

Рис. 5. Сравнение весовой функции $h_i(t)$ и выходной функции качества $L(t)$

На рис. 5 изображены выходная ФК и весовая функция $h_i(t)$. Видно, что вследствие малой протя-

женности ФК входного сигнала в соответствии с принципом (9) данные характеристики практически не отличаются друг от друга.

Приведенный пример иллюстрирует высокую разрешающую способность фазочастотных алгоритмов. Это позволяет говорить о возможности определения временного местоположения отражающих границ при фазочастотном прослеживании с высокой точностью. Кроме того, подобие импульсной сейсмотрассы $h_i(t)$ и выходной функции качества (как по амплитуде, так и по форме) позволяет сделать вывод, что ФК непосредственно связана с параметрами слоистой поглощающей толщи и несет информацию об ее петрофизических характеристиках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авербух А.Г. Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке. — М.: Недра, 1982. — 232 с.
2. Худзинский Л.А. Об определении некоторых параметров однородных слоев по их фазовым спектральным характеристикам // Известия АН СССР. Физика Земли. — 1996. — № 5. — С. 68–77.
3. Трапезникова Н.А. Методика спектральных вариаций для прогнозирования свойств геологического разреза // Геофизика. — 1997. — № 2. — С. 12–16.
4. Иванченков В.П., Кочегуров А.И. Определение временного положения сейсмических сигналов по оценкам их фазочастотных характеристик // Геология и геофизика. — 1988. — № 9. — С. 77–83.
5. Иванченков В.П., Кочегуров А.И. Фазочастотные алгоритмы оценки местоположения пространственно-временных сигналов в условиях априорной неопределенности // Известия вузов. Физика. — 1995. — Т. 38 — № 9. — С. 100–104.
6. Иванченков В.П., Шлотгауз В.А. Применение спектральных характеристик для решения некоторых задач автоматической обработки сейсмограмм // Известия вузов. Геология и разведка. — 1977. — № 3. — С. 108–116.
7. Иванченков В.П., Вылегжанин О.Н., Орлов О.В. и др. Фазочастотный анализ сейсмических сигналов и его применение в задачах прогноза геологического разреза // Инновационные методы и технологии нефтегазопроисловых работ и возможные пути их реализации в юго-восточных районах Западной Сибири. — Томск: ЦНТИ, 2000. — С. 62–74.
8. Иванченков В.П., Вылегжанин О.Н., Орлов О.В. и др. Методы фазочастотного анализа волновых полей и их применение в задачах обработки данных сейсморазведки // Известия Томского политехнического университета. — 2006. — Т. 309. — № 7. — С. 65–70.

Поступила 06.11.2008 г.

УДК 550.053.510.2+550.053.681.3(571.16)

ФАЗОЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН И ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА

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

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

На основе анализа информационной модели слоистых поглощающих сред рассмотрены основные предпосылки и возможности применения фазочастотных характеристик отраженных сейсмических волн для прогноза геологического разреза. Исследовано поведение обобщенных фазовых спектров коэффициентов отражения. Показано, что наибольшие изменения фазовых спектров коэффициентов отражения наблюдаются для газонасыщенного коллектора.

Ключевые слова:

Линейная система, фазочастотные характеристики, модель поглощающей среды, коэффициенты отражения и преломления.

Повышение эффективности разведки месторождений нефти и газа в сложных сейсмогеологических условиях обуславливает необходимость создания новых методов прогноза геологического разреза на основе наиболее информативных параме-

тров регистрируемых сейсмических волн. В настоящее время предложен широкий спектр методов, в которых в качестве информативных признаков широко используются динамические характеристики сейсмических волн, связанные прежде всего с их

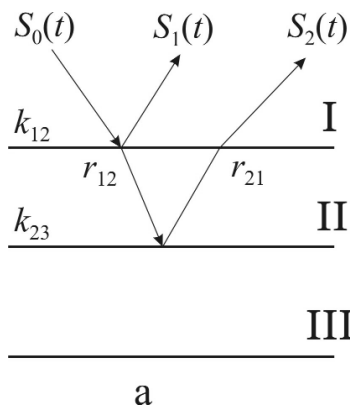
амплитудой и энергией [1]. В значительно меньшей степени используются фазочастотные характеристики (ФЧХ) сейсмических волн. Между тем, именно в фазовых спектрах сейсмических сигналов заложена важная информация о местоположении отражающих границ, поглощающих и дисперсионных свойствах слоистых геологических сред [2, 3].

При решении задач прогноза геологического разреза, в том числе при прогнозе нефтегазоносности осадочных толщ по данным сейсмических наблюдений, важным вопросом является выявление и изучение устойчивых связей между свойствами осадочных толщ и изменениями выделяемых параметров сейсмических волн. Связь между свойствами среды и параметрами регистрируемого сейсмического поля исследуется путем решения прямых задач. Сложность задаваемой модели зависит от основных свойств среды, которые на данном этапе исследований представляют интерес и подлежат определению.

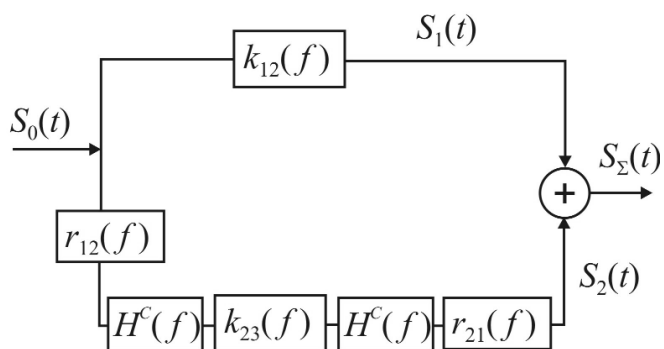
Один из распространенных в настоящее время подходов к построению модели слоистых поглощающих сред с горизонтальными границами раздела связан с представлением среды в виде линейной системы, вносящей определенные изменения в проходящие через нее колебания [1]. Отметим, что широко распространенные способы решения прямых задач в сейсморазведке, которые предполагают расчет синтетических сейсмограмм непосредственно во временной области, при изучении сред с поглощением и дисперсией оказываются неприменимыми. Поэтому при исследованиях геологических сред, отклоняющихся от идеально-упругих, волновые поля рассчитывают в спектральной области, а переход во временную область осуществляется на последнем этапе вычислений. Проиллюстрируем суть применяемого системного подхода на примере простой модели плоскопараллельной слоистой поглощающей толщи (рис. 1, а).

В лучевом приближении процесс отражения от кровли и подошвы линейно-неупругого слоя II можно представить в виде эквивалентной системы, представленной на рис. 1, б.

Частотную характеристику такой системы можно записать в виде:



а



б

Рис. 1. Модель плоскопараллельной слоистой поглощающей толщи

$$H_{\Sigma}(f) = r_{12}(f) \cdot H(f) \cdot k_{23}(f) \cdot r_{12}(f) + k_{12}(f) = |H_{\Sigma}(f)| e^{j\phi_{\Sigma}(f)},$$

где $k_{12}(f)$ и $k_{23}(f)$ – коэффициенты отражения от кровли и подошвы II слоя, $r_{21}(f)$ и $r_{12}(f)$ – коэффициенты преломления на кровле II слоя, $H(f) = H^c(f) \cdot H^c(f)$ – частотная характеристика частной системы, характеризующая распространение волны в поглощающем слое II в двух направлениях, $|H_{\Sigma}(f)|$ и $\phi_{\Sigma}(f)$ определяют соответственно амплитудно-частотную (АЧХ) и фазочастотную характеристику слоев. Важно отметить, что коэффициенты $k_{12}(f)$, $k_{23}(f)$, $r_{21}(f)$ и $r_{12}(f)$ в поглощающих средах являются комплексными функциями частоты f . Спектр волн, отраженных от кровли и подошвы II слоя, может быть соответственно представлен:

$$\begin{aligned} S_1(f) &= k_{12}(f) \cdot S_0(f) = |S_1(f)| e^{j\phi_1(f)}, \\ S_2(f) &= r_{21}(f) \cdot k_{23}(f) \cdot H(f) \cdot r_{12}(f) S_0(f) = |S_2(f)| e^{j\phi_2(f)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где 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 частной системы $\phi_H(f)$, определяющей распространение волны в поглощающем слое, и начальной фазы падающей волны $\phi_0(f)$.

В соответствии с [1] для двух изотропных полупространств, разделенных плоской границей, выражения для комплексных коэффициентов отражения и преломления могут быть представлены:

$$\begin{aligned} k(f) &= \frac{2\pi(\rho_2 V_2(f) - \rho_1 V_1(f)) - j(\rho_2 V_2(f) \delta_1(f) - \rho_1 V_1(f) \delta_2(f))}{2\pi(\rho_2 V_2(f) + \rho_1 V_1(f)) - j(\rho_2 V_2(f) \delta_1(f) + \rho_1 V_1(f) \delta_2(f))}, \\ r(f) &= \frac{2(2\pi\rho_1 V_1(f) - j\rho_1 V_1(f) \delta_2(f))}{2\pi(\rho_1 V_1(f) + \rho_2 V_2(f)) - j(\rho_1 V_1(f) \delta_2(f) + \rho_2 V_2(f) \delta_2(f))}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $V_i(f)$, $\rho_i(f)$ – соответственно скорость распространения продольных волн и декремент поглощения в i -ой среде на частоте f ; ρ_i – плотность i -ой среды ($i=1, 2$). При этом

$$\delta_i(f) = \frac{\alpha_i(f)V_i(f)}{f}.$$

Здесь $\alpha_i(f)$ – коэффициент поглощения в i -ой среде.

Тогда, исходя из (3), аргументы коэффициентов отражения и преломления запишутся как:

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

$$\phi_r(f) = \arctg \frac{2\pi(\delta_1(f) - \delta_2(f))}{4\pi^2 + \delta_1(f)\delta_2(f) + \gamma_{12}(f)(4\pi^2 + \delta_2^2(f))}, \quad (5)$$

где $\gamma_i(f) = \rho_i V_i(f)$, $i=1, 2$, $\gamma_{12}(f) = (\rho_1 V_1(f))/(\rho_2 V_2(f))$ – отношение акустических жесткостей в средах I и II. В случае линейной зависимости коэффициента поглощения $\alpha_i = \beta_i f$ скорость распространения продольных волн связана с параметром поглощения β известным дисперсионным соотношением [1]:

$$V(f) = \frac{\pi V(f_1)}{\pi + 2\beta V(f_1) \ln(f_1/f)},$$

где f_1 – некоторая базовая частота, $V(f_1)$ – скорость распространения волны в слое на частоте f_1 .

Следующей составляющей фазового спектра отраженной волны (2) является функция $\phi_H(f)$, определяющая фазовый набег при распространении волны в поглощающем слое. Согласно [1] частотная характеристика поглощающего слоя $H(f)$ может быть представлена в виде:

$$H(f) = |H(f)|e^{-j\phi_H(f)} = e^{-\alpha(f)2h} \cdot e^{-j2\pi\alpha(f)2h \left[\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V(f)} \right]}, \quad (6)$$

где V_0 – скорость в идеально-упругой среде, h – мощность слоя.

Принимая для поглощающего слоя минимально-фазовую модель и учитывая ранее сделанное допущение о линейной зависимости коэффициента поглощения от частоты, выражение для модуля и аргумента $H(f)$ можно привести к виду [1]:

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

$$\phi_H(f) = 4\pi fh \left[\frac{1}{V(f_1)} - \frac{\beta}{\pi^2} \ln \frac{f}{f_1} \right], \quad (7)$$

где $V(f_1)$ – скорость распространения волны на частоте f_1 . Из (6) 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. На рис. 2 приведена структурная схема системы, характеризующей передаточные свойства многослойной линейно-неупругой поглощающей среды при принятых ранее допущениях.

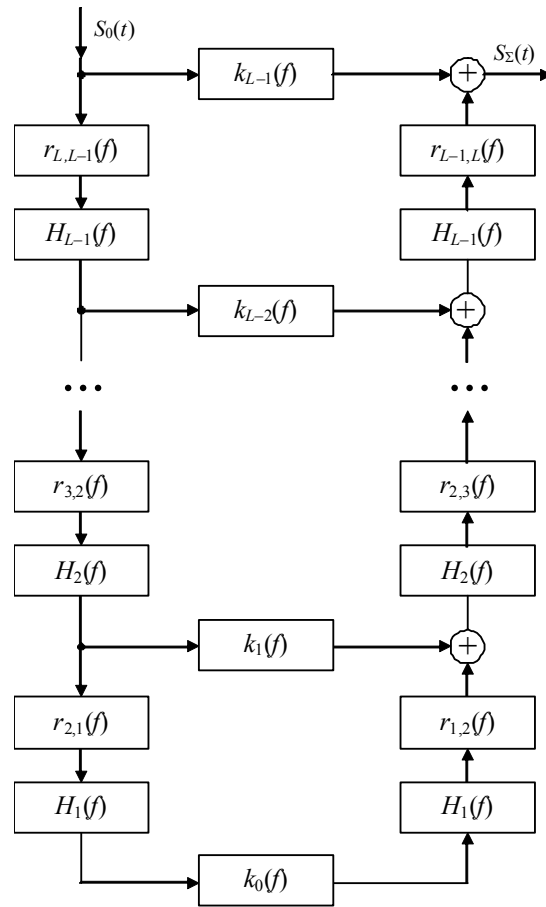


Рис. 2. Структурная схема системы, определяющей передаточные характеристики многослойной поглощающей среды. L – число границ

Используя данную структурную схему нетрудно показать, что выражение для частотной характеристики такой системы имеет следующий вид:

$$H_{\Sigma}(f) = k_{L-1}(f) + \sum_{i=0}^{L-2} k_i(f) \prod_{n=i+1}^{L-1} H_n(f) r_{n,n-1}(f) \cdot r_{n-1,n}(f). \quad (8)$$

На основе (8) может быть рассчитана синтетическая сейсмограмма для некоторой точки на поверхности наблюдения.

$$S_{\Sigma}(t) = F^{-1}\{S_0(f)H_{\Sigma}(f)\}. \quad (9)$$

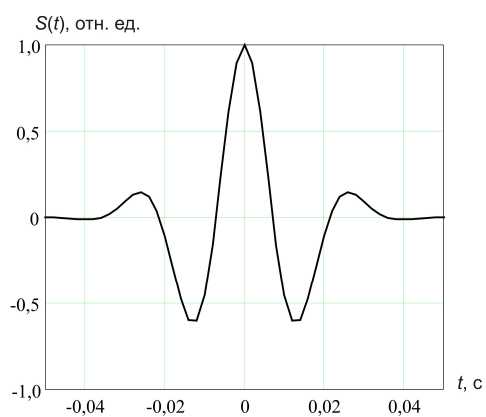
Здесь $F^{-1}\{\dots\}$ обозначает операцию обратного преобразования Фурье.

Совокупность модельных сейсмограмм при заданном числе слоёв и заданном распределении в них петрофизических параметров позволяет построить волновое поле и использовать его при проведении дальнейших исследований.

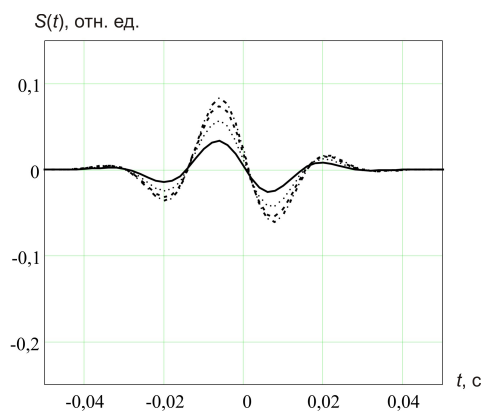
Таким образом, из соотношений (2, 4, 5, 7) видно, что петрофизические параметры исследуемой толщи оказывают непосредственное влияние на ФЧХ отраженных волн. Исследования данного влияния проводились в соответствии с (8, 9) для четырех моделей слоистых поглощающих сред

Модель 1	Модель 2
Аргиллиты	Аргиллиты
Газонасыщенный песчаник	Нефтенасыщенный песчаник
Аргиллиты	Аргиллиты
Модель 3	Модель 4
Аргиллиты	Аргиллиты
Водонасыщенный песчаник	Карбонизированный песчаник
Аргиллиты	Аргиллиты

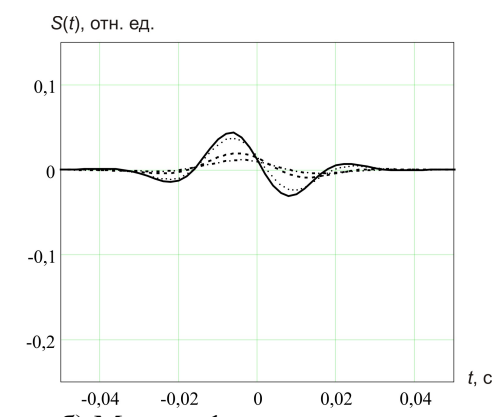
Рис. 3. Модели слоистых поглощающих сред



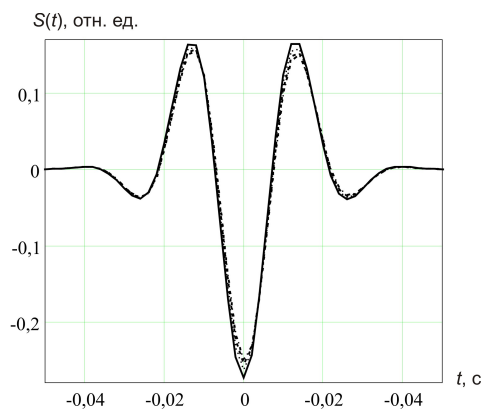
а) Форма падающей волны



б) Модель 1



г) Модель 3



д) Модель 4

- 1 —————
- 2 (dotted)
- 3 - - - - - (dashed)
- 4 - . - . - . (dash-dot)

е) Различные декременты поглощения

Рис. 4. Форма волны, отраженной от подошвы 2-го слоя

(рис. 3). Эти модели имитировали наличие слоя песчаника (слой 2), расположенного во вмещающей толще аргиллита (слои 1 и 3). 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 данных, характерных для верхнеюрской продуктивной толщи Крапивинской площади Томского Приобья.

Форма падающей волны задавалась импульсом с колокольной огибающей

$$S(t) = a_0 e^{-\beta^2 t^2} \cos(2\pi f_0 t + \phi_0),$$

имеющему следующие параметры: $\beta=51$, $a_0=1$, $\phi_0=0$.

На рис. 4 показаны формы волн, отраженных от подошвы 2-го слоя при различных значениях его декрементов поглощения δ_2 для указанных выше моделей сред. Мощность 2-го слоя для всех сред была 11 м. Естественно, во всех случаях амплитуда отраженной волны меньше, чем падающей, причем, как и следовало ожидать, наибольшее уменьшение амплитуды отраженного импульса наблюдается для сред с газонефтенасыщенным коллектором. Импульсы отраженных волн растягиваются по длительности, причем это растяжение больше для газонасыщенного коллектора.

Результаты исследования вклада в фазовый спектр отраженных волн составляющих, обусловленных отражением, преломлением и распростра-

нением упругих колебаний во 2-м поглощающем слое (см. выражение (1)) показали следующее:

- наибольший вклад в фазовый спектр отраженной волны вносят коэффициенты отражения (1);
- вклад в фазовый спектр волны, отраженной от подошвы второго слоя, обусловленный преломлением на его кровле, оказался небольшим для всех анализируемых сред;
- фазовые набегі, определяемые прохождением волны в поглощающем слое, также невелики.

На рис. 5 и 6 изображены обобщенные фазовые спектры коэффициентов отражения от кровли и подошвы 2-го слоя [4], полученные для рассматриваемых моделей сред. Данные характеристики были построены на основе обобщения семейства аргументов коэффициентов отражения, вычисляемых при четырех значениях декремента поглощения контактирующих слоев, различных для каждой модели. Заштрихованные области на рисунках определяют пределы изменения фазовых спектров коэффициентов отражения при изменении параметров поглощения второго слоя.

Анализ проведенных зависимостей показывает, что насыщение породы – коллектора газом или нефтью приводит к резкому изменению фазовых спектров коэффициентов отражения (Модель 1 и 2). Причем в диапазоне отношений частот f/f_0 от 0,5 до 2 значения обобщенных фазовых спектров коэффициентов отражения сосредоточены в области $\pi/2$, либо $-\pi/2$.

Наибольшие изменения фазовых спектров коэффициентов отражения наблюдаются для газонасыщенного коллектора. В случае насыщения пе-

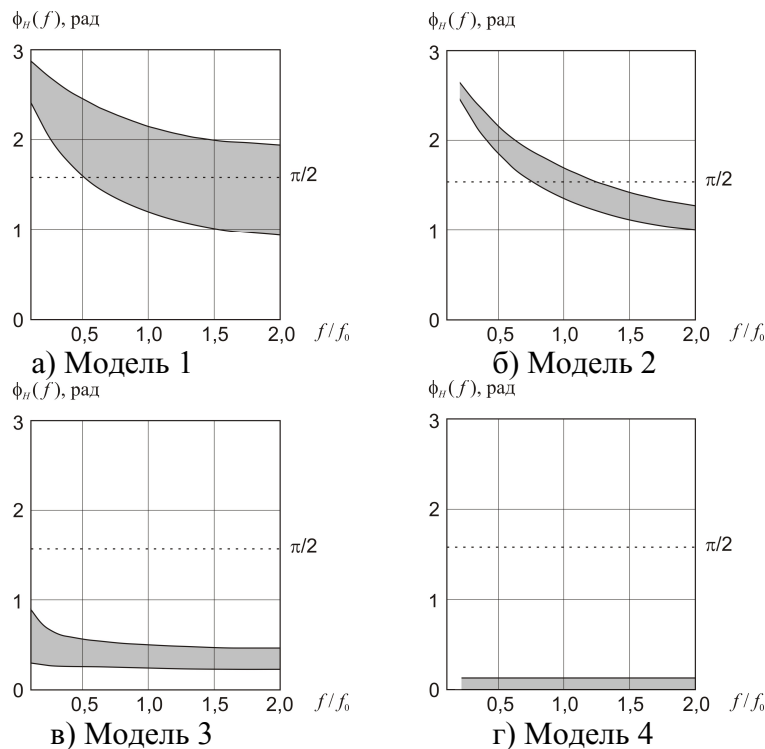


Рис. 5. Обобщенные фазовые спектры коэффициентов отражения от кровли 2-го слоя

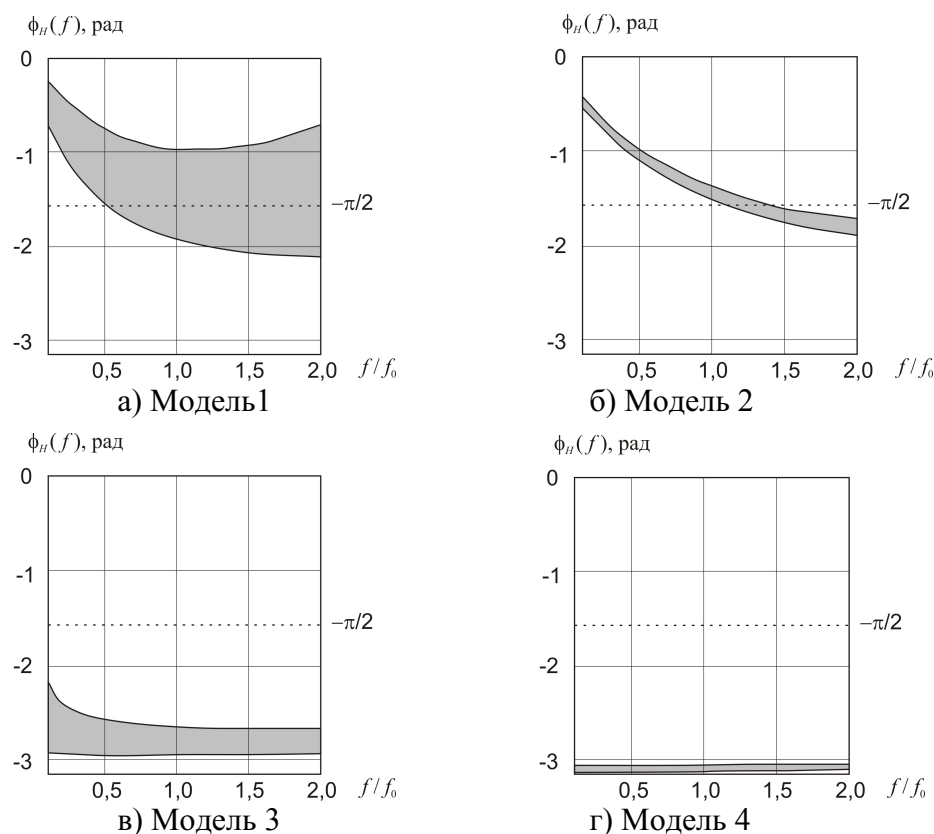


Рис. 6. Обобщенные фазовые спектры коэффициентов отражения от подошвы 2-го слоя

счаного коллектора водой (Модель 3), обобщенные фазовые спектры коэффициентов отражения слабо зависят от частоты, и их значения сосредоточены в промежуточной области 0...1 рад или $-(2...3)$ рад. При отсутствии коллектора (Модель 4) фазовые спектры коэффициентов отражения меняются очень слабо и практически не зависят от частоты. Их значения близки к 0 или $-\pi$ рад. Сопоставление рис. 5 и 6 показывает, что по характеру изменения фазовые спектры коэффициентов отражения от кровли и подошвы второго слоя близки по динамическим свойствам между собой и отличаются только знаком, а также областью их сосредоточения. Например, фазовые спектры коэффициентов отражения от кровли 2-го слоя в случае отсутствия коллектора (Модель 4) имеют положительные значения и сосредоточены в области нуля, а фазовые

спектры коэффициентов отражения от подошвы этого слоя имеют отрицательные значения и сосредоточены в области $-\pi$ рад.

Сходство аргументов коэффициентов отражения можно объяснить тем, что в рассматриваемых моделях сред покрывающие и подстилающие толщи мало отличаются по своим петрофизическим параметрам, что приводит к определенной близости характера изменения их фазовых спектров.

Выявленные особенности изменения фазовых спектров отраженных волн в области залежи углеводородов показывают возможность их непосредственного использования в качестве важных диагностических признаков при прогнозе нефтегазоносности осадочных толщ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авербух А.Г. Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке. – М.: Недра, 1982. – 232 с.
2. Худзинский Л.А. Об определении некоторых параметров однородных слоев по их фазовым спектральным характеристикам // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1996. – № 5. – С. 68–77.
3. Иванченков В.П., Кочегуров А.И. Определение временного положения сейсмических сигналов по оценкам их фазочастотных характеристик // Геология и геофизика. – 1988. – № 9. – С. 77–83.
4. Иванченков В.П., Вылегжанин О.Н., Орлов О.В. и др. Методы фазочастотного анализа волновых полей и их применение в задачах обработки данных сейсморазведки // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 7. – С. 65–70.

Поступила 10.11.2008 г.