

## Разработка методов экспресс-оценки качества полевого материала на базе вейвлетных преобразований

■ Руннова А.Е., СГТУ, г. Саратов, Крылов А.А., ООО «ГАЗПРОМ ГЕОРЕСУРС», г. Саратов

■ Храмов А.Е., СГТУ, г. Саратов

Сегодня одним из наиболее перспективных в применении из новых математических методов к задачам поисковой сейсмической геофизики является вейвлетный анализ. В [1–3] представлены результаты разработок различных методов диагностики и фильтрации волновых компонент для полевых данных наземной сейсмической разведки МОВ МОГТ на основе непрерывного вейвлетного анализа. Среди основных достоинств разрабатываемых на основе вейвлетных преобразований методов можно особо подчеркнуть следующие: принципиальные возможности автоматизации процесса обработки и одноканальности разработанных алгоритмов; незначительные затраты машинного времени; высокая точность и устойчивость к шумам.

Настоящая статья посвящена вопросам адаптации вейвлетного преобразования к конкретным задачам геофизической разведки и к характерным особенностям цифровых сигналов, получаемых в результате проведения наземной сейсмической съемки. В статье также представлены разработанные подходы к классификации осцилляторных паттернов в экспериментальных временных рядах и диагностике на цифровых материалах сейсморазведки МОВ МОГТ полезного сигнала, несущего информацию об отражающих целевых горизонтах, шумовых компонент записи, а также зарегистрированных регулярных волн-помех различных классов, амплитудные, частотные и фазовые характеристики которых обусловлены глубинными и поверхностными сейсмогеологическими условиями.

Непрерывное вейвлетное преобразование с комплексным материнским вейвлетом для хаотического временного ряда  $x(t)$  осуществляется [4]:

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

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 ( $s \in \mathbb{R}_+$ ), отвечает за ширину вейвлета  $\psi_{s, t_0}(t)$ , а  $t_0 \in \mathbb{R}$  – 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.

На основе преобразования (1) нами созданы однотрассовые автоматические методы диагностики различных волновых паттернов сейсмических записей с возможностью адаптивной подстройки к конкретным сейсмогеологическим особенностям полевых материалов. Разработанные подходы были апробированы на различных экспериментальных данных, включая полевые материалы сейсморазведки, полученных в различных полевых условиях.

Возможности анализа сигналов на основе конкретного вейвлетного преобразования целиком будут определяться видом и свойствами материнского

вейвлета (2). Известен достаточно обширный ряд классических базовых вейвлетных функций, хорошо зарекомендовавших себя для изучения сложных нестационарных сигналов различной природы. Среди наиболее распространенных и универсальных по своим возможностям классических материнских вейвлетов можно выделить следующие базисные функции: морлет-вейвлет, МНАТ-вейвлет; паул-вейвлет [4–7].

На рисунке 1 представлен временной ряд данных, составляющих полевой материал, т.е., один канал, снятый в одном из пунктов регистрации (ПП № 85 при выбранном ПВ на сейсмограмме на рисунке 3) и результаты построения соответствующих проекций распределения амплитуды  $|W(t_0, s)|$  вейвлетного

преобразования, полученных с помощью различных базисных вейвлетных функций (морлет-вейвлета (а), МНАТ-вейвлета (б); паул-вейвлета (в)). Отметим, что наилучшее разрешение по частоте предоставляет использование в качестве материнской функции – морлет-вейвлета:

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

где  $\omega_0$  – параметр вейвлета. Очевидно, что при увеличении  $0\omega$  будет расти локализация представления результатов в Фурье-пространстве, но будет ухудшаться разрешение данных в реальном времени [5, 8].

Наилучшую локализованность наблюдающихся волновых компонент во

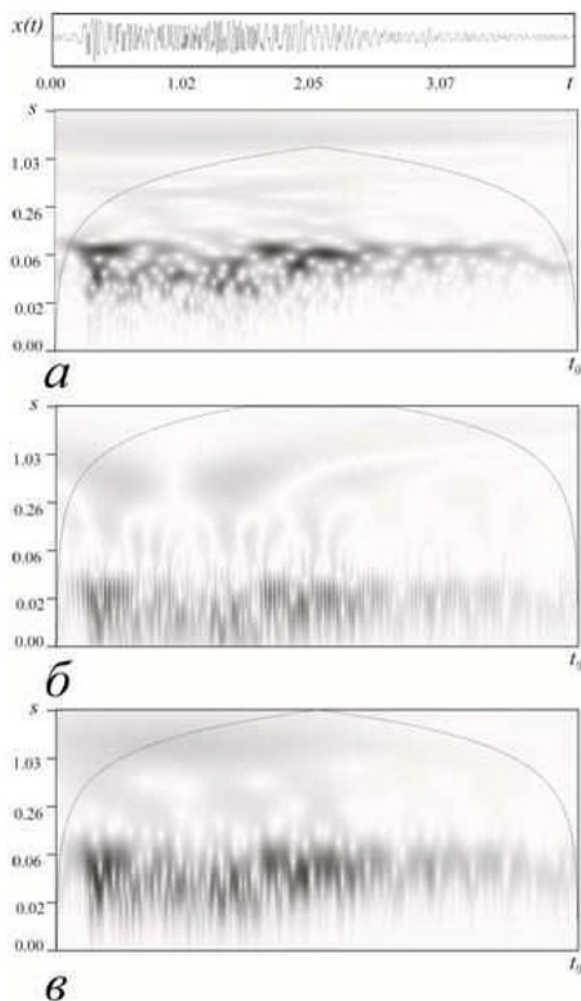


Рис. 1. Временная реализация, полученная регистрацией в одном из каналов пункта приёма сейсмического отклика; соответствующая проекция распределения амплитуды  $|W(t_0, s)|$  вейвлетного преобразования, полученная с помощью базисного морлет-вейвлета ( $\omega=6.0$ ) (а); проекция распределения амплитуды вейвлетного преобразования с базисным МНАТ-вейвлетом (б); проекция распределения амплитуды вейвлетного преобразования с базисным паул-вейвлетом (в). Длительность временной реализации  $N=3000=2^{11}$  отсчетов,  $\Delta t = 0.002$ . Конус отмечает область влияния краевых эффектов.

времени демонстрирует применение вейвлетного анализа с действительным базисным МНАТ–вейвлетом:

$$\psi_0(\eta) = \frac{(-1)^{m+1} j^m m!}{\left[ \Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right) \right]^{0.5}} \frac{d^m}{d\eta^m} e^{-\frac{\eta^2}{2}}. \quad (4)$$

Материнский вейвлет, соответствующий  $m = 2$  и называется МНАТ–вейвлетом (Mexican Hat – «Мексиканская шляпа»).

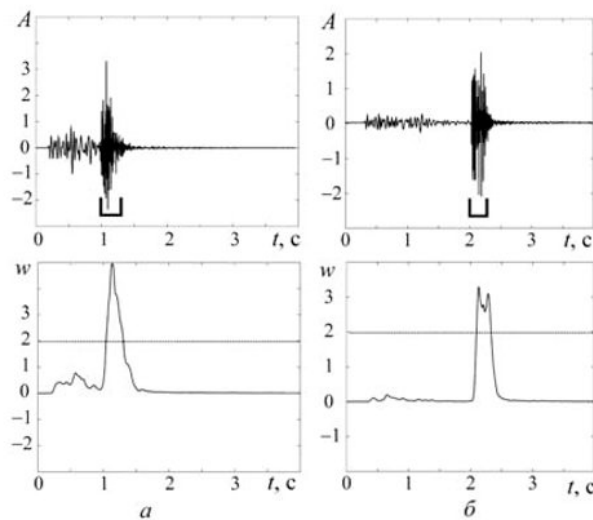
Отметим, что, кроме перечисленных базисных функций широкой популярностью пользуется вейвлет Паула:

$$\psi_0(\eta) = \frac{2^m j^m m!}{\sqrt{\pi} (2m!)} (1 - j\eta)^{-(m+1)}, \quad (5)$$

где  $m$  – порядок вейвлета. Непрерывное вейвлетное преобразование, проведенное на основе вейвлета Паула (5) несколько лучше разрешает временную область, чем морлет-вейвлет, но по сравнению с морле обладает значительно меньшими возможностями разделения близко расположенных частот (или, говоря более корректно с математической точки зрения, масштабов).

Основная идея разработанного метода диагностики различных режимов волновой динамики заключается в оценке мгновенной энергии преобразования  $w(t)$  в частотном диапазоне, характерном для искомого колебательного паттерна. При превышении величиной  $w(t)$  некоторого критического уровня, определяемого опытным путем или известным априори, производится вывод о наличии того или иного типа динамики в сигнале. Расчет вейвлетного преобразования первоначально осуществлялся с материнским морлет-вейвлетом.

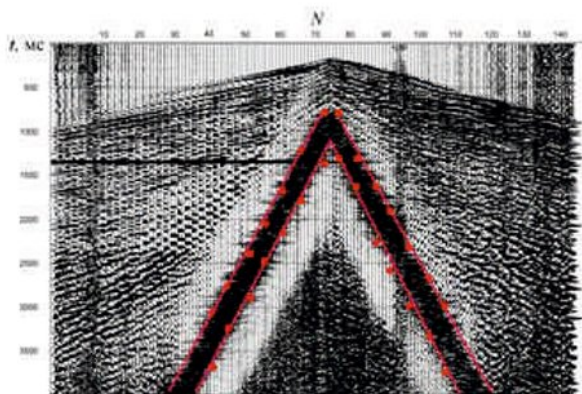
На рисунке 2 показаны две характер-



▲ Рис. 2. Результаты обработки различных трасс (трасса 76 (а) и трасса 96 (б)) и автоматического выделения временной области, соответствующей волне-помехе. Сверху показан исходный сигнал с выделенной экспертом волной-помехой. Снизу – результат расчета мгновенной энергии  $w(t)$  вейвлетного преобразования. Штриховой линией на нижних рисунках нанесен порог  $w_{\text{пор}}$ .

ные трассы рассматриваемой сейсмограммы (рисунки а и б) и результаты расчета мгновенной энергии на диапазоне масштабов  $F = (60-200)$  Гц. Хорошо видно, что область волны-помехи характеризуется значительным возрастанием амплитуды мгновенной энергии вейвлетного преобразования  $w$ . Выбирая опытным путем пороговое значение  $w_{\text{пор}} = 2$ , мы можем эффективно выделить область на сейсмограмме, в которой наблюдается волновое поле помех различного типа. Результат обработки данных всех трасс на сейсмограмме показан на рисунке 3.

На ней в результате проведенного автоматизированного вейвлетного анализа выделена область пространственной и временной регистрации искомого помех, обусловленных волнами звукового и поверхностного типов (отмечена линиями на рисунке). Отметим, что при



▲ Рис. 3. Результат обработки данных всех трасс на сейсмограмме ОПВ. Линиями отмечена область пространственной и временной регистрации искомых помех, обусловленных волнами звукового и поверхностного типов, выделенная автоматически с помощью рассмотренного метода. Для удобства визуализации на полевом материале было проведено АРУ.

проведении стандартной обработки выделение данного типа волн производится либо вручную, либо требует применения сложных многоканальных процедур. Очевидным достоинством рассмотренного метода является возможность быстрой автоматической обработки сейсмограммы и выделения области волны-помехи.

Выбранный для численных экспериментов в качестве «стандартного» типового базиса вейвлет-морлет [12] с параметром  $\omega_0 = 2\pi$  обладает хорошо локализованным в реальном и фурье-пространстве базисом. Выбор данного материнского вейвлета для численных экспериментов обусловлен близостью его формы к виду регистрируемого при «типичных» полевых работах сейсмического импульса. Отметим, что возможности построения вейвлетного материнского базиса на основе теоретических представлений о форме сейсмического импульса весьма ограничены. К примеру, типичной моделью отраженной

волны, характерной для материалов наземной сейсмической разведки, полученной в результате невзрывных работ, является импульс Пузырева [2, 3]. Однако, во-первых, полевые материалы далеки от идеального нуля- или минимально-фазового состояния зарегистрированных сейсмоприемником колебаний [3]. К сожалению, вид сейсмического импульса очень сильно зависит как от записывающей и передающей аппаратуры, так и от непосредственных сейсмических свойств геологической среды. Во-вторых, в случае классического импульса Пузырева можно утверждать, что идеальной базисной функцией для проведения анализа на основе вейвлетного преобразования является уже указанный выше материнский вейвлет Морле, практически повторяющий в своей действительной части форму импульса Пузырева или, иными словами, адаптивно настроенный на форму такого идеального сигнала. Также хорошо подходят для изучения сейсмических данных МНАТ- и Паул-вейвлеты.

Однако, вследствие смешанного характера формы волнового импульса сейсмических записей, в качестве альтернативного варианта выбора вейвлетного базиса, оптимизированного для конкретных сейсмогеологических условий, использование типовых базисов вейвлет-преобразования (1) является не всегда уместным и более выгодным становится использование адаптивного вейвлет-анализа. В частности, большой интерес вызывает попытка создания вейвлетного подхода для обратного процесса усиления определённых участков записи в рамках реализации некоторой аналогии нелинейного подхода к усилению амплитуд зарегистрированных сейсмоколебаний. В рамках разработки комплекса программных вейвлет-метод

обработки данных уместно использовать численное конструирование адаптивных вейвлетов на основе отрезков анализируемых временных рядов [9, 10]. Нами предложена следующая процедура построения комплексной вейвлетной функции на основе временного ряда  $x(t)$ .

На первой стадии процедуры выделяется характерный временной масштаб  $\tau$  (или соответствующая ему частота  $\omega_\tau = \frac{2\pi}{\tau}$ ) нерегулярного нестационарного процесса  $x(t)$ . В случае исследуемых нерегулярных временных рядов геофизической природы, величина  $\tau$  будет сильно варьироваться для различных колебаний, суперпозиций которых данный сигнал является. Иными словами, разнообразные регулярные помехи и полезные отклики от отражающих геологических границ будут иметь различные характерные частоты  $\omega_\tau$ , что даёт возможность тонкой настройки вейвлетного преобразования для конкретных задач диагностики, стоящих перед геофизиком. Далее, определившись с периодом  $\tau$  искоемых колебаний, выбирается некий отсчет  $t_0$  во временной реализации сигнала  $x(t)$ , относительно которого и будем строить вейвлетный базис. Реальная и мнимая часть вейвлетной функции будет строиться в соответствии со следующими формулами [4, 5, 7, 10]:

$$\text{Re}\psi(t) = \pi^{-1/4} \left\langle x(t-t_0) \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(t-t_0)^p}{(n\tau)^p}\right) \right\rangle, \quad (6)$$

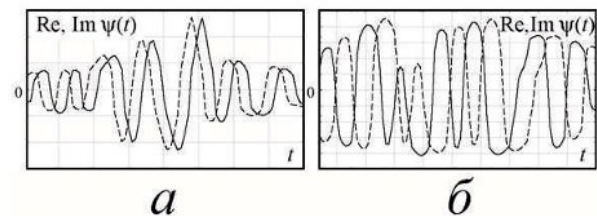
$$\text{Im}\psi(t) = \pi^{-1/4} \left\langle x(t-t_0 + \tau/2) \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(t-t_0)^p}{(n\tau)^p}\right) \right\rangle,$$

где  $\langle \dots \rangle$  обозначает операцию удаления среднего значения для удовлетворения условия нулевого среднего,  $n$  и  $p$  – параметры вейвлета. Из формулы (6) видно, что параметр  $t_0$  вейвлета характеризует отрезок ряда  $x(t)$ , который оказы-

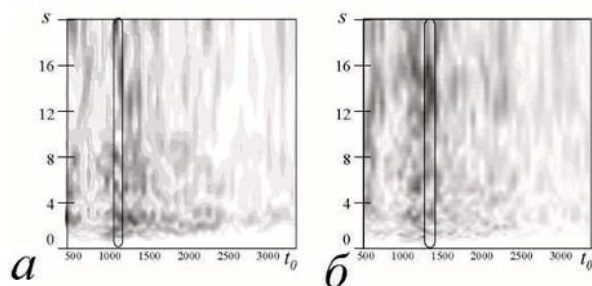
вает наибольшее влияние на вейвлетный спектр  $W(t, s)$ . Таким образом, вейвлетное преобразование (1) с базисом (6) позволит эффективно выделять из сигнала участки длиной  $\Delta t \approx 4\pi\tau$ , которые будут «похожи» или «однородны» с участком временного ряда  $x(t)$ , где  $t \in (t_0 - 2\pi\tau, t_0 + 2\pi\tau)$ .

На рисунке 4 продемонстрированы результаты расчета адаптивных вейвлетных функций (7) по уже рассмотренным данным с одного канала ПП № 85 (см. рисунки 1, 3 (б)). Видно, что в зависимости от выбора  $t_0$ , при сохранении всех остальных параметров неизменными, вид вейвлетной функции сильно меняется и определяется видом волновой компоненты, преобладающей на соответствующем временном интервале. На рисунке 4 а показан вид вейвлет-базиса, построенного по данным временной реализации, отвечающим первому сильному отраженному отклику на 1000–1100 мс, рисунок 4 б демонстрирует аналогичную вейвлетную функцию, рассчитанную по временному интервалу вблизи 1400 мс отражения от второго характерного горизонта.

На рисунке 5 приведены результаты построения соответствующих проекций распределения амплитуды  $|W(t_0, s)|$  вейвлетного преобразования, получен-



▲ Рис. 4. Вид адаптивных численно рассчитанных вейвлетных базисов (7) на основе временного ряда из трассы ПП № 85. Параметры  $n$  и  $p$  на рисунках а и б одинаковы и выбраны равными 2 и 4, соответственно.



▲ Рис. 5 Проекция распределения амплитуды  $|W(t_0, s)|$  вейвлетного преобразования, полученные с помощью адаптивных вейвлет-базисов, для трассы ПП № 85, (а): вейвлет-базис рассчитан вблизи  $t_0 = 1050$  мс, (б): вейвлет-базис рассчитан вблизи  $t_0 = 1454$  мс

ных с помощью созданных адаптивных базисных вейвлетных функций, для трассы № 85. Хорошо видно, что разработанные базисы позволяют осуществить «тонкую» настройку вейвлетного преобразования на определенные волновые особенности и позволяют легко диагностировать искомые участки геофизических сигналов, а именно время прихода целевых отражений от первой и второй отражающих геологических границ.

Таким образом, вейвлетные преобразования являются мощным инструментом исследования сложных зашумленных сильно нестационарных данных, а современные мощности вычислительной техники и одноканальный подход позволяют производить обработку гигантских массивов полевых данных за весьма разумные сроки. Особый интерес вызывает тот факт, что многие созданные членами авторского коллектива методики на базе вейвлетных преобразований уже задействованы в весьма различных отраслях наукоемких технологий – медицины, СВЧ-электроники, физической электроники и др. Общность особенностей экспериментальных сигналов, регистрируемых в самых различных условиях, делает современные методы исследования практически универсальными,

позволяя продвигаться в понимании общих закономерностей природы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного задания высшим учебным заведениям на 2016 год в части проведения научно-исследовательских работ (СГТУ-141).

#### Литература

1. Пискун П.В. Программно-алгоритмическое обеспечение непрерывного вейвлетного преобразования при обработке и интерпретации геофизических полей. М.: МГУ, 2006.
2. Филатова А.Е. и др. 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.
3. Руннова А.Е. и др. Вейвлеты в геофизике: обработка сигналов в сейсморазведке. М.: Университетская книга, 2013.
4. Короновский А. А., Храмов А. Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003.
5. Morlet J., Arens G., Fourgeau E., Gland D. Wave propagation and sampling theory – Part I: Complex signal and scattering in multilayered media // Geophysics. 1982. Vol. 47, No 2. PP. 203–221.
6. Foufoula-Georgiou E., Kumar P. Wavelets in geophysics. N.-Y.: Academic Press., 1994.
7. Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло А. С. Вейвлеты и их применение // УФН. 2001. Т. 171, № 5. С. 465–501.
8. Euskai M. B., Beylkin G., Coifman E. et al. Wavelets and their applications and data analysis. Boston, Jones and Bartlett, 1992.
9. Новиков Л. В. Адаптивный вейвлет-анализ сигналов // Научное приборостроение. 1999. Т. 9, № 2. С. 47–56.
10. Гусев В.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Применение адаптивных вейвлетных базисов к анализу нелинейных систем с хаотической динамикой // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29, № 18 С. 61–69.