

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Могиленских Д.В., Павлов И.В., Федоров В.В., Мельникова С.Н., Сапожникова Е.Э. Принципы построения и функциональное содержание системы визуализации для анализа скалярных и векторных полей, заданных на двумерных регулярных сетках / Препринт РФЯЦ – ВНИИТФ. – Снежинск, 2000. – № 172. – 26 с.
2. Бондарев А.Е., Галактионов В.А. Анализ развития концепций и методов визуального представления данных в задачах вычислительной физики / Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2009. – № 53. – 28 с. URL: http://www.keldysh.ru/papers/2009/prep53/prep2009_53 (дата обращения: 28.03.2012).
3. Андреев С.В., Галактионов В.А., Денисов Е.Ю., Кирилов Н.Е. Синтез фотореалистичных трехмерных изображений в современных системах презентаций // Программные продукты и системы. – 2007. – № 3. – С. 37–40.
4. Ванданов В.Г., Долговесов Б.С., Исламов Р.Р., Казанский И.П., Клименко С.В., Ковальков М.А., Мазурок Б.С., Морозов Б.Б. Программно-аппаратный комплекс 3D презентаций на основе виртуальной студии и виртуального окружения // Трехмерная визуализация научной, технической и социальной реальности. Кластерные технологии моделирования: Труды I Международ. конф. – Ижевск: УдГУ, 2009. – Т. 1. – С. 73–77.

Поступила 28.03.2012 г.

УДК 550.8.053

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕТОДОВ ФАЗОЧАСТОТНОГО ПРОСЛЕЖИВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В.П. Иванченков, А.И. Кочегуров, О.В. Орлов

Томский политехнический университет
E-mail: kai@cc.tpu.edu.ru

Приведены результаты исследования разрешающей способности методов фазочастотного прослеживания сейсмических сигналов на моделях волновых полей и реальных данных. Показано, что методы фазочастотного прослеживания сигналов с равновесной и неравновесной обработкой обладают высокой разрешающей способностью и позволяют выделять слабые отражения в волновом поле. Результаты обработки полевых материалов подтверждают выводы математического моделирования и практическую ценность разработанных методов.

Ключевые слова:

Сейсмические сигналы, фазочастотные характеристики, разрешающая способность, функция правдоподобия.

Key words:

Seismic signals, phase-frequency characteristic, resolving ability, likelihood function.

Прослеживание сейсмических волн и границ занимает одно из ведущих положений при решении задач структурной сейсморазведки. В общей постановке в задачу прослеживания входит обнаружение волн, их идентификация и оценка параметров. Основными неизвестными параметрами при прослеживании волн являются моменты их прихода. Варианты прослеживания фиксированных волн (границ) связаны с назначением участков, в пределах которых исследуется поведение искомого объекта. На основе результатов прослеживания выходных данных осуществляется построение структурных карт и палеопостроения.

Не менее важное значение имеет прослеживание волн при решении задач прогноза геологического разреза, в том числе прогноза нефтегазоносности. При решении этих задач требуется проводить как детальное изучение геометрических параметров и формы выделяемых локальных геологических объектов, так и осуществлять оценку комплекса кинематических параметров, используемых при прогнозе. При прослеживании волн может также производиться определение ряда динамических параметров выделяемых отражений, напри-

мер, их амплитудных, энергетических и фазовых спектров.

На практике довольно часто необходимо решать задачи прослеживания волн в условиях их интенсивной интерференции. Такая ситуация наиболее характерна при исследованиях тонкослоистых сред. При этом, как правило, приходится осуществлять прослеживание волн в условиях, когда форма сигналов неизвестна. В этой связи реализуемые алгоритмы прослеживания сейсмических волн должны обладать повышенной разрешающей способностью и позволять надежно осуществлять оценку их кинематических параметров в условиях неполной априорной информации о свойствах выделяемых сигналов.

Для решения задач прослеживания волн нами был предложен ряд спектральных методов, использующих только информацию о фазовых спектрах регистрируемых сигналов [1–3]. Так в [1] рассмотрен оптимальный метод прослеживания фиксированных волн, наблюдаемых на фоне гауссовых помех, который реализуется в виде процедуры поиска максимума функции правдоподобия:

$$L(t) = \sum_{k=1}^m \delta(\omega_k) \cos(\Delta\phi(\omega_k) - \omega_k t). \quad (1)$$

Здесь $\Delta\phi(\omega_k) = \phi_x(\omega_k) - \phi_s(\omega_k)$ – отклонение фазового спектра сигнала от фазового спектра смеси сигнала и шума, $\delta(\omega_k) = A(\omega_k)/\sigma(\omega_k)$ – пиковое отношение сигнала к шуму на частоте ω_k , m – число анализируемых частотных компонент.

Практическое применение оптимальных фазочастотных алгоритмов вида (1) наталкивается на ряд проблем, в частности связанных с оценкой распределения отношений $\delta(\omega_k)$ в исследуемом диапазоне частот. Действительно, форма регистрируемых сейсмических сигналов, как правило, неизвестна, а, следовательно, неизвестны $\delta(\omega_k)$, $k = \overline{1, m}$. При этом также обычно оказываются неизвестными точные значения фазового спектра выделенных сигналов. В этой связи в [3] предложены так называемые фазочастотные алгоритмы с равновесной и неравновесной обработкой. Эти алгоритмы могут быть получены из оптимального метода путем замены в (1) весовой функции $\delta(\omega_k)$ на другие, специально подобранные функции. В общем случае функция правдоподобия (критерий оценки временного положения сигналов) для таких алгоритмов может быть записана в виде:

$$L(t) = \sum_{k=1}^m w(\omega_k) \cos[\phi(\omega_k, t)], \quad (2)$$

где $w(\omega_k)$ – частотная весовая функция, вид которой зависит от реализуемого фазочастотного алгоритма; $\phi(\omega_k, t)$ – текущий фазовый спектр участка трассы, вычисляемый в скользящем окне анализа [3].

Для равновесного алгоритма весовая функция $w(\omega_k)$ принимается равной единице во всей полосе частот. Для алгоритма с неравновесной обработкой $w(\omega_k)$ может быть задана в треугольной, синусоидальной или экспоненциальной форме. Так, при дальнейших исследованиях $w(\omega_k)$ задавалась в виде треугольной функции [3]:

$$w(\omega) = \frac{4}{3\omega_c} \begin{cases} 0, & \omega \leq \omega_H \\ \frac{2}{\omega_c}(\omega - \omega_H), & \omega_H < \omega \leq \omega_C, \\ -\frac{1}{\omega_c}(\omega - \omega_B), & \omega_C < \omega \leq \omega_B \end{cases}$$

где ω_B и ω_H – соответственно верхние и нижние частоты, определяющие $w(\omega_k)$; ω_C – частота максимума $w(\omega_k)$. При этом $\omega_C = 2\omega_H$; $\omega_B = 2\omega_C$.

Важно отметить, что в основу синтеза алгоритмов с равновесной и неравновесной обработкой положено установленное ранее свойство стационарности фазовых спектров импульсов однократно-отраженных волн. Это свойство заключается в том, что при совмещении начала отсчета с центром окна анализа фазовые спектры сейсмоимпульсов принимают постоянное, не зависящее от частоты значение [2].

Исходя из анализа (2) можно также показать определенную аналогию между процедурой оценки временного положения сигналов в принятых алгоритмах отслеживания и их низкочастотной

фильтрацией, а именно выражение функции правдоподобия (2) является обратным дискретным преобразованием Фурье от результата фильтрации исходного процесса цифровым фильтром с частотной характеристикой вида [4],

$$H(\omega_k) = \frac{w(\omega_k)}{|X(\omega_k)|}, \quad k = \overline{1, m},$$

где $|X(\omega_k)|$ – амплитудно-частотная характеристика сигнала.

Рассмотрим влияние действия фильтра. Прежде всего, отметим, что данный фильтр сначала выравнивает амплитудный спектр исследуемого колебания, а затем взвешивает его с помощью заданных весовых коэффициентов. При этом фазовые соотношения в исходной записи не изменяются. Известно [5], что выравнивание амплитудно-частотной характеристики при линейной фазочастотной характеристике приводит к сжатию сигнала, а, следовательно, появляется реальная возможность увеличить разрешение сигналов на записи. Кроме того, при реализации такого фильтра, с помощью задания весовых коэффициентов можно управлять его частотной характеристикой, тем самым, усиливая или ослабляя различные частотные составляющие сигнала.

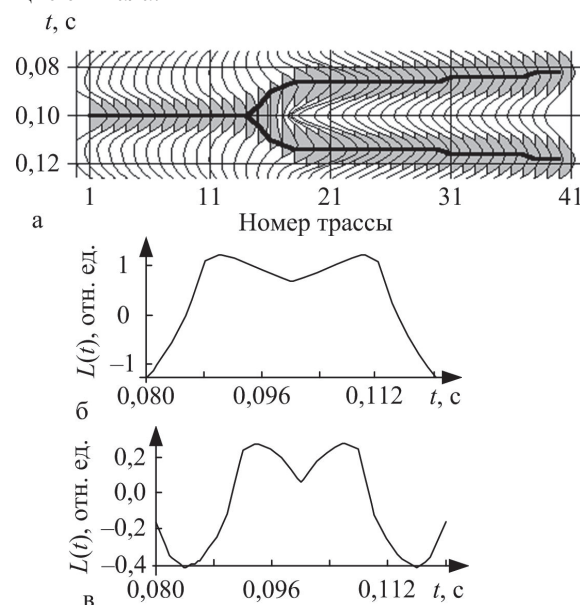


Рис. 1. Пример, иллюстрирующий разрешающую способность методов ФЧП. Модель волнового поля (а). Функция отслеживания для алгоритмов ФЧП с равновесной обработкой с разрешением 16 мс (б) и с неравновесной обработкой с разрешением 11 мс (в). Длительность окна отслеживания 40 мс; полоса частот 20...60 Гц

Для оценки разрешающей способности предложенных фазочастотных алгоритмов проведено их исследование на синтезированных моделях сейсмического волнового поля [3]. Модель задавалась в форме

$$s_{\Sigma}^k(t) = s\left(t - t_0 + \frac{\Delta T_k}{2}\right) + s\left(t - t_0 - \frac{\Delta T_k}{2}\right).$$

Здесь k – номер сеймотрассы; $t_0=0,1$ с; ΔT_k – временной интервал между импульсами, мс. Каждый из импульсов $s(t)$ является сигналом с колоколообразной огибающей.

Исследование разрешающей способности алгоритмов фазочастотного прослеживания (ФЧП) проводилось следующим образом. Выбирались параметры прослеживания, при которых разрешение являлось наилучшим. Далее непосредственно осуществлялось ФЧП. Полученное двумерное изображение исследовалось с целью определения трассы

с минимальным номером, на которой сигналы еще разрешались (имеется два явно выраженных экстремума, соответствующих теоретическому местоположению интерферируемых сигналов). Номер данной трассы, равный временному сдвигу между сигналами, выраженному в мс, соответствует предельному разрешению сигналов при прослеживании волн для исследуемого алгоритма.

На рис. 1, а, в качестве примера показана модель волнового поля и функции прослеживания для алгоритмов ФЧП с равновесной (рис. 1, б)

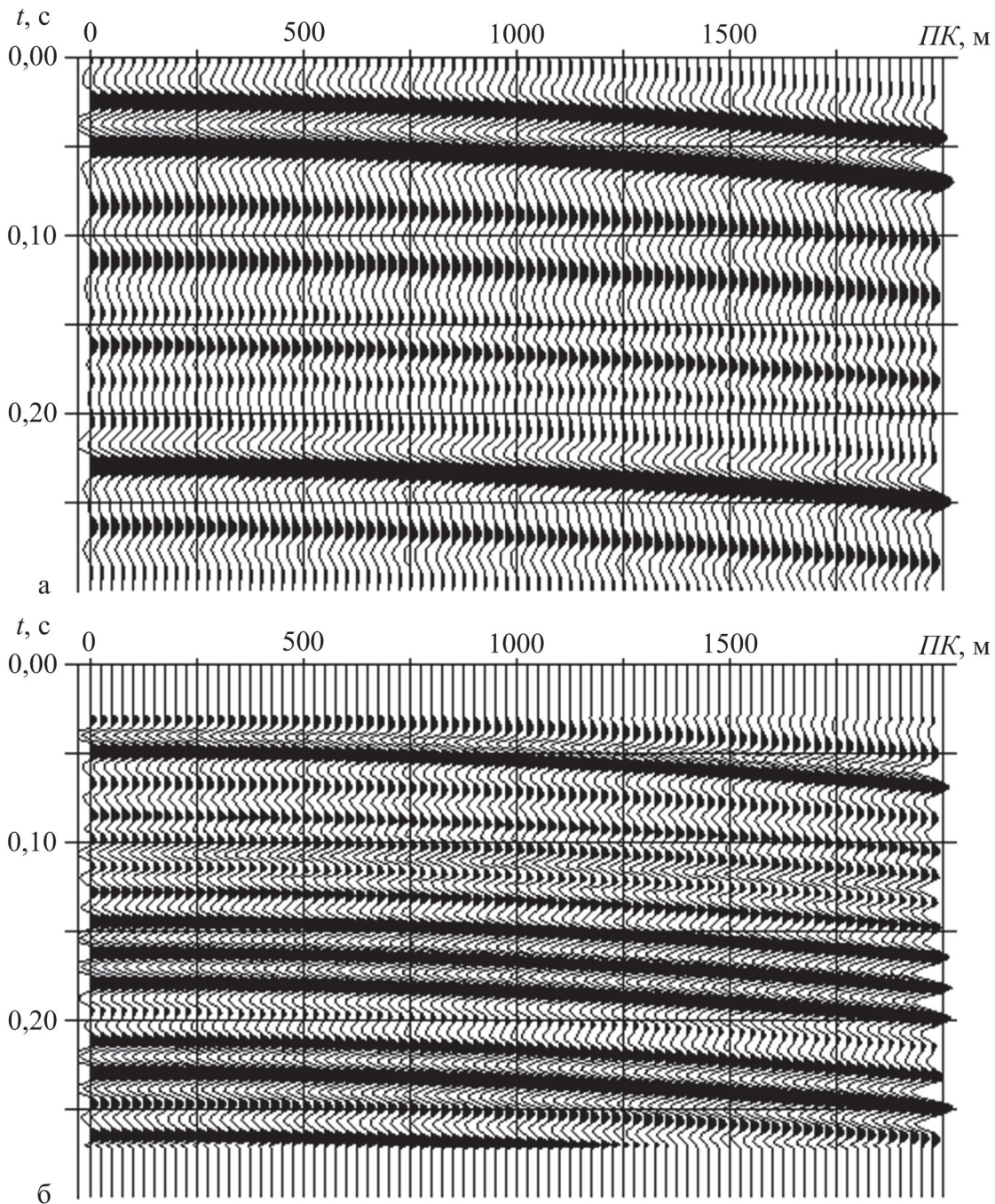


Рис. 2. ФЧП сигналов на модели сейсмограммы (алгоритм с неравновесной обработкой). Модель волнового поля (сигнал – импульс с колоколообразной огибающей; $f_0=34$ Гц, $\beta=51$) (а). Результат прослеживания (б). Длительность окна прослеживания 40 мс; центральная частота весовой функции $f_c=70$ Гц

и неравновесной обработкой (рис. 1, в) для трассы, которая в данном случае определяет предельное разрешение сигналов.

Приведенный пример показывает высокую разрешающую способность фазочастотных алгоритмов. Это позволяет говорить о возможности определения временного местоположения отражающих границ при ФЧП с высокой точностью.

На рис. 2, а приведена модель сейсмограммы, а на рис. 2, б – результат ФЧП (алгоритм с неравновесной обработкой), когда интерференционная картина складывается из 14 волн. Каждая волна состоит из совокупности импульсов с колоколообразной огибающей, основная частота которых $f_0=34$ Гц, а коэффициент затухания $\beta=51$.

Первая трасса модели сейсмограммы изображена на рис. 3, а. Видно, что в полученной интерференционной картине не удается выделить все действительно присутствующие в модели волны. Результаты ФЧП для данной трассы приведены на рис. 3, б, где уже явно все волны идентифицированы.

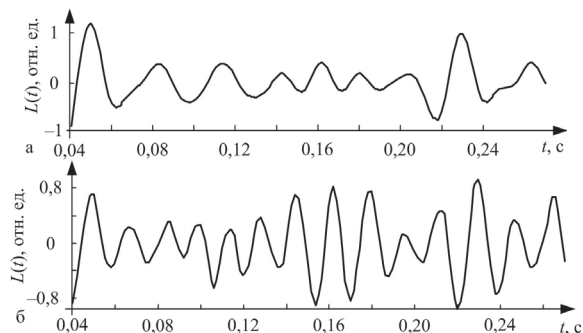


Рис. 3. ФЧП сигналов на модели сейсмотрассы. Модель волнового поля (а). Функция прослеживания (б)

Количественные результаты исследования разрешающей способности алгоритма ФЧП с неравновесной обработкой при различной длительности окна прослеживания T приведены на диаграмме, рис. 4.

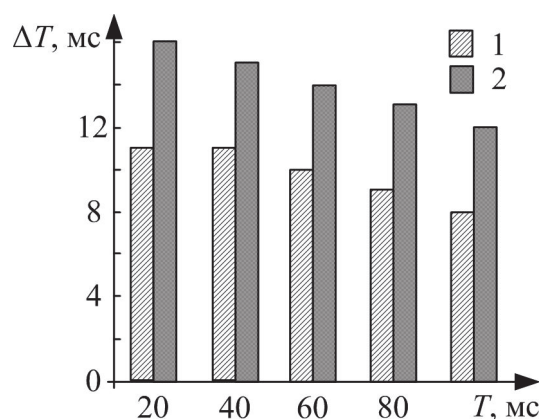


Рис. 4. Разрешающая способность алгоритма с неравновесной обработкой для сигналов с частотами: 1) 24; 2) 34 Гц

Из анализа диаграммы следует, что методы ФЧП сигналов с неравновесной обработкой позволяют разрешать сигналы, сдвинутые друг относительно друга не более чем на треть видимого пе-

риода. Такое разрешение дает возможность на практике получать надежные оценки кинематических параметров сейсмических сигналов при исследовании тонкослоистых сред.

На рис. 5 приведены фрагменты разреза (Крапивинское месторождение, Томская обл.) после стандартной обработки (рис. 5, а) и ФЧП (рис. 5, б).

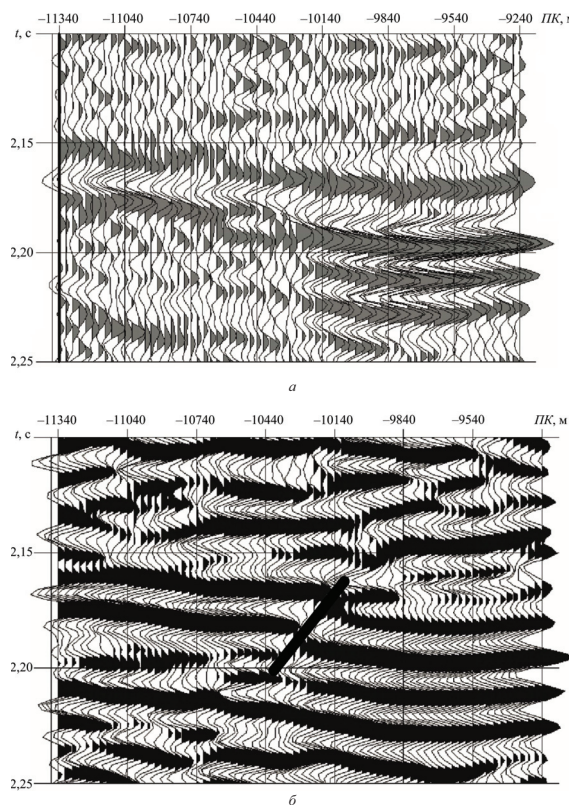


Рис. 5. Фрагменты разреза после стандартной обработки (а) и ФЧП (б)

Из рисунка видно, что в результате проведения ФЧП удалось выделить амплитудно-выраженный сброс, которого на фрагменте разреза после стандартной обработки не наблюдается.

Еще более убедительный пример приведен на рис. 6, где удалось не только выделить двухступенчатое нарушение, но и увидеть зону предполагаемого водонасыщенного коллектора.

Выводы

Исследования на моделях волновых сейсмических полей и результаты обработки реальных данных показали, что:

1. Методы фазочастотного прослеживания сигналов позволяют существенно увеличить разрешение сигналов на исходных сейсмических записях, по крайней мере, до одной трети видимого периода.
2. Результаты фазочастотного прослеживания дают возможность выделять предполагаемые тектонические нарушения, необходимые как для решения задач структурной сейсмозаведки, так и для прогноза нефтегазоносности.

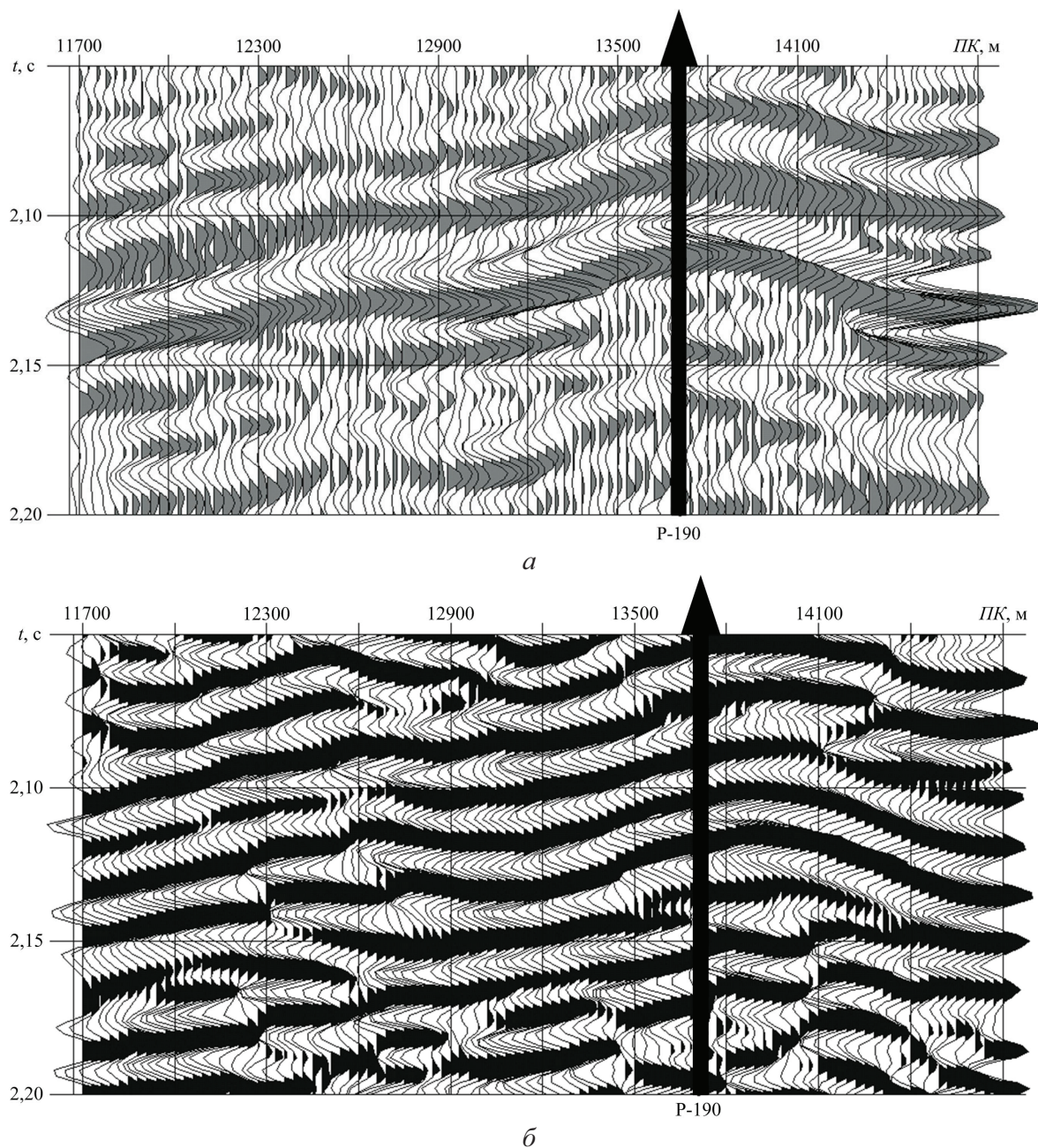


Рис. 6. Фрагменты разреза в области скважины P-190 после стандартной обработки (а) и ФЧП (б)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванченков В.П., Кочегуров А.И. Определение временного положения сейсмических сигналов по оценкам их фазочастотных характеристик // Геология и геофизика. – 1988. – № 9. – С. 77–83.
2. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Орлов О.В. О точности определения временного положения сейсмических сигналов по оценкам их фазочастотных характеристик // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 5. – С. 49–53.
3. Иванченков В.П., Вылегжанин О.Н., Орлов О.В., Козлов А.А. и др. Методы фазочастотного анализа волновых полей и их применение в задачах обработки данных сейсмозвездки // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 7. – С. 65–70.
4. Кочегуров А.И. Исследование функции правдоподобия, формируемой при реализации методов фазочастотного прослеживания сейсмических волн // Наука и образование – ведущий фактор стратегии Казахстан-2030. (Сагиновские чтения № 2): Сб. трудов Междунар. научн. конф. – Караганда, 24–26 июня 2010. – Ч. 3. – Караганда: КарГТУ, 2010. – С. 364–365.
5. Тяпкин Ю.К. Оптимальная линейно-фазовая полосовая фильтрация сейсмических записей // Геология и геофизика. – 1984. – № 3. – С. 99–105.

Поступила 18.04.2012 г.