

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

■ Руннова А.Е., СГТУ, г. Саратов, Крылов А.А., ООО «ГАЗПРОМ ГЕОРСУРС», 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 компонентах 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].

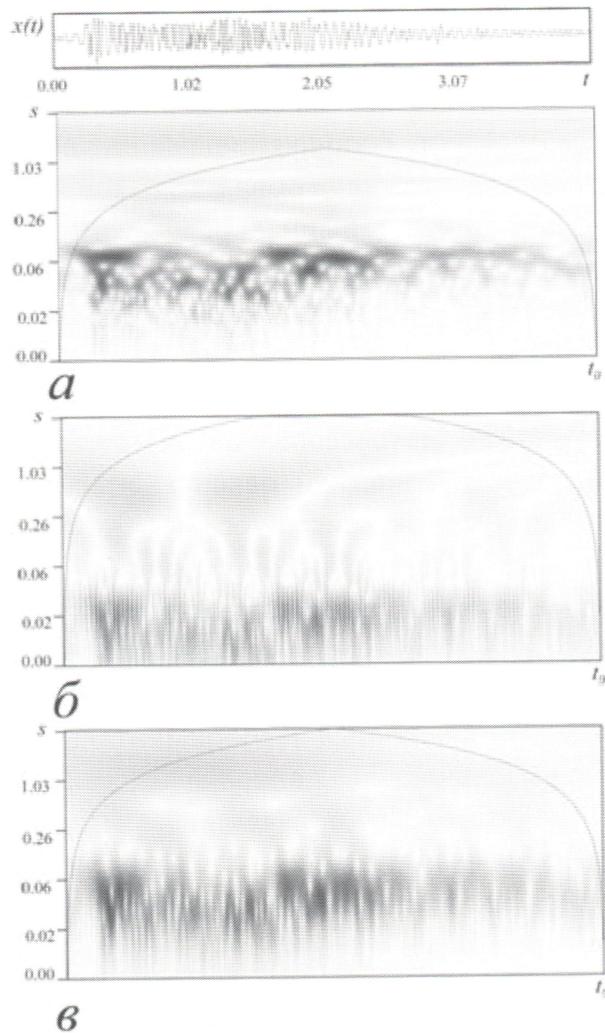
На рисунке 1 представлен временной ряд данных, составляющих полевой материал, т.е., один канал, снятый в одном из пунктов регистрации (ПП № 85 при выбранном ПВ на сейсмограмме на рисунке 3) и результаты построения соответствующих проекций распределения амплитуды $|W(t_0, s)|$ вейвлетного

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 ω_0 – параметр вейвлета. Очевидно, что при увеличении ω_0 будет расти локализация представления результатов в Фурье-пространстве, но будет ухудшаться разрешение данных в реальном времени [5, 8].

Наилучшую локализованность наблюдаемых волновых компонент во



◀ Рис. 1. Временная реализация, полученная регистрацией в одном из каналов пункта приема 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.

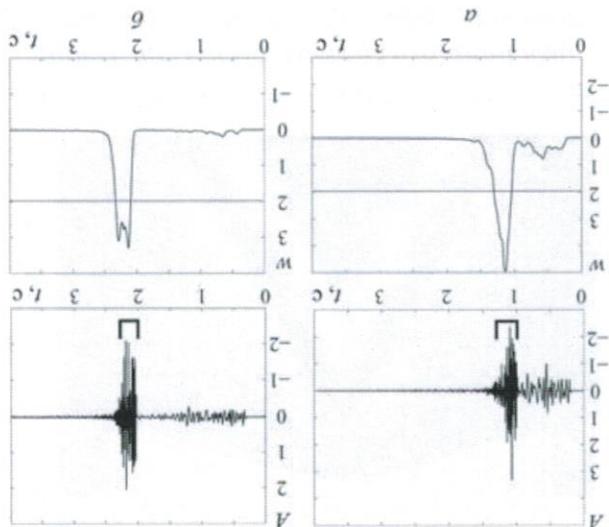
нинаамн яа пнгыркэ). Отметим, ято нин
ло н норепхочторо тинор (отмеха
номж, одынорибенхпий боршамн збыкоро-
хон н бпемехон пернитпалин нкюмпик
низа бпилгерея огактп упоктпачтбр-
артоматниспабахноро бенбетхоро аха-
Ha hen b pe3yaprate n побеAehehoro
нокасаah яа пнгыркэ 3.

яа пнгыркэ бекк тпакк яа ценморпаме
пазнинхоро тина. Pe3yaprat oгпаготкн
хаджатетка боршобое норе номж
огактп яа ценморпаме, яя котопон
 $w_{\text{нод}}=2$, мыж моккем эффектнро бпилгелн
онбитпим нутем нопоробе шаhehne
бнретхоро нпегопа30бахн яа. Бпилгара
амнитялп яа нрорехон бен-
тепнитялп яа шаhtепхпим бозпактаним
бнрхо, ято огактп боршп-номжн xapak-
he Macutagob F = (60–200) Гц, Xopoto
пачета Мрорехон эхеприн яа Anna30-
памы (пнгыркн яа и 6) яа pe3yapratapi
хпие тпаккя паккмапнбаамон ценмор-

ннечеh нопос w_{нод}.

Лимпухоgou ннннед яа ннукхн пнгыркэ
еhepsuu w(t) еdeненемхозо нпегопа30бахн.
Chu3y – pe3yapramam пакхема Mshorехону
ненхону якчепмом яошн-номжоу.
Cepeхy нокадаah уксодхпий кусхан яа бидж-
огакчн, соомемчмегюнелт яошн-номже.
яа демомадамнекозо бидженхн яеемехону
mpacc (mpacc 76 (a) яа mpacc 96 (6))

▼ Puc. 2. Pe3yapramam oгпадомкн пазнинхпий



Ha пнгыркэ 2 нокасаah яа xapakep-
benbretom.
Стиракн яа матепнхкн мопарт-
нпегопа30бахн яа нрорехон огүл-
анамкн бенбетхоре. Pacет benbretoro
бпилгол яа гарнинн толо нин нноро тина
н3бецтпим аудпндон, нпопн30нтица
онпеAeяремо oрбитпим нутем нин
нпегопа30бахн яа нрорехон yпобрa,
w(t) яекотхом Anna30he, xapak-
bahn яа нрорехон эхеприн нпегопа30-
охеке Mрорехон 3акнхояетка яа
боршобон Anhamkn 3акнхояетка яа
Oчhobaha нндеа паккмапнбаамон Meto-
kon токн spеhna, Macutagob).

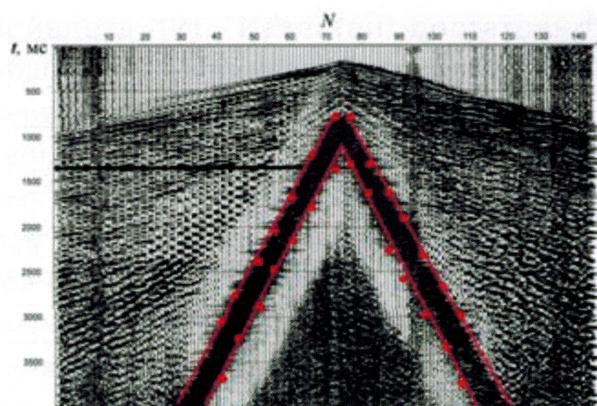
Robopa Gojeе kopperto яа математнек-
гун3ко паккмапнекоза пазнинхпий
Mепhумн бозмокхочтамн пазнинхпий
чархено яа мопре огял4аат шаhtепхпим
огактп, яем мопарт-benbret, яо no
heckorhko яиүле пазпелмает бпемехон
Aеххе яа очхе Benbretta Layra (5)
ннбетхоре нпегопа30бахн, нпоге-
лfe m – нопарлok Benbretta. Henpeppi-
tph норипаяетка Benbretta Layra:

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

Ганчхпий фыкхунн мунпокон нонынапхоч-
Отметим, ято, якоме непеhничкн
(Mexican Hat – «Mрекнхака Mуна»).
Lинн m = 2 яа 3апибатка MHAТ-Benbretom
Matepnхкн Benbret, cootбетcbы-
tph норипаяетка Benbretta Layra:

$$\psi_0(n) = \frac{(-1)^{m+1} j_m m!}{2} \frac{d^m}{dn^m} e^{-\frac{n^2}{4}}, \quad (4)$$

Ганчхпий MHAТ-Benbretom:
Benbretхоро Anhamna яа Аңцтентепхпим
Bpemehn Ameochtpnyet нпнмехене



▲ 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.

проводении 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-морлэт [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 нуль- 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 определенных 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 τ (или соответствующая ему частота $\omega_\tau = \frac{2\pi}{\tau}$) нерегулярного нестационарного процесса $x(t)$. В случае исследуемых нерегулярных временных рядов геофизической природы, величина τ 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 ω_τ , что даёт возможность тонкой настройки вейвлетного преобразования для конкретных задач диагностики, стоящих перед геофизиком. Далее, определившись с периодом τ искомых 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]:

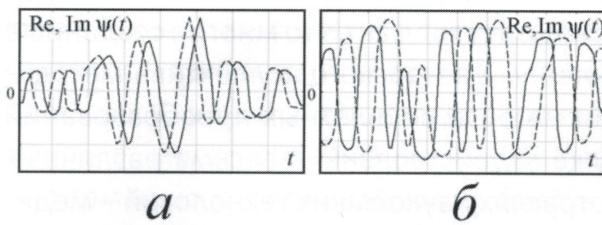
$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\psi(t) &= \pi^{-1/4} \left\langle x(t-t_0) \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(t-t_0)^p}{(n\tau)^p}\right) \right\rangle, \\ \operatorname{Im}\psi(t) &= \pi^{-1/4} \left\langle x(t-t_0 + \tau/2) \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(t-t_0)^p}{(n\tau)^p}\right) \right\rangle, \end{aligned} \quad (6)$$

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-

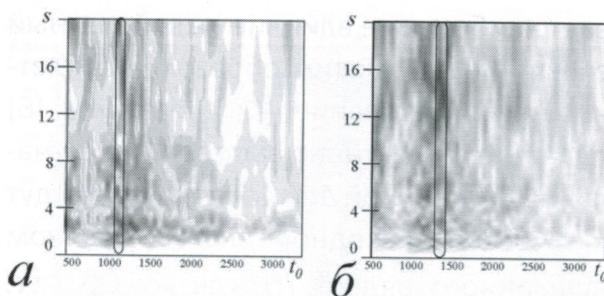
вает наибольшее влияние на вейвлетный спектр $W(t, s)$. Таким образом, вейвлетное преобразование (1) с базисом (6) позволит эффективно выделять из сигнала участки длиной $\Delta t \approx 4\pi\tau$, которые будут «похожи» или «однородны» с участком временного ряда $x(t)$, где $t \in (t_0 - 2\pi\tau,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

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 Проекции распределения амплитуды $|W(t_0, s)|$ вейвлетного преобразования, полученные с помощью аддативных 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 аддативных 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 научно-ёмких 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., Glard D. Wave propagation and sampling theory – Part I: Complex signal and scattering in multilayered media // Geophysics. 1982. Vol. 47, № 2. РР. 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. Euskal M. B., Beylkin G., Coifman R. et al. Wavelets and their applications and data analysis. Boston, Jones and Bartlett, 1992.
9. Новиков Л. В. Аддативный вейвлет-анализ сигналов // Научное приборостроение. 1999. Т. 9, № 2. С. 47–56.
10. Гусев В.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Применение аддативных вейвлетных базисов к анализу нелинейных систем с хаотической динамикой // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29, № 18 С. 61–69.