

УДК 553.9; 51-74

**А.Е. Руннова, А.А. Короновский, А.В. Иванов, А.Е. Храмов**  
**A.E. Runnova, A.A. Koronovskii, A.V. Ivanov, A.E. Khratov****НОВЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ВЕЙВЛЕТ-МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ  
ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ  
РАЗВЕДКИ****NEW INNOVATIVE WAVELET METHODS OF DATA DIGITAL DYNAMIC  
PROCESSING OF SEISMIC EXPLORATION**

Рассмотрены инновационные методы цифровой обработки данных сейсмической разведки, которые основаны на новых математических алгоритмах и подходах, уже апробированных в других областях естественных наук. Выделено, что одним из наиболее перспективных из апробированных на сегодня новых математических методов в применении к задачам поисковой сейсмической геофизики является вейвлетный анализ.

Инновационные методы, вейвлетный анализ, сейсмическая разведка

*The new innovative methods of digital data processing of seismic exploration based on new mathematic algorithms and approaches, tested in other areas of natural sciences are considered. It is emphasized that one of the most perspective and tested new mathematic methods applied to the tasks of search seismic geophysics today is wavelet analysis.*

Innovative methods, wavelet analysis, seismic exploration

На протяжении всей новейшей истории постоянный и длительный рост энергетических потребностей человеческого общества приводит к непрерывному повышению мирового уровня добычи таких невозобновляемых природных источников энергии, как нефть и природный газ. Хотя в современном понимании нефтяная промышленность в разных странах мира существует всего 110–140 лет, за этот отрезок времени добыча нефти и газа увеличилась более чем в 40 тысяч раз. Быстрый рост добычи природных углеводородов приводит к необходимости проведения геофизических поисково-разведочных работ по выявлению, оценке запасов и подготовке к разработке промышленных залежей нефти и газа. В ходе поисково-разведочных работ применяются геологические, геофизические, гидрогеохимические методы, а также бурение скважин и их исследование. В настоящее время одним из лидирующих способов геофизических поисково-разведочных работ и методов

исследований строения земной коры является сейсмическая разведка [1–5].

На сегодняшний день мировым стандартом обработки геофизических данных, полученных в результате сейсмогеологических исследований земной коры, является динамический подход, основанный на одновременном количественном и качественном анализе как времени прихода, так и формы и интенсивности зарегистрированных сейсмических колебаний. Динамическая обработка делает возможным получение достоверных сведений не только о форме сейсмических границ, но и о характере распределения во всем разрезе акустической жесткости и коэффициентов поглощения упругих волн. Получаемые в ходе выполнения качественной динамической обработки достоверные геофизические сведения позволяют извлечь из материалов сейсморазведки дополнительную информацию о тонких особенностях строения изучаемой геологической среды, в частности становится

возможно восстановить историю формирования осадочной толщи в районе исследований, изучить детальные особенности структуры геологических границ и фациального состава отдельных слоев, установить наличие и тип флюидов в слоях и т. п. [6–8]. Теория динамического подхода к обработке сейсмических данных постоянно обогащается новыми методами и подходами к анализу временных рядов, которые основаны на новых математических алгоритмах и подходах, уже апробированных в других областях естественных наук (например, в нелинейной физике и радиофизике) [9].

Одним из наиболее перспективных из апробированных на сегодня новых математических методов в применении к задачам поисковой сейсмической геофизики является вейвлетный анализ. В [9, 10] предоставлены результаты разработок различных методов диагностики и фильтрации волновых компонент на полевых данных наземной сейсмической разведки методом отраженных волн методом общей глубинной точки (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, снижение затрат машинного времени, высокие точность и устойчивость к шумам. В настоящей статье нами

предложен инновационный комплекс процедур на основе различных модификаций непрерывного вейвлетного преобразования для задач обработки различных волновых компонент сложных сигналов сейсмической съемки.

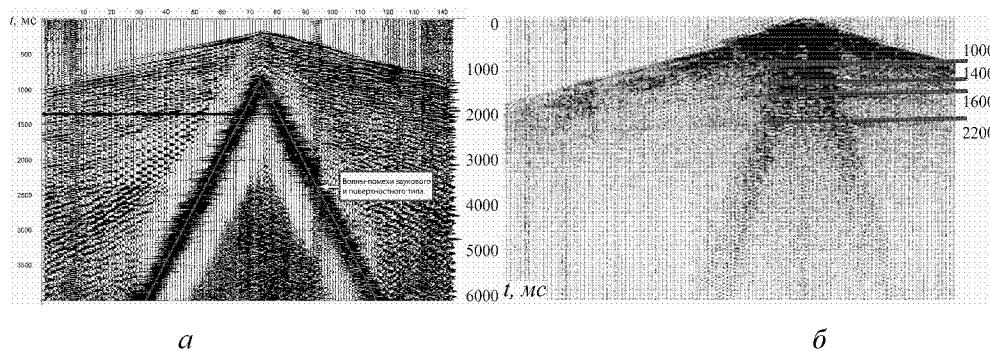
Непрерывное вейвлетное преобразование с комплексным материнским вейвлетом для хаотического временного ряда  $x(t)$  осуществляется [11]:  $W(s, t_0) = \int x(t) \psi_{s, t_0}^*(t) dt$  (1),

где  $\psi_{s, t_0}(t)$  — вейвлетная функция, получающаяся из материнского вейвлета:

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

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 были впервые предложены однотрассовые автоматические методы диагностики различных волновых паттернов сейсмических записей с возможностью адаптивной подстройки к конкретным сейсмогеологическим особенностям полевых материалов. Апробация новых методов осуществлялась на данных полевых материалов, представленных на рис. 1.

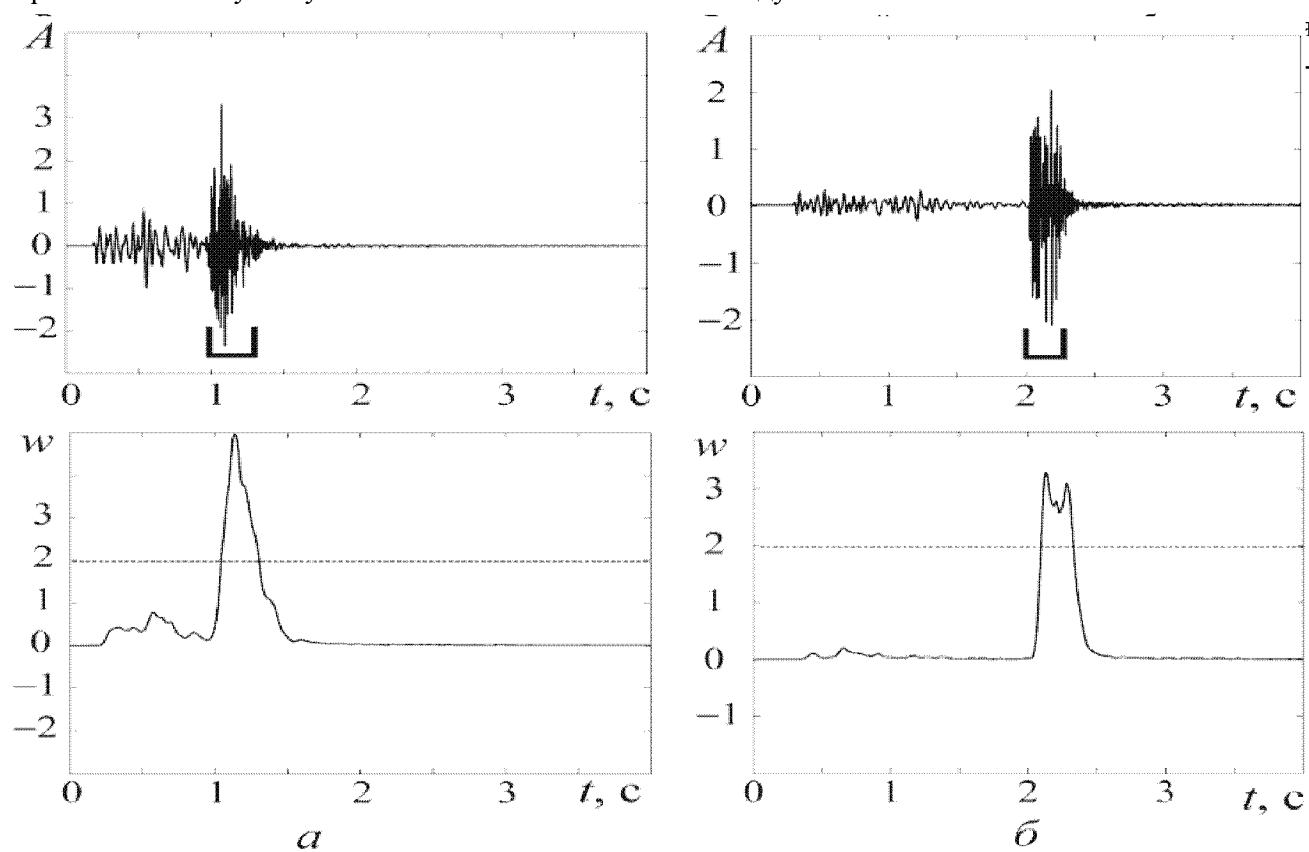


**Рис.1. а Сейсмограмма ОПВ волнового поля полевого материала, отработанного на территории Поволжья, после проведения одноканальной потрассной процедуры АРУ. Красными линиями показаны волны-помехи звукового и поверхностного типа. б — Сейсмограмма ОПВ полевого материала, отработанного на территории Узбекистана, после проведения одноканальной потрассной процедуры АРУ. Для обоих рисунков по оси абсцисс отложен номер трассы N, по оси ординат — время t**

На рис. 1 а показана типичная сейсмограмма общего пункта взрыва (ОПВ), полученная при проведении наземных сейсмических исследований методом отраженных волн в Саратовском Поволжье. Рис. 1 б демонстрирует внешний вид сейсмограммы ОПВ первичных полевых материалов, отработанных на территории Узбекистана, после проведения одноканальной процедуры автоматической регулировки усиления (АРУ), на которой ориентировочно выделены времена регистрации сигналов, свидетельствующих о наличии отражающих горизонтов в геологической среде. Территория полевых исследований принадлежит западной равнинной части Узбекистана. Сейсмогеологические условия участка работ весьма удобны для расчета вейвлетных спектральных и фазовых характеристик материалов, поскольку влияние верхней части разреза (ВЧР) на глубинные отражения практически отсутствует.

настоящее время 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: морле-вейвлет, МНАТ-вейвлет; паул-вейвлет [11–14].

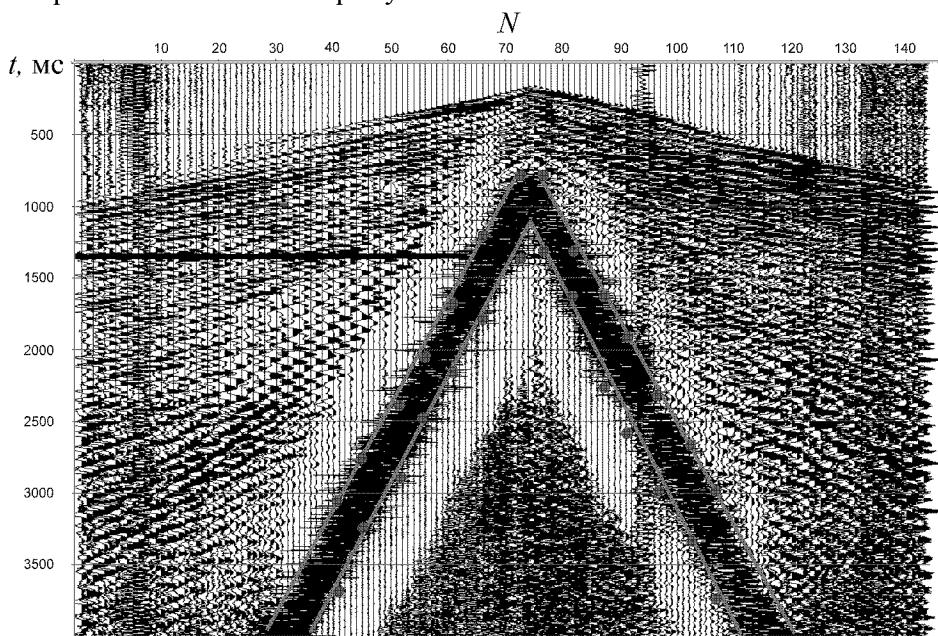
Основная идея разработанного метода диагностики различных режимов волновой динамики заключается в оценке мгновенной энергии преобразования  $w(t)$  в частотном диапазоне, характерном для искомого колебательного паттерна. При превышении величиной  $w(t)$  некоторого критического уровня, определяемого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



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

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

проведенного автоматизированного вейвлетного анализа выделена область пространственной и временной регистрации искомых помех, обусловленных волнами звукового и поверхностного типов (отмечена линиями на рисунке). Отметим, что при проведении стандартной обработки выделение данного типа волн производится либо вручную, либо требует применения сложных многоканальных процедур. Очевидным достоинством рассмотренного метода является возможность быстрой автоматической обработки сейсмограммы и выделения области волны-помехи.



**Рис. 3. Результат обработки данных всех трасс на сейсмограмме. Линиями отмечена область пространственной и временной регистрации искомых помех, обусловленных волнами звукового и поверхностного типов, выделенная автоматически с помощью рассмотренного метода**

Выбранный для численных экспериментов в качестве «стандартного» типового базиса вейвлет Морле [12] с параметром  $\psi_0 = \rho$  обладает хорошо локализованным в реальном и Фурье-пространстве базисом. Выбор данного материнского вейвлета для численных экспериментов обусловлен близостью его формы к виду регистрируемого при «типовых» полевых работах сейсмического импульса. Однако хорошо известно, что форма волнового импульса, регистрируемого при проведении наземной сейсмической разведки, сильно варьируется в зависимости от особенностей геологической среды,

петрофизических характеристик местности и методик проведения полевых работ. В таком случае для сложных задач динамической обработки данных на первый план выходят возможности «тонкой» настройки вейвлетного базиса на конкретные особенности регистрируемого при сейсмической разведке сигнала.

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 состояний, 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 удобным и оправданным, и более эффективным становится использование адаптивного вейвлет-анализа. В рамках разработки комплекса программных вейвлет-методов обработки данных уместно использовать численное конструирование адаптивных вейвлетов на основе отрезков анализируемых временных рядов. Нами предложена следующая процедура построения комплексной вейвлетной функции на основе временного ряда  $x(t)$ .

На первой стадии процедуры выделяется характерный временной масштаб  $\phi$  нерегулярного нестационарного процесса  $x(t)$ . В случае исследуемых нерегулярных временных рядов геофизической природы величина  $\phi$  будет сильно варьироваться для различных колебаний, суперпозиций которых данный сигнал является. Иными словами,

разнообразные регулярные помехи и полезные отклики от отражающих геологических границ будут иметь различные характерные частоты  $\omega_\tau$ , что даёт возможность тонкой настройки вейвлетного преобразования для конкретных задач диагностики, стоящих перед геофизиком. Далее, определившись с периодом  $\phi$  искомых колебаний, выбирается некий отсчет  $t_0$  во временной реализации сигнала  $x(t)$ , относительно которого и будет строиться вейвлетный базис. Реальная и мнимая часть вейвлетной функции будет задаваться в соответствии со следующими формулами:

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

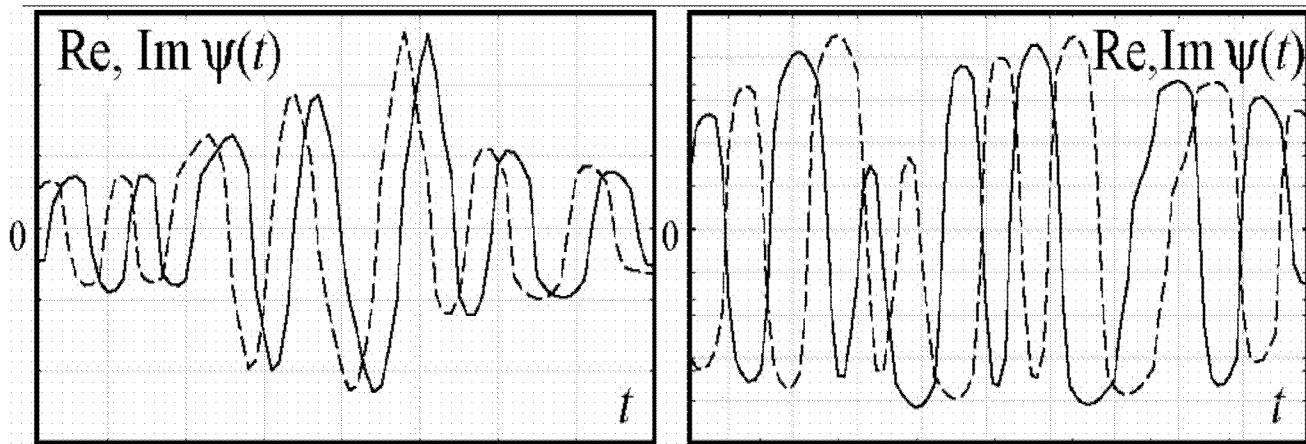
$$\text{Im } \psi(t) = A_{\text{Im}} \left\langle x(t - t_0 + \tau/2) \exp \left( -\frac{1}{2} \frac{(t - t_0)^p}{(n\tau)^p} \right) \right\rangle,$$

где  $\langle \dots \rangle$  обозначает операцию удаления среднего значения для удовлетворения условия нулевого среднего,  $n$  и  $p$  – параметры вейвлета,  $A$  – нормировочный множитель. Из формулы (3) видно, что параметр  $t_0$  вейвлета характеризует отрезок ряда  $x(t)$ , который оказывает наибольшее влияние на вейвлетный спектр  $W(t, s)$ .

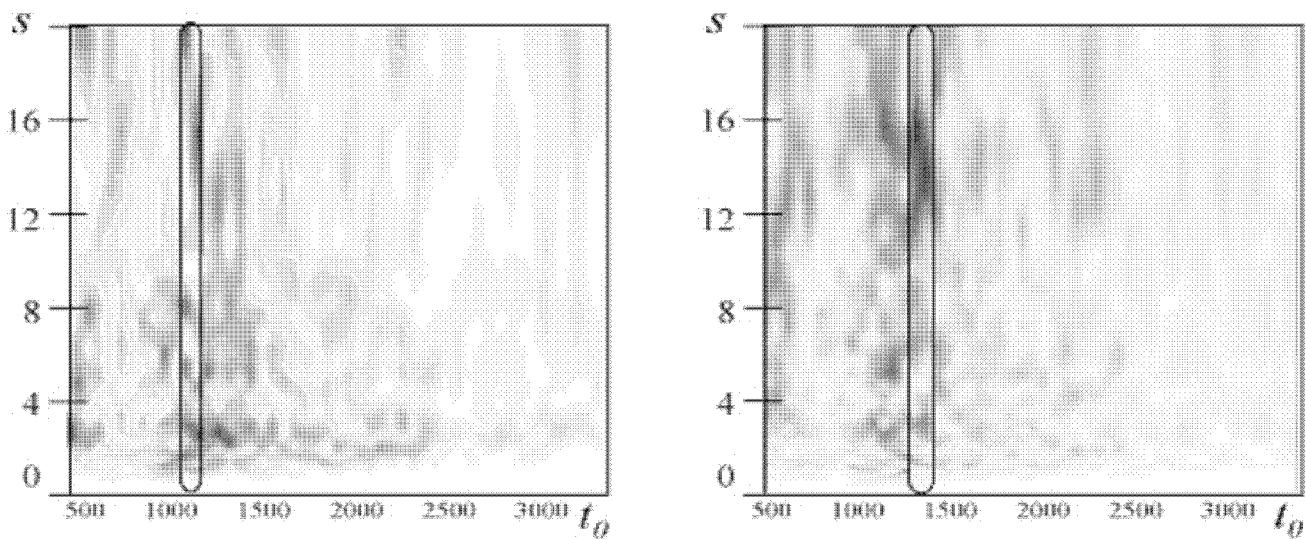
На рис. 4 продемонстрированы результаты расчета адаптивных вейвлетных функций (7) по типичной трассе (см. рис. 1 б).

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 рис. 4 а показан вид вейвлет-базиса, построенного по данным временной реализации, отвечающим первому сильному отраженному отклику, рис. 4 б демонстрирует аналогичную вейвлетную функцию, рассчитанную по временному интервалу отражения от второго характерного горизонта.

На рис. 5 приведены результаты построения соответствующих проекций распределения амплитуды вейвлетного преобразования  $|W(t, s)|$ , полученных с помощью созданных адаптивных базисных вейвлетных функций.



**Рис. 4. Вид адаптивных численно рассчитанных вейвлетных базисов (3) на основе временного ряда из рассматриваемой трассы. Параметры  $p$  и  $r$  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 адаптивных вейвлет-базисов, (а): вейвлет-базис рассчитан вблизи  $t_0 = 1050$  мс, (б): вейвлет-базис рассчитан вблизи  $t_0 = 1454$  мс**

Хорошо видно, что разработанные базисы позволяют осуществить «тонкую» настройку вейвлетного преобразования на определенные волновые особенности и диагностировать время прихода целевых отражений от первой и второй отражающих геологических границ.

Итак, описанные методики, несомненно, позволяют достичь высокого уровня точности, численной и программной простоты реализации и использования, возможности тонкой «настройки» такого современного

математического метода, как вейвлет-анализ на службе камеральных работ разведочной геофизики и обладают высоким инновационным потенциалом.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение 14.B37.21.0632) и в рамках проекта, выполняемого СГТУ по государственному заданию на выполнение работ.

**Руннова Анастасия Евгеньевна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НОЦ «Нелинейная динамика сложных систем» факультета экологии и сервиса Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Короновский Алексей Александрович** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НОЦ «Нелинейная динамика сложных систем» факультета экологии и сервиса Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Иванов Алексей Викторович** – кандидат геолого-минералогических наук, декан факультета экологии и сервиса Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Храмов Александр Евгеньевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Геоэкология и инженерная геология» факультета экологии и сервиса Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Runnova Anastasija Evgenevna** – Candidate of Physics and Mathematics, research scientist of the REC «Nonlinear Dynamics of Complex Systems» of Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

**Koronovskii Aleksey Aleksandrovich** – leading research scientist of the REC «Nonlinear Dynamics of Complex Systems» of Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

**Ivanov Aleksey Viktorovich** – Dean of faculty of service and ecology of Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

**Khramov Alexander Egenovich** – Professor of Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

Статья поступила в редакцию 18.01.13, принята к опубликованию 25. 01. 13