

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА К СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

К. Ю. Силкин, А. И. Дубянский

Воронежский государственный университет

Описываются информационные, методические и программные разработки для осуществления вейвлет-анализа записей локальных сейсмологических событий на ВКМ. Приводятся результаты вейвлет-анализа записи промышленного взрыва в карьере Шкурлат. Даются рекомендации по применению вейвлет-преобразований при интерпретации сейсмологических данных.

Ключевые слова: вейвлет, вейвлет-преобразование, сейсмология, карьер, взрыв, волны.

Вейвлет-анализ — это одно из средств изучения свойств числовых рядов, которое совсем недавно вошло в арсенал отечественных исследователей. Сейсмология была одной из первых областей его применения [1], которое сдерживалось отсутствием соответствующей вычислительной техники. Затем широкое распространение вейвлет-анализ получил преимущественно в других сферах: от климатологии до финансового анализа [2]. И только в последние пять лет интерес российских сейсмологов к вейвлетам существенно вырос [3].

Методические приёмы вейвлет-преобразования схематичны, и исследователь вырабатывает их особенности самостоятельно исходя из характеристик обрабатываемых им данных, интересующей информации и собственных предпочтений [4]. Это объясняется тем, что математический аппарат вейвлет-анализа и его программные реализации к настоящему времени достигли высокого уровня развития [5]: имеется большой набор материнских вейвлетов, выбор между непрерывным и дискретным преобразованиями. Разные виды вейвлетов позволяют настраивать преобразование на выделение сигналов определённой формы. Непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) даёт возможность изучать тонкую структуру сигнала, но его вычисление требует больших затрат компьютерного времени. В то же время дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) скрадывает некоторые второстепенные детали, но выполняется на порядок быстрее [6].

Важной задачей, которую следовало решить, было создание на основе использования вейвлет-преобразования информационно-программного комплекса, который может быть использован для частотно-временного анализа записей сейсмических событий различной природы. Необходимая

первичная сейсмологическая информация была предоставлена Лабораторией глубинного строения, геодинамики и сейсмического мониторинга (рук. доц. Л. И. Надёжка) Геофизической службы РАН. В этой лаборатории накоплен богатый опыт применения спектрального анализа сейсмических записей [7].

Для обеспечения максимально возможной технологичности исследований и оптимальной визуализации результатов были выполнены вспомогательные разработки. Во-первых, создана (при участии Т. Б. Силкиной) база данных SF2007, содержащая записи локальных сейсмических событий вместе со всей необходимой атрибутивной информацией (координата эпицентра, глубина гипоцентра, энергетический класс и др.).

Во-вторых, в системе компьютерной математики MatLab7 была разработана программа WLA5, которая, осуществляя доступ к базе данных, предоставляет возможность выполнять НВП и ДВП с большим числом видов материнских вейвлетов. Программа WLA5 учитывает специфику сейсмологических данных: три компоненты записи, большая длина записи, широкий частотный диапазон регистрируемых колебаний. Например, для сохранения информативности вейвлетограммы, содержащей 10 000 отсчётов по оси времени, не только на малых частотах, была применена оригинальная идея. Вместо самих значений коэффициентов НВП изображается их энергетический аналог, получаемый как огибающая графиков коэффициентов на каждом частотном уровне. Также нестандартно производится визуализация коэффициентов ДВП. Для обеспечения сопоставимости результатов НВП и ДВП последние интерполируются как по времени, так и по частоте. Интерполяция по времени нужна для получения одинакового количества детализирующих коэффициентов на всех уровнях разложения сигнала в вейвлет-базисе. Интерполя-

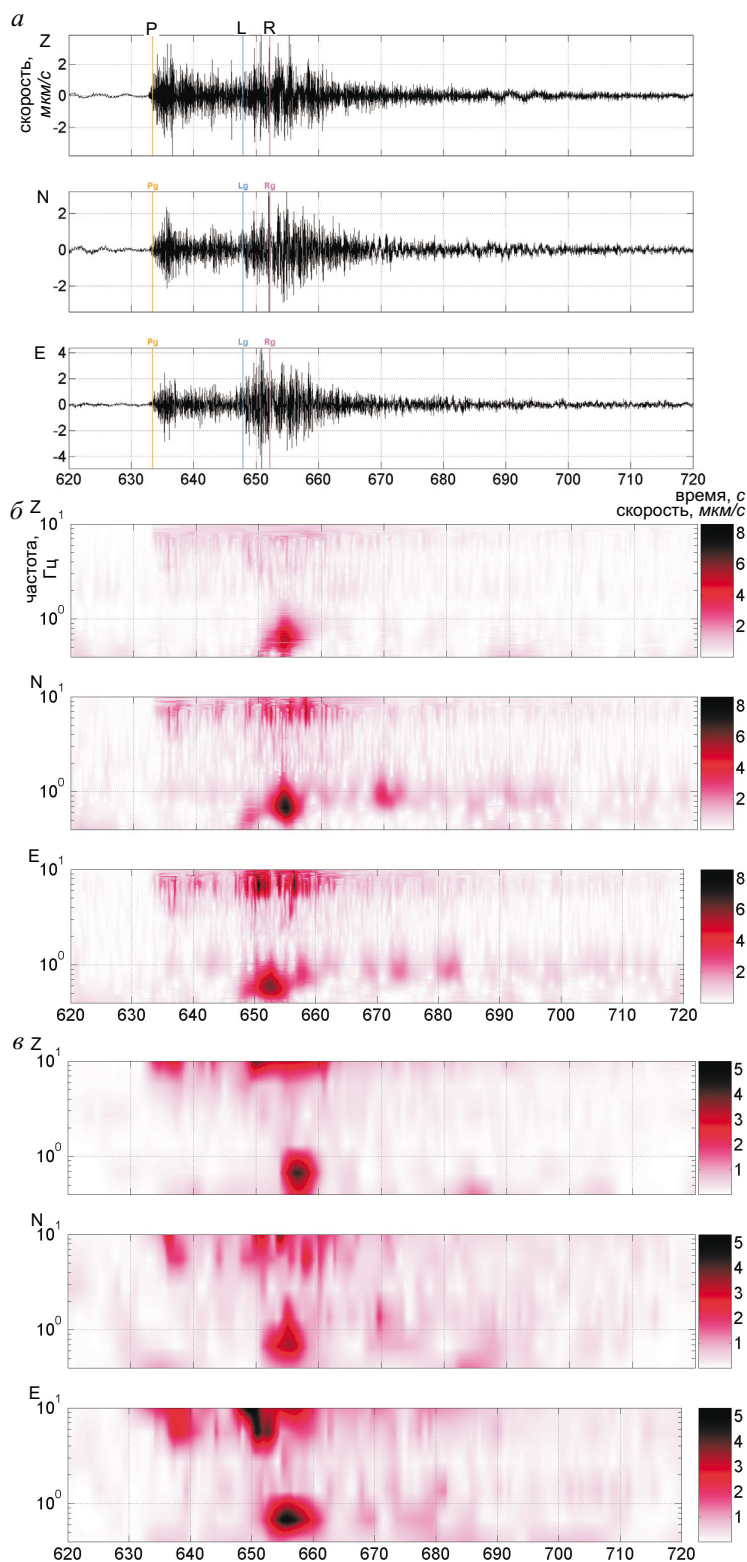


Рис. 1. Сопоставление непрерывного и дискретного вейвлет-преобразований на примере взрыва в карьере Шкурлат (произведён 31 мая 2007 г. в 09:10:36, начало временного окна 09:00:00): а — временные формы записей взрыва для Z-, N- и E-каналов; вейвлетограммы для этих же каналов: б — непрерывного преобразования, в — дискретного преобразования. Индексы вступлений волн: P — продольная, L — волна Лава, R — волна Рэлея

ция по частоте позволяет перейти от формальных номеров уровней разложения к понятным всем частотам. Учёт большой ширины частотного спектра сейсмологических записей осуществляется с помощью применения логарифмического масштаба при визуализации вейвлетограмм.

С помощью базы данных SF2007 и программы WLA5 было обработано и проанализировано более 100 записей различных событий (карьерные взрывы, взрывы в шахте и местные землетрясения), полученных на разных сейсмологических станциях. При этом изучались особенности применения разных материнских вейвлетов при реализации НВП и ДВП.

В качестве примера в данной работе приводятся результаты применения вейвлет-анализа к записи промышленного взрыва в карьере Шкурлат, произведённого 31 мая 2007 г. Запись этого взрыва получена на сейсмостанции VRSR, установленной в селе Сторожевое. Эта запись характеризуется низким уровнем помех и чёткими вступлениями продольных и поперечных волн (рис. 1, а).

По записям вертикально- (Z), северо- (N) и восточно-ориентированного (E) сейсмоприёмников были выполнены НВП (рис. 1, б) и ДВП (рис. 1, в). Использовался биортогональный вейвлет (рис. 2). При сравнении полученных вейвлетограмм можно отметить большую степень их сходства, хотя на вычисление коэффициентов ДВП мощный компьютер тратит около 10 секунд, а для НВП потребуется уже 2 минуты. Увеличение более чем на порядок затрат времени является нежелательным при большом объёме исследований.

При непосредственном рассмотрении вейвлетограмм (как НВП, так и ДВП) можно выявить основные черты такого нестационарного сигнала, как запись сейсмологического события. В диапазоне частот 3–10 Гц и времён 633–640 с (время отсчитывается от момента 09:00:00) регистрируются объёмные продольные волны. Первые вступления более отчётливо различимы на

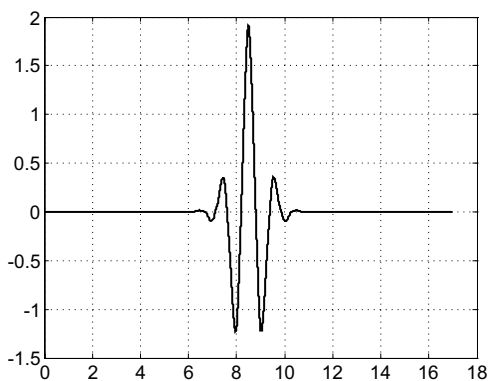


Рис. 2. Биортогональный вейвлет (2-й порядок разложения, 8-й порядок реконструкции)

вейвлетограмме НВП. Но ДВП даёт более яркое изображение Р-волн.

На этих же частотах, но больших временах (с 648 по 664 с) регистрируются поперечные волны. Вступления S-волн одинаково отчётливо выделяются на вейвлетограммах обоих видов. Но различается общий «портрет» волны, проявляющийся в мелких частотно-временных флуктуациях. Чуть позже (652–662 с), но уже в диапазоне частот 0,4–1 Гц появляется волна Рэлея. Вследствие такой низкой частоты она практически одинаково изображается с помощью НВП и ДВП как чётко локализованное по частоте и времени очень яркое пятно.

Интересно, что на вейвлетограммах НВП можно выделить волну Лява отдельно от поперечной волны, хотя регистрируются они одновременно. Это возможно благодаря способности вейвлет-преобразования разделять сигналы не только по времени, но и по частоте. На рис. 1, б можно увидеть, что на особо малых частотах (0,4–0,8 Гц) с отметки времени 647 с и до вступления волны Рэлея выделяется волна Лава.

Наиболее чётко волна Рэлея видна на вейвлетограммах Z-компоненты, а волна Лява — на N- и E-вейвлетограммах.

Также следует отметить, что НВП гораздо лучше изображает такую характерную для большинства взрывов черту (особенно в карьере Шкурлат), как длинный низкочастотный «хвост», тянущийся от «пятна» волны Рэлея на протяжении 40–50 с. Он может быть связан с постепенным высвобождением энергии, наведённой в среде взрывом.

Таким образом, можно сделать следующие выводы и рекомендации.

1. Вейвлет-преобразование — это удобный и информативный метод анализа таких нестационарных волновых процессов, как сейсмологические записи.

2. При анализе записей лучше изображать не сами коэффициенты вейвлет-преобразования, а огибающие их изочастотных графиков. Рекомендуется применять логарифмический масштаб частоты на вейвлетограммах.

3. При составлении коллекции вейвлет-портретов сейсмологических событий можно использовать ДВП как быстрый инструмент, дающий общее представление об анализируемом сигнале.

4. Точный, детальный анализ мелких особенностей (выделение первых вступлений волн, идентификация вторичных фаз, выявление наведённой реакции среды) невозможен без НВП.

5. Необходимо проводить исследования в области выбора оптимального вида материнского вейвлета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. — Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001. — 464 с.
2. Мала С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Мала. — М. : Мир, 2005. — 671 с.
3. Любушин А.А. Использование вейвлет-анализа для автоматической классификации трехкомпонентных сейсмических записей / А. А. Любушин, З. Калаб, Н. Частова // Физика Земли. — 2004. — № 7. — С. 50–56.
4. Запрягаев С. А. Применение вейвлет-преобразования в анализе электрофизиологических процессов в организме человека / С. А. Запрягаев. — Воронеж : ЛОП ВГУ, 2006. — 55 с.
5. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике / В. П. Дьяконов. — М. : СОЛОН-Пресс, 2004. — 400 с.
6. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MatLab / Н. К. Смоленцев. — М. : ДМК-Пресс, 2005. — 304 с.
7. Надёжка Л. И. Сейсмический эффект массовых химических взрывов в карьере г. Павловска / Л. И. Надёжка, Р. А. Орлов, И. Н. Сафронич и др. // Системы жизнеобеспечения и управления в чрезвычайных ситуациях. Межвузовский сборник. — Воронеж : Изд-во ВГУ, 2003. — С. 99–103.