

Методы диагностики и фильтрации различных волновых компонент для обработки и исследования сейсмических данных

А. Е. Руннова^{1,*}, А. Н. Павлов^{1,2}, В. А. Максименко^{1,2}, М. О. Журавлев^{1,2}, А. А. Короновский^{1,2}, А. Е. Храмов^{1,2}

¹Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

²Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83

В работе представлен краткий обзор современных аспектов применения различных модификаций вейвлетного преобразования для анализа и диагностики различных волновых компонент в задачах обработки и исследования данных сейсмической разведки. Авторами описаны созданные методы анализа и исследования сложных зашумленных данных на базе различных характеристик непрерывного вейвлетного преобразования. Представлены результаты разработки методов фильтрации на базе дискретного вейвлетного преобразования, а также преимущества использования комбинированных методик на базе дискретных вейвлетов и метода эмпирических мод. В работе продемонстрированы результаты проведения исследований и фильтрации реальных полевых данных сейсмической разведки.

PACS: 89.75.Kd, 93.85.Bc.

УДК: 550.8.05, 51-73.

Ключевые слова: дискретное вейвлетное преобразование, непрерывный вейвлетный анализ, метод эмпирических мод, сейсмическая разведка, нелинейные сигналы.

В последние десятилетия плавно растет интерес к использованию различных аспектов вейвлет-анализа, одного из базовых математических инструментов нелинейной динамики, в прикладных областях науки и техники. Настоящий доклад посвящён разработкам методов изучения, диагностики и фильтрации различных волновых компонент сейсмических данных в области камеральных работ разведочной геофизики. На сегодняшний день большинство работ, результаты которых внедряются в практику сейсморазведки, в основном связаны с применением быстрого дискретного вейвлет-преобразования для сжатия данных и кратномасштабного анализа в задачах очистки сигналов от высокочастотных шумов [1]. Тем не менее, очевидно, что возможности вейвлетного анализа отнюдь не ограничиваются решением только подобных вспомогательных задач. Вейвлетный анализ может быть также успешно использован для цифровой обработки сигналов разведочной сейсмической геофизики в рамках инструментальной базы анализа и фильтрации различных компонент зарегистрированных колебаний, например, разделения полезной отраженной волны и паразитных звуковых, поверхностных или частично- и полнократных волн [2]. В частности, вейвлет-анализ может эффективно применяться для распознавания близких по форме, интенсивности и частотным характеристикам сигналов на фоне шума. Кроме того, большие возможности вейвлетного преобразования для анализа конкретных особенностей экспериментальных цифровых сигналов позволяют осуществлять простую и эффективную фильтрацию диагностируемых паразитных компонент зарегистриро-

ванных данных. Публикации результатов многочисленных исследований, проводимых в различных областях естествознания [3, 4], неопровержимо доказывают, что вейвлет-анализ представляет собой мощный инструмент исследования, применимый к коротким, зашумленным, многокомпонентным и нестационарным процессам, и развитие новых, базирующихся на вейвлет-преобразовании методов обработки и анализа сигналов сейсмической разведки, является актуальной задачей современной геофизики [4].

В рамках доклада выполнен краткий обзор современного использования вейвлетного анализа в геофизике. Во-первых, дана оценка работам, посвящённым развитию задач повышения соотношения сигнал/шум. Проведение вейвлетной фильтрации в современных технических практических приложениях является весьма востребованным, часто используемым и перспективным для весьма различных целей — как один из весьма успешных примеров приведем цифровую обработку фото- и видеоинформации, проводимую с помощью дискретных вейвлетов [5]. Во-вторых, подробно рассмотрены задачи применения вейвлетного преобразования для изучения суммарных временных разрезов. Эта обширная и весьма перспективная область применения вейвлетного анализа в геофизике связана с последними этапами обработки и дополнительными инструментами геофизической интерпретации данных — расчётом и анализом атрибутов сейсмических записей. С самого начала интенсивного промышленного использования трёхмерной сейсморазведки возникла потребность в быстром анализе больших объёмов сейсмических данных и сокращении “ручной” интерпретации данных в рамках камеральных работ геофизических сейсморобот. Наиболее известными подобными инструментами и являются атрибутивные методы интерпретации, позволяющие провести быструю иденти-

*E-mail: anefila@gmail.com

фикацию любых “особенностей” временных разрезов, например, геологических зон разломов. К наиболее известным и используемым в настоящее время можно отнести атрибуты, основанные на вычислении по скользким зонам временных разрезов когерентности, локальной дисперсии, а также ряд атрибутов, основанных на стабильности локальной оценки вектора градиента в трехмерном поле амплитуд. Однако в условиях временных сейсморазрезов ОГТ с недостаточно высоким соотношением сигнал/шум пространственная корреляция данных низка по всему разрезу, и, следовательно, применение таких методов становится невозможным. Кроме того, анализ атрибутными методами результатов сейсморазведки геологических сред, строение которых далеко от горизонтально-слоистого, при увеличении углов наклонов отражающих границ приводит к ложным результатам, в частности, диагностике несуществующих разломов.

Таким образом, направления совершенствования и поиска новых математических подходов в рамках задач обработки и интерпретации сейсмических данных весьма актуальны. Оригинальные исследования коллектива авторов, представленные в настоящем докладе посвящены анализу и фильтрации на основе вейвлетного преобразования полевых записей (сейсмограмм). Рассмотрены возможности разработки теоретических методик на базе непрерывного вейвлетного преобразования для оценки характеристик и выделения различных компонент сложных сигналов геофизической природы. На рис. 1 продемонстрированы результаты первоначального вейвлетного анализа сейсмической трассы из достаточно типичного полевого материала. На проекциях распределения амплитуды вейвлетного преобразования выделены различные идентифицируемые экспертом зарегистрированные волновые компоненты для исследуемых трасс. В частности, на поверхностях амплитуды вейвлетного преобразования отмечены зоны регистрации основных отражений на относительно низких частотах. Отметим, что низкочастотный характер материала не является свидетельством его низкого качества или следствием каких-либо особых сейсмогеологических условий, а лишь неотъемлемым свойством первичного полевого материала, не прошедшего ни одной процедуры даже простейшей одноканальной деконволюции и фильтрации. Как следует из рис. 1 *а*, непосредственно по приведённым временным реализациям провести подобную идентификацию не представляется возможным. Однако, на рисунке на масштабной временной плоскости (*б*) удаётся идентифицировать основные типы зарегистрированных отражений. Продемонстрированные результаты проведённого одноканального вейвлетного анализа весьма успешны и показывают как адекватность НВП поставленным задачам динамической обработки, так и его высокую перспективность для применения в камеральных работах сейсмической разведки.

Кроме того, важность разрабатываемых подходов к классификации и диагностике характерных осцил-

ляторных паттернов в экспериментальных временных рядах обуславливается принципиальной возможностью их автоматизации и проведением в одноканальном режиме. Подобная диагностика на цифровых материалах сейсморазведки МОВ МОГТ полезного сигнала, шумовых компонент записи, а также зарегистрированных регулярных волн-помех различных классов, амплитудные, частотные и фазовые характеристики которых обуславливаются глубинными и поверхностными сейсмогеологическими условиями, крайне важна для проведения экспресс-анализа и первичной полевой обработки.

Подробно рассмотрена возможность использования вейвлет-фильтров при обработке сигналов сейсморазведки. Для осуществления быстрого алгоритма предварительной очистки экспериментально регистрируемых процессов от случайных искажений (включая помеховые волны поверхностного и звукового типов, например, регистрируемые волны Рэлея и Лява [2]), применяется подход, основанный на дискретном вейвлет-преобразовании [6]. Этот подход имеет ряд преимуществ по сравнению с непрерывным преобразованием. Во-первых, применение ортогональных базисных функций позволяет ограничиться меньшим числом коэффициентов разложения. Во-вторых, применение пирамидального алгоритма разложения, использующего идеологию субполосной фильтрации, 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.

На основе дискретного вейвлет-преобразования в работе был проведен анализ экспериментальных данных, в качестве которых были выбраны трассы сейсмограмм общего пункта возбуждения из первичного полевого материала. Анализируемые данные помимо полезного сигнала содержали локализованные помехи (поверхностные и звуковые волны), имеющие большую амплитуду. Так как данные помехи превосходили по мощности сейсмический сигнал, проведение его детального анализа в их присутствии представлялось достаточно сложной задачей, и для адекватной расшифровки информации, содержащейся в сейсмических данных, необходимо было вначале осуществить фильтрацию волн-помех. Такая фильтрация должна, с одной стороны, быть узкополосной (так как 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 вейвлет-фильтрацию. При этом можно воспользоваться простым амплитудным критерием для идентификации коэффициентов вейвлет-преобразования, которые соответствуют поме-

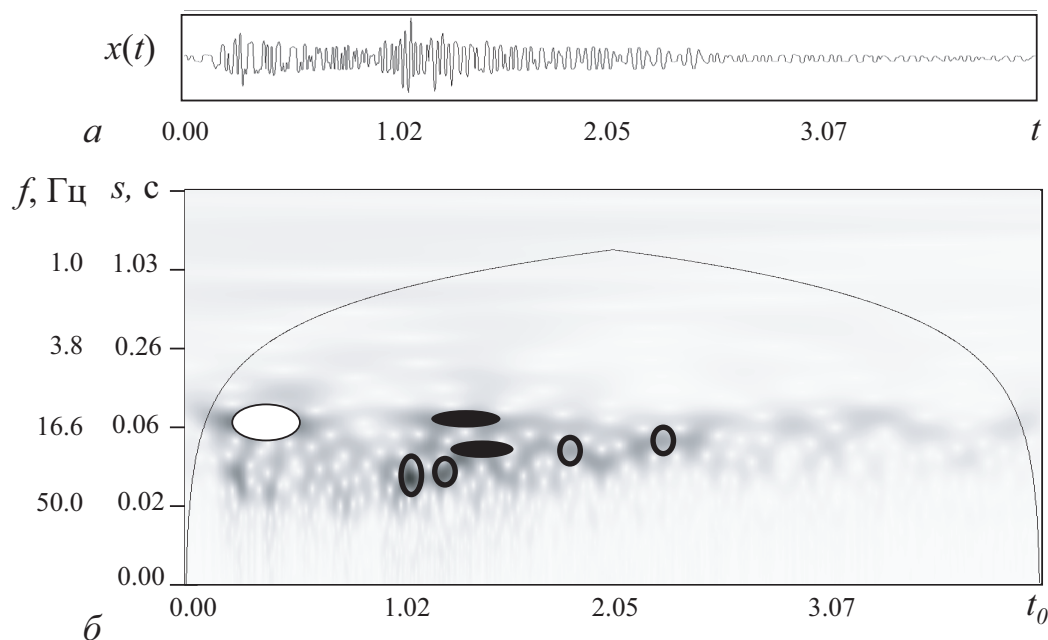


Рис. 1: Временная реализация, полученная регистрацией сейсмического отклика геологической среды в условиях равнинного Узбекистана, (а) и соответствующая проекция распределения амплитуды непрерывного вейвлетного преобразования, построенная с использованием материнского Морле-вейлета (б). Заполненными чёрными овалами отмечены области во временной и масштабной областях вейвлет-преобразования, отвечающие зарегистрированным помехам, светлыми овалами — первые вступления сейсмического сигнала, пустыми овалами — сигналы от отражающих границ геологической среды. U-образная кривая отмечает область влияния краевых эффектов при расчёте вейвлетного спектра. Шкала по оси ординат построена в логарифмическом масштабе

ховым волнам. В работе продемонстрирована эффективность решения данной задачи с использованием вейвлетов Добеши. Применение фильтров на основе дискретного вейвлет-преобразования позволяет многократно повысить скорость вычисления по сравнению с непрерывным вейвлет-преобразованием, что является актуальным для анализа волновых полей сейсмограммы, содержащих большое количество трасс. В рамках представляемого доклада авторы приводят сравнение возможностей и особенностей алгоритмов фильтрации на основе вейвлет-анализа и метода эмпирических мод для исследования внутренней структуры сигналов сейсморазведки [7].

Отметим, что данные сейсморазведки представляют собой один из тех примеров, когда задача извлечения максимально возможной информации о структуре земной коры является стимулом к развитию и совершенствованию методов цифровой обработки сигналов. Эти методы могут базироваться как на новых математических алгоритмах (включая аппарат вейвлет-анализа или синтетические алгоритмы, которые используют вейвлет-анализ как одну из ступеней анализа численных данных) или алгоритмах, уже апробированных в других областях естественных наук (например, в радиофизике). Одним из важных проблематичных

моментов, стоящих перед исследователем, является ситуация значительного объема ручного труда по выделению компонент волн-помех и шумов и последующего тестирования параметров их фильтрации, что многократно увеличивает время и затраты на обработку данных. Кроме того, большинство применяемых процедур анализа и фильтрации сейсмических данных не вполне удовлетворяют критериям динамической обработки и приводят к ощутимым потерям интенсивности зарегистрированного полезного сигнала и искажению формы регистрируемых упругих колебаний геологической среды. Все это делает актуальным исследование новых методов обработки данных в сейсморазведке.

В докладе достаточно полно продемонстрированы современные представления о применении методов вейвлет-анализа в задачах обработки сейсмических данных разведочной геофизики и уникальные разработанные методики коллективом авторов. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного задания высшим учебным заведениям на 2014 год и плановый период 2015 и 2016 годов в части проведения научно-исследовательских работ (СГТУ-141, СГТУ-146), а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 14-05-31171 мол_а.

- [1] *Пискун П.В.* Программно-алгоритмическое обеспечение непрерывного вейвлетного преобразования при обработке и интерпретации геофизических полей. (М.: МГУ, 2006).
- [2] *Yilmaz O.* Seismic Data Analysis. **I, II** (O. Yilmaz. — USA: Tulsa, Society of Exploration Geophysicists, 2001).
- [3] *Короновский А.А., Храмов А.Е.* Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. (М.: Физматлит, 2003).
- [4] *Руннова А.Е. и др.* Вейвлеты в геофизике: обработка сигналов в сейсморазведке. (М.: Университетская книга, 2013). ISBN 978-5-91304-325-2.
- [5] *Naveau P., Oh H.* IEEE Transactions On Image Processing. **13**, N. 6. P. 35. (2004).
- [6] *Meyer Y.* Wavelets: Algorithms and applications. (Philadelphia: S.I.A.M., 1993).
- [7] *Huang N.E. et al.* Proc. R. Soc. London, Ser. A. **454**. P. 903. (1998).

Methods of diagnostics and filtration of various wave component for processing and research survey note in seismic exploration

A.E. Runnova^{1,a}, A.N. Pavlov^{1,2}, V.A. Maksimenko^{1,2}, M.O. Guravlev^{1,2}, A.A. Koronovskii^{1,2}, A.E. Hramov^{1,2}

¹*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. Saratov 410054, Russia*

²*Saratov State University. Saratov 410012, Russia*

E-mail: ^aanefila@gmail.com

This paper presents a brief review the modern application of wavelet transform to analyze and diagnostics various wave components in seismic survey note processing. We describe methods of analysis and research of complex noisy survey note based on various characteristics of continuous wavelet transform. In paper we show the results of discrete wavelet filtration and the benefits of using combined techniques based on discrete wavelet transform and empirical modes method. In this paper we demonstrate the results of studying and filtering actual field seismic data.

PACS: 89.75.Kd, 93.85.Bc.

Keywords: discrete wavelet transform, continuous wavelet analysis, empirical modes method, seismic exploration, nonlinear data.

Сведения об авторах

1. Руннова Анастасия Евгеньевна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: 8 (963) 112-59-02, e-mail: anefila@gmail.com.
2. Павлов Алексей Николаевич — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел. (8452) 21-07-10.
3. Максименко Владимир Александрович — без степени, научный сотрудник; тел. (8452) 51-42-94.
4. Журавлев Максим Олегович — без степени, ассистент; тел. (8452) 51-42-94.
5. Короновский Алексей Александрович — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел. (8452) 51-42-94.
6. Храмов Александр Евгеньевич — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел. (8452) 51-42-94.