



В. П. Иванченков, канд. техн. наук, доцент, *at@at.tpi.ru*,

А. И. Кочегуров, канд. техн. наук, доцент, *kaicc@tpi.ru*,

О. В. Орлов, канд. техн. наук, доцент, *orloff234@gmail.com*

(кафедра прикладной математики, Национальный исследовательский
Томский политехнический университет, Россия, г. Томск)

ФАЗОЧАСТОТНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА

Рассматриваются возможности использования фазочастотных характеристик (ФЧХ) отраженных сейсмических волн в качестве информативных параметров для решения задач прогноза геологического разреза, кратко обобщаются результаты разработки и исследования ряда фазочастотных методов анализа сложных волновых полей. Показывается высокая разрешающая способность и помехоустойчивость фазочастотных методов, приводятся примеры их применения для обработки реальных данных.

Ключевые слова: фазочастотные характеристики отраженных сейсмических волн, методы фазочастотного прослеживания, фазовременной анализ, прогноз геологического разреза.

В настоящее время для решения задач прогноза геологического разреза (ПГР) широко применяются динамические параметры отраженных волн, связанные с их амплитудой и энергией (амплитуды экстремумов волн, амплитудные и энергетические спектры сигналов, корреляционные функции сейсмозаписей и т. п.) [1, 3, 4]. В значительно меньшей степени используются фазочастотные характеристики (ФЧХ) сейсмических волн. Между тем в сложный закон изменения фазовых спектров сейсмических сигналов заложена важная информация о местоположении отражающих границ, типе скоростного разреза, поглощающих и дисперсионных свойствах слоистых геологических сред [5, 9–12]. На этой основе могут быть синтезированы фазочастотные алгоритмы прослеживания, позволяющие в условиях априорной неопределенности относительно формы исследуемых волн обнаруживать и разрешать сигналы на фоне

интенсивных помех и получать надежные оценки их параметров [6]. Использование ФЧХ отражений оказывается также полезным при решении задач прогноза геологического разреза, в том числе прогноза нефтегазоносности осадочных толщ.

В данной статье кратко обобщаются результаты исследований информационных свойств фазовых спектров однократно отраженных волн, разработке на их основе ряда фазочастотных методов для решения отдельных задач прогноза геологического разреза, а также приводятся примеры применения предложенных методов, подтверждающие их эффективность.

Предварительно отметим некоторые важные свойства ФЧХ сейсмических сигналов, обратив внимание на эффект стационарности фазовых спектров отраженных волн. В соответствии с общей спектральной теорией сигналов в детерминированном представлении любой процесс, представляющий собой изменение той

или иной физической величины, может быть полностью описан как во временной области в виде функции $U(t)$, так и в частотной области – в виде комплексного спектра $S(f)$.

Обе эти формы представления процессов равноправны и связаны между собой парой преобразования Фурье:

$$U(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f)e^{+j2\pi ft} df,$$

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t)e^{-j2\pi ft} dt.$$

При этом $S(f)$ как любая комплексная функция может быть записана следующим образом:

$$S(f) = |S(f)| \cdot e^{j\phi(f)},$$

где функция

$$\phi(f) = \arctg \frac{B(f)}{A(f)} + 2\pi n, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

определяет фазовый спектр сигнала и является в соответствии с формулой (1) неоднозначной функцией, что предпо-

деляет необходимость доопределять его для значений, выходящих за пределы интервала $[-\pi, \pi]$.

При определении фазовых спектров сейсмических сигналов важное значение имеет выбор начала отсчета времени, полосы частот и временного интервала (размера окна анализа), в пределах которого находится преобразование Фурье при вычислении спектров.

Проведенные исследования на наиболее часто используемых моделях сейсмических импульсов (импульс Берлаге, импульс с колокольной огибающей и др.) показали, что при определенной протяженности окна анализа и совмещения его центра с максимумами сигналов их фазовые спектры в основной полосе частот принимают постоянное, не зависящее от частоты значение (область стационарной фазы) [5]. На рис. 1а в качестве примера показан импульс Берлаге

$$S(t) = \alpha_0 t^n e^{-\beta t} \sin 2\pi f_0 t, \quad t \geq 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots;$$

где β , n – параметры, определяющие конкретный вид огибающей импульса, f_0

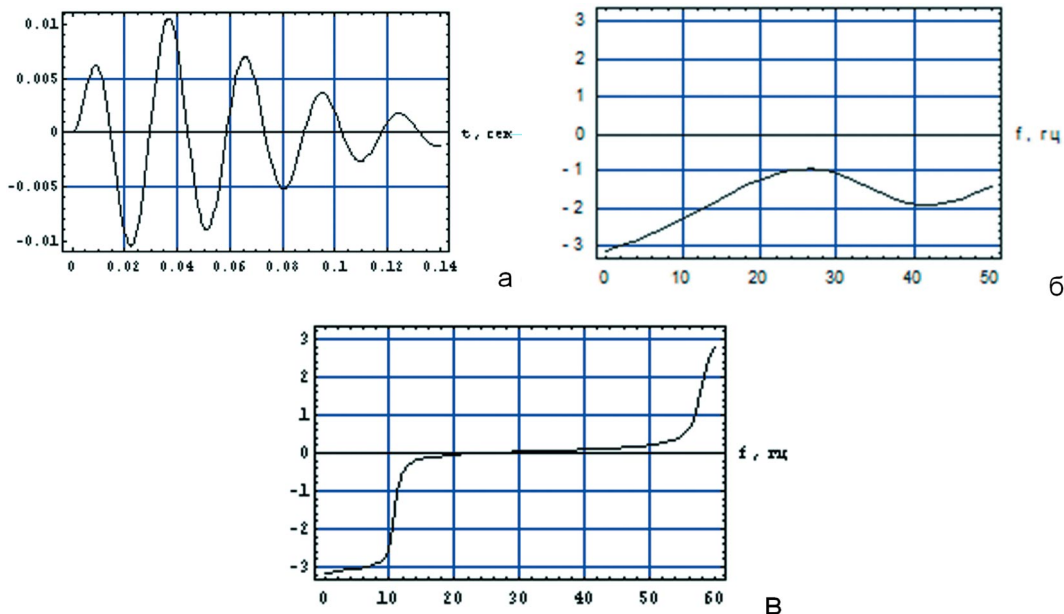


Рис. 1. Эффект стационарности фазового спектра импульса Берлаге:
 а – импульс Берлаге; б – фазовый спектр в широком окне анализа; в – фазовый спектр в коротком окне анализа

– преобладающая частота. ФЧХ импульса Берлаге ($n=1, 2$) не является постоянной ни при каких параметрах β, n (рис. 1б). Однако, если ограничить длительность импульса, выбрав окно анализа, равное 2–3 видимым периодам, а нулевую точку отсчета времени расположить в центре окна, то фазовый спектр в определенной полосе частот становится практически стационарным (рис. 1в).

Проведенные исследования показали, что в общем случае границы области стационарной фазы в случае ограничения длительности сейсмоимпульсов с достаточной точностью определяются полосой частот:

$$\left(\max\left\{0, f_0 - \frac{1}{T}\right\}, f_0 + \frac{1}{T} \right),$$

где T – длительность окна анализа.

Установленное условие стационарности ФЧХ сейсмоимпульсов нашло подтверждение при изучении спектров отраженных волн, полученных при сейсмических исследованиях в ряде районов Западной Сибири [7]. Использование информации о стационарности ФЧХ сейсмических сигналов позволило синтезировать ряд фазочастотных алгоритмов прослеживания волн и построить на их основе объектно-ориентированные фазовые разрезы. Некоторые из этих алгоритмов будут рассмотрены далее.

Важной задачей при ПГР являются вопросы выявления и изучения взаимосвязей

между фазовыми спектрами отраженных волн и петрофизическими параметрами анализируемых геологических сред. С этой целью были проведены исследования на ряде моделей слоистых поглощающих сред с горизонтальными границами. При этом использовался один из широко распространенных подходов, когда среда рассматривалась в виде линейной системы, вносящей определенные изменения в проходящие через нее колебания [1, 3]. Суть применяемого системного подхода можно проиллюстрировать на примере простой модели слоистой поглощающей толщи (рис. 2а). При нормальном падении волны $S(t)$ в лучевом приближении процесс отражения от кровли и подошвы линейно неупругого слоя II можно представить в виде эквивалентной системы, показанной на рис. 2б.

Спектры волн, отраженных от кровли и подошвы слоя II, могут быть соответственно представлены

$$S_1(f) = k_{12}(f)S_0(f) = |S_1(f)|e^{j\phi_1(f)},$$

$$S_2(f) = r_{21}(f)k_{23}(f)H(f)r_{12}(f)S_0(f) = |S_2(f)|e^{j\phi_2(f)},$$

где $k_{12}(f)$ и $k_{23}(f)$ – коэффициенты отражения от кровли и подошвы слоя II; $r_{21}(f)$ и $r_{12}(f)$ – коэффициенты преломления на кровле слоя II; $H(f)$ – частотная характеристика системы, характеризующая распространение волны в поглощающем слое II в двух направлениях; $S_0(f)$ – спектр падающей волны. Следует отметить, что коэффициенты отражения и прелом-

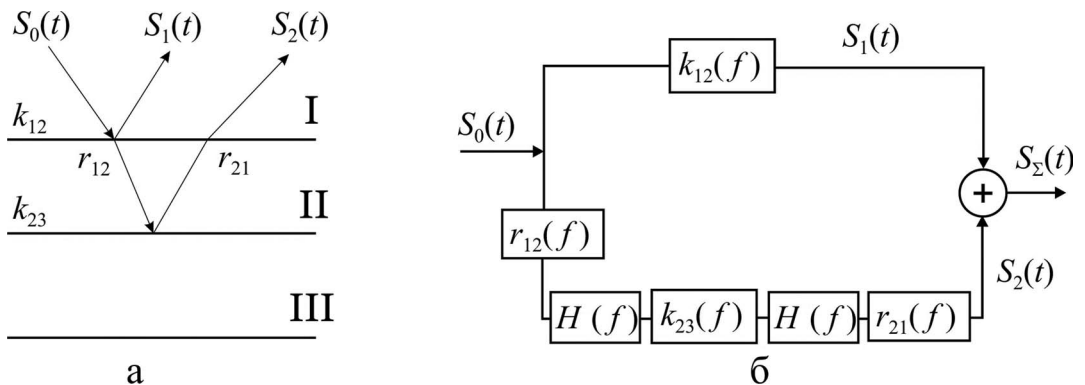


Рис. 2. Модель плоскопараллельной слоистой поглощающей толщи:

а – модель среды; б – представление модели среды в виде эквивалентной системы

ления в поглощающих средах являются комплексными функциями.

Функция

$$\phi_2(f) = \phi_{r_{12}}(f) + \phi_H(f) + \phi_{k_{23}}(f) + \phi_{r_{21}}(f) + \phi_0(f) \quad (2)$$

определяет фазовый спектр отраженной волны $S_2(f)$, который непосредственно зависит от аргументов коэффициентов преломления $\phi_r(f)$ и отражения $\phi_k(f)$, а также от ФЧХ системы $\phi_H(f)$, определяющей распространение волны в поглощающем слое, и начальной фазы падающей волны $\phi_0(f)$.

В соответствии с работами [2, 7] аргументы коэффициентов отражения и преломления могут быть записаны в следующей форме:

$$\phi_k(f) = \arctg \frac{4\pi\gamma_{12}(f)[\delta_2(f) - \delta_1(f)]}{4\pi^2[1 - \gamma_{12}^2(f)] + [\delta_1^2(f) - \delta_2^2(f)\gamma_{12}^2(f)]},$$

$$\phi_r(f) = \arctg \frac{2\pi[\delta_1(f) - \delta_2(f)]}{4\pi^2 + \delta_1(f)\delta_2(f) + \gamma_{12}(f)[4\pi^2 + \delta_2^2(f)]}, \quad (3)$$

где $\gamma_{12}(f) = \frac{\rho_1 V_1(f)}{\rho_2 V_2(f)}$ – отношение акустических жесткостей в средах I и II; $V_i(f)$, ρ_i – соответственно скорость распространения продольных волн и плотность среды;

$\delta_i(f) = \frac{\alpha_i(f)V_i(f)}{f}$ – декремент поглощения; $\alpha_i(f)$ – коэффициент поглощения в i -й среде ($i=1, 2$).

Следующей составляющей фазового спектра волны, отраженной от подошвы II слоя, является функция $\phi_H(f)$, определяющая фазовый набег при распространении волны в этом поглощающем слое. Принимая для поглощающего слоя минимально-фазовую модель среды и допущение о линейной зависимости коэффициента поглощения от частоты $\alpha(f) = \beta f$ согласно работам [1, 2], выражение для модуля и аргумента $H(f)$ можно привести к виду:

$$|H(f)| = e^{-\alpha(f)2h},$$

$$\phi_H(f) = 4\pi fh \left[\frac{1}{V(f_1)} - \frac{\alpha(f)}{\pi^2} \ln \left(\frac{f}{f_1} \right) \right], \quad (4)$$

где h – мощность II слоя; $V(f_1)$ – скорость распространения на некоторой базовой частоте f_1 .

Из формулы (4) видно, что нелинейная составляющая $\phi_H(f)$ определяется поглощающими свойствами анализируемого слоя. По аналогии с изложенным ранее может быть построена модель поглощающей среды, состоящей из произвольного числа слоев [7].

Таким образом, из выражений (2–4) видно, что петрофизические параметры исследуемой толщи оказывают непосредственное влияние на ФЧХ отраженных волн.

Исследования данного влияния проводились на ряде моделей слоистых поглощающих сред. В качестве примера на рис. 3 приведены четыре такие модели.

Модель 1

Аргиллиты
Газонасыщенный песчаник
Аргиллиты

Модель 2

Аргиллиты
Нефтенасыщенный песчаник
Аргиллиты

Модель 3

Аргиллиты
Водонасыщенный песчаник
Аргиллиты

Модель 4

Аргиллиты
Карбонизированный песчаник
Аргиллиты

Рис. 3. Геологические модели слоистых поглощающих сред

Эти модели имитировали наличие слоя песчаника (слой II), расположенного во вмещающей толще аргиллита (слои I и III). В первой модели песчаный слой предполагался насыщенным газом, во второй – нефтью, в третьей – водой. В четвертой модели имитировалось наличие непроницаемого карбонизированного песчаника. Скорости продольных волн, плотности сред, акустические жесткости и декременты поглощения во всех слоях выбирались, исходя из обобщенных данных, характерных для верхнеюрской продуктивной толщи Крапивинской площади Томского Приобья.

На рис. 4 изображены обобщенные фазовые спектры отраженной волны от подошвы II слоя, полученные для четырех рассматриваемых моделей сред. Данные характеристики были построены на основе оценки семейства аргументов коэффициентов отражения, вычисляемых при различных декрементах поглощения контактирующих слоев. Заштрихованные области на рисунках определяют пределы изменения фазовых спектров отраженных волн в зависимости от параметров поглощения второго слоя. Наибольшие изменения фазовых спектров отраженных волн, как видно из рисунка, наблюдаются для газонасыщенного коллектора (рис. 4а) и нефтенасыщенного песчаника (рис. 4б). В случае насыщения песчаного коллектора водой (рис. 4в) обобщенные фазовые спектры коэффициентов отражения слабо зависят от частоты, и их значения сосредоточены в промежуточной области $0 \div 1$ рад или $-2 \div -3$ рад. При отсутствии коллектора фазовые спектры изменяются незначительно и практически не зависят от частоты (рис. 4г). Их значения близки к 0 или π .

Проведенные исследования на ряде других моделей слоистых поглощающих сред также показали, что фазовые спектры отраженных волн значимо зависят от изменения акустических и поглощающих свойств среды. Это может служить важной предпосылкой для использования ФЧХ отраженных волн в качестве диа-

гностических признаков при решении задач ПГР, в том числе прогнозе нефтегазонасыщенности осадочных толщ.

Как уже отмечалось выше, на базе свойства стационарности ФЧХ отраженных волн были разработаны фазочастотные алгоритмы для их прослеживания. Прослеживание сейсмических волн и границ занимает одно из ведущих положений при решении задач структурной сейсморазведки. Не менее важное значение имеет прослеживание волн при решении задач прогноза геологического разреза. 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. На практике довольно часто приходится решать задачи прослеживания волн в условиях их интенсивной интерференции. Такая ситуация наиболее характерна при исследованиях тонкослоистых сред, где, 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 достаточно надежно осуществлять оценку их кинематических параметров в условиях неполной априорной информации о свойствах выделяемых сигналов.

Предварительно рассмотрим оптимальный метод прослеживания фиксированных волн, наблюдаемых на фоне гауссовых помех, который реализуется в виде процедуры поиска максимума функции правдоподобия [6]

$$L(t) = \sum_{k=1}^m \delta(\omega_k) \cos [\Delta\phi(\omega_k) - \omega_k t]. \quad (5)$$

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

Практическое применение оптимальных фазочастотных алгоритмов вида (5) 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 предложены

так называемые фазочастотные алгоритмы (ФЧП) с равновесной и неравновесной обработкой. Эти алгоритмы могут быть получены из оптимального метода путем замены в формуле (5) весовой функции $\delta(\omega_k)$ на другие, специально подобранные функции. В общем случае функция качества (критерий оценки временного положения сигналов) для таких алгоритмов может быть записана в виде [9]

$$L(t) = \sum_{k=1}^m w(\omega_k) \cos[\phi(\omega_k, t)], \quad (6)$$

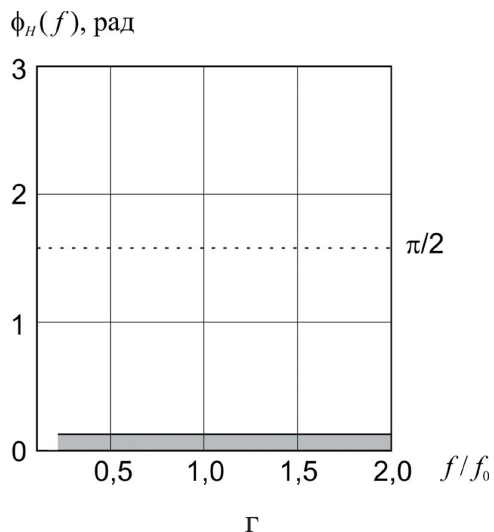
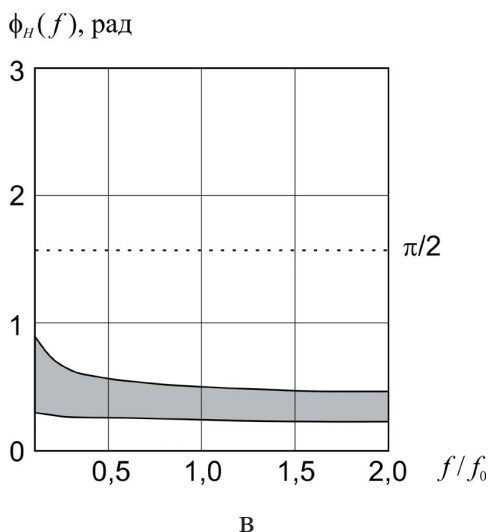
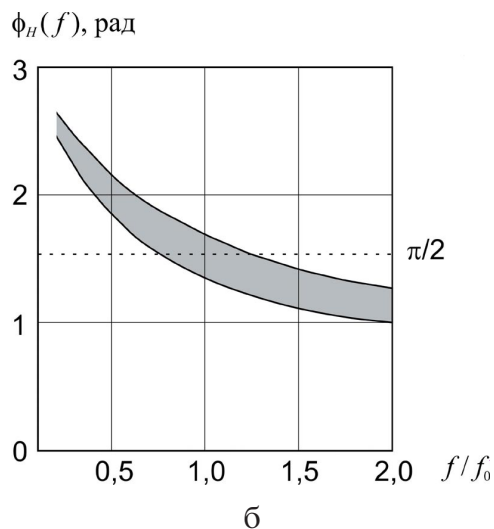
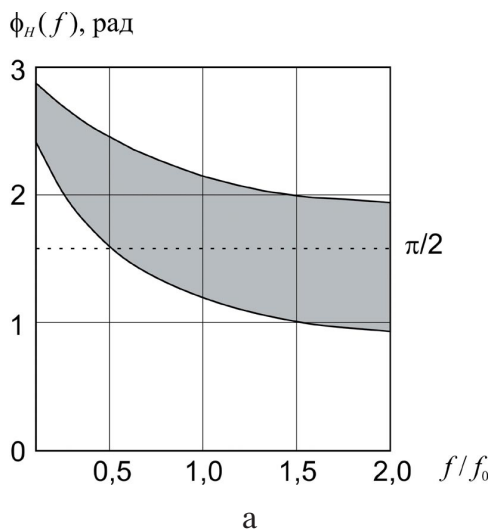


Рис. 4. Обобщенные фазовые спектры отражения волн от кровли второго слоя:

а – модель 1; б – модель 2; в – модель 3; г – модель 4

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

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. Определение временного положения сигнала при этом осуществляется путем оценки местоположения экстремума функции качества (6).

На рис. 5 приведена схема, поясняющая процедуру прослеживания волн в реализуемых алгоритмах. Вдоль выбранной

сейсмической трассы перемещается окно анализа, для каждого положения которого определяется мгновенный фазовый спектр выделенного участка трассы и проводится вычисление функции качества (6). После прохождения требуемого интервала сейсмотрассы определяется положение экстремума функции качества и оценивается время прихода сигнала в данную точку приема. Исследование эффективности предложенных алгоритмов ФЧП проводилось на различных моделях волновых полей. Так, на рис. 6 приведены отдельные результаты исследования помехоустойчивости алгоритмов ФЧП, когда прослеживание сигналов осуществлялось на фоне гауссовых нерегулярных помех. Графики иллюстрируют зависимость

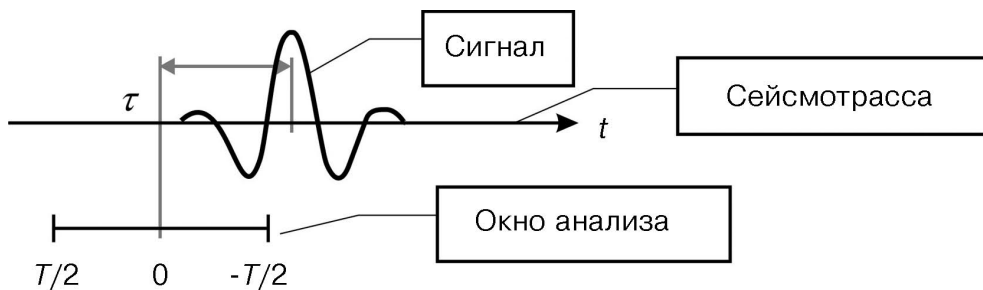


Рис. 5. Схема, поясняющая процедуру фазочастотного прослеживания сейсмических волн

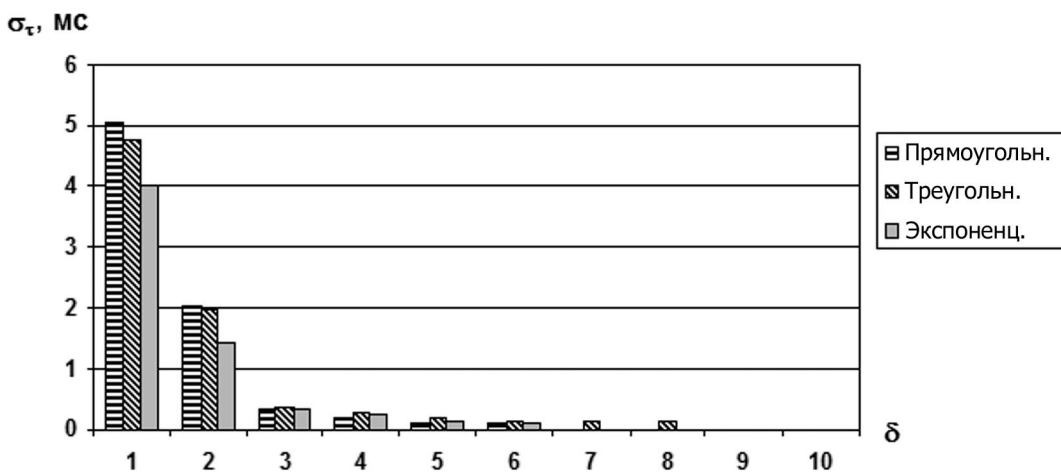


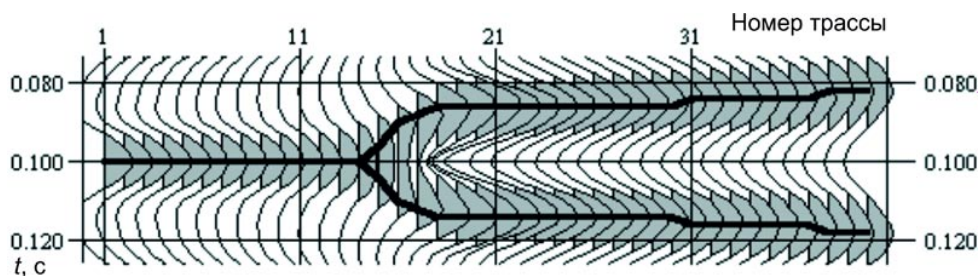
Рис. 6. Оценка помехоустойчивости алгоритмов ФЧП с равновесной и неравновесной обработкой при треугольной и экспоненциальной весовых функциях

среднеквадратической погрешности оценки временного положения сигнала σ от пикового отношения сигнала к шуму δ для алгоритмов с равновесной и неравновесной обработкой и различными весовыми функциями. Из них видно, что даже при отношении сигнала к шуму, равному единице, погрешность оценки временного положения не превышает 6 мс, что свидетельствует о достаточно высокой помехоустойчивости алгоритмов ФЧП.

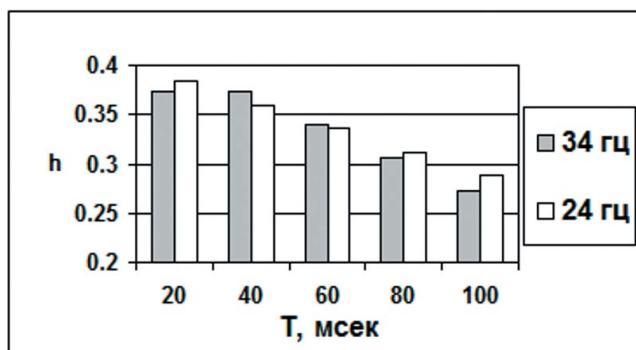
Как уже отмечалось выше, при решении задач прослеживания и детального расчленения тонкослоистых продуктивных толщ особо важное значение приобретает обеспечение повышенного разрешения выделяемых сейсмических сигналов. На рис. 7 в качестве примера показаны результаты исследования разрешающей способности методов ФЧП с неравновесной обработкой, полученные на модели поля, включающей две одина-

ковые по форме волны (рис. 7а). Как видно из рис. 7б, данный метод обеспечивает разрешение по вертикали порядка четверти длины волны [8].

На базе предложенных методов ФЧП, наряду с прослеживанием сейсмических волн, были реализованы алгоритмы построения объектно-ориентированных разрезов, фазовременного (ФАН) и фазоэнергетического (ФЭА) анализов. При построении объектно-ориентированных разрезов функция качества алгоритмов прослеживания определяется для различных пикетов наблюдения и отображается во временном интервале, соответствующем анализируемым толщам. ФАН – анализ используется при прогнозе типов геологического разреза около- и межскважинного пространства. Для каждой анализируемой сейсмотрассы в области исследуемой толщи формируется совокупность функций ФЧП (6):



а



б

Рис. 7. Разрешающая способность алгоритма ФЧП с неравновесной обработкой для сигналов с частотой 24 и 34 гц:

а – модель сейсмограммы; б – оценка разрешающей способности

$$L_i(\tau) = \sum_{k=1}^{n-1} W_i(f_k) \cos [\phi(f_k) - 2\pi f_k \tau], \quad (7)$$

где $W_i(f_k)$ специально подобранная весовая функция, частотные параметры которой целенаправленно изменяются в процессе ФАН-анализа.

Совокупность функций вида (7) образует ФАН-колонку (ФАН-образ) для данной сейсмотрассы, а их совокупность для набора сейсмотрасс вдоль профиля наблюдения образует ФАН-разрез.

Для решения данной задачи привлекаются данные геофизического исследования скважин и имеющиеся материалы по пробуренным ранее на исследуемой площади скважинам. На основе этих данных при проведении ФАН анализа для пикетов наблюдения, соответствующих положению скважин, получают ФАН-образы, которые далее используются в качестве эталонных при прогнозе типов геологического разреза в около- и межскважинном пространстве.

При проведении ФЭА формируется функция, пропорциональная энергии функций качества (7), получаемых при фазовременном анализе. Как показали исследования, аномальные значения поглощения и дисперсии скорости сейсмических волн приводят к появлениям аномалий в поведении этой функции, что может служить прогнозным признаком для выделения нефтегазоперспективных зон в исследуемой области около- и межскважинного пространства. По данным ФАН и ФЭА строятся карты распространения типов разрезов и распределения аномальных зон для изучаемой площади. По результатам комплексной интерпретации структурных построений и всех материалов фазочастотной обработки формируются предложения по оценке продуктивности анализируемых толщ.

На базе предложенных фазочастотных методов были разработаны программно-алгоритмические комплексы “Геосейф” и “Геосейф-ВСП” [9]. Комплекс “Геосейф” ориентирован на детальную обработку временных разрезов, получаемых при

проведении наземных исследований методом общей глубинной точки (ОГТ). Комплекс “Геосейф-ВСП” используется для обработки данных вертикального сейсмического профилирования (ВСП). На этих программных комплексах проведена обработка большого объема материалов сейсмических исследований ОГТ и ВСП, полученных в условиях Томской и Тюменской областей. Общий анализ представленных для обработки разрезов ОГТ показал, что наблюдаемые волновые поля для исследуемых толщ имеют, как правило, сложный интерференционный характер, отражающий тонкослойный геологический разрез со сложным пространственным распределением слагающих его элементов. В ряде случаев отражения от анализируемых горизонтов динамически не выразительны, неустойчивы по латерали и прослеживаются спорадически. При детальной обработке временных разрезов ОГТ были построены объектно-ориентированные разрезы на основе алгоритмов ФЧП, а также горизонтальные ФАН и ФЭА разрезы.

В целом проведенное по результатам обработки сопоставление временных разрезов ОГТ и объектно-ориентированных фазовых разрезов показало, что применение ФЧП значительно улучшает разрешение волн в области их интенсивной интерференции, а также позволяет выделять и прослеживать слабые по интенсивности отражения. На рис. 8–11 приведены отдельные результаты обработки материалов ОГТ с помощью разработанных фазочастотных алгоритмов.

Так, на рис. 8 представлены фрагменты разреза ОГТ и полученного объектно-ориентированного разреза (разреза ФЧП) для одного из профилей Мыльджинского газоконденсатного месторождения Томской области. Как видно из рисунка, на разрезе ФЧП, в отличие от разреза ОГТ, удается выделить и привязать все основные отражающие горизонты нижнего мела и верхней юры, причем уверенно прослеживаются даже очень слабые по интенсивности отражения. На

разрезах ФЧП, по сравнению с разрезами ОГТ, более отчетливо проявляются различные неоднородности исследуемого геологического разреза (рис. 9).

По результатам ГИС и исследования кернов, полученных на скважинах Крапивинского нефтяного месторождения Томской области было выделено

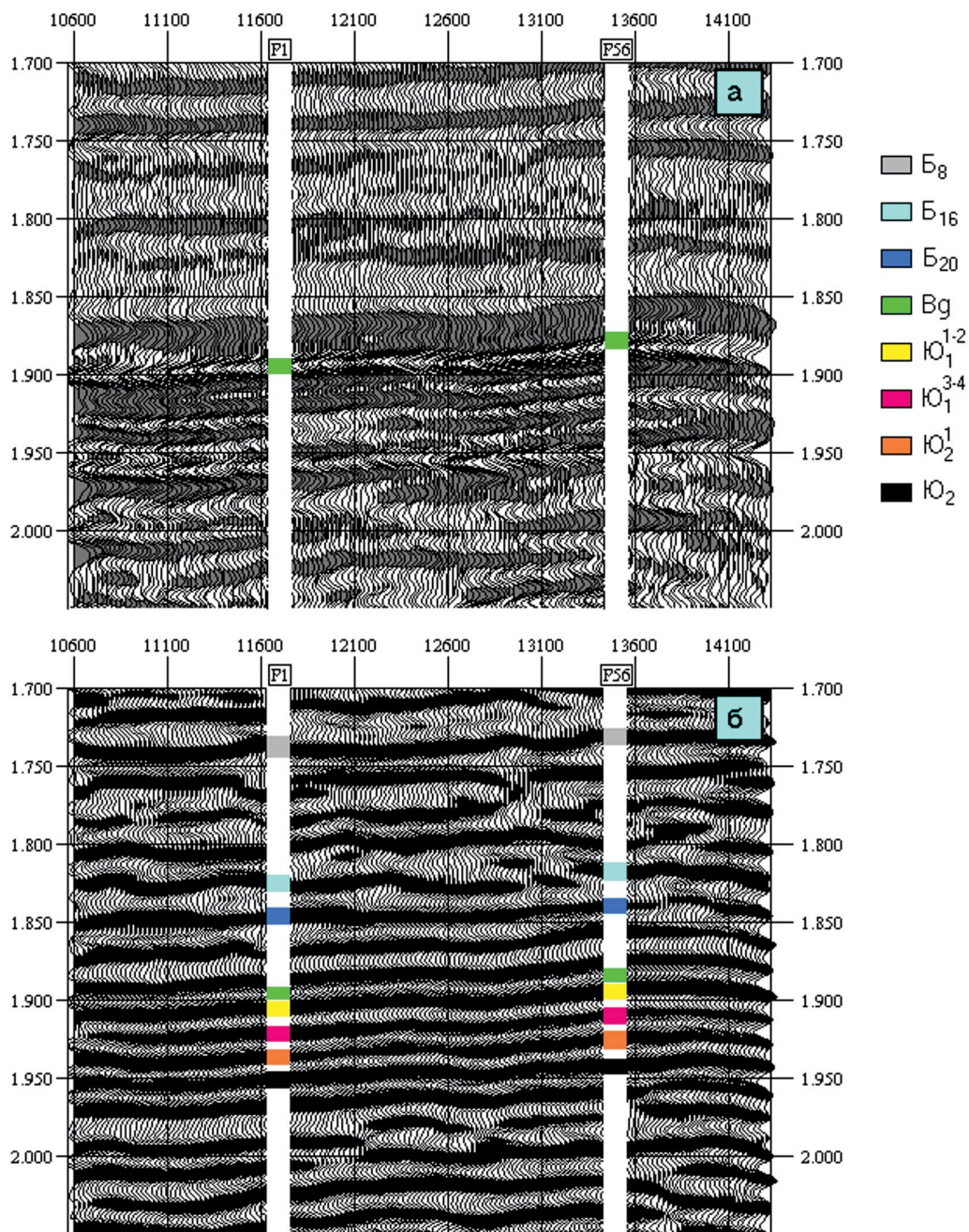


Рис. 8. Фрагменты временных разрезов ОГТ и ФЧП профиля Мыльджинского газоконденсатного месторождения:

а – фрагмент разреза ОГТ; б – фрагмент разреза ФЧП

На рис. 11 в качестве примера показан фазоэнергетический разрез, построенный по данным ФЭА материалов ОГТ. На раз-

резе отчетливо проявляется аномалия в области нефтяной залежи, где пробурена разведочная скважина.

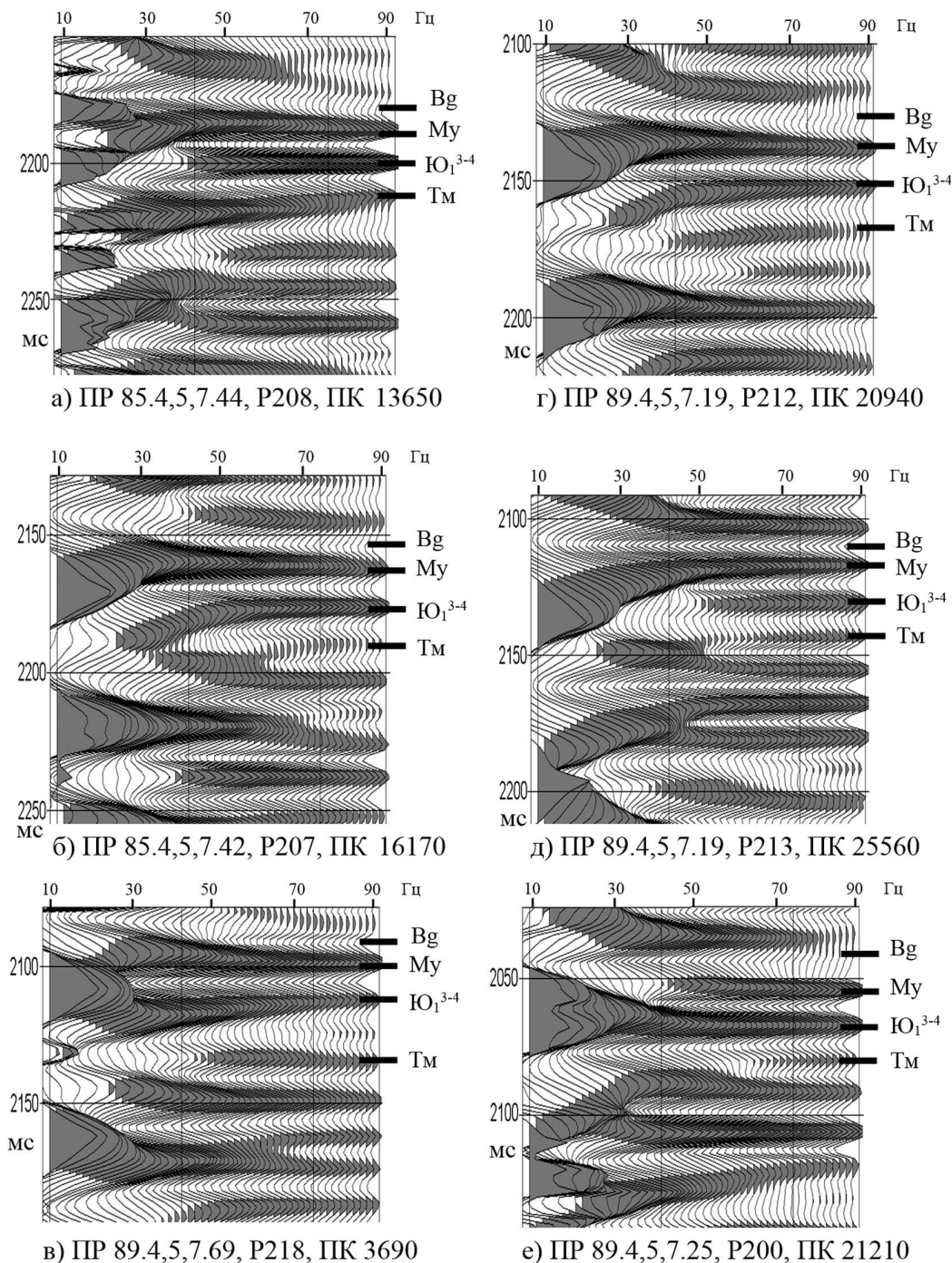


Рис. 10. Эталонные ФАН-образы для различных типов геологического разреза:

а) I – тип; б) II – тип; в) III – тип; г) IV – тип; д) V – тип; е) VI – тип



Рис. 11. Проявление нефтяной залежи на фазоэнергетическом разрезе (Болтная площадь, Томская обл.)

Результаты проведенной обработки сейсмических материалов подтверждают большую перспективность применения предложенных фазочастотных методов для решения структурных задач и задач прогноза геологического разреза. Эффективность методов подтверждена бурением разведочных и промысловых скважин. Так, выданный прогноз нефтегазоносности был подтвержден на Соболином, Болтном и Крапивинском нефтяных месторождениях Томского Приобья.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Авербух А. Г.* Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке. М.: Недра, 1982. 232 с.
2. *Авербух А. Г., Трапезникова Н. А.* Отражение и преломление плоских волн при нормальном падении на границу поглощающих сред//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1972. № 9. С. 74–83.
3. *Боганик Г. Н., Гурвич И. И.* Сейсморазведка: Учебник для вузов. Тверь: Изд-во АИС, 2006. 744 с.
4. *Давыдова Е. А., Копилевич Е. А., Мушин И. А.* Спектрально-временной метод картирования типов геологического разреза// Геофизика. 2002. № 5. С. 682–684.
5. *Иванченков В. П., Шлотгауэр В. А.* Применение спектральных характеристик для решения некоторых задач автоматической обработки сейсмограмм//Изв. вузов. Геология и разведка. 1977. № 3. С. 108–116.
6. *Иванченков В. П., Кочегуров А. И.* Определение временного положения сейсмических сигналов по оценкам их фазочастотных характеристик//Геология и геофизика. 1988. № 9. С. 77–83.
7. *Иванченков В. П., Кочегуров А. И., Орлов О. В.* Фазочастотные характеристики сейсмических волн и основные предпосылки их применения для решения задач прогноза геологического разреза//Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313. № 5. С. 132–137.
8. *Иванченков В. П., Кочегуров А. И., Орлов О. В.* Исследование разрешающей способности методов фазочастотного прослеживания сейсмических сигналов//Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320. № 5. С. 80–84.

9. Иванченков В. П., Вылегжанин О. Н., Кочегуров А. И., Орлов О. В., Козлов А. А. Методы фазочастотного анализа волновых полей и их применение в задачах обработки данных сейсморазведки//Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 7. С. 65–70.

10. Трапезникова Н. А. Методика спектральных вариаций для прогнозирования

свойств геологического разреза//Геофизика. 1997. № 2. С. 12–16.

11. Тяпкин Ю. К. Оптимальная линейно-фазовая полосовая фильтрация сейсмических записей//Геология и геофизика. 1984. № 3. С. 99–105.

12. Худзинский Л. Л. О частотно-фазовом анализе сейсмических волн. В кн.: Динамика земной коры. М.: Наука, 1965. С. 65–70.

Рукопис отримано 15.10.2013.

Розглядаються можливості використання фазочастотних характеристик (ФЧХ) відбитих сейсмічних хвиль як інформативних параметрів для вирішення завдань прогнозу геологічного розрізу, стисло узагальнюються результати розробки і дослідження ряду фазочастотних методів аналізу складних хвильових полів. Показано високу роздільну здатність і перешкодостійкість фазочастотних методів, наведено приклади їх застосування для обробки реальних даних.

Ключові слова: фазочастотні характеристики відбитих сейсмічних хвиль, методи фазочастотного дослідження, фазочасовий аналіз, прогноз геологічного розрізу.

The article deals with possible use of phase-frequency characteristics of seismic reflection as an informative signal parameter for a solution of the problems of geologic profile forecast and generalizes the development and research results in a number of methods of complex wave field analysis. High resolution and immunity of phase-frequency methods are shown; the examples of their application for actual data processing are given.

Keywords: phase-frequency characteristics of seismic reflection, phase-frequency tracking methods, phase-time analysis, geologic profile forecast.