

УСПЕХИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕЙВЛЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА НЕСТАЦИОНАРНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ДАННЫХ В СОВРЕМЕННОЙ ГЕОФИЗИКЕ

*А.Е. Филатова, А.Е. Артемьев, А.А. Короновский,
А.Н. Павлов, А.Е. Храмов*

Работа представляет собой обзор и анализ современного состояния методов геофизических исследований на основе вейвлетных преобразований. Отмечаются существующие проблемы и перспективы применения вейвлетного анализа при решении задач обработки и интерпретации геофизических материалов сейсмической разведки. Предлагается новый метод диагностики волн-помех звукового и поверхностного типов по данным наземной сейсморазведки.

Ключевые слова: Вейвлетный анализ, геофизика, сейсморазведка, временной ряд, полезные ископаемые.

Введение

Многие процессы в окружающем мире являются нестационарными и демонстрируют изменения во времени статистических свойств. Анализ соответствующих экспериментальных данных на основе классических вероятностных и спектральных методов зачастую приводит к проблемам в интерпретации полученных результатов. К настоящему времени достигнут значительный прогресс в создании новых, более эффективных методов исследования нестационарных процессов, наиболее известным среди которых является вейвлетный анализ [1–3]. Первоначально он был предложен в качестве альтернативы классическому спектральному анализу, но почти сразу после своего появления вейвлетный анализ стал восприниматься в качестве инструмента прикладных исследований практически во всех естественных науках и многих областях техники. Основной областью применения данного математического аппарата в естествознании является обработка нестационарных (во времени) и/или неоднородных (в пространстве) случайных и хаотических процессов [4–10]. Именно поэтому вейвлетный анализ представляет значительный интерес для геофизических наук, открывая новые возможности цифровой обработки данных сейсморазведки.

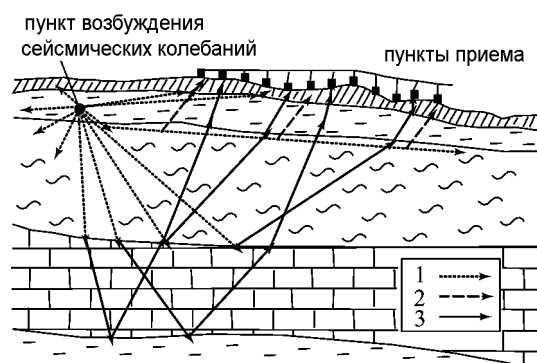


Рис. 1. Схема полевых сейсморазведочных работ. Лучи упругих волн: 1 – прямые и проходящие волны, 2 – преломленные, 3 – отраженные

Российской Федерации в Западной и Восточной Сибири, Поволжье, Прикаспийской впадине, Тимано-Печорском регионе. В результате проведения экспериментальных полевых работ получают исходные материалы для решения поставленных геологических задач.

На сегодняшний день преобладающая часть полевых сейсморазведочных работ ведется на основе метода отраженных волн. На рис. 1 приведена условная схема полевых сейсмических наблюдений. На ней показаны траектории некоторых волн (прямых, преломленных, отраженных), возбуждаемых взрывом заряда в неглубокой скважине и принимаемых на поверхности в ряде точек с помощью сейсмоприемников, подключаемых через многоканальный кабель к сеймостанции, осуществляющей запись колебаний и, возможно, их первичную обработку.

Извлечение полезной геологической информации из полевых сейсмических записей происходит в процессе камеральных геофизических работ – обработки и интерпретации. При этом получение искомой геолого-геофизической информации о разрезе базируется на решении обратной задачи теории сейсморазведки – задачи определения сейсмогеологических параметров среды на изучаемой территории по наблюдаемому в ходе экспериментальных полевых работ полю упругих волн. Решение обратной задачи теории сейсморазведки предполагает многоэтапную обработку, включающую ослабление колебаний-помех различного характера, расчет и коррекцию статических и кинематических поправок, корректирующую фильтрацию сейсмозаписей и многие другие.

В современной геофизической сейсмической разведке можно выделить два основных подхода к обработке полевых сейсмических материалов – кинематическая и динамическая обработка. Первый подход – **кинематическая обработка** – позволяет по наблюдаемым временам прихода фронтов полезных отраженных волн восстановить положение отдельных сейсмических границ и изучить в первом приближении распределение скоростей в среде. На сегодняшний день кинематическая обработка сейсмоматериалов является на практике преобладающей и позволяет проводить последующую структурную интерпретацию сейсмогеологических разрезов. Однако, современное состояние запасов и темпов освоения нефтяных месторождений обуславливает необходимость существенного повышения разрешенности и точности методов сейсморазведки для изучения продуктивных пластов мелких залежей и доизучения старых площадей, что достигается с помощью второго подхода – **динами-**

В настоящее время сейсмическая разведка является ведущим методом геофизических исследований земной коры, лидирующее положение которого обуславливается большой глубиной при высокой детальности исследований. Сейсморазведка играла и играет важную, а подчас преобладающую роль в задачах прогнозирования литологического состава и нефтегазоносности глубоко залегающих отложений при освоении крупнейших нефтегазоносных провинций на территории

ческой обработки, основанной на одновременном количественном и качественном анализе как времени прихода, так и формы и интенсивности зарегистрированных сейсмических колебаний. В настоящее время именно динамическая обработка является ведущим направлением развития новых методов и алгоритмов камеральных сейсморазведочных сухопутных исследований. Быстрое и эффективное совершенствование методов обработки позволяет утверждать, что в недалеком будущем на основе подходов динамической обработки станет возможным получение важных и достоверных сведений не только о форме сейсмических границ, но и о характере распределения во всем разрезе акустической жесткости и коэффициентов поглощения упругих волн.

Целью динамической обработки является извлечение из материалов сейсморазведки дополнительной информации о тонких особенностях строения изучаемой геологической среды, а именно:

- восстановление истории формирования осадочной толщи в районе исследований;
- изучение детальных особенностей структуры геологических границ и фациального состава отдельных слоев;
- установление наличия и типа флюидов в слоях и т. п.

Для решения перечисленных задач все процедуры обработки должны быть выполнены в режиме сохранения относительных амплитуд сейсмических колебаний для всего временного интервала их регистрации. Отметим, что при динамической обработке полевых данных сейсмической разведки наиболее остро встает проблема аккуратного и тщательного анализа зарегистрированных приемным устройством многих десятков тысяч отраженных волн, из которых полезными, несущими извлекаемую информацию, являются лишь десятки. В качестве характерного примера можно выделить задачу фильтрации зоны регистрации помех, обусловленных звуковыми и поверхностными волнами (волны Релея, Лява и др.). Для решения задачи подавления наблюдаемых волн-помех и шумов в мировой и российской практике используются различные методы – алгоритмы, основанные на полосовой фильтрации в частотно-пространственной области, фильтрации в области частота–волновое число, медианной фильтрации и некоторые другие. Общими недостатками указанных алгоритмов являются: во-первых, неспособность метода сохранить полезную информацию, содержащуюся в сейсмическом сигнале и осложненную зарегистрированными высокоинтенсивными волнами-помехами; во-вторых, в районах сейсморазведочных работ, характеризующихся своеобразным рыхлым строением приповерхностной зоны, спектральный состав регистрируемых помех рассматриваемого типа ограничивает возможности частотной селекции полезной и шумовой компонент сигнала. Кроме того, поверхностные сейсмогеологические условия и петрофизические характеристики района проводимой сейсморазведки могут быть весьма изменчивы, что приводит к сильным пространственно-временным вариациям кинематических и динамических характеристик звуковых и поверхностных волн, что, в конечном итоге, делает невозможным осуществление их фильтрации в автоматическом режиме. Увеличение количества ручной работы приводит к удорожанию проводимых исследований и увеличению сроков их проведения. Создание новых методов на основе традиционных алгоритмов и их модификаций оказывается, как правило, весьма сложным и неэффективным. Все это делает актуальной разработку методов на основе сравнительно

новых для области практической разведочной геофизики современных алгоритмов, таких как вейвлетный анализ, который бы позволил провести не только автоматизацию некоторых стадий обработки, но и обеспечить высокую степень сохранности полезной сейсмической информации.

В последние годы в области камеральных работ разведочной геофизики интерес к исследованиям с использованием вейвлетов постепенно растет. Однако большинство работ, результаты которых внедряются в практику сейсморазведки, связано с применением быстрого дискретного вейвлет-преобразования для сжатия данных и кратномасштабного анализа в задачах очистки сигналов от высокочастотных шумов [11, 12]. Тем не менее, возможности вейвлетного анализа отнюдь не ограничиваются решением подобных задач и могут быть успешно использованы для цифровой обработки сигналов разведочной сейсмической геофизики как инструмент анализа и фильтрации различных компонент зарегистрированных колебаний, например, разделения полезной отраженной волны и паразитных звуковых, поверхностных или частично- и полнократных волн. 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 натуральных сигналов позволяют осуществлять простую и эффективную фильтрацию диагностируемых паразитных компонент зарегистрированных данных. Публикации результатов многочисленных исследований, проводимых в различных областях естествознания [2, 8, 13, 14], неопровержимо доказывают, что вейвлет-анализ представляет собой мощный инструмент исследования, применимый к коротким, зашумленным, многокомпонентным и нестационарным процессам. Поскольку именно такие процессы регистрируются и являются предметом дальнейшей обработки при разведочных геофизических сейсмических работах, развитие методов, базирующихся на вейвлет-преобразовании, является актуальной задачей современной геофизики.

Данная работа посвящена обзору известных из научных источников примеров современного использования вейвлетного преобразования в камеральных геофизических работах и рассмотрению возможностей более широкого применения методик на основе данного подхода.

1. Анализ на основе вейвлетного преобразования в современной разведочной геофизике

Терминология «вейвлетов» (от англ. *wavelet*, что в дословном переводе означает «маленькая волна») сформировалась в восьмидесятих годах двадцатого века [1]. Первоначально данный математический аппарат был предложен в качестве альтернативы классическому спектральному анализу, основанному на преобразовании Фурье. Возникновение теории вейвлетов считается одним из важнейших событий в математике за последние десятилетия, поскольку это, пожалуй, единственная новая математическая концепция, которая сразу же после ее появления стала восприниматься в качестве инструмента *прикладных* исследований практически во всех естественных науках и многих областях техники [2, 3, 7]. В настоящее время вейвлеты широко используются при решении задач анализа и синтеза различных сигналов, для обра-

ботки изображений, для сжатия больших объемов информации и цифровой фильтрации, для распознавания образов, при изучении сильно развитой турбулентности, при решении некоторых дифференциальных уравнений и т.п. Применения вейвлетов известны в радиофизике, нелинейной динамике, акустике, оптике, физике твердого тела, сейсмологии, динамике жидкостей, биологии и медицине, экономике и т.д.

Начнем изложение современного применения анализа на основе вейвлетного преобразования с краткого математического экскурса в данный метод. Непрерывное вейвлетное преобразование осуществляется путем свертки

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

анализируемой функции $f(t)$ с двухпараметрической вейвлетной функцией $\psi_{s,t_0}(t)$, которая получается из материнского вейвлета $\psi_0(t)$ посредством масштабных преобразований и сдвигов по времени

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

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 . За подробным описанием математических тонкостей выбора вида функции материнского вейвлета, численной реализации вейвлетного преобразования и связи вейвлетных временных масштабов и частот классического спектрального анализа отсылаем читателя к многочисленным обзорным статьям и монографиям, посвященных изложению основных понятий и сущности вейвлетного преобразования (например, [2, 7, 13, 14]).

Одними из первых практических приложений вейвлетного преобразования стали анализ и изучение временных рядов геофизической природы, полученных в ходе наблюдений за сейсмической активностью [15, 16], изменениями метеорологических параметров того или иного атмосферного или океанического процесса [17–22] и т. п. В настоящее время методы на основе вейвлетного преобразования используются в теории магнитного поля Земли [23], метеорологии [24–26], геодезии [27], гравиразведке [11, 28], магниторазведке [12] и электроразведке [29]. В работах [30, 31] рассмотрены возможности применения вейвлетного преобразования для решения обратных задач геофизики. Как известно, обратные задачи геофизики являются некорректно поставленными задачами. В упомянутых работах вейвлетные преобразования используются в контексте классического метода регуляризирующего функционала А.Н. Тихонова. Тем не менее, отметим, что потенциальные возможности методов на основе вейвлетного анализа при обработке геофизических данных исчерпаны далеко не в полной мере. В первую очередь, сказанное относится к обработке данных ведущего метода при нефтегазопроисловых работах – сейсморазведки, в области которой авторы настоящей работы занимаются обработкой данных. Учитывая сложность и стоимость проведения сейсмической съемки, разработка алгоритмов детального анализа сейсмических волновых полей, позволяющих максимизировать получаемую информацию и проводить корректные преобразования данных, остается актуальной

проблемой во всем мире. Автоматизация процессов цифровой обработки и геологической интерпретации данных, дающая значительную экономию времени и трудозатрат, также является важной на сегодняшний день задачей. В настоящее время во многих российских геофизических организациях до сих пор преобладают устаревшие методы обработки данных, не использующие современные подходы к анализу нестационарных полей. Для решения этих проблем требуется не только разработка новых и усовершенствование старых алгоритмов обработки, но и разработка их эффективных программных реализаций. За последнее десятилетие работы, посвященные применению вейвлет-анализа, уже продемонстрировали его эффективность во многих областях геофизики. Тем не менее, как показывает практика, основанные на этом преобразовании алгоритмы практически не внедрены в процессы обработки российских геофизических организаций. Это обусловлено недостатком доступных практических реализаций и сравнительно малым количеством подробных работ, посвященных применению вейвлет-анализа в конкретных геофизических задачах на русском языке, в то время как практическая заинтересованность в анализе на основе этого преобразования существует и возрастает.

К числу наиболее перспективных направлений применения вейвлетного преобразования в сейсморазведке относятся следующие два направления.

1. Селекция упругих волн различных типов, с целью максимизации соотношения сигнал/помеха (задача фильтрации).

2. Расчет информативных атрибутов сейсмической записи, позволяющих извлекать полезную информацию о петрофизических свойствах горных пород, а также диагностировать зоны, представляющие повышенный интерес в нефтегазопроисхождении (задача прогнозирования геологического разреза и прямого прогноза нефтегазоносности).

Кроме этого, определенный интерес могут представлять следующие направления.

- Решение обратных динамических задач сейсморазведки.
- Задача выбора оптимальных управляющих сигналов при вибросейсморазведке.
- Сжатие информации.

Начнем изложение материалов обзора, посвященного использованию вейвлетного анализа в геофизике, с рассмотрения работ, целью которых является повышение отношения сигнал/шум. Отметим, что проведение вейвлетной фильтрации в современных практических приложениях является весьма востребованным, часто используемым и перспективным для различных целей. В качестве одного из успешных примеров приведем цифровую обработку фото- и видеоинформации, осуществляемую с помощью дискретных вейвлетов [26]. Тем не менее, как показывает анализ доступных современных источников, задачам подавления волн-помех, регистрируемых на геофизических материалах, посвящено крайне мало научных работ.

Из известных публикаций [24, 26, 32, 33] выделим направление, посвященное разработке оптимального фильтра, основанного на одномерном вейвлет-преобразовании. В качестве материнского вейвлета использовались вейвлеты DOG-семейства, хотя данный класс базисных вейвлетных функций не является оптимальным для решения поставленной задачи. Результаты прямого вейвлетного преобразования (скейлограммы, скейлограммы и т. д.) в явном виде в работе [24] не приводятся, поэто-

му оценить эффективность диагностики волн-помех, содержащихся в сейсмических записях, не представляется возможным. В качестве результата приведены сейсмограммы до и после применения фильтрации основанной на вейвлет-преобразовании, а также их разность – то есть отфильтрованные помехи (рис. 2). Следует отметить, что приведенные на рис. 2 сейсмограммы не являются характерными для наземной сейсмической разведки, а вычтенные помехи нельзя идентифицировать как волны-помехи поверхностного типа, заявленные для фильтрации в публикации. Скорее, на представленных рисунках наблюдаются кратно-преломленные волны-помехи, для вычитания которых в камеральных работах сейсморазведки давно и успешно применяются другие методы (например, алгоритмы многоканальной веерной режекторной фильтрации в области частота–волновое число). Тем не менее, в ряде публикаций продемонстрированы результаты эффективного применения фильтрации на основе вейвлетного преобразования для подавления волн-помех различных классов (например, работы [26, 33]). Особо отметим работу [33], в которой приводятся сравнительные оценки использования для фильтрации вейвлетного преобразования на основе стандартного базисного Морле-вейвлета и адаптивных (зависящих от исходных данных) материнских вейвлетных функций. К сожалению, в указанной работе рассматриваются только отдельные сейсмические трассы и сигналы, без приведения полных сейсмограмм, а также отсутствует окончательный результат – сейсмограммы, очищенные от волн-помех. Рис. 3 иллюстрирует результаты применения адаптивного анализирующего вейвлета в сравнении со стандартным материнским вейвлетом Морле. Из рис. 3 наглядно видно, что адаптивный вейвлет обладает более высокой разрешающей способностью как в частотной, так и во временной областях. Аналогичные результаты по высокому качеству анализа сигналов с помощью адаптивных вейвлетов были получены и в ряде других работ [34, 35] при анализе сигналов негеофизической природы.

Отметим, что выбор анализирующего материнского вейвлета является одним из ключевых вопросов для проведения успешной обработки любых сложных сигналов и, в частности, записей сейсмической разведки. Материнский вейвлет должен

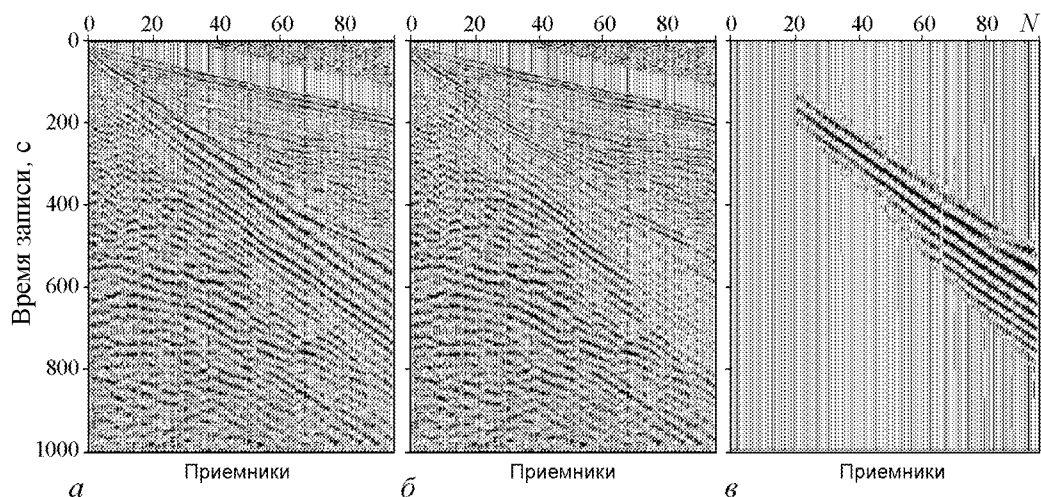


Рис. 2. Результаты применения вейвлет-фильтрации к сейсмическим данным: *а* – исходные данные; *б* – результат фильтрации; *в* – вычтенные помехи (из работы [24])

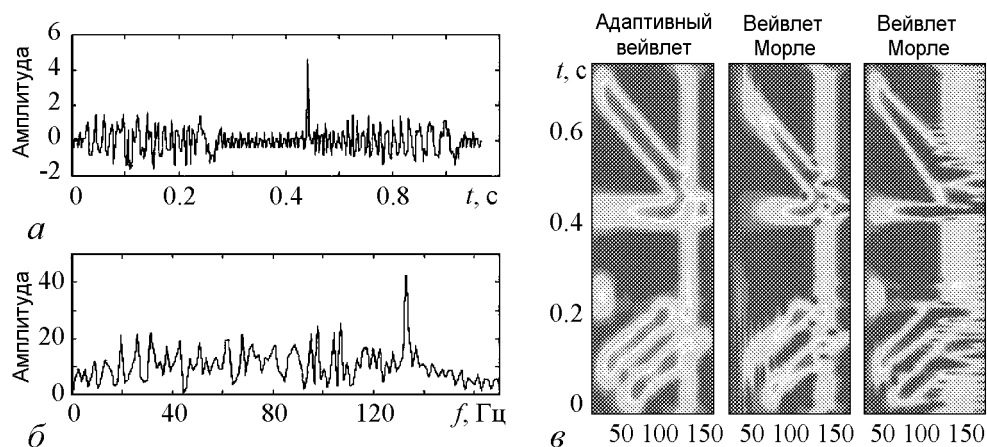


Рис. 3. Сопоставление результатов применения различных анализирующих вейвлетов: *a* – исходный сейсмический сигнал; *b* – амплитудно-частотный спектр сейсмической записи; *в* – результаты преобразования анализируемой трассы, полученные с помощью адаптивного вейвлетного базиса и материнского Морле-вейвлета с параметрами $\omega_0 = 6.0$ и $\omega_0 = 16.0$ (из работы [33])

быть максимально приближен к классу функций, описывающих сигнал. Иными словами, желательно, чтобы форма материнской вейвлетной функции отражала поведение сигнала и его составляющих.

Однако сложность адекватного выбора базисной функции заключается в том, что зарегистрированный сейсмический сигнал представляет собой суперпозицию полезных волн и волн-помех, подлежащих фильтрации. Поэтому целесообразность использования адаптивного вейвлета, то есть импульса, извлеченного непосредственно из исходных полевых данных, является спорной и требует тщательного исследования. Авторы настоящей работы, опираясь как на имеющийся обширный опыт практического использования непрерывного вейвлетного анализа в различных областях естествознания (нелинейная динамика, СВЧ-электроника, нейрофизиология и так далее [7, 36–39]), так и на изученные работы в области прикладной геофизики, предлагают следующие варианты выбора вида материнской вейвлетной функции.

1. Использование стандартных материнских вейвлетных функций (Morlet, МНАТ и аналогичные).
2. Использование в качестве базисных вейвлетов стандартных функций аналитической аппроксимации отраженного сигнала, принятых в сейсморазведке (например, импульсы Пузырева, Берлаге, Риккера, Клаудера [40, 41]).
3. Поиск аналитических аппроксимаций сигналов волн-помех, подлежащих исключению.
4. Тестирование адаптивных вейвлетов.

Очевидным и главным преимуществом первого и второго вариантов является простота их реализации. Одновременно, лежащим на поверхности недостатком первого и второго методов является сильная переменность вида колебаний, регистрируемых при геофизических разведочных полевых работах, проводимых в различных сейсмогеологических и петрофизических условиях. Однако для ряда территорий со сходными характеристиками вполне можно выбрать заданную форму материнской функции вейвлетного преобразования, позволяющей решить задачи анализа и фильтрации требуемых волн-помех. Наименее перспективным авторам представляется

решение поставленной задачи по третьему пути развития, поскольку поиск аналитических аппроксимаций сигналов волн-помех представляет собой предмет отдельной обширной научно-технической проблемы, решение которой является нетривиальным, а для ряда ситуаций определено не существующим. Значительно проще с технической точки зрения численной реализации выглядит четвертый вариант, заключающийся в использовании адаптивного вейвлет-анализа. Кроме того, важным преимуществом использования адаптивного вейвлетного анализа для изучения сейсмических колебаний является возможность точной настройки создаваемых фильтров на конкретные особенности сигналов, отражающие строение изучаемой геологической среды.

Проводя обзор современных методов обработки на основе вейвлетного преобразования, на первое место следует поставить широко используемое в практике сейсморазведочных работ преобразование Габора [42], являющееся модификацией оконного преобразования Фурье и, своего рода, прообразом вейвлетного анализа. Преобразование Габора Γ^α функции $f \in L^2(\mathbb{R})$ определяется формулой

$$(\Gamma^\alpha f)(\omega, b) = \int_{\mathbb{R}} (e^{-j\omega t} f(t)) g_\alpha(t - b) dt. \quad (3)$$

Данное преобразование ставит в соответствие функции одного переменного функцию двух переменных. Функция g_α играет роль временного окна:

$$g_\alpha(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\alpha}} e^{-\frac{t^2}{4\alpha}}, \quad (4)$$

где α – некоторый фиксированный параметр. Параметр b используется для сдвига окна с целью покрыть всю анализируемую временную область, на которой определена функция $f(t)$. Очевидно, что преобразование Габора $(\Gamma^\alpha f)(\omega, b)$ локализует преобразование Фурье вокруг точки $t = b$.

В работе [43] обработка материалов сейсморазведки производилась с помощью преобразования Габора с целью подготовки сейсмограмм двумерной наземной сейсмической разведки методом обратных волн методики общей глубинной точки для AVO-анализа* – относительно нового, быстро развивающегося метода динамической интерпретации сейсмозаписей.

Из отечественных публикаций, посвященных вейвлетному анализу полевого материала, отметим работы [44–49], в которых на основе одномерных вейвлетных преобразований проводится кратномасштабный анализ нестационарных геофизических полей, в частности, данных, полученных в рамках проведения наземной сейсмической разведки. Такой анализ позволяет изучить полную структуру принятого сигнала, идентифицировать ее составляющие, в частности – выделить и локализовать аномальные, шумовые и полезные информационные компоненты. Однако для полного решения задачи фильтрации необходимо применять эффективные алгоритмы обратного вейвлетного преобразования, позволяющие осуществлять фильтрацию больших массивов экспериментальных данных, количество информации, содержащейся в которых, может исчисляться гигабайтами.

* Amplitude variation with offsets – изменение амплитуд в зависимости от удалений.

Кроме фильтрации сейсмограмм, в современной научной литературе можно обнаружить примеры применения вейвлетного преобразования к фильтрации временных разрезов. Например, в работе [50] исследуются возможности вейвлетного преобразования для подавления случайных (некогерентных) шумов. Для решения этой задачи в современной сейсморазведке обычно применяются различные варианты медианных и когерентных фильтров. Однако в связи с актуальной в последнее время проблемой сохранения истинных динамических характеристик сейсмических записей использование вейвлет-фильтров может оказаться значительно более целесообразным.

Второе из выделенных авторами наиболее перспективных направлений применения вейвлетного анализа в геофизике связано с популярным в настоящее время направлением развития интерпретационных методов – расчетом и анализом так называемых атрибутов сейсмических записей. Следует отметить, что для современной сейсмической интерпретации направление развития атрибутного анализа весьма актуально [51], и в современной научно-технической литературе оно получило значительно более широкое освещение по сравнению с анализом и фильтрацией на основе вейвлетного преобразования полевых записей (сейсмограмм) (например, работы [25, 52–56]). Хорошее и достаточно полное описание применения атрибутного анализа в сейсморазведке приведено в курсе лекций одного из создателей теории динамической интерпретации, профессора Хьюстонского университета К. Марфурта [52, 53]. Согласно [53], атрибуты сейсмической записи, основанные на вейвлетном преобразовании, можно охарактеризовать как одни из наиболее информативных для целей анализа литологического состава, стратиграфических особенностей, а также прямого прогноза перспектив нефтегазоносности геологического разреза. Продолжая тему атрибутного анализа сейсмических записей, выделим работу [54], в которой предлагается атрибут SPICE сейсмической записи. Для вычисления данного атрибута используется одномерное непрерывное вейвлетное преобразование с анализирующим вейвлетом Морле. В результате получают разрезы атрибута SPICE, два из которых приведены на рис. 4.

В верхней части рис. 4 показаны суммарные временные разрезы общей глубинной точки – основные результаты, используемые для интерпретации данных сейсморазведки отраженными волнами. На временном разрезе слева, черным эллипсом отмечен участок, осложненный определенными стратиграфическими особенностями. На временном разрезе справа, хорошо прослеживается дизъюнктивное нарушение – разрыв непрерывности слоистых толщ. В нижней части рисунка приведены соответствующие разрезы атрибута SPICE. По мнению авторов работы [54], эффективность выявления различных стратиграфических особенностей и точность локализации дизъюнктивных нарушений по разрезам атрибута SPICE значительно выше по сравнению с данными стандартной сейсморазведки, и одновременно превосходит уже существующие методы атрибутного анализа, например, расчет мгновенных фаз и частот сейсмических записей.

В русскоязычной литературе вейвлетный анализ временных разрезов рассматривается в работах [46, 57–60]. А.А. Никитин в своей обзорной статье [46] проводит аналогии вейвлетного анализа с давно разработанным и широко применяемым методом – спектрально-временным анализом (СВАН). Технология СВАН основана на непрерывной по времени и по частоте развертке любого геофизического параметра, в том числе сейсмических трасс и кривых ГИС. Метод СВАН подробно описан в работах [61, 62]. Традиционно, при проведении СВАН используются такие параметры волнового поля как видимый период, ширина спектра в различных диапазонах частот

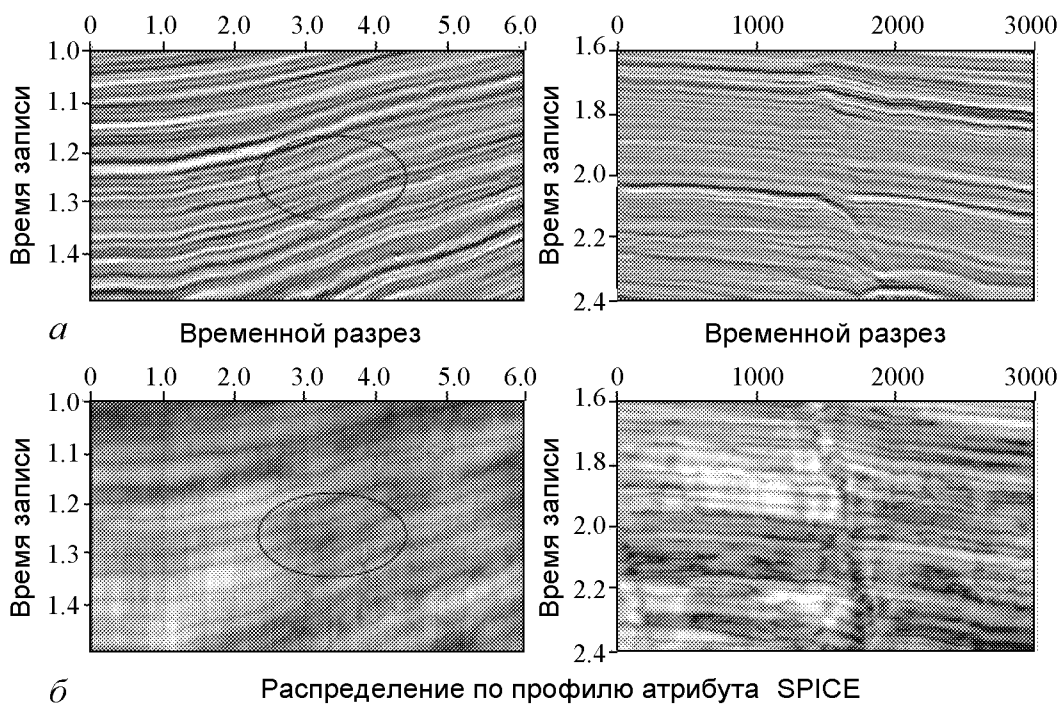


Рис. 4. Результаты атрибутного анализа, проведенного с помощью расчета атрибута SPICE: *а* – исходный суммарный разрез общей глубинной точки после процедуры миграции, полученный с помощью двумерной наземной сейсмической разведки метода отраженных волн; *б* – результаты расчета атрибута SPICE, проведенного по соответствующему сейсмическому разрезу (из работы [54])

и т. п. Как справедливо отмечает А.А. Никитин в работе [46], частотно-временная локализация геофизических сигналов, заложенная в процедуре вейвлетного анализа, существенно расширяет возможности технологии СВАН. Обработка волнового поля при этом сводится к реализации следующих процедур:

- исходное волновое поле, полученное в широком диапазоне частот, преобразуется в поле коэффициентов вейвлет-преобразования;
- по полю вейвлет-коэффициентов выделяется наиболее энергоемкая область временного разреза, отражающая перспективную на углеводородонасыщение ассоциацию тонкослоистых пластов;
- в пределах выделенной области рассчитывается дисперсия амплитуды временного разреза в скользящем окне;
- дисперсия амплитуд временного разреза подвергается вейвлет-преобразованию, что обеспечивает локализацию энергии амплитуд в частотно-временной области;
- характер флюидонасыщения (нефть, газ) по временному разрезу определяется в различных частотных диапазонах в конкретном временном интервале для района прогнозируемой залежи. При локализации нефтегазовых залежей отмечается их проявление в области более низких частот для нефтяных месторождений, а для газовых – в области как низких, так и высоких частот.

Описанная выше технология вейвлет-преобразования опробована в пределах известных месторождений Приазовья, а также при прогнозе углеводородонасыщения целевых объектов шельфа Каспийского и Азовского морей. Из последних публикаций следует отметить работу [57], в которой проводится анализ двумерных сей-

смических изображений (временных разрезов профилей и разрезов выделяемых горизонтов из данных наземной пространственной сейсморазведки) с использованием двумерных вейвлетов. Наиболее интересные результаты получены с применением анализирующих вейвлетов Добеши. В этом случае многомасштабный анализ строится в пространстве $L^2(R^2)$ функций двух переменных. Авторы работы [57] показывают, что использование двумерного вейвлетного преобразования предоставляет возможность выделять и анализировать по отдельности (в разных диапазонах длин волн) аппроксимирующие горизонтальные, диагональные и вертикальные особенности 2D и 3D изображений и на их основе локализовать аномальные составляющие. Такие особенности характерны для горизонтов, содержащих залежи углеводородов и других полезных ископаемых. На рис. 5 показаны некоторые результаты двумерного вейвлетного анализа. В левой части этого рисунка изображен временной суммарный разрез общей глубинной точки, на котором отмечены аномальные зоны распределения вейвлет-коэффициентов, которые отождествляются с перспективными в нефтегазопроисковом отношении объектами. В правой части рис. 5 показано распределение вейвлет-коэффициентов по сечению куба сейсмических данных, соответствующего поверхности целевого отражающего горизонта. Черными точками обозначены местоположения скважин с углеводородной продукцией.

На рис. 6 приведен еще один пример из работы [57]. В данном случае в качестве материнской функции для дискретного вейвлетного преобразования была использована функция Хаара. Положение скважин с продукцией обозначено верти-

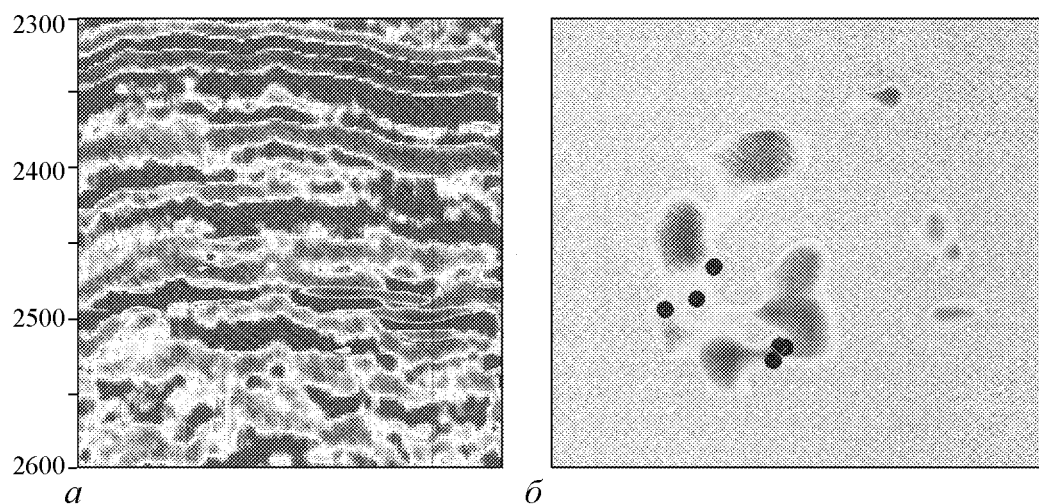


Рис. 5. Результаты двумерного вейвлетного анализа сейсмических изображений, полученных с помощью трехмерной наземной сейсморазведки методом отраженных волн по методике общей глубинной точки (из работы [57]): *а* – распределение вейвлет-коэффициентов на профиле; *б* – распределение вейвлет-коэффициентов на заданном горизонте 3D-изображения



Рис. 6. Распределение вейвлет-коэффициентов вдоль двумерного сейсмического профиля, суммарный временной разрез по профилю дан в виде подложки (из работы [57])

кальными черными линиями. Можно отметить определенную корреляцию между аномалиями в распределении вейвлет-коэффициентов и положением продуктивных скважин. При этом на временном разрезе, показанном на рис. 6, не выделяется визуально заметных аномалий амплитуд.

Итак, приведенные в данном обзоре результаты и описания современных приложений вейвлетного преобразования в геофизических разведочных исследованиях, в частности, в камеральных работах (обработки и интерпретации данных сейсмической разведки) убедительно свидетельствуют о высокой эффективности и большой практической значимости этого направления для развития методов анализа, диагностики и фильтрации полевых материалов и сейсмических разрезов в нефтегазовой сейсморазведке.

2. Перспективы дальнейшего развития методов исследования и фильтрации сложных экспериментальных сигналов на основе вейвлетного анализа

Проведя анализ зарубежных и отечественных публикаций, отметим, что в настоящее время использование методов анализа сигналов на основе непрерывного вейвлетного преобразования в геофизических науках либо не продвигается дальше теоретических исследований временных рядов на длительных временных интервалах, носящих фундаментальный характер [15–21], либо остаются на уровне способов расчета частотно-амплитудных характеристик временных разрезов сумм общей глубинной точки полевого материала и последующей их визуализации. Анализ вышеуказанных информационных источников показал, что ниша использования вейвлетного анализа для непосредственного изучения, диагностики различных компонент и последующей фильтрации компонент-помех на экспериментальных полевых материалах является на сегодняшний день практически свободной. Однако для ряда приложений, например, проблемы фильтрации звуковых и поверхностных волн, наиболее оптимальным способом будет являться реализация вейвлетного преобразования с последующим исключением областей, соответствующих помехам. В таком случае, реализация решения поставленной задачи может быть осуществлена двумя путями.

- Анализ и обработка полевого материала хорошо разработанными методами дискретного вейвлетного анализа в его приложении к обработке изображений [63–66]. Сейсмограммы в сортировке общего пункта возбуждения полевого материала рассматриваются как изображения, и дальнейшая обработка проводится с каждым отдельным файлом, относящимся к соответствующему пункту возбуждения. В простейшем случае для реализации данного метода решения поставленной проблемы после корректно проведенных процедур восстановления истинного соотношения помех [40, 41, 67] необходимо: а) провести дискретное вейвлетное преобразование; б) на полученном трехмерном объекте вручную выделить паттерны, соответствующие искомым помехам; в) реализовать обратное преобразование с исключением соответствующих областей. Подобный способ хотя и представляется возможным для практического использования, однако, весьма уязвим для критики. Во-первых, подобный способ обработки даже в тестовом режиме предлагает весьма большой объем вычислений. Например, сейсмическая разведка весьма небольшой глубинности со следующими параметрами: длительность записи – 3 с, дискретизация – 2 мс и количество пунктов приема – 181 канал, потребует расчета изображения, состоящего из 10^6 отсчетов. Во-вторых, дискретное вейвлетное преобразование

не сохраняет всю информацию, содержащуюся в исходном сигнале. Иными словами, некоторые высоко-, низкочастотные и малоамплитудные составляющие будут автоматически отфильтрованы при проведении прямого и обратного преобразований. Для задач сейсмической разведки, целью которых является получение весьма дорогостоящей информации, такое свойство данного метода представляется нежелательным, поскольку в таком случае говорить о четкой динамической обработке информации уже не приходится.

- Анализ и обработка полевого материала методами анализа одномерных сигналов на базе непрерывного вейвлетного анализа. При данном подходе вейвлетный анализ играет роль одноканального преобразования для каждой трассы полевого материала. Полученные проекции распределения амплитуд и фаз вейвлетного преобразования позволяют изучить сигнал, записанный на каждом пункте приема, и оценить наличие или отсутствие в нем регулярных компонент, соответствующих искомому волнам-помехам. Выделив на одной из трасс диапазон присутствия зоны регистрации звуковых и поверхностных волн, можно в автоматическом режиме просканировать весь полевой материал и получить для каждого пункта возбуждения точные границы подлежащей фильтрации зоны помех. Затем, фильтрация указанной области может быть осуществлена как с помощью обратного вейвлетного преобразования, так и любым другим способом (например, одноканальным частотным фильтром, работающим в найденном диапазоне). Использование данной схемы обработки материала дает целый ряд преимуществ, наиболее важные из которых следующие: простота конструкции и численной реализации данного метода; сокращение времени цифровой обработки сигнала за счет одноканальной проработки полевого материала и возможность исключить из анализа заведомо недействительные трассы (например, дальние каналы пунктов приема); интегрируемость данного метода в уже применяющиеся методики фильтрации (например, на основе преобразования Радона) и некоторые другие.

Исходя из вышесказанного, актуальными и перспективными представляются создание и оптимизация методов непрерывного вейвлетного анализа для исследования, диагностики и фильтрации цифровых записей наземной сейсмической разведки метода отраженных волн по методике общей глубинной точки, как элементов современной динамической обработки, которые сочетали бы высокую степень сохранности формы и интенсивности полезного сейсмического сигнала с преимуществами быстрых одноканальных методов кинематической обработки.

3. Диагностика волн-помех звукового и поверхностного типов по цифровым данным наземной сейсморазведки на основе непрерывного вейвлетного анализа

Как уже отмечалось, решение обратной задачи теории сейсморазведки предполагает многоэтапную обработку, включающую ослабление волн-помех различного характера, расчет и коррекцию статических и кинематических поправок, корректирующую фильтрацию сейсмозаписей и многое другое. Для решения перечисленных задач все процедуры обработки должны быть выполнены в режиме сохранения относительных амплитуд сейсмических колебаний для всего временного интервала их регистрации. В настоящем разделе обзора обсудим возможности автоматической диагностики помех, обусловленных звуковыми и поверхностными волнами (волны Релея, Лява и др.), на основе вейвлетного анализа по цифровым данным наземной сейсморазведки.

На рис. 7, *a* представлена типичная сейсмограмма общего пункта возбуждения из первичного полевого материала, полученного на территории Саратовской области. Полученные первичные полевые материалы сейморазведки характеризуются высоким уровнем прослеживания отраженных волн от целевых горизонтов, регистриру-

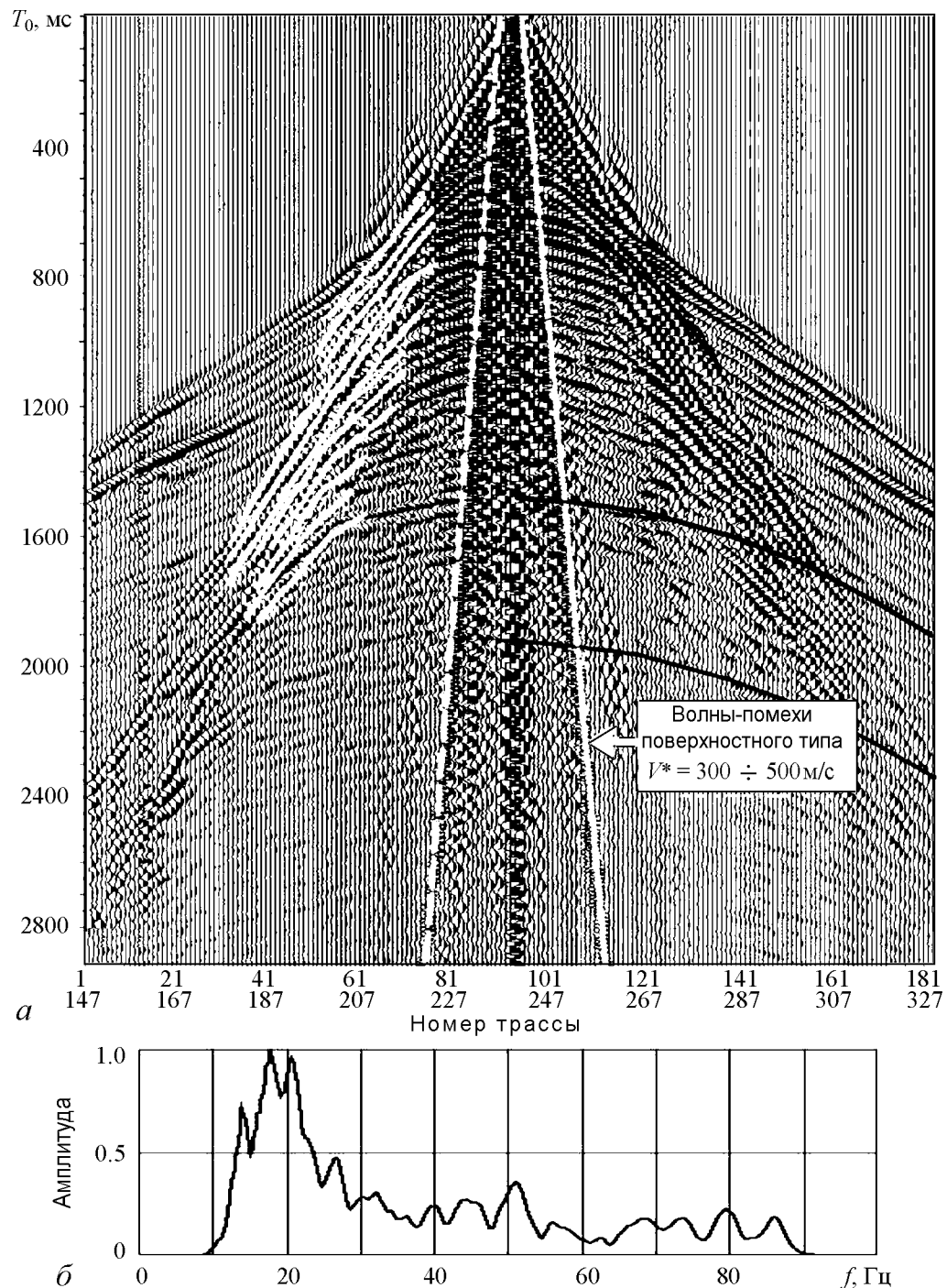


Рис. 7. Характеристика волнового поля первичного полевого материала: *a* – сейсмограмма общего пункта возбуждения; *b* – частотная характеристика сейсмограммы

емых в интервале $500 \div 2300$ мс. В волновом поле сейсмограммы можно уверенно выделить ряд годографов, предположительно идентифицируемых как отражения от горизонтов. В волновом поле присутствуют регулярные волны-помехи и случайный шум, выделенные на рис. 7, а, кроме того, сейсмограммы характеризуются выраженным затуханием амплитуд сейсмического сигнала с увеличением времен регистрации, а также весьма неоднородным уровнем амплитуд на трассах различных пунктов приема. Наиболее интенсивными помехами являются среднескоростные волны на средних и дальних трассах (кажущаяся скорость $v^* = 1800 \div 2500$ м/с). Отражения, вызванные высокоскоростными кратными волнами, регистрируются на дальних каналах, начиная с 1200 мс. Амплитудно-частотная характеристика исходного материала представлена на рис. 7, б и характеризуется преобладанием низкочастотных составляющих в диапазоне $15 \div 25$ Гц, что обусловлено интенсивной зоной регистрации помех поверхностных и звуковых волн.

Очевидно, что проведение качественной динамической обработки подобного полевого материала ставит перед геофизиком среди прочего задачу повышения частоты сейсмических записей, что достигается проведением поверхностно-согласованной деконволюции по полемому материалу, максимально очищенному от всех наблюдаемых волн-помех. Отметим, что в число необходимых процедур фильтрации, требующейся для рассматриваемого полевого материала, необходимо включить фильтрацию в области частота–волновое число для подавления среднескоростных волн-помех, медианную фильтрацию для подавления случайных шумов, а также проведение полосовой фильтрации в диапазоне $13 \div 18$ Гц в области регистрации звуковых и поверхностных помех. Однако для пунктов возбуждения, располагающихся в различных поверхностных сейсмогеологических условиях, границы области регистрации звуковых и поверхностных помех будут варьировать в достаточно широких пределах. Кроме того, частотный состав поверхностных и звуковых волн изменяется от сейсмограммы к сейсмограмме даже по небольшому району работ. В совокупности, можно утверждать, что на практике провести диагностику и последующую фильтрацию данного типа помех с помощью стандартных методов обработки в автоматическом режиме не удастся без редакции границ пространственной области обработки и диапазона частот исключаемых шумов на разных сейсмограммах. Таким образом, основная проблема, исключающая реализацию фильтрации рассматриваемых помех в автоматическом режиме, заключается в невозможности выделить критерий для ее проведения.

Предлагаемая в настоящей работе методика для диагностики зарегистрированных волн-помех звукового и поверхностного типов основана на непрерывном вейвлетном преобразовании, производимом в одноканальном режиме по полемому материалу. На рис. 8 показан типичный вид проекции распределения амплитуды $|W(t, s)|$ вейвлетного преобразования, полученного с помощью базисного вейвлета Морле, построенного для центральных трасс рассматриваемого полевого материала (см. рис. 7, а). На проекции $|W(t, s)|$ присутствует легко идентифицируемый выраженный максимум, соответствующий рассматриваемым помехам. Отметим, что интенсивность колебаний соответствующих временных масштабов настолько велика, что визуализация всех остальных зарегистрированных компонент сейсмической записи становится невозможной. Таким образом, для каждой трассы можно четко выявить зону регистрации поверхностных волн и, при необходимости, уточнить частотный состав помех, выполнив пересчет от масштабов вейвлетного преобразова-

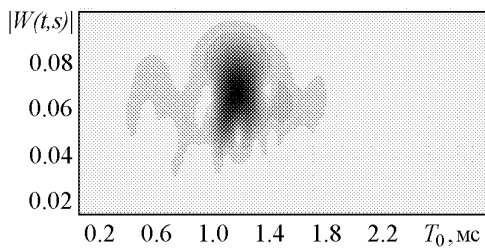


Рис. 8. Проекция распределения амплитуды $|W(t, s)|$ вейвлетного преобразования одной из центральных трасс рассматриваемого полевого материала (см. рис. 7, а), полученного с помощью базисного материнского вейвлета Морле

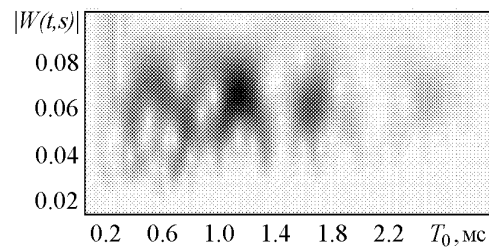


Рис. 9. Проекция распределения амплитуды $|W(t, s)|$ вейвлетного преобразования трассы, представленной на рис. 8, рассматриваемого полевого материала после фильтрации зарегистрированных звуковых и поверхностных волн

ния к частотам преобразования Фурье [7]. Например, для рассматриваемой трассы полевого материала изучаемые помехи регистрируются на временах $1.12 \div 1.28$ мс и требуют фильтрации в диапазоне частот $14 \div 16$ Гц.

На рис. 9 продемонстрирована проекция распределения амплитуды $|W(t, s)|$ вейвлетного преобразования, полученного с помощью базисного вейвлета Морле, построенного для той же трассы рассматриваемого полевого материала после проведенной фильтрации. Наглядно видно, что после удаления выше обозначенных классов помех на вейвлетной поверхности можно визуализировать все волновые компоненты, наблюдающиеся в полевом материале.

Таким образом, предлагаемый метод однокального вейвлетного преобразования позволяет отследить зону зарегистрированных высокоинтенсивных волн звукового и поверхностного типа и, затем, отфильтровать данные помехи. Кроме того, наличие четких критериев, по которым можно выделить требуемые помехи на поверхности распределения амплитуды $|W(t, s)|$ вейвлетного преобразования, а именно - возрастание интенсивности мод колебаний и четкая локализация по времени и шкале временных масштабов, дает возможность проведения необходимой фильтрации в автоматическом режиме.

Заключение

Таким образом, в работе были выполнены обзор и анализ современного состояния методов геофизических исследований на основе вейвлетного преобразования, применяемого в камеральных работах по обработке и интерпретации геофизических материалов сейсмической разведки. На основе рассмотренных информационных источников и опыта авторского научного коллектива по применению вейвлетного анализа к сложным сигналам различной природы выявлены перспективы расширения областей применения рассматриваемых способов, а также принципиально новые возможности использования вейвлетного анализа для автоматизации некоторых процедур обработки материалов наземной сейсморазведки. Предложен новый метод диагностики волн-помех звукового и поверхностного типов по цифровым данным наземной сейсморазведки на основе непрерывного вейвлетного анализа с базовым комплексным материнским вейвлетом Морле.

Работа была поддержана Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Библиографический список

1. Grossman A., Morlet J. SIAM J. Math. Anal. 1984. Vol. 15, № 4. P. 273.
2. Addison P.S. The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science Engineering, Medicine and Finance. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2002.
3. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. М.–Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001.
4. Torrence C., Compo G.P. // Bulletin of the American Meteorological Society. 1998. Vol. 79. P. 61.
5. Wavelets in Physics / Edited by J.C. van der Berg. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
6. Aldroubi A., Unser M. Wavelets in Medicine and Biology. CRC-Press, 1996.
7. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003.
8. Храмов А.Е., Короновский А.А., Пonomarenko V.I., Prokhorov M.D. // Phys. Rev. E. 2007. Vol. 75, № 5. 056207.
9. Sosnovtseva O.V., Pavlov A.N., Brazhe N.A., Brazhe A.R., Erokhova L.A., Maksimov G.V., Mosekilde E. // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 94. 218103.
10. Короновский А.А., Храмов А.Е. // Plasma Physics Reports. 2002. Vol. 28, № 8. 666.
11. Пискун П.В. Программно-алгоритмическое обеспечение непрерывного вейвлет-преобразования при обработке и интерпретации геофизических полей. М.: МГУ, 2006.
12. Пискун П.В., Петров А.В., Зиновкин С.В. Тезисы докладов VII международной научно-практической конференции «Геомодель-2005», 2005. 42.
13. Астафьева Н.М. // УФН. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145.
14. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. // УФН. 2001. Т. 171, № 5. С. 465.
15. Стаховский И.Р. // ДАН. 1996. Т. 350, № 3. С. 393.
16. Mallat S.G. // Trans. Amer. Math. Soc. 1989. Vol. 315. P. 69.
17. Wirtki K. // Journal Physics Oceanography. 1975. Vol. 5. P. 572.
18. Rayner N.A., Horton E.B., Parker D.E., Folland C.K., Hackett R.B. Version 2.2 of the global sea-ice and sea surface temperature data set 1903-1994. CRTN 74, Hadley Centre for Climate Prediction and Research, 1996.
19. Mac Kenzie D. // New Scientist. 1987. Vol. 16. P. 16.
20. Shaowu W. // Acta Meteorologica Sinica. 1992. Vol. 6, № 1. P. 47.
21. Hudgins L., Friehe L.A., Mayer M.E. // Physical Review Letters. 1993. Vol. 71. 3279.
22. Сонечкин Д.М., Даценко Н.М., Иващенко Н.Н. // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1996. Vol. 4, № 4,5. P. 108.
23. Manda M., Balasis G. // Geophys. J. Int. 2006. Vol. 167. P. 586.
24. Corso G., Kuhn P.S., Lucena L.S., Thom Z.D. // Physica A. 2003. Vol. 318. P. 551.
25. Naveau P., Oh H. // IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Vol. 13, № 6. P. 35.
26. Yuen D.A., Vincent A.P., Kido M., Vecsey L. // Pure and Applied Geophysics. 2001. Vol. 159. 2285.

27. *Петров А.В., Никитин А.А., Пискун П.В., Зиновкин С.В.* Тезисы докладов VIII международной научно-практической конференции «Геомодель-2006», 2006. 315.
28. *Albora M., Bal A., Ucan O.N.* // Pure and Applied Geophysics. 2007. Vol. 164. P. 199.
29. *Светов Б.С., Пискун П.В.* // Геофизика. 2005. Vol. 4. P. 43.
30. *Gholami A., Siahkoohi H.R.* // Geophysical Prospecting. 2009. Vol. 57. P. 847.
31. *Gholami A., Siahkoohi H.R.* // Geophys. J. Int. 2009. Vol. 176. P. 151.
32. *Kumar P., Foughoula-Georgiou E.* // Reviews of Geophysics. 1997. Vol. 35. P. 385.
33. *Kritski A., Vincent P., Yuen D.A., Carlsen T.* // Geophysics. 2007. Vol. 72. V1–V11.
34. *Гусев В.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29, № 18. С. 61.
35. *Sitnikova E., Hramov A.E., Koronovskii A.A., Luijtelaar E.L.* // Journal of Neuroscience Methods. 2009. Vol. 180. P. 304.
36. *Короновский А.А., Храмов А.Е.* Непрерывный вейвлетный анализ в приложениях к задачам нелинейной динамики. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2002.
37. *Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2001. Т. 9, № 4,5. С. 3.
38. *Koronovskii A.A., Hramov A.E.* // Technical Physics Letters. 2001. Vol. 27, № 1. P. 1.
39. *Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30, № 14. С. 29.
40. *Гурвич И.И., Боганик Г.Н.* Сейсмическая разведка. М.: Недра, 1980.
41. *Yilmaz O.* Seismic Data Analysis. V. I, II. USA: Tulsa, Society of Exploration Geophysicists, 2001.
42. *Воробьев В.И., Грибунин В.Г.* Теория и практика вейвлетного преобразования. С.-Петербург: ВУС, 1999.
43. *Reine C., Van der Baan N., Clark R.* // Geophysics. 2009. Vol. 74, № 2. WA123.
44. *Алексеев В.И.* Доклады на 10-й научно-практической конференции «Современные геофизические технологии в ОАО "Хантымансийскгеофизика" и перспективы их использования для повышения эффективности поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа». 2008, 111.
45. *Земцова Д.П., Никитин А.А., Пискун П.В.* // Тезисы докладов VII международной научно-практической конференции «Геомодель-2005», 2005. 68.
46. *Никитин А.А.* // Геофизика. 2006. Т. 4. С. 11.
47. *Никитин А.А., Петров А.В.* // Геофизика. 2007. Vol.3. P. 63.
48. *Пискун П.В., Никитин А.А., Зиновкин С.В., Петров А.В.* // Известия вузов. Геология и разведка. 2005. Т. 3. С. 39.
49. *Хачай О.А., Кукса Ю.И., Хачай О.Ю.* // Геофизика. 2003. Т. 5. С. 46.
50. *Broadhead M.K., Aramco S., Dhahran N.* // The Leading Edge. 2008. P. 226.
51. *Ампилов Ю.П.* Сейсмическая интерпретация: опыт и проблемы. М.: Изд-во «Геоинформмарк», 2004.
52. *Chopra S., Marfurt K.J.* Seismic attribute mapping of structure and stratigraphy: Society of Exploration Geophysicists, Distinguished Instructor Short Course Series. USA: Tulsa, 2006.
53. *Chopra S., Marfurt K.J.* Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization: Society of Exploration Geophysicists. OK: Tulsa, 2007.

54. *Liner C., Li C., Gersztenkorn A., Smythe J.* // SEG Abstract. 2004. 52.
55. *Boroscheck R.L., Comte D.Y.* // Journal Seismology. 2006. Vol. 10. P. 353.
56. *Domingues M.O., Mendes O.J., Mendes da Costa A.* // Advances in Space Research. 2005. Vol. 35. P. 831.
57. *Алексеев В.И., Бобрышев А.Н.* // Геофизика. 2009. Т. 3. С. 12.
58. *Пискун П.В., Никитин А.А., Земцова Д.П.* Тезисы докладов 6-х Геофизических чтений им. В. В. Федынского. Центр ГЕОН, 2004. 26.
59. *Масюков А.В., Масюков В.В., Шленкин С.И.* Математические методы в геофизике: Труды международной конференции, 2003.
60. *Копилевич Е.А., Афанасьев М.Л., Петров А.Ю.* // Нефтяное хозяйство. 2006. Т. 9. С. 10.
61. *Давыдова Е.А., Копилевич Е.А., Мушин И.А.* // Доклады РАН. 2002. Т. 385, № 5. С. 682.
62. *Копилевич Е.А., Давыдова Е.А., Самаркин М.А.* // Геофизика. 2004. Т. 2. С. 21.
63. *Strutz T., Muller E.* // Picture Coding Symposium'97, 10–12 September. Berlin. Germany. 1997, 67.
64. *Strutz T., Schwarz H., Muller E.* // Proceedings of SPIE. 1997. 3164. P. 279.
65. *Frick P., Baliunas S.L., Galyagin D., Sokoloff D., Soon W.* // The Astrophysical Journal. 1997. Vol. 483. P. 426.
66. *Новиков Л.В.* // Научное приборостроение. 1999. Vol. 9, № 2. P. 47.
67. *Бондарев В.И., Крылатков С.М.* Основы обработки и интерпретации данных сейсморазведки. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2001.
- Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского* *Поступила в редакцию* *18.12.2009*

PROGRESS AND PROSPECT OF WAVELET TRANSFORM APPLICATION TO THE ANALYSIS OF NONSTATIONARY NONLINEAR DATES IN CONTEMPORARY GEOPHYSICS

A.E. Filatova, A.E. Artemiev, A.A. Koronovskii, A.P. Pavlov, A.E. Hramov

The presented paper is an analytical review of the methods and examples of applications of the continuous and discrete wavelet transform in geophysical study. The possibility of the extension of application of the wavelet-based methods in geophysics is also considered.

Keywords: Wavelet analysis, geophysics, seismic prospecting, time series, minerals.



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



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 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



Павлов Алексей Николаевич – родился в Саратове (1973). Окончил физический факультет Саратовского университета по специальности радиофизика и электроника (1995). Кандидат физико-математических наук (1998). В настоящее время работает доцентом на кафедре радиофизики и нелинейной динамики. Область научных интересов: анализ временных рядов. Имеет более 80 работ, опубликованных в отечественной и зарубежной печати.

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