численно полученному вейвлетному спектру $|W(t, s)|$. Сплошная линия ограничивает область влияния красных эффектов, достоверные данные располагаются ниже этой линии [3,9]. Стрелками показаны структуры, соответствующие турбулентной фазе перемежающегося поведения в исследуемой временной реализации. *в* и *г* – Профили вейвлет-поверхности $|W(t, s)|$, соответствующие ламинарной (*в*) и турбулентной (*г*) фазам временной реализации $x(t)$ системы Лоренца. На профиле вейвлет-поверхности ламинарной фазы отчетливо видны три максимума, соответствующие характерным временным масштабам: $s_1 \approx 0.2$, $s_2 \approx 0.3$ и $s_3 \approx 0.56$. *д* – Энергия вейвлет-спектра $w(t)$, приходящаяся на диапазон характерных временных масштабов $s \in S = (0.1; 0.6)$

вейвлет-поверхности $|W(t, s)|$ на плоскость (t, s) . Наиболее темные участки проекции $|W(t, s)|$ на плоскость (t, s) (рис. 1, б) соответствуют максимумам вейвлет-поверхности, кривая на рисунке ограничивает область влияния краевых эффектов. На проекции вейвлет-поверхности четко выделяются структуры, соответствующие ламинарной и турбулентной фазам перемежающегося поведения во временной реализации. Иными словами, если отвлечься от физического объяснения наблюдаемого поведения системы, на рис. 1 представлен временной ряд, на котором в разные периоды времени преобладает динамика, обусловленная различными волновыми компонентами (регулярной и стохастической). Структура вейвлет-поверхности, соответствующая регулярной фазе движения, имеет профиль $W(t, s)|_{t=\text{const}}$ с двумя глобальными максимумами, соответствующими характерным временным масштабам $s_1 \approx 0.2$, $s_2 \approx 0.3$ и $s_3 \approx 0.56$ (см. рис. 1, в, на котором показано мгновенное распределение энергии вейвлет-спектра по временным масштабам $E(s)$). Этим максимумам вейвлет-поверхности соответствуют три темные области на проекции поверхности $|W(t, s)|$, расположенные параллельно оси времени (см. рис. 1, б). Профиль поверхности $|W(t, s)|$ не изменяется с течением времени t в пределах ламинарной фазы. Однако с наступлением режима турбулентной динамики вид поверхности $|W(t, s)|$ сильно изменяется. Можно сказать, что в режиме хаотической динамики наблюдается «всплеск» разномасштабных колебательных явлений. Это хорошо видно на рис. 1, г. Распределение энергии вейвлет-спектра по временным масштабам $E(s)$ существенным образом отличается от распределения, соответствующего ламинарной фазе (ср. с рис. 1, в).

На рис. 1, б видно, что области вейвлет-поверхности, соответствующие турбулентным фазам, четко локализованы во времени [39]. Также видно, что в пределах ламинарной фазы функция $w(t)$ имеет структуру, близкую к периодической, и совершает колебания вблизи среднего значения $w_0(t) \approx 510$ с амплитудой, не превышающей величины в 10 единиц. В течение турбулентной фазы $w(t)$ испытывает резкие скачки значений (рис. 1, д), что позволяет точно диагностировать различные фазы движения. Моменты времени, в которые величина $|w(t) - w_0(t)|$ не превышает пороговое значение $D = 10$, считаются ламинарными фазами, а интервалы времени, для которых выполняется условие $|w(t) - w_0(t)| > D$ – турбулентными. Таким образом, исследователь имеет возможность численно оценить продолжительность хаотической фазы и соотношение длительностей турбулентной и ламинарной фаз динамики системы при различных значениях критического параметра r [41].

3. Анализ и диагностика различных волновых компонент полевых данных наземной сейсмической разведки

Все возрастающая потребность в энергетических ресурсах и повышение мировых цен на нефть настоятельно диктует необходимость постоянного и интенсивного поиска новых месторождений нефти и газа. В связи с этим актуальной является задача разработки новых технологий обработки и интерпретации данных сейсморазведки как геофизического метода, играющего ведущую роль в комплексе геолого-разведочных работ на нефть и газ. Основными результатами полевой геофизической

разведки сейсмическим способом являются сейсмограммы, которые представляют собой цифровые записи упругих колебаний, вызываемых взрывами или другими источниками.

На рис. 2 показана типичная сейсмограмма общего пункта взрыва, 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, то есть может быть численно описана набором амплитуд упругих колебаний с шагом дискретизации по времени, в данном случае 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 50 метров по профилю. Следовательно, для записи только одного сейсмического профиля может потребоваться количество

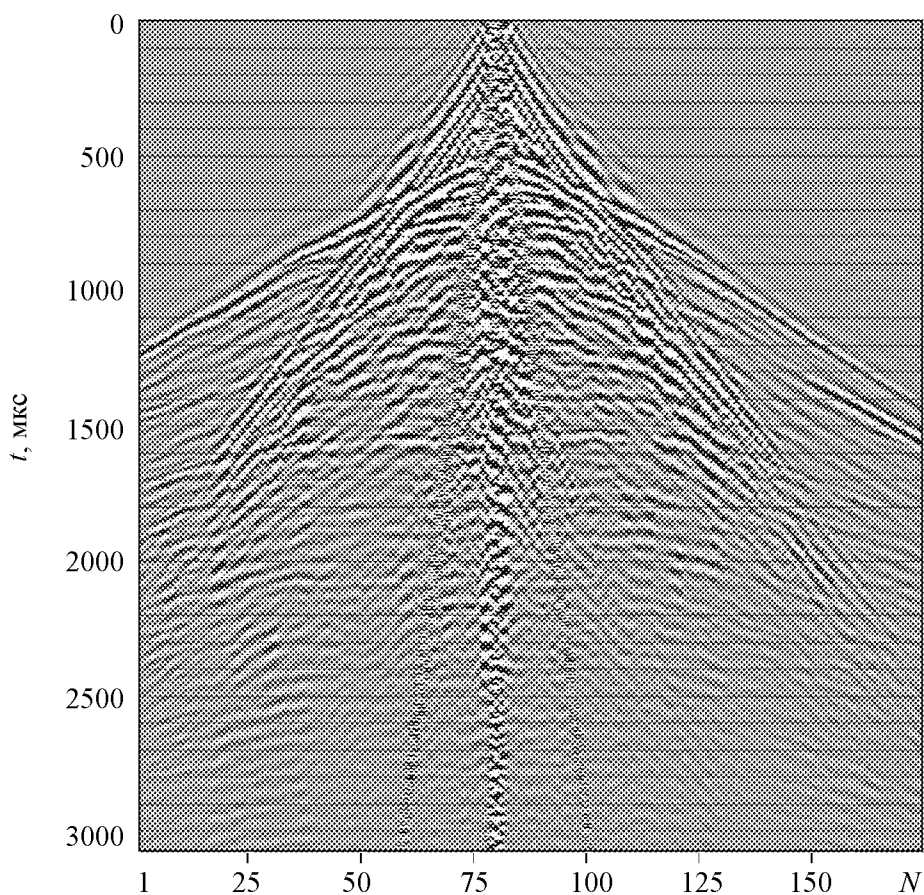


Рис. 2. Сейсмограмма общего пункта возбуждения волнового поля первичного полевого материала. По оси абсцисс отложен номер трассы N , по оси ординат – время регистрации сейсмических колебаний t

памяти, исчисляемое гигабайтами. Для детального геологического изучения небольших месторождений нефти и газа, характерных для 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. Так как наиболее полная и точная геологическая интерпретация данных сейморазведки 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 первые терабайты памяти. В связи с вышеизложенным, становится понятным, что стоящая в центре данной статьи задача разработки новых высокоэффективных алгоритмов диагностики волн-помех в автоматическом режиме особенно актуальна.

Обратимся к представленному на рис. 2 полевому материалу. Отметим, что ключевым понятием в теории сейморазведки является понятие годографа [1]. Годографом называется зависимость времени прихода волны в точку наблюдения от координат этой точки. Сейсмический годограф представляет собой ось синфазности – то есть линию, соединяющую точки на разных трассах, колеблющиеся в одинаковой фазе. При простом визуальном анализе первичной сейсмограммы, приведенной на рисунке, хорошо видно, что, кроме полезных однократно отраженных волн, характеризующихся гиперболическими годографами, сейсмическая запись содержит в себе множество волн других типов. При работах методом отраженных волн 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 помехам принято относить прямую волну и поверхностные волны Рэлея. Среднескоростные помехи обусловлены перераспределением энергии падающей волны на границах раздела упругих свойств среды (обменные волны) и явлением полного внутреннего 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 общего пункта взрыва (см. рис. 2).

Временной ряд одной из трасс (см. рис. 2, трасса 88 сейсмограммы) показан на рис. 3, *а*. Соответствующая вейвлетная поверхность представлена на рис. 3, *б*, из которого видно, что при преобладании различных волновых компонент зарегистрированного сейсмического сигнала энергия вейвлетного спектра перераспределяется

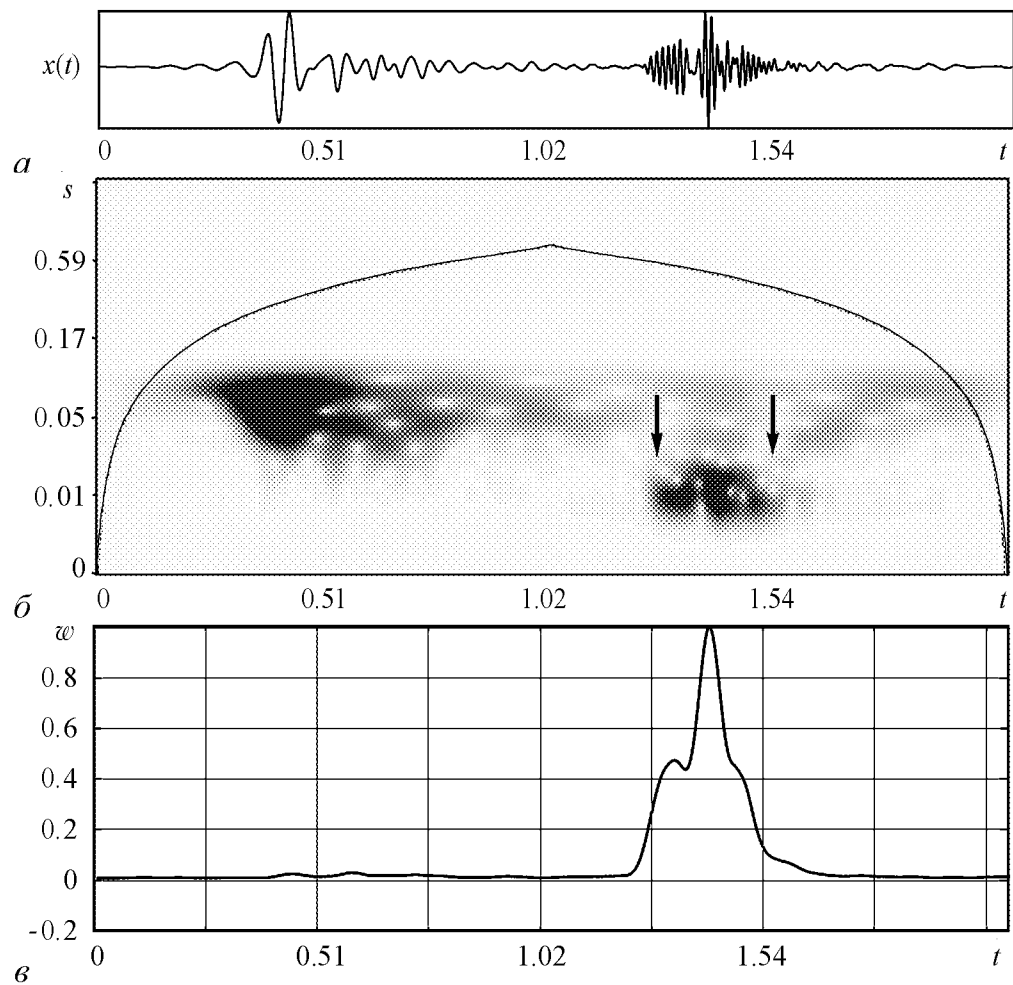


Рис. 3. *а* – Временной ряд, соответствующий одной из трасс сейсмограммы (трасса 88). *б* – Проекция распределения амплитуды вейвлет-преобразования $|W(t, s)|$, рассчитанного по временной реализации $x(t)$, на пространственно-временную плоскость (t, s) . Интенсивность градаций серого цвета пропорциональна численно полученному вейвлетному спектру $|W(t, s)|$. Сплошная линия ограничивает область влияния краевых эффектов, достоверные данные располагаются ниже этой линии [3, 9]. Стрелками показана зона регистрации помех, вызванных волнами звукового типа. *в* – Энергия вейвлетного спектра $w(t)$, приходящаяся на диапазон характерных временных масштабов $s \in S = (0.089; 0.02)$

различными способами. Стрелками отмечена область, отвечающая регистрации звуковой помехи. Элементарные вычисления показывают, что звуковая помеха демонстрирует увеличение амплитуды вейвлетных коэффициентов в диапазоне высоких частот 50...500 Гц и, соответственно, низких значений масштабов вейвлетного преобразования, в то время как полезный сигнал характеризуется высокими значениями коэффициентов вейвлетного преобразования в низкочастотном диапазоне частот (10...100 Гц). На основании этого явления построен алгоритм автоматического распознавания помехи звукового типа.

Поскольку волны-помехи звукового и поверхностного типов характеризуются увеличением энергии, приходящейся на определенный диапазон временных масштабов (частот), не совпадающий с диапазоном частот полезного сейсмического сигнала, удобно рассматривать интегральную величину мгновенной энергии на характерном для волны-помехи диапазоне масштабов F согласно формуле (6), где диапазон $F \in (0.0089; 0.02)$. На рис. 3, в приведена рассчитанная по рассматриваемому временному ряду и нормированная на единицу зависимость $w(t)$ по диапазону масштабов F . Очевидно, если в момент времени t имеет место волна-помеха, то справедливо следующее соотношение:

$$w(t) \geq w_0, \quad (8)$$

где w_0 – пороговое значение энергии, определяемое экспериментально единожды для всего полевого материала, отработанного на площади со схожими сейсмогеологическими условиями. Для данного полевого материала пороговое значение было выбрано $w_0 = 0.3$. Следует отметить, что с единым порогом производился расчет не одной сейсмограммы, а всего сейсмического профиля, отработанного по одной методике, но в достаточно изменчивых поверхностных и приповерхностных сейсмогеологических условиях. Данный факт говорит о высокой устойчивости предлагаемого метода к неизбежно присутствующим стохастическим шумам и флуктуациям геологической среды.

Итак, предложенный универсальный алгоритм на основании непрерывного вейвлетного преобразования легко позволяет осуществлять диагностику зоны регистрации волн-помех звукового типа. В одноканальном режиме для каждой трассы рассчитывается зависимость $w(t)$ на диапазоне масштабов F . Очевидно, что при реальной обработке по профилю принципиальная одноканальность метода позволит провести этот и последующие этапы вычисления параллельно для различных трасс массива полевого материала. По рассчитанным зависимостям $w(t)$ определяются диапазоны времени, на которых выполняется условие (8) и, кроме того, присутствует глобальный максимум зависимости $w(t)$ для предотвращения возможной ложной диагностики. Таким образом, после выполнения данных действий для каждой трассы в автоматическом режиме определяются волны-помехи на записях сейсмограмм.

Результат обработки данных всех трасс рассматриваемой сейсмограммы показан на рис. 4. На ней после проведенного вейвлетного анализа выделена область пространственной и временной регистрации искомым помех, обусловленных волнами звукового и поверхностного типов (отмечена линиями на рисунке). Отметим, что при проведении стандартной обработки выделение данного типа волн производится либо вручную, либо требует применения сложных многоканальных процедур. С ис-

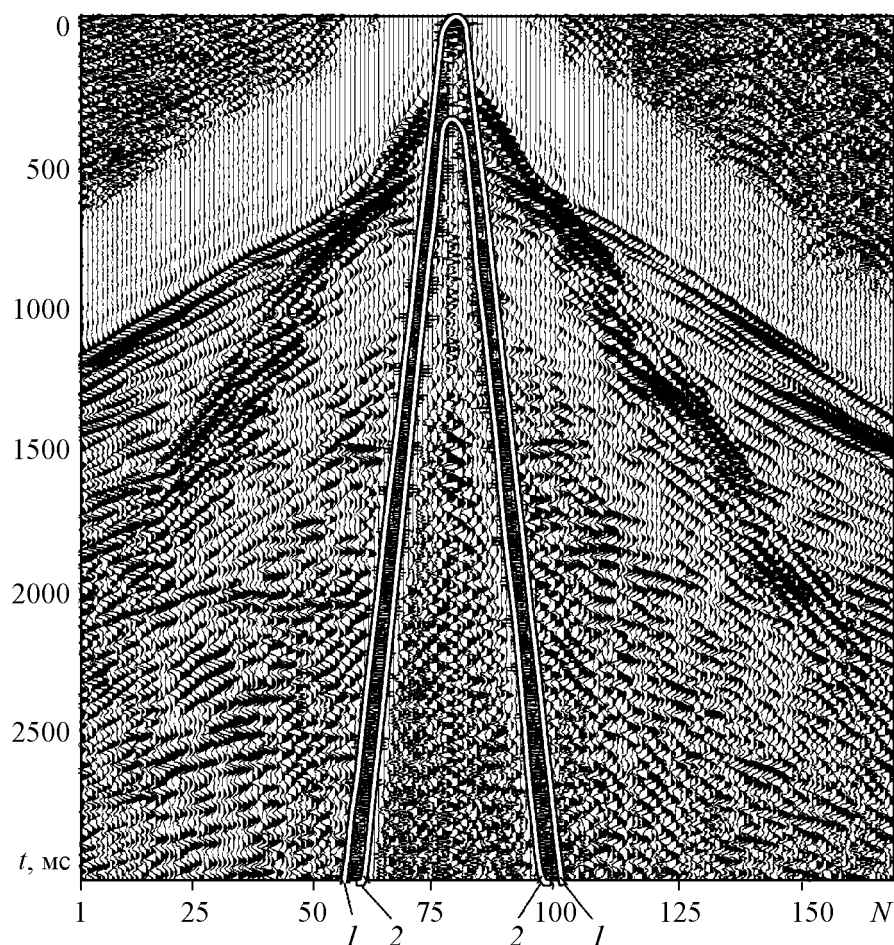


Рис. 4. Результат обработки данных всех трасс на полевой сейсмограмме ОПВ (см. рис. 2). Линиями отмечена область пространственной и временной регистрации искомым помех, обусловленных волнами звукового и поверхностного типов, выделенная автоматически с помощью предложенного метода. Для большей наглядности полевой материал представлен после процедуры одноканальной автоматической регулировки амплитуд

пользованием рассмотренного метода появляется возможность быстрой автоматической диагностики области регистрации волн-помех и последующей их фильтрации. Разработка методов последующей одноканальной фильтрации будет являться продолжением данной научной работы.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе предлагается метод диагностики различных режимов волновой динамики по сложным нестационарным сигналам различной природы. Данный метод основан на непрерывном вейвлет-преобразовании, апробирован на модельных системах нелинейной динамики и с успехом может быть применен для исследования экспериментальных данных геофизической природы. Предложенный метод является устойчивым к влиянию шумов и флуктуаций, искажающих исходную временную реализацию. Высокая эффективность предложенного метода

в области геофизики обусловлена принципиальной одноканальностью, малыми численными затратами на обработку информации и, в перспективе, большими возможностями по расширению сферы дальнейшего применения.

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

Библиографический список

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: Издательство УГГА, 2001.
3. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения М.: Физматлит, 2003.
4. Блаттер Ч. Вейвлет-анализ. Основы теории. М.: Постмаркет, 2001.
5. Анфиногентов В.Г., Короновский А.А., Храмов А.Е. Вейвлетный анализ и его использование для анализа динамики нелинейных динамических систем различной природы // Изв. РАН, сер. физич. 2000. Т. 64, № 12. С. 2383.
6. Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // Bulletin of the American Meteorological Society. 1998. Vol. 79. P. 61.
7. Peng C.-K., Havlin S., Stanley H.E., Goldberger A. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series // Chaos. 1995. Vol. 5. P. 82.
8. Muzy J.F., Bacry E., Arneodo A. The multifractal formalism revisited with wavelets // International Journal Bifurcation Chaos. 2010. Vol. 4, № 2. P. 245.
9. Daubechies I. Ten lectures on wavelets. Philadelphia: SIAM, 1992.
10. Meyer Y. Wavelets: Algorithms and Applications. Philadelphia: SIAM, 1993.
11. Mallat S.G. A wavelet tour of signal processing. New York: Academic Press, 1998.
12. Addison P.S. The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science Engineering, Medicine and Finance. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2002.
13. Flandrin P. Some aspects of non-stationary signal processing with emphasis on time-frequency and time-scale methods // In Wavelets / Ed. by J.M. Combes, A. Grossmann, Ph. Tchamitchian. Springer, Berlin. 1989. P. 68.
14. Grossman A., Morlet J. Decomposition of Hardy function into square integrable wavelets of constant shape // SIAM J. Math. Anal. 1984. Vol. 15, № 4. P. 273.
15. Holschneider M. Wavelets: An analysis tool. Oxford: Oxford University Press, 1995.
16. 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.
17. 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 ТГУ. 2010. Т. 15, № 2. С. 524.

18. Пискун П.В. Программно-алгоритмическое обеспечение непрерывного вейвлет-преобразования при обработке и интерпретации геофизических полей. М.: МГУ, 2006.
19. Пискун П.В., Петров А.В., Зиновкин С.В. Компьютерная технология Коскад СЕЙС комплексного анализа сейсмической и скважинной информации. Тезисы докладов VII международной научно-практической конференции Геомодель-2005, 2005. С. 42.
20. Sitnikova E.Yu., Hramov A.E., Koronovskii A.A., Luijtelaar E.L. Sleep spindles and spike-wave discharges in EEG: Their generic features, similarities and distinctions disclosed with Fourier transform and continuous wavelet analysis // Journal of Neuroscience Methods. 2009. Vol. 180. P. 304.
21. Kumar P., Foufoula-Georgiou E. Wavelet analyses for geophysical applications // Reviews of Geophysics. 1997. Vol. 35. P. 385.
22. Corso G., Kuhn P.S., Lucena L.S., Thom Z.D. Seismic ground roll time-frequency filtering using the Gaussian wavelet transform // Physica A. 2003. Vol. 318. P. 551.
23. Yuen D.A., Vincent A.P., Kido M., Vecsey L. Geophysical Applications of Multidimensional Filtering with Wavelets // Pure and Applied Geophysics. 2001. Vol. 159. P. 2285.
24. Kritski A., Vincent P., Yuen D.A., Carlsen T. Adaptive wavelets for analyzing dispersive seismic waves // Geophysics. 2007. Vol. 72. P. V1-V11.
25. Овчинников А.А., Храмов А.Е., Люттьеханн А., ван Луйтелаар Ж. Метод диагностики характерных паттернов на наблюдаемых временных рядах и его экспериментальная реализация в режиме реального времени применительно к нейрофизиологическим сигналам // ЖТФ. 2011. Т. 81, № 1. С. 3.
26. Liner C., Li C., Gersztenkorn A., Smythe J. SPICE: A new general seismic attribute. (SEG Expanding Abstracts.) 2004. P. 52.
27. Naveau P. and Oh H. Polynomial Wavelet Regression for Images With Irregular Boundaries // IEEE Transactions On Image Processing. 2004. Vol. 13, № 6. P. 35.
28. Domingues M.O., Mendes O.Jr., Mendes da Costa F. On wavelet techniques in atmospheric sciences // Advances in Space Research. 2005. Vol. 35. P. 831.
29. Аку П., Ричардс П. Количественная сейсмология. Т. 1. М.: Мир, 1983.
30. Rutherford S.R., Williams R.H. Amplitude -versus-offset variations in gas sands // Geophysics. 1989. Vol. 54. P. 680.
31. Castagna J.P., Backus M.M. Offset-dependent reflectivity – Theory and practice of AVO analysis // Soc. Expl. Geophys. 1993. P. 3.
32. Ross C.P. Effective AVO crossplot modeling: A tutorial // Geophysics. 2000. Vol. 65, № 3. P. 700.
33. Dong W. AVO detectability against tuning and stretching artifacts // Geophysics. 1999. Vol. 64, № 2. P. 494.
34. Foster D.J., Keys R.G., Reilly J.M. Another perspective on AVO crossplotting // The Leading Edge. 1997. Vol. 16, № 9. P. 1233.
35. Gray D., Goodway B., Chen T. Bridging the Gap: Using AVO to detect changes in fundamental elastic constants. SEG, Expanded Abstracts, 1999.
36. Иноземцев А.Н., Коростышевский М.Б., Воскресенский Ю.Н., Баранский Н.Л., Бадейкин А.Н. Влияние спектральных характеристик сейсмических сигналов

на образ и класс AVO-аномалий в тонкослоистых средах // Геофизика. Спец. выпуск. Технологии сейсморазведки-II. 2003. С. 167.

37. *Валиев С.Г., Ли И.А.* Результаты AVO-анализа сейсмических записей на нефтегазовых месторождениях шельфа Сахалина // Геофизика. 2003. № 2. С. 21.
38. Техническая инструкция по проведению сейсморазведочных работ на нефть и газ. М., 2003.
39. *Короновский А.А. and Храмов А.Е.* Об эффективном анализе перехода к хаосу через перемежаемость с помощью вейвлетного преобразования // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27, № 1. С. 3.
40. *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Midzyanovskaya I.S., Sitnikova E., Rijn C.M.* On-Off intermittency in time series of spontaneous paroxysmal activity in rats with genetic absence epilepsy // Chaos. 2006. Vol. 16. P. 043111.
41. *Короновский А.А., Минюхин И.М., Тищенко А.А., Храмов А.Е., Мидзяновская И.С., Ситникова Е.Ю., Van Luijelaar E.L., Rijn C.M.* Применение непрерывного вейвлет-преобразования для анализа перемежающегося поведения // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15, № 4. С. 34.
42. *Шустер Г.* Детерминированный хаос. М.: Мир, 1988.

*Саратовский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского*

*Поступила в редакцию 2.12.2010
После доработки 3.02.2011*

THE METHOD OF AUTOMATIC DIAGNOSTICS OF VARIOUS COMPONENTS OF COMPLEX SIGNALS ON THE BASE OF WAVELET TRANSFORM AS APPLIED TO GEOPHYSICS PROBLEMS

A.E. Filatova, A.E. Artemiev, A.A. Ovchinnikov, A.A. Koronovskii, A.E. Hramov

The article discusses the method of analysis and automatic diagnostics of the characteristics of various components of complex signals on digital data on the basis of continuous wavelet transformation. The results of processing of experimental data are exposed. The article shows that the offered method of single-channel continuous wavelet transformation with the subsequent analysis of instantaneous transformation energy in a certain frequency band allows tracing a zone of the registered high-intensity waves of sound and superficial type in an automatic mode.

Keywords: Automatic diagnostics, wavelet analysis, digital signal, seismic exploration works, sound and superficial waves.



Филатова Анастасия Евгеньевна – родилась в Саратове (1983). Окончила факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета (2005). Кандидат физико-математических наук (2008). Старший научный сотрудник лаборатории физики нелинейных явлений Отделения физики нелинейных систем Саратовского государственного университета. Область научных интересов – нелинейная динамика систем различной природы, методы анализа динамических систем, вейвлетный анализ. Автор ряда статей в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: anefila@gmail.com



Артемьев Александр Евгеньевич – родился в Саратове (1975). Окончил геологический факультет Саратовского государственного университета (1997). Кандидат геолого-минералогических наук (2001). Доцент кафедры геофизики геологического факультета Саратовского государственного университета. Основные научные интересы связаны с развитием методики обработки и интерпретации данных сейсморазведки, моделированием процессов распространения упругих волн и вейвлетным анализом. Автор ряда статей в рецензируемых научных журналах.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: aartemiev@gmail.com



Овчинников Алексей Александрович – родился в Саратове (1985), окончил Саратовский государственный университет (2008). Ассистент кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. Область научных интересов – влияние шумов на явления синхронизации.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: ovchinnikov@nonlin.sgu.ru



Храмов Александр Евгеньевич – окончил физический факультет Саратовского госуниверситета (1996). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1999) и доктора (2006) физ.-мат. наук. Профессор, заместитель заведующего кафедрой электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов – радиофизика в той ее части, которая связана со взаимодействием свободных электронов с электромагнитными полями, нелинейная динамика распределенных активных сред, методы анализа и моделирования динамических систем. Опубликовал (в соавторстве) книгу «Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков» (Т. 1, М.: Физматлит, 2003; Т. 2, М.: Физматлит, 2004), монографию «Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения» (Москва: Наука, Физматлит, 2003), двухтомную коллективную монографию «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот» (М.: Физматлит, 2009), коллективную монографию «Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов» (М.: Изд.-во МГУ, 2010) и др.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: aeh@nonlin.sgu.ru



Короновский Алексей Александрович – родился в Саратове (1972). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1995), доктор физико-математических наук (2007), профессор кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. Область научных интересов – нелинейная динамика и ее проявления в различных сферах человеческой деятельности, в том числе нелинейная динамика социально-экономических процессов. Автор ряда статей в центральной печати, а также лекций по СВЧ-электронике в 2-х томах (в соавторстве) и 4-х монографий (в соавторстве) «Нелинейная динамика в действии» и «Непрерывный вейвлетный анализ», вышедших в Издательстве ГосУНЦ «Колледж», двухтомной монографии «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот» (М.: Физматлит, 2009, под редакцией А.А. Короновского, А.А. Кураева, Д.И. Трубецкова и А.Е. Храмова), монографии «Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов» (М.: Изд.-во МГУ, 2010, под редакцией С.И. Ильина и Д.И. Трубецкова) и др.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: alkor@nonlin.sgu.ru