



## ПРИМЕНИМОСТЬ ЛИНЕАРИЗОВАННЫХ АППРОКСИМАЦИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН ДЛЯ АЗИМУТАЛЬНОГО АНАЛИЗА АМПЛИТУД *PP*-ОТРАЖЕНИЙ В АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

Т.В. Нефедкина, П.А. Лыхин

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия, e-mail: nefedkinatv@ipgg.sbras.ru, pavel.lykhin@gmail.com*

В основе метода AVOA-анализа лежит аппроксимационное уравнение Рюгера для коэффициента отражения продольной волны на границе изотропного и анизотропного (HTI) полупространств. В настоящей статье исследуются условия, при которых аппроксимация Рюгера является правомерной. Для этого были рассчитаны точные плоскотоволновые коэффициенты отражения *PP*-волны и их линеаризованные аппроксимации как для теоретических моделей, так и для реальных моделей среды в Сибири. Показано, что аппроксимационные формулы пригодны для AVOA-инверсии (с определением всех параметров модели) только в случае слабой анизотропии при перепаде упругих параметров на границе  $\leq 15\%$  (положительный перепад) и  $\leq 10\%$  (отрицательный перепад). В то же время азимут оси симметрии определяется достаточно точно для всех моделей при отношении сигнал/помеха  $\geq 10$ .

*Азимутальный AVO-анализ, пространственный AVOA-анализ, амплитуды отражений, AVOA-инверсия, трансверсально-изотропная HTI-среда, точность и помехоустойчивость метода*

### APPLICABILITY OF THE LINEARIZED APPROXIMATION OF THE P-WAVE REFLECTION COEFFICIENTS FOR THE AZIMUTHAL *PP*-REFLECTION AMPLITUDE ANALYSIS IN ANISOTROPIC MEDIA

T.V. Nefedkina, P.A. Lykhin

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,  
Acad. Koptyuga prosp., 3, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: nefedkinatv@ipgg.sbras.ru, pavel.lykhin@gmail.com*

The method of AVOA-analysis is based on Ruger approximation equation for the *P*-wave reflection coefficient at the interface of the isotropic and anisotropic (HTI) half-spaces. In this paper we analyze the conditions allowing to use Ruger approximation. For this purpose the exact *PP*-plane-wave reflection coefficients and their linearized approximations were calculated for both theoretical models and for Siberian medium models. It is shown that the approximation formulas are suitable for AVOA-inversion (with the definition of all model parameters) only in case of weak anisotropy with elastic parameters contrast at the interface of  $\leq 15\%$  (positive contrast) and  $\leq 10\%$  (negative contrast). At the same time, the azimuth of the symmetry axis is determined with sufficient accuracy for all models if signal to noise ratio  $\geq 10$ .

*Azimuthal AVO-analysis, spatial AVOA-analysis, reflection amplitude, AVOA-inversion, transversely isotropic (HTI) media, the accuracy and robustness of the method*

### ВВЕДЕНИЕ

AVO-анализ продольных волн начал широко применяться за рубежом с 80-х гг. прошлого столетия для решения задач прогнозирования геологического разреза и, в частности, для определения природы “ярких пятен”, которые связаны с наличием углеводородов или с изменением литологии. Первоначально AVO-анализ был предложен для прогнозирования залежей газа [Ostrander, 1984; Rutherford, Williams, 1989]. В его основу входят линеаризованные плоскотоволновые коэффициенты отражения, точные выражения для которых впервые были получены К. Цеппритцем [Zoerpritz, 1919]. В настоящее время AVO-анализ применяют, в основном, для разведки и поисков газовых резервуаров в молодых терригенных породах, а также для обнаружения новых залежей на уже разрабатываемых месторождениях.

Данная работа посвящена азимутальному анализу амплитуд, или AVOA-анализу (Amplitude Versus Offset

and Azimuth). Во всем мире этот метод широко применяется для обнаружения и картирования зон повышенной азимутально-ориентированной трещиноватости, к которым часто приурочены месторождения углеводородов. Современные технические возможности позволяют бурить продуктивные скважины под любым углом к горизонту, в том числе горизонтальные, поэтому при разведке месторождений очень важно определить преимущественное направление трещин. Информация об анизотропии упругих свойств пород используется также при оценке ожидаемых дебитов проектных скважин, определении направления преимущественного потока вод из нагнетательных скважин, планировании гидроразрыва пластов и других геолого-технологических мероприятиях [Ленский и др., 2016].

Методология анализа AVOA основывается на известном теоретическом факте, заключающемся в том, что азимутальная анизотропия скоростей, вызванная

наличием вертикально ориентированных трещин в среде, влечет за собой и азимутальную анизотропию амплитуд, в частности коэффициентов отражения [Чичина и др., 2004].

Резервуары с системой параллельных трещин могут быть представлены моделью трансверсально изотропной (ТИ) среды с осью симметрии нормальной плоскостям трещин. В частности, система вертикальных азимутально-ориентированных трещин может быть представлена трансверсально-изотропной средой с горизонтальной осью симметрии (НТИ).

При анализе трещиноватого коллектора на основе данных *PP*-волн обычно придерживаются следующей концептуальной модели. В том случае, если наблюдения проводятся параллельно направлению трещин, то последние оказывают минимальное влияние на отражающие свойства, независимо от угла падения. Это вызвано тем, что движения частиц при прохождении продольной волны всегда будут ориентированы параллельно тонким трещинам. В то время как при ориентации линии наблюдения перпендикулярно трещинам колебания частиц в продольной волне ориентированы поперек трещин, что сильно влияет на коэффициент отражения, особенно при больших углах падения.

Изучение анизотропных свойств трещиноватого коллектора традиционно проводится по методу посекторного AVOA-анализа [Чичина и др., 2004]. В этом методе определяют градиенты AVO по амплитудам отраженных волн отдельно для каждого сектора, объединяющего выбранный интервал направлений источник–приемник. Все точки наблюдений, которые находятся внутри одного сектора, относят к его биссектрисе. Это приводит к определенным погрешностям в определении параметров среды. В работе [Ленский и др., 2016] предлагается некоторая модификация метода посекторного AVOA-анализа, в которой посекторно определяется атрибут AVOA-анализа *S-imp*, имеющий смысл относительного скачка акустического импеданса поперечной волны на границе. Метод посекторного AVOA-анализа оказался весьма чувствительным к неполноте данных по азимутам, что характерно для применяющихся в России 3D-систем наблюдений.

В работе [Нефедкина и др., 2011] предложен новый метод пространственного AVOA-анализа. В нем входная информация об амплитудах волн и координатах точек наблюдения извлекается из 3D данных продольных волн без искажений. При этом обратная задача решается сразу по полноазимутальному набору данных, относящихся к общей отражающей площадке. Такой подход обеспечивает существенное увеличение точности решения обратной задачи.

В последние годы накопился некоторый отрицательный опыт в применении AVO-анализа, что вызывает известное недоверие ко всем методам динамического анализа сейсмических данных. Связано это, в какой-то мере, с некорректным использованием приемов динамического анализа сейсмограмм в геофизической практике.

Во-первых, известно, что определение динамических параметров сейсмических записей является надежным только при высоком отношении сигнал/помеха (не менее 5–10). Во-вторых, поскольку AVO-анализ входит в обязательный граф обработки, геофизики применяют его в разных регионах с присущими этим регионам сейсмогеологическими условиями, забывая об ограничениях метода. Дело в том, что классический

AVO-анализ основан на линейризованных аппроксимациях коэффициента отражения, справедливых для малого изменения упругих свойств на отражающей границе и небольших удалений от источника [Aki, Richards, 1980; Shuey, 1985]. В анизотропных средах накладывается также ограничение на величину анизотропии, которая считается слабой [Rüger, 1998, 2001]. В настоящей статье исследуются условия, при которых аппроксимация Рюгера является правомерной, каков допустимый порядок малости скачков упругих свойств и коэффициентов анизотропии на границе. Анализируются также сейсмогеологические условия нефтегазоносных бассейнов Западной и Восточной Сибири с точки зрения корректности применения там линейризованных аппроксимаций коэффициента отражения для азимутального анализа амплитуд отраженных волн.

## МЕТОДОЛОГИЯ

Отражающий коллектор с упорядоченной вертикальной трещиноватостью представляется в виде модели трансверсально-изотропной среды с горизонтальной осью симметрии ортогональной плоскости трещин. Рассматривается отражение продольной *PP*-волны от границы, разделяющей изотропное и слабо анизотропное упругие полупространства. Коэффициент отражения для продольной волны аппроксимируется формулой Рюгера в предположении малого контраста упругих свойств на границе [Rüger, 1998, 2001]:

$$R_{PP} = A + B(\varphi) \sin^2 \theta + C(\varphi) \tan^2 \theta, \quad (1)$$

$$B(\varphi) = B^{iso} + B^{ani} \cos^2(\varphi - \varphi_0), \quad (2)$$

$$C(\varphi) = C^{iso} + C^{ani1} \cos^4(\varphi - \varphi_0) + C^{ani2} \sin^2(\varphi - \varphi_0) \cos^2(\varphi - \varphi_0), \quad (3)$$

где  $\theta$  – угол падения волны на границу;  $\varphi$  – азимут линии источник–приемник относительно направления горизонтальной оси  $X$ ;  $\varphi_0$  – азимут оси симметрии относительно оси  $X$ . Коэффициент  $A$  в разложении (1) равен коэффициенту отражения при нормальном падении волны;  $B(\varphi)$  – градиент AVO,  $B^{iso}$  – изотропная часть градиента, равная градиенту AVO в изотропной среде;  $B^{ani}$  – анизотропная добавка к градиенту, зависящая от параметров анизотропии среды;  $C(\varphi)$  – кривизна, которая вносит вклад в значение коэффициента отражения при больших удалениях (или углах падения);  $C^{iso}$  – изотропная составляющая коэффициента  $C(\varphi)$ ,  $C^{ani1}$ ,  $C^{ani2}$  – его анизотропные составляющие.

Параметры аппроксимации  $A$ ,  $\varphi_0$ ,  $B^{iso}$ ,  $B^{ani}$ ,  $C^{iso}$ ,  $C^{ani1}$ ,  $C^{ani2}$  могут быть определены из уравнений (1)–(3) методом наименьших квадратов или оптимизационными методами. При этом очень важный параметр анизотропной среды  $\varphi_0$  (азимут оси симметрии) определяется сразу. Остальные упругие параметры вычисляются по значениям параметров аппроксимации. Согласно работам А. Рюгера [Rüger, 1998, 2001] последние связаны с упругими параметрами среды следующим образом. Параметры  $A$ ,  $B^{iso}$  и  $C^{iso}$  могут быть выражены через относительные скачки скоростей продольных и поперечных волн и плотностей на границе [Shuey, 1985; Rüger, 2001]:

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{Z}, \quad (4)$$

$$B^{iso} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta V_P}{V_P} - 4g \left( \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} + \frac{\Delta V_S}{V_S} \right) \right] = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta V_P}{V_P} - 4g \frac{\Delta G}{G} \right), \quad (5)$$

$$C^{iso} = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P}, \quad (6)$$

где  $\Delta V_P = V_{P2} - V_{P1}$ ;  $\bar{V}_P = (V_{P2} + V_{P1}) / 2$ ;  $\Delta V_S = V_{S2} - V_{S1}$ ;  $\bar{V}_S = (V_{S2} + V_{S1}) / 2$ ;  $\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$ ;  $\bar{\rho} = (\rho_2 + \rho_1) / 2$ ;  $g = (V_S / V_P)^2$ ;  $Z = \rho V_P$  – вертикальный  $P$ -импеданс;  $G = \rho V_S^2$  – вертикальный модуль сдвига;  $\Delta Z = Z_2 - Z_1$ ;  $\bar{Z} = (Z_2 + Z_1) / 2$ ;  $\Delta G = G_2 - G_1$ ;  $\bar{G} = (G_2 + G_1) / 2$ .

Для слабой анизотропии параметры  $B^{ani}$ ,  $C^{ani1}$  и  $C^{ani2}$  выражаются через вариации коэффициентов анизотропии Томсена на границе [Rüger, 2001]:

$$B^{ani} = \frac{1}{2} \Delta \delta^{(V)} + 4g \Delta \gamma, \quad (7)$$

$$C^{ani1} = \frac{1}{2} \Delta \varepsilon^{(V)}, \quad (8)$$

$$C^{ani2} = \frac{1}{2} \Delta \delta^{(V)}, \quad (9)$$

где  $g$  – квадрат отношения скоростей  $V_S$  к  $V_P$  во вмещающей породе,  $\delta^{(V)}$ ,  $\varepsilon^{(V)}$  и  $\gamma$  – параметры анизотропии, введенные Томсеном [Thomsen, 1986], зависящие от плотности трещин  $e$ .

Таким образом, имеется принципиальная возможность определения упругих параметров анизотропной среды  $V_P$ ,  $V_S$  и  $\rho$  из решения системы уравнений (4)–(6), а коэффициентов анизотропии  $\delta^{(V)}$ ,  $\varepsilon^{(V)}$  и  $\gamma$  из решения системы уравнений (7)–(9).

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выяснения условий, при которых аппроксимация Рюгера является допустимой, были проведены следующие исследования: во-первых, были рассчитаны точные плосковолновые коэффициенты отражения продольной волны для модели горизонтальной границы, разделяющей изотропное и анизотропное (НТИ) полупространства; во-вторых, построены аппроксимационные зависимости Рюгера, которые рассчитывались по формулам (1)–(9) с использованием точных параметров модели; в-третьих, на точные коэффициенты отражения наложена случайная помеха и выполнена AVOA-инверсия по формулам Рюгера (1)–(3) с определением параметров аппроксимации; в-четвертых, решена обратная задача и определены параметры анизотропной среды по формулам (4)–(6) и (7)–(9).

Расчет плосковолновых коэффициентов отражения проведен по программам, составленным в Matlab П.А. Лыхиным на основе теории лучевого метода в анизотропных средах [Петрашень, 1984; Гольдин, 2008; Schoenberg, Protazio, 1992]. Известно, что уравнения К. Цеппритца [Zoeppritz, 1919] для коэффициентов отражения и прохождения плоских волн в изотропных средах имеют точные решения в явном виде. В случае анизотропных сред коэффициенты отражения и прохождения плоских волн через плоскую границу могут быть определены из решения системы шести линейных уравнений, полученных из условий непрерывности

векторов смещений и напряжений на жесткой границе. В матричной форме ее можно записать:

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{X}, \text{ где } \mathbf{b} = \left( \mathbf{I}_P^{d(1)} \quad \mathbf{t}_P^{d(1)} \right)^T, \\ \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\mathbf{I}_P^{u(1)} & -\mathbf{I}_{SV}^{u(1)} & -\mathbf{I}_{SH}^{u(1)} & \mathbf{I}_P^{d(2)} & \mathbf{I}_{SV}^{d(2)} & \mathbf{I}_{SH}^{d(2)} \\ -\mathbf{t}_P^{u(1)} & -\mathbf{t}_{SV}^{u(1)} & -\mathbf{t}_{SH}^{u(1)} & \mathbf{t}_P^{d(2)} & \mathbf{t}_{SV}^{d(2)} & \mathbf{t}_{SH}^{d(2)} \end{pmatrix}, \\ \mathbf{X} = \left( R_{PP} \quad R_{PSV} \quad R_{PSH} \quad T_{PP} \quad T_{PSV} \quad T_{PSH} \right)^T,$$

Здесь  $\mathbf{I}_P^{d(1)}$  – вектор поляризации падающей  $P$ -волны в верхнем слое,  $\mathbf{I}_i^{d(2)}$  – вектор поляризации преломленной волны  $i$ -го типа в нижнем слое,  $\mathbf{I}_i^{u(1)}$  – вектор поляризации отраженной волны  $i$ -го типа в верхнем слое,  $\mathbf{t}_P^{u(1)}$  – вектор напряжения падающей  $P$ -волны в верхнем слое,  $\mathbf{t}_i^{d(2)}$  – вектор напряжения преломленной волны  $i$ -го типа в нижнем слое,  $\mathbf{t}_i^{u(1)}$  – вектор напряжения отраженной волны  $i$ -го типа в верхнем слое. В выражениях выше  $\mathbf{A}$  – матрица смещений–напряжений для образующихся волн, вектор-столбец  $\mathbf{b}$  – это вектор смещений–напряжений для падающей волны, вектор-столбец  $\mathbf{X}$  состоит из коэффициентов отражения и преломления.

AVOA-инверсия проводилась с помощью алгоритма пространственного AVOA-анализа [Лыхин, Нефедкина, 2016]. Особенности алгоритма являются, во-первых, полноазимутальный набор данных, относящихся к общей точке отражения или общему источнику, и, во-вторых, использование двух следующих друг за другом методов: наименьших квадратов (МНК) и оптимизационного метода Нелдера–Мида [Химмельблау, 1975].

На первом этапе на малых удалениях от источника используется линейная зависимость  $R_{PP}(\sin^2\theta)$  (двухчленная аппроксимация) и с помощью МНК определяются четыре параметра аппроксимации Рюгера (1)–(2):  $A$ ,  $B^{iso}$ ,  $B^{ani}$ ,  $\varphi_0$ . Параметры  $B^{iso}$  и  $B^{ani}$  рассчитываются с погрешностью и являются начальным приближением для следующего этапа решения обратной задачи.

На втором этапе на полной базе наблюдений для аппроксимации зависимости  $R_{PP}(\sin^2\theta)$  используется трехчленный полином (параболический). Параметры аппроксимации Рюгера  $A$  и  $\varphi_0$  считаются известными из первого этапа, далее методом Нелдера–Мида определяются пять оставшихся параметров (1)–(3):  $B^{iso}$ ,  $B^{ani}$ ,  $C^{iso}$ ,  $C^{ani1}$ ,  $C^{ani2}$ . Начальное приближение для коэффициентов  $C^{iso}$ ,  $C^{ani1}$  и  $C^{ani2}$  принималось равным 0.

В оптимизационном алгоритме осуществляется минимизация следующей функции:

$$F(\mathbf{v}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( A_{obs}(l_i, \varphi_i, \mathbf{m}) - A_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v}) \right)^2},$$

где  $n$  – число наблюдений,  $l$  – расстояние от источника до  $i$ -го приемника,  $\mathbf{v}$  – вектор неизвестных параметров модели,  $\mathbf{m}$  – вектор материальных параметров модели,  $A_{obs}(l_i, \varphi_i, \mathbf{m})$  – наблюдаемые амплитуды отражения, исправленные за геометрическое расхождение (в нашем случае – плосковолновой коэффициент отражения с наложенными на него помехами);  $A_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v})$  – теоретическое описание явления отражения, в качестве которого принималась аппроксимация Рюгера (1)–(3).

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

В монографии [Rüger, 2001] автор исследует точность аппроксимаций коэффициента отражения от границы изотропного и анизотропного НТИ полупространств (1)–(3) на ряде моделей с мало-контрастной границей (относительные вариации упругих параметров на границе  $\leq 0.1$ ) и параметрами анизотропии, принимающими значения 0 или  $\pm 0.1$ . Мы продолжили эти исследования для моделей с более контрастной границей (как для слабой, так и для сильной анизотропии), чтобы определить предельные значения относительных скачков упругих свойств на границе и параметров анизотропии, допускающие применение линейризованных аппроксимаций коэффициента отражения. В настоящей работе параметры моделей изменялись следующим образом. В первой серии расчетов верхняя среда задавалась изотропной, нижняя среда анизотропной с параметрами:  $V_{p2} = 2.5$  км/с – вертикальная скорость продольной волны,  $V_{s2} = 1.5$  км/с – вертикальная скорость быстрой поперечной волны,  $\rho_2 = 2.7$  г/см<sup>3</sup> – плотность. Скачки упругих свойств на границе  $\Delta V_p / \bar{V}_p$ ,  $\Delta Z_p / \bar{Z}_p$  и  $\Delta G_p / \bar{G}_p$  принимали значения 0.1; 0.15; 0.2; 0.3 и  $-0.1$ ;  $-0.15$ ;  $-0.2$ ;  $-0.3$ ; параметры анизотропии в нижнем слое – 0.1 (значительная анизотропия) и 0.05 (слабая анизотропия). Продольная волна падала из изотропной среды на границу с анизотропной, т. е. имитировалось отражение от кровли анизотропного слоя в реальных моделях. Параметры моделей даны в табл. 1.

Во второй серии экспериментов расчеты проводились для случая падения продольной волны из анизотропной среды на границу с изотропной средой, т. е. верхняя среда задавалась анизотропной, а нижняя – изотропной.

Таблица 1

Параметры моделей в первой серии экспериментов. Верхняя среда изотропная, нижняя – анизотропная

| Номер модели | $\Delta V_p / \bar{V}_p$ | $\Delta G / \bar{G}$ | $\Delta Z / \bar{Z}$ | $\Delta \epsilon^{(V)}$ | $\Delta \delta^{(V)}$ | $\Delta \gamma$ |
|--------------|--------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------|
| 1            | 0.1                      | 0.1                  | 0.1                  | -0.1                    | -0.1                  | 0.1             |
| 2            | 0.15                     | 0.15                 | 0.15                 | -0.1                    | -0.1                  | 0.1             |
| 3            | 0.2                      | 0.2                  | 0.2                  | -0.1                    | -0.1                  | 0.1             |
| 3a           | 0.3                      | 0.3                  | 0.3                  | -0.1                    | -0.1                  | 0.1             |
| 4            | -0.1                     | -0.1                 | -0.1                 | -0.1                    | -0.1                  | 0.1             |
| 5            | -0.15                    | -0.15                | -0.15                | -0.1                    | -0.1                  | 0.1             |
| 6            | -0.2                     | -0.2                 | -0.2                 | -0.1                    | -0.1                  | 0.1             |
| 6a           | -0.3                     | -0.3                 | -0.3                 | -0.1                    | -0.1                  | 0.1             |
| 7            | 0.1                      | 0.1                  | 0.1                  | -0.05                   | -0.05                 | 0.05            |
| 8            | 0.15                     | 0.15                 | 0.15                 | -0.05                   | -0.05                 | 0.05            |
| 9            | 0.2                      | 0.2                  | 0.2                  | -0.05                   | -0.05                 | 0.05            |
| 10           | -0.1                     | -0.1                 | -0.1                 | -0.05                   | -0.05                 | 0.05            |
| 11           | -0.15                    | -0.15                | -0.15                | -0.05                   | -0.05                 | 0.05            |
| 12           | -0.2                     | -0.2                 | -0.2                 | -0.05                   | -0.05                 | 0.05            |

Таблица 2

Параметры моделей во второй серии экспериментов. Верхняя среда изотропная, нижняя – анизотропная

| Номер модели | $\Delta V_p / \bar{V}_p$ | $\Delta G / \bar{G}$ | $\Delta Z / \bar{Z}$ | $\Delta \epsilon^{(V)}$ | $\Delta \delta^{(V)}$ | $\Delta \gamma$ |
|--------------|--------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------|
| 4a           | -0.1                     | -0.1                 | -0.1                 | 0.1                     | 0.1                   | -0.1            |
| 5a           | -0.3                     | -0.3                 | -0.3                 | 0.1                     | 0.1                   | -0.1            |

Параметры верхней анизотропной среды  $V_{p1}$ ,  $V_{s1}$ ,  $\rho_1$  совпадают с параметрами нижней среды в предыдущей серии тестирования. Этот случай наиболее близок к отражению от подошвы анизотропного слоя в реальных моделях. Параметры таких моделей даны в табл. 2.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

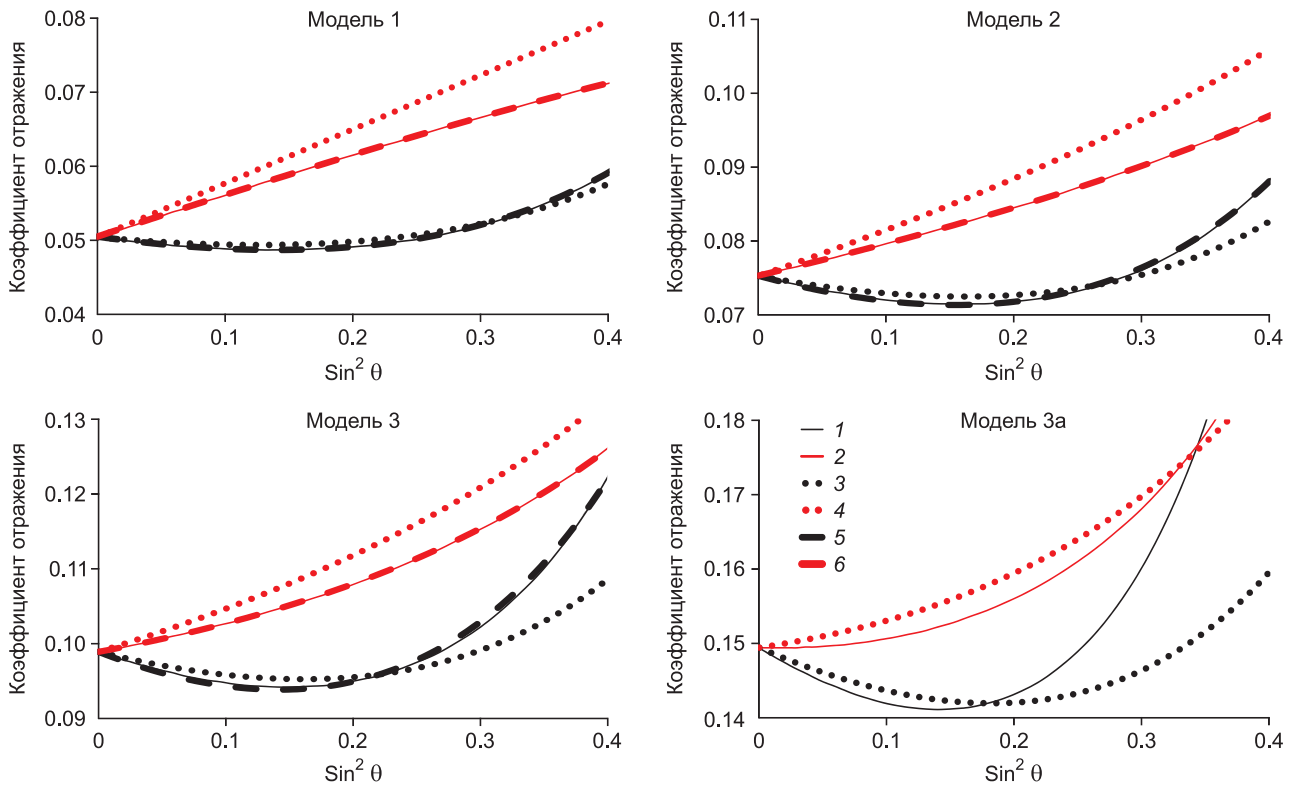
Аппроксимации по Рюгеру вычислялись по формулам (1)–(9) по точным значениям параметров моделей. Трехчленная аппроксимация точных коэффициентов отражения полиномом второй степени относительно  $\sin^2\theta$  вычислялась по формулам (1)–(3) с коэффициентами аппроксимации, полученными оптимизационным алгоритмом.

На рис. 1 показаны коэффициенты отражения (точное решение) и их аппроксимации в плоскости изотропии и плоскости оси симметрии для моделей 1, 2, 3 и 3a. Эти модели характеризуются положительным перепадом упругих свойств на границе и значительной анизотропией.

Модель 1 имеет параметры, совпадающие с параметрами модели 6 из монографии Рюгера [Rüger, 2001], и выбрана с целью верификации расчетов и для сопоставления с результатами по другим моделям. Для всех моделей, представленных на рис. 1, сглаживание точных коэффициентов отражения (до наложения шума) полиномом второй степени выполняется практически точно.

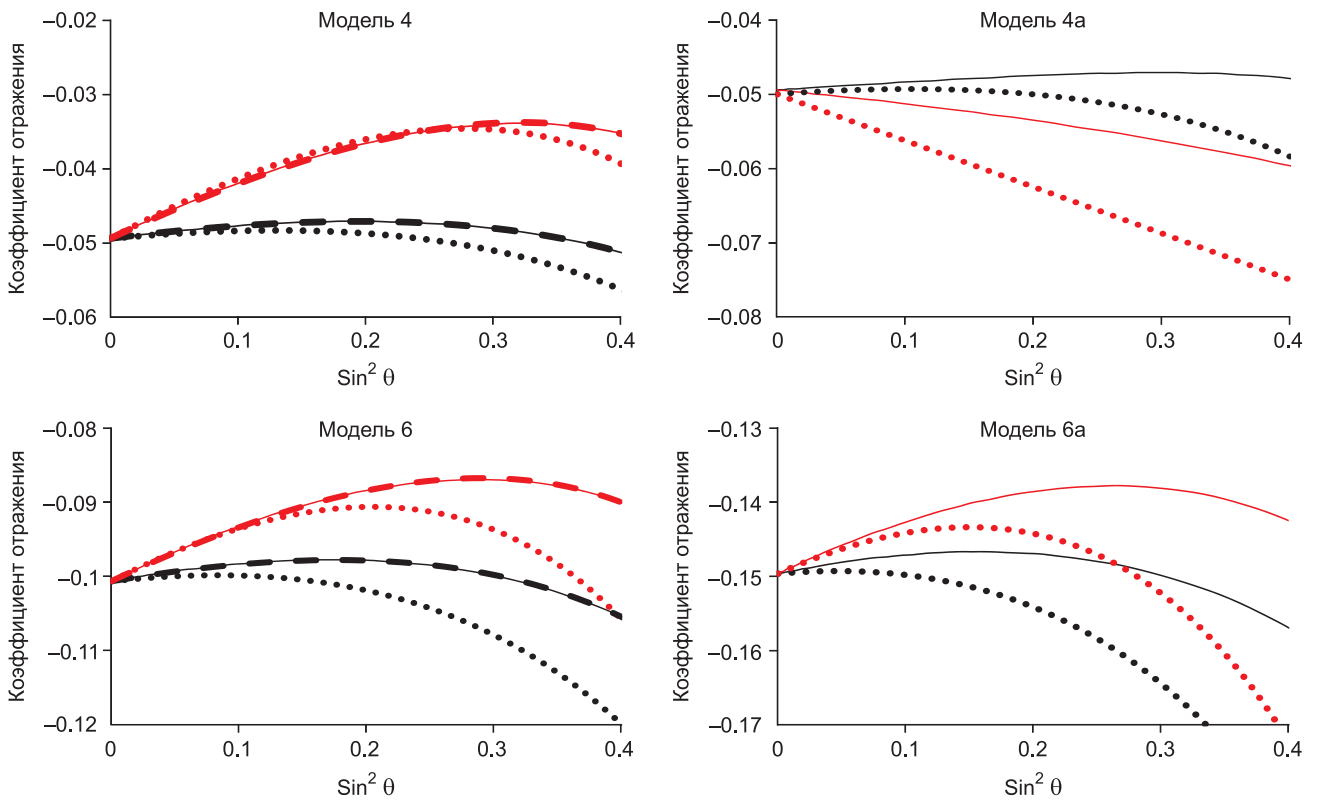
Погрешность аппроксимации Рюгера растет с увеличением угла падения волны, особенно быстро при больших скачках упругих параметров на границе (0.2; 0.3;  $-0.2$ ;  $-0.3$ ). Допустимой ее можно считать только до углов падения  $17$ – $20^\circ$  для относительных перепадов упругих свойств не более 0.2. При перепаде 0.3 (модель 3a) погрешность аппроксимации Рюгера становится значительной уже на малых углах падения  $10$ – $13^\circ$ . Характерной особенностью моделей с положительным перепадом упругих свойств является наличие критического угла падения, который приближается к источнику с увеличением контрастности границы. В связи с этим коэффициент отражения в плоскости изотропии выходит на околоритический подъем на углах падения  $25$ – $30^\circ$ , где плосковолновой коэффициент неадекватно описывает явление отражения.

На рис. 2 показаны коэффициенты отражения (точное решение) и их аппроксимации в плоскостях изотропии и оси симметрии для моделей 4, 4a, 6 и 6a. Эти модели характеризуются отрицательным перепадом упругих свойств на границе и значительной анизотропией. При отрицательном перепаде упругих свойств на границе нет критических углов. Зависимости  $R_{pp}(\sin^2\theta)$  представляют собой гладкие кривые, которые хорошо аппроксимируются полиномом второй степени до углов падения  $35$ – $40^\circ$ . В то же время для этих моделей при больших углах падения резко возрастают погрешности аппроксимации Рюгера. С увеличением угла падения они растут быстрее, чем при положительном перепаде упругих параметров. Если при  $\Delta V_p / \bar{V}_p = 0.1$  погрешности малы до углов падения  $23^\circ$  (модель 4), при  $\Delta V_p / \bar{V}_p = -0.2$  погрешности допустимы до углов падения  $17^\circ$  (модель 6), то при  $\Delta V_p / \bar{V}_p = -0.3$  недопустимые погрешности аппроксимации наблюдаются уже на очень малых удалениях от источника при углах падения  $6$ – $10^\circ$  (модель 6a). Модели 4 и 4a имеют одинаковые параметры за исключением порядка слоев. В модели 4a верхний слой



**Рис. 1.** Точное решение для коэффициентов отражения, их аппроксимации по Рюгеру и полиномом второй степени в плоскостях изотропии и оси симметрии для моделей 1, 2, 3 и 3а.

Здесь и на рис. 2, 3: 1 –  $R_{pp}$  в плоскости изотропии, 2 – то же в плоскости оси симметрии; 3 – аппроксимация коэффициентов отражения по Рюгеру в плоскости изотропии, 4 – то же в плоскости оси симметрии; 5 – полином второй степени в плоскости изотропии, 6 – то же в плоскости оси симметрии.



**Рис. 2.** Точное решение для коэффициентов отражения, их аппроксимации по Рюгеру и полиномом второй степени в плоскостях изотропии и оси симметрии для моделей 4, 4а, 6 и 6а.

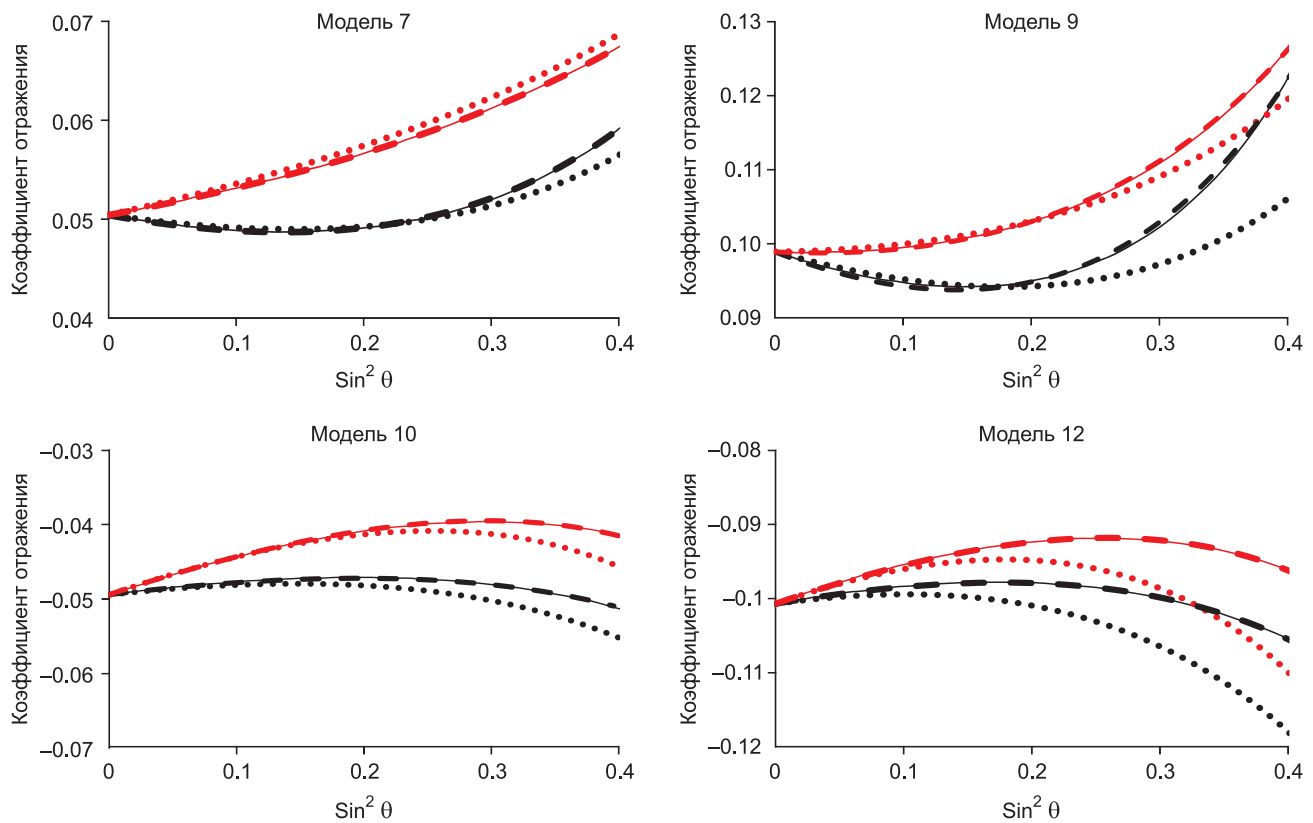


Рис. 3. Точное решение для коэффициентов отражения, их аппроксимации по Рюгеру и полиномом второй степени в плоскостях изотропии и оси симметрии для моделей 7, 9, 10 и 12.

анизотропный, а нижний – изотропный. Как видно из рис. 2, при падении волны из анизотропной среды на границу с изотропной (модель 4а) погрешности аппроксимации Рюгера на оси симметрии значительно больше.

На рис. 3 показаны коэффициенты отражения (точное решение) и их аппроксимации в плоскостях изотропии и оси симметрии для моделей 7, 9, 10 и 12. Эти модели характеризуются слабой анизотропией. Мы видим, что в случае положительного перепада упругих параметров на границе уравнения Рюгера практически точно аппроксимируют плоскородные коэффициенты отражения до углов падения  $30^\circ$  (модели 7, 9). При отрицательном перепада хорошая аппроксимация наблюдается для малого скачка параметров ( $-0.1$ ) до углов падения  $27^\circ$  (модель 10), для большого скачка ( $-0.2$ ) только на малых удалениях от источника до углов падения  $17-20^\circ$  (модель 12).

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод, что для большинства моделей с сильной анизотропией при углах падения волны больше  $20^\circ$  отмечается расхождение точного и аппроксимационного решений. Линейность зависимости  $R_{pp}(\sin^2\theta)$  (двухчленная аппроксимация) сохраняется на малых удалениях от источника при углах падения до  $17-20^\circ$ . Трехчленный полином (параболический) для отдельных вариантов модели хорошо сглаживает зависимость  $R_{pp}(\sin^2\theta)$  до углов падения  $30-40^\circ$ .

#### АВОА-ИНВЕРСИЯ И РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Для проведения АВОА-инверсии были рассчитаны теоретические коэффициенты отражения в различных

азимутах наблюдений:  $0, 30, -30, 45, -45, 60, -60, 90^\circ$ . На вход алгоритма подавались значения коэффициентов отражения для всех азимутов и всех удалений одновременно. Как было описано выше, АВОА-инверсия выполнялась в два этапа. На малых удалениях от источника до углов падения  $20^\circ$  использовалась линейная аппроксимация коэффициента отражения, при включении больших удалений до углов падения  $27-35^\circ$  – параболическая. Затем по определенным коэффициентам аппроксимации вычислялись упругие параметры модели по формулам (4)–(9). Упругие параметры верхней среды считались известными, определялись упругие параметры нижней анизотропной среды. Тестирование проводилось на данных без помех и с наложением шума 10 и 20 %.

Ниже (табл. 3–6) приводятся результаты решения обратной задачи для четырех моделей. При слабой анизотропии упругие параметры среды определяются с хорошей точностью при перепаде упругих параметров на границе  $\leq 15\%$  (положительный перепад) и  $\leq 10\%$  (отрицательный перепад). Погрешности определения  $V_{p2}, V_{s2}$  и  $\rho_2$  равны 2 % без помех и с 10%-й помехой. Коэффициенты анизотропии определяются с ошибкой 10–30 % (см. табл. 3).

С увеличением перепада упругих свойств на границе при слабой анизотропии погрешности увеличиваются и при скачке  $\Delta V_p / \bar{V}_p = \Delta Z_p / \bar{Z}_p = \Delta G_p / \bar{G}_p = 0.2$  они составляют уже 3 %, а с 10%-й помехой – 13–15 %. Коэффициенты анизотропии при этом не определяются (см. табл. 4).

При сильной анизотропии упругие параметры среды определяются с достаточной точностью только при малом перепаде упругих свойств на границе

Таблица 3

## Результаты решения обратной задачи для модели 10

| Параметры среды,<br>модель 10 |                               | Решение обратной задачи        |             |                                |             |
|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|                               |                               | Шум 0 %                        |             | Шум 10 %                       |             |
|                               |                               | Значение параметра             | Погрешность | Значение параметра             | Погрешность |
| $V_{P1} = 2.76$               | $V_{P2} = 2.5$                | $V_{P2} = 2.55$                | 2.1 %       | $V_{P2} = 2.56$                | 2.3 %       |
| $V_{S1} = 1.58$               | $V_{S2} = 1.5$                | $V_{S2} = 1.53$                | 1.8 %       | $V_{S2} = 1.53$                | 2.0 %       |
| $\rho_1 = 2.70$               | $\rho_2 = 2.70$               | $\rho_2 = 2.65$                | -2.0 %      | $\rho_2 = 2.64$                | -2.2 %      |
| $\varepsilon_1^{(V)} = 0$     | $\varepsilon_2^{(V)} = -0.05$ | $\varepsilon_2^{(V)} = -0.036$ | -28.0 %     | $\varepsilon_2^{(V)} = -0.064$ | 28.0 %      |
| $\delta_1^{(V)} = 0$          | $\delta_2^{(V)} = -0.05$      | $\delta_2^{(V)} = -0.034$      | -32.0 %     | $\delta_2^{(V)} = -0.040$      | -20.0 %     |
| $\gamma_1 = 0$                | $\gamma_2 = 0.05$             | $\gamma_2 = 0.045$             | -10.0 %     | $\gamma_2 = 0.048$             | -4.0 %      |
| –                             | $\varphi_0 = 0^\circ$         | $\varphi_0 = 0^\circ$          | 0°          | $\varphi_0 = -0.67^\circ$      | -0.67°      |

Таблица 4

## Результаты решения обратной задачи для модели 9

| Параметры среды,<br>модель 9 |                               | Решение обратной задачи        |             |                              |             |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|
|                              |                               | Шум 0 %                        |             | Шум 10 %                     |             |
|                              |                               | Значение параметра             | Погрешность | Значение параметра           | Погрешность |
| $V_{P1} = 2.05$              | $V_{P2} = 2.5$                | $V_{P2} = 2.59$                | 3.4 %       | $V_{P2} = 2.89$              | 15.6 %      |
| $V_{S1} = 1.36$              | $V_{S2} = 1.5$                | $V_{S2} = 1.55$                | 3.1 %       | $V_{S2} = 1.77$              | 13.7 %      |
| $\rho_1 = 2.70$              | $\rho_2 = 2.70$               | $\rho_2 = 2.61$                | -3.4 %      | $\rho_2 = 2.33$              | -13.6%      |
| $\varepsilon_1^{(V)} = 0$    | $\varepsilon_2^{(V)} = -0.05$ | $\varepsilon_2^{(V)} = -0.106$ | 112.0 %     | $\varepsilon_2^{(V)} = -1.3$ | 2500.0 %    |
| $\delta_1^{(V)} = 0$         | $\delta_2^{(V)} = -0.05$      | $\delta_2^{(V)} = -0.104$      | 108.0 %     | $\delta_2^{(V)} = -1.374$    | 2648.0 %    |
| $\gamma_1 = 0$               | $\gamma_2 = 0.05$             | $\gamma_2 = 0.084$             | 68.0 %      | $\gamma_2 = 0.602$           | 1104.0 %    |
| –                            | $\varphi_0 = 0^\circ$         | $\varphi_0 = 0^\circ$          | 0°          | $\varphi_0 = 2.4^\circ$      | 2.4°        |

Таблица 5

## Результаты решения обратной задачи для модели 1

| Параметры среды,<br>модель 1 |                              | Решение обратной задачи        |             |                                |             |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|                              |                              | Шум 0 %                        |             | Шум 10 %                       |             |
|                              |                              | Значение параметра             | Погрешность | Значение параметра             | Погрешность |
| $V_{P1} = 2.26$              | $V_{P2} = 2.5$               | $V_{P2} = 2.57$                | 3.0 %       | $V_{P2} = 2.59$                | 3.4 %       |
| $V_{S1} = 1.43$              | $V_{S2} = 1.5$               | $V_{S2} = 1.54$                | 2.6 %       | $V_{S2} = 1.54$                | 2.6 %       |
| $\rho_1 = 2.70$              | $\rho_2 = 2.70$              | $\rho_2 = 2.62$                | -3.0 %      | $\rho_2 = 2.09$                | -22.6 %     |
| $\varepsilon_1^{(V)} = 0$    | $\varepsilon_2^{(V)} = -0.1$ | $\varepsilon_2^{(V)} = -0.164$ | 64.0 %      | $\varepsilon_2^{(V)} = -0.184$ | 84.0 %      |
| $\delta_1^{(V)} = 0$         | $\delta_2^{(V)} = -0.1$      | $\delta_2^{(V)} = -0.148$      | 48.0 %      | $\delta_2^{(V)} = -0.150$      | 50.0 %      |
| $\gamma_1 = 0$               | $\gamma_2 = 0.1$             | $\gamma_2 = 0.125$             | 25.0 %      | $\gamma_2 = 0.125$             | 25.0 %      |
| –                            | $\varphi_0 = 0^\circ$        | $\varphi_0 = 0^\circ$          | 0°          | $\varphi_0 = -0.68^\circ$      | -0.68°      |

Таблица 6

## Результаты решения обратной задачи для модели 6

| Параметры среды,<br>модель 6 |                              | Решение обратной задачи        |             |                                |             |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|
|                              |                              | Шум 0 %                        |             | Шум 10 %                       |             |
|                              |                              | Значение параметра             | Погрешность | Значение параметра             | Погрешность |
| $V_{P1} = 3.06$              | $V_{P2} = 2.5$               | $V_{P2} = 2.69$                | 7.4 %       | $V_{P2} = 2.70$                | 7.9 %       |
| $V_{S1} = 1.66$              | $V_{S2} = 1.5$               | $V_{S2} = 1.60$                | 6.6 %       | $V_{S2} = 1.60$                | 6.7 %       |
| $\rho_1 = 2.70$              | $\rho_2 = 2.70$              | $\rho_2 = 2.51$                | -7.0 %      | $\rho_2 = 2.50$                | -7.4 %      |
| $\varepsilon_1^{(V)} = 0$    | $\varepsilon_2^{(V)} = -0.1$ | $\varepsilon_2^{(V)} = -0.050$ | -50.0 %     | $\varepsilon_2^{(V)} = -0.062$ | -38.0 %     |
| $\delta_1^{(V)} = 0$         | $\delta_2^{(V)} = -0.1$      | $\delta_2^{(V)} = -0.046$      | -54.0 %     | $\delta_2^{(V)} = -0.034$      | -66.0 %     |
| $\gamma_1 = 0$               | $\gamma_2 = 0.1$             | $\gamma_2 = 0.067$             | -33.0 %     | $\gamma_2 = 0.057$             | -43.0 %     |
| –                            | $\varphi_0 = 0^\circ$        | $\varphi_0 = 0^\circ$          | 0°          | $\varphi_0 = 1.31^\circ$       | 1.31°       |

( $\leq 10\%$ .) Погрешности определения  $V_{P2}$ ,  $V_{S2}$  и  $\rho_2$  равны 3% без помех и с 10%-й помехой. Коэффициенты анизотропии определяются с ошибкой 25–80% (см. табл. 5).

С увеличением перепада упругих свойств на границе погрешности увеличиваются и при значении  $\Delta V_P / \bar{V}_P = \Delta Z_P / \bar{Z}_P = \Delta G_P / \bar{G}_P = -0.2$  они составляют уже 7%. Коэффициенты анизотропии при этом определяются с погрешностью 50–60% (см. табл. 6).

Азимут оси симметрии на всех моделях определяется с хорошей точностью даже на зашумленных данных. При помехе 10% ошибка не превышает  $1-2^\circ$ .

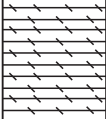
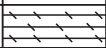
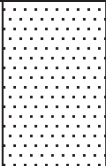
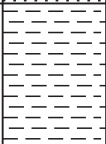
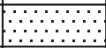

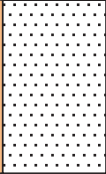
## РЕАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ

### Западная Сибирь

Западная Сибирь является крупнейшей нефтегазоносной провинцией. Здесь открыто большое количество нефтяных и газовых месторождений-гигантов (Самотлорское, Мамонтовское, Федоровское, Уренгойское, Ямбургское и др.). Основные запасы нефти сосредоточены в меловых отложениях. Большие перспективы связаны также с юрским нефтепродуктивным этажом. В Западно-Сибирском бассейне углеводородов все устойчивые отражающие сейсмические горизонты формируются на глинистых и углисто-глинистых пачках, которые характеризуются аномально низкими относительно вмещающих песчано-алевролитовых пород скоростями распространения продольных волн, что приводит к формированию энергетически выраженных

высокоамплитудных отражений [Калинин, 2015]. Перепады акустических жесткостей на границах между песчаниками, алевролитами и аргиллитами незначительны и не оказывают заметного влияния на динамические особенности сейсмической записи. По некоторым литературным источникам [Ленский и др., 2016] продуктивные юрские отложения являются анизотропными. Анализ данных кросс-дипольного акустического каротажа показывает, что анизотропные среды обычно имеют неоднородное строение и представлены чередованием участков с различной степенью анизотропии (от 3 до 10%). Основные перспективы поиска и добычи нефти в тюменской свите (средняя и нижняя юра) связываются с зонами трещинно-поровых (эпигенетических) коллекторов. Субвертикальная упорядоченная трещиноватость создает анизотропию среды типа НТИ.

В настоящей статье мы исследовали возможности изучения анизотропии продуктивных песчаных пластов Ю<sub>2</sub>–Ю<sub>3</sub>, залегающих в верхах тюменской свиты, с которыми связана отраженная волна Т. Обобщенная сейсмогеологическая модель для Среднего Приобья составлена по данным ГИС скважины № 252 на Южно-Киняминской площади. На рис. 4 показана семи-слойная модель юрских отложений от баженовской свиты до верхов тюменской свиты. Верхние шесть слоев считались изотропными, седьмой – трансверсально изотропный с горизонтальной осью симметрии (НТИ). Азимут оси симметрии от оси X  $\varphi_0 = 75^\circ$ , т. е. направление оси симметрии субмеридиональное, а

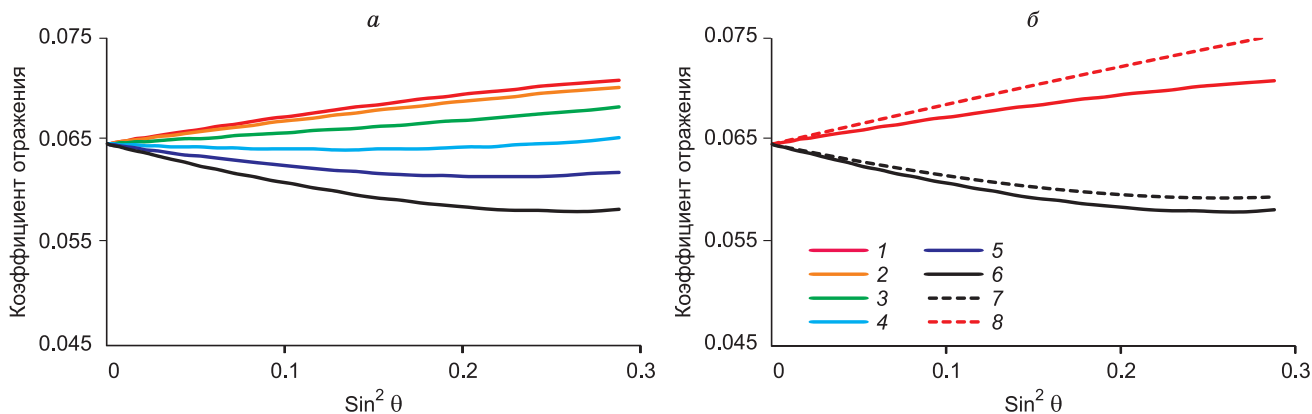
| Номер слоя | Лито-логия  | Свита        | Пласт                          | $V_P$ , км/с | $V_S$ , км/с | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | Параметры анизотропии  | $h$ , м | Глубина кровли, м | Отражающий горизонт |
|------------|---|--------------|--------------------------------|--------------|--------------|----------------------------|--|---------|-------------------|---------------------|
| 1          |  | Баженовская  |                                | 2.65         | 1.5          | 2.3                        | –  | 30      | 2760              | Б                   |
| 2          |  | Георгиевская |                                | 3.4          | 1.9          | 2.4                        | –  | 10      | 2790              |                     |
| 3          |  | Васюганская  | Ю <sub>1</sub>                 | 3.6          | 1.9          | 2.4                        | –  | 40      | 2800              |                     |
| 4          |  |              |                                | 3.9          | 2.2          | 2.5                        | –  | 35      | 2840              |                     |
| 5          |  |              | Ю <sub>2</sub> <sup>0</sup>    | 3.75         | 2.0          | 2.4                        | –  | 10      | 2875              |                     |
| 6          |  | Тюменская    |                                | 3.3          | 1.8          | 2.3                        | –  | 15      | 2885              | Т                   |
| 7          |  |              | Ю <sub>2</sub> –Ю <sub>3</sub> | 3.6          | 1.9          | 2.4                        | $\varepsilon^{(V)} = -0.1$<br>$\delta^{(V)} = -0.06$<br>$\gamma = 0.1$<br>$\varphi_0 = 75^\circ$ | 40      | 2900              |                     |

 1     2     3     4

Рис. 4. Обобщенная модель юрских отложений Среднего Приобья.

1 – глины, 2 – аргиллит, 3 – песчаники, 4 – трансверсально-изотропный слой.





**Рис. 5.** Теоретические коэффициенты отражения от горизонта Т для различных азимутов наблюдений (а) и их аппроксимации в плоскостях изотропии и оси симметрии (б).

1 – азимут 75°; 2 – азимуты 90, 60°; 3 – азимуты 105, 45°; 4 – азимуты 120, 30°; 5 – азимуты 135, 15°; 6 – азимут 165°; 7 – аппроксимация коэффициента отражения по Рюгеру в плоскости изотропии, 8 – то же в плоскости оси симметрии.

преимущественное направление трещиноватости коллектора – субширотное. Параметры анизотропии Томсена:  $\epsilon^{(V)} = -0.1$ ;  $\delta^{(V)} = -0.06$ ;  $\gamma = 0.1$ . При трассировке лучей от поверхности наблюдений до целевого интервала разреза покрывающая толща выше баженовской свиты считалась однородной изотропной со средней скоростью  $V_p = 2.6$  км/с,  $V_s = 1.3$  км/с и плотностью  $\rho = 2.2$  г/см<sup>3</sup>.

Теоретические коэффициенты отражения продольной волны от горизонта Т для различных азимутов наблюдения показаны на рис. 5, а; их аппроксимации в плоскостях изотропии и оси симметрии – на рис. 5, б. Линейность зависимостей  $R_{pp}(\sin^2\theta)$  сохраняется примерно до углов падения 19–20°, параболическая зависимость справедлива до углов падения 32–35°.

Для решения обратной задачи использовались теоретические значения коэффициентов отражения для 8 азимутов радиальных профилей наблюдений 15, 30, 45, 60, 75, 90, 120, 165°, относящихся к одному источнику. Входными данными программы служила совокупность всех значений коэффициентов отражения для всех азимутов и удалений. Для изучения помехоустойчивости алгоритмов АВОА-анализа на теоретические значения коэффициентов отражения накладывался случайный шум, имеющий нормальное распределение и составляющий 10 % от среднего уровня коэффициента отражения на базе наблюдения.

Результаты решения обратной задачи на данных без помех и с помехами приведены в табл. 7. Для МНК

использовались данные для углов падения до 20° (двухчленная аппроксимация), для метода Нелдера–Мида – до 32° (трехчленная аппроксимация). Как видно из таблицы, без помех определяется точно азимут оси симметрии, с небольшой погрешностью 1.5 % – вертикальные скорости и плотность анизотропного слоя. Из коэффициентов анизотропии вычисляется с хорошей точностью только  $\epsilon^{(V)}$ ; параметр  $\gamma$  – с погрешностью 30 %. Наибольшая погрешность наблюдается при вычислении  $\delta^{(V)}$  – 130 %. Эти закономерности сохраняются и при наложении шума 10 % на точные значения коэффициентов отражения. В этом случае ошибка определения азимута оси симметрии составляет 1.3°. Погрешности вычисления параметров  $\epsilon^{(V)}$ ,  $\gamma$  и  $\delta^{(V)}$  возрастают до 12, 47 и 176 % соответственно. Таким образом, в условиях терригенного разреза Среднего Приобья возможно определение направления трещиноватости юрских коллекторов и анизотропии скорости продольных волн с высокой точностью при использовании параболической аппроксимации Рюгера.

### Восточная Сибирь

В Восточной Сибири основные запасы углеводородов связаны с карбонатными коллекторами рифейского и вендского возраста, которые характеризуются малой пористостью и сложным сочетанием межзерновой, каверновой и трещинной составляющих порового пространства. Проницаемость обеспечивается, главным

Таблица 7

Результаты решения обратной задачи на данных без шумов и с 10%-м шумом

| Параметры среды        |                           | Решение обратной задачи     |             |                             |             |
|------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|-------------|
|                        |                           | Шум 0 %                     |             | Шум 10 %                    |             |
|                        |                           | Значение параметра          | Погрешность | Значение параметра          | Погрешность |
| $V_{p1} = 3.3$         | $V_{p2} = 3.6$            | $V_{p2} = 3.66$             | 1.7 %       | $V_{p2} = 3.63$             | 0.8 %       |
| $V_{s1} = 1.8$         | $V_{s2} = 1.9$            | $V_{s2} = 1.93$             | 1.6 %       | $V_{s2} = 1.94$             | 2.1 %       |
| $\rho_1 = 2.3$         | $\rho_2 = 2.4$            | $\rho_2 = 2.37$             | -1.2 %      | $\rho_2 = 2.38$             | -0.8 %      |
| $\epsilon_1^{(V)} = 0$ | $\epsilon_2^{(V)} = -0.1$ | $\epsilon_2^{(V)} = -0.090$ | -10.0 %     | $\epsilon_2^{(V)} = -0.088$ | -12.0 %     |
| $\delta_1^{(V)} = 0$   | $\delta_2^{(V)} = -0.06$  | $\delta_2^{(V)} = -0.138$   | 130.0 %     | $\delta_2^{(V)} = -0.166$   | 176.0 %     |
| $\gamma_1 = 0$         | $\gamma_2 = 0.1$          | $\gamma_2 = 0.132$          | 32.0 %      | $\gamma_2 = 0.147$          | 47.0 %      |
| –                      | $\varphi_0 = 75^\circ$    | $\varphi_0 = 75^\circ$      | 0°          | $\varphi_0 = 73.69^\circ$   | 1.3°        |

образом, наличием вертикальной трещиноватости. Поскольку исследуемая геологическая среда включает в себя систему вертикальных азимутально-ориентированных трещин, будем описывать ее в рамках поперечно-изотропной модели с горизонтальной осью симметрии, расположенной ортогонально плоскости трещин.

Исследование применимости алгоритмов AVOA, основанных на линеаризованных аппроксимациях Рюгера, проводилось на модельных данных для целевого карбонатного комплекса Верхнечонского нефтяного месторождения.

Обобщенная сейсмогеологическая модель месторождения была составлена по данным вертикального сейсмического профилирования (ВСП) и акустического каротажа (АК) в скважинах № 73 и 78. В качестве модели рассматривается трехслойная горизонтально-слоистая среда. Второй слой задан трансверсально-изотропным и имитирует трещиноватые отложения (долмиты) осинского горизонта и подсолевого карбонатного комплекса (венд) (рис. 6).

Направление оси симметрии в анизотропном слое является горизонтальным и составляет с осью  $X$  угол  $60^\circ$ , а направление трещин –  $150^\circ$  соответственно.

Отражающие горизонты в данном разрезе: горизонт А – кровля осинского горизонта усольской свиты и карбонатного комплекса, являющийся репером; горизонт М2 – кровля непской свиты, подошва карбонатного комплекса.

Модельными данными являлись теоретические коэффициенты отражения  $P$ -волн от кровли (горизонт А) и подошвы (горизонт М2) трещиноватого анизотропного слоя (рис. 7). Линейность зависимостей  $R_{PP}(\sin^2\theta)$  для обоих горизонтов сохраняется примерно до углов падения  $19\text{--}20^\circ$ .

Для AVOA-инверсии использовались теоретические значения коэффициентов отражения для восьми азимутов радиальных профилей наблюдений  $0, 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150^\circ$ , относящихся к одному источнику. Результаты AVOA-инверсии на данных без помех и с помехами приведены в табл. 8 (для кровли анизотропного слоя) и табл. 9 (для подошвы). Углы падения для МНК – до  $19^\circ$  (двухчленная аппроксимация), для метода Нелдера–Мида – до  $40^\circ$  (трехчленная аппроксимация). На данных без помех азимут оси симметрии определяется точно, как по горизонту А, так и по горизонту М2.

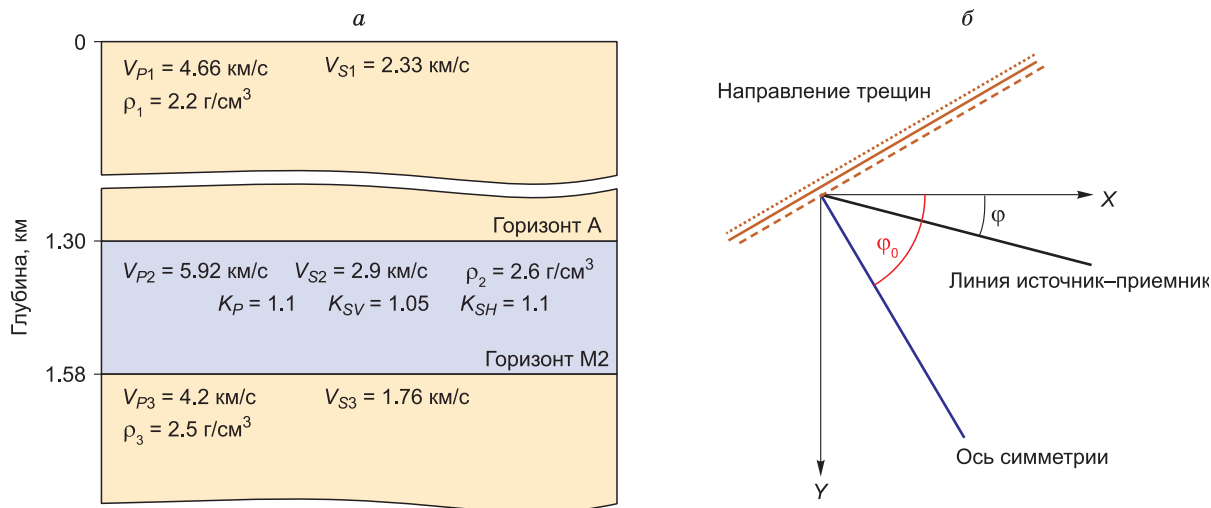


Рис. 6. Обобщенная сейсмогеологическая модель Верхнечонского месторождения в разрезе (а) и в плане (б). Трансверсально-изотропный слой выделен сиреневым цветом.  $K_{SH}$ ,  $K_P$ ,  $K_{SV}$  – эффективные параметры анизотропии по М.В. Невскому [Невский, 1974].

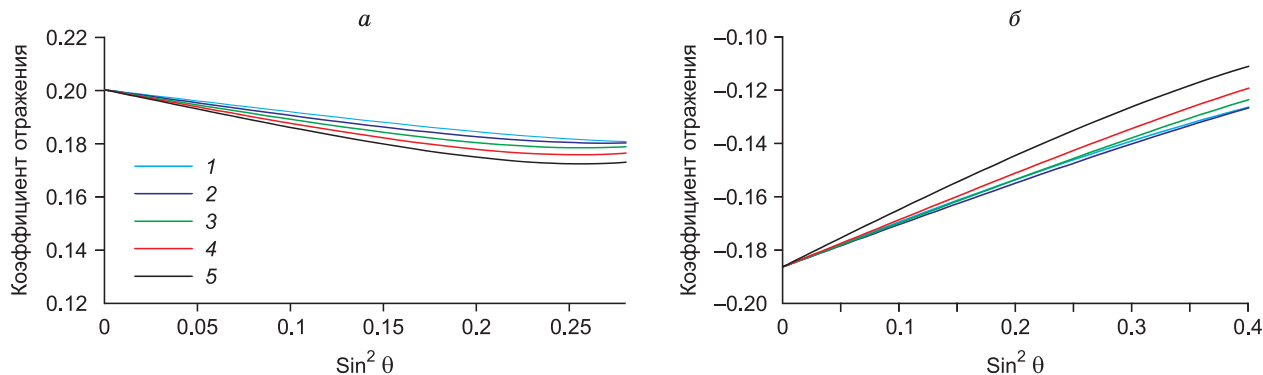


Рис. 7. Коэффициенты отражения от кровли (а) и подошвы (б) анизотропного слоя в различных азимутах наблюдений для обобщенной сейсмогеологической модели Верхнечонского месторождения.

1 – азимут  $60^\circ$ ; 2 – азимуты  $90, 30^\circ$ ; 3 – азимуты  $105, 15^\circ$ ; 4 – азимуты  $120, 0^\circ$ ; 5 – азимут  $150^\circ$ .

Таблица 8

Зависимость параметров аппроксимации от уровня шума для горизонта А

| Параметр аппроксимации              | Шум, % |       |       |
|-------------------------------------|--------|-------|-------|
|                                     | 0      | 10    | 20    |
| <i>A</i>                            | 0.20   | 0.20  | 0.20  |
| <i>B<sup>iso</sup></i>              | -0.20  | -0.20 | -0.19 |
| <i>B<sup>ani</sup></i>              | 0.10   | 0.10  | 0.08  |
| <i>C<sup>iso</sup></i>              | 0.30   | 0.30  | 0.27  |
| <i>C<sup>ani1</sup></i>             | -0.22  | -0.21 | -0.19 |
| <i>C<sup>ani2</sup></i>             | -0.14  | -0.11 | -0.09 |
| $\varphi, ^\circ$                   | 60.00  | 67.40 | 69.30 |
| Погрешность $\Delta\varphi, ^\circ$ | 0.00   | 7.40  | 9.30  |

С наложением шума точность определения азимута оси симметрии падает. При помехе 10 % погрешности составляют 7.5° для горизонта А и 2.7° для горизонта М<sub>2</sub>. С увеличением уровня помехи до 20 % ошибка определения азимута оси симметрии возрастает до 9–11°. Значения параметров аппроксимации *B<sup>iso</sup>* и *B<sup>ani</sup>* определяются с удовлетворительной точностью до уровня помех 20 % для горизонта А и 10 % для горизонта М<sub>2</sub>. Коэффициенты *C<sup>iso</sup>*, *C<sup>ani1</sup>* и *C<sup>ani2</sup>* определяются относительно устойчиво для уровня помехи не более 10 %.

Таким образом, на модельных данных для Верхнечонского нефтяного месторождения показано, что параболическая аппроксимация повышает точность определения параметров *B<sup>iso</sup>* и *B<sup>ani</sup>*, обычно используемых в интерпретации. В то же время она характеризуется меньшей помехоустойчивостью при определении параметров *C<sup>iso</sup>*, *C<sup>ani1</sup>* и *C<sup>ani2</sup>* и поэтому может быть рекомендована к применению только на материалах хорошего качества с отношением сигнал/помеха не менее 10. При таком отношении сигнал/помеха азимут оси симметрии определяется с высокой точностью, погрешность не превышает 2–7°, причем по отражению от подошвы анизотропного слоя точность выше. По величине *B<sup>ani</sup>* можно на качественном уровне судить о плотности трещин. Количественный переход от параметров аппроксимации коэффициентов отражения, определенных из инверсии, к упругим параметрам анизотропной среды по формулам Рюгера (4)–(9) является неправомерным, поскольку перепад упругих параметров на кровле и подошве анизотропного слоя для модели Верхнечонского нефтяного месторождения нельзя считать малым. Действительно перепад скоростей продольных и поперечных волн и плотностей в данном случае равен на кровле:  $\Delta V_P/\bar{V}_P = 0.24$ ,  $\Delta V_S/\bar{V}_S = 0.22$ ,  $\Delta \rho/\bar{\rho} = 0.17$ ; на подошве  $-\Delta V_P/\bar{V}_P = -0.34$ ,  $\Delta V_S/\bar{V}_S = -0.49$ ,  $\Delta \rho/\bar{\rho} = -0.04$ . Сравнительно малым можно считать только перепад плотностей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье на теоретических моделях были исследованы условия, при которых линейризованная аппроксимация Рюгера для плосковолнового коэффициента отражения продольной волны от гра-

Таблица 9

Зависимость параметров аппроксимации от уровня шума для горизонта М<sub>2</sub>

| Параметр аппроксимации | Шум, %                              |             |             |             |             |             |        |
|------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------|
|                        | 0                                   |             | 10          |             | 20          |             |        |
| Обратная задача        | Двухчленная                         | Трехчленная | Двухчленная | Трехчленная | Двухчленная | Трехчленная |        |
|                        | <i>A</i>                            | -0.189      | -           | -0.189      | -           | -0.189      | -      |
|                        | <i>B<sup>iso</sup></i>              | 0.262       | 0.268       | 0.271       | 0.271       | 0.276       | 0.255  |
|                        | <i>B<sup>ani</sup></i>              | -0.093      | -0.096      | -0.118      | -0.103      | -0.196      | -0.074 |
|                        | <i>C<sup>iso</sup></i>              | -           | -0.099      | -           | -0.102      | -           | -0.079 |
|                        | <i>C<sup>ani1</sup></i>             | -           | 0.067       | -           | 0.084       | -           | 0.025  |
|                        | <i>C<sup>ani2</sup></i>             | -           | 0.080       | -           | 0.067       | -           | 0.071  |
|                        | $\varphi, ^\circ$                   | 60          | -           | 62.7        | -           | 71.2        | -      |
|                        | Погрешность $\Delta\varphi, ^\circ$ | 0           | -           | 2.7         | -           | 11.2        | -      |

ницы изотропного и анизотропного НТИ полупространств является правомочной, а также каков допустимый порядок малости скачков упругих свойств и коэффициентов анизотропии на границе. Кроме того были проанализированы сейсмогеологические условия нефтегазоносных бассейнов Западной и Восточной Сибири с точки зрения корректности применения там линейризованных аппроксимаций коэффициента отражения для азимутального анализа амплитуд отраженных волн.

Из анализа рассмотренных теоретических моделей можно сделать вывод, что для большинства моделей с сильной анизотропией при углах падения волны больше 20° отмечается расхождение точного и аппроксимационного решений. Двухчленная (линейная) аппроксимация коэффициента отражения, справедливая на малых удалениях от источника при углах падения до 20°, позволяет надежно определить азимут оси симметрии. Для решения обратной задачи с определением всех параметров анизотропной среды необходимо использовать трехчленную (параболическую) аппроксимацию коэффициента отражения, которая для отдельных вариантов модели хорошо сглаживает зависимость  $R_{PP}(\sin^2\theta)$  до углов падения 30–35°, но не обеспечивает высокой точности определения упругих параметров среды из-за большого расхождения точных значений коэффициента отражения с аппроксимацией Рюгера. К тому же трехчленная аппроксимация обладает плохой помехоустойчивостью, что приводит к невозможности определения коэффициентов анизотропии на зашумленных данных. Таким образом, аппроксимационные формулы годятся для AVOA-инверсии (с определением всех параметров модели) только в случае слабой анизотропии при перепаде упругих параметров на границе  $\leq 15\%$  (положительный перепад) и  $\leq 10\%$  (отрицательный перепад). В то же время азимут оси симметрии определяется достаточно точно практически для всех исследованных моделей при отношении сигнал/помеха  $\geq 10$ .

На реальных моделях, типичных для Западной и Восточной Сибири, показано, что азимутальный AVO-анализ позволяет надежно определить азимут оси сим-

метрии и, следовательно, направление трещиноватости коллектора по хорошим экспериментальным данным с отношением сигнал/помеха  $\geq 10$ . О распределении плотности трещин на исследуемых площадях можно судить на качественном уровне по изменениям параметра  $B^{ani}$ .

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность Г.А. Дугарову за полезные советы и большую помощь при разработке алгоритма расчета коэффициентов отражения в анизотропных средах.

#### Литература

- Гольдин С.В.** Сейсмические волны в анизотропных средах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 372 с.
- Калинин А.Ю.** Структурно-тектоническая характеристика, сейсмогеологическая модель и оценка перспектив нефтегазоносности верхней юры и неокома Александровского свода и Колтогорского мегапрогиба: Дис. ...канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2015. 200 с.
- Ленский В.А., Адиев А.Я., Иркабаев Д.Р., Бурдыгина Г.В., Тимергазин К.К., Арсланов Д.К., Борисова М.К., Губачев О.А.** Оценка азимутальной анизотропии пород по AVO-атрибутам и анализу скорости в МОГТ-3D // Технологии сейсморазведки. 2016. № 1. С. 61–68.
- Лыхин П.А., Нефедкина Т.В.** Методика пространственно-АВОА-анализа PP-отражений в анизотропных средах в широкоугловом диапазоне наблюдений // 18-я конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа “Геомодель-2016”: Сб. материалов EAGE. Геленджик, 2016.
- Невский М.В.** Квазианизотропия скоростей сейсмических волн. М.: Наука, 1974. 145 с.
- Нефедкина Т.В., Карстен В.В., Егорова А.А.** Пространственный анализ амплитуд отраженных продольных волн в азимутально-анизотропных средах // Технологии сейсморазведки. 2011. № 3. С. 42–48.
- Петрашень Г.И.** Распространение объемных волн и методы расчета волновых полей в анизотропных упругих средах / Сб. науч. тр. под ред. Г.И. Петрашеня. Л.: Наука, 1984. 282 с.
- Химмельблау Д.** Прикладное нелинейное программирование. М.: “Мир”, 1975. 534 с.
- Чичина Т.И., Сабинин В.И., Корсунов В.И., Ронкий-Харийо Х.** Амплитудный анализ отраженных продольных волн в азимутально-анизотропных средах при разведке нефтегазовых резервуаров // Сейсмические исследования земной коры: Сб. докл. междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию акад. Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 23–25 нояб. 2004 г.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. С. 196–202.
- Aki K., Richards P.G.** Quantitative Seismology, Theory and Methods. Volume I. San Francisco, California: W.H. Freeman & Co, 1980. 557 p.
- Ostrander W.J.** P-wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence // Geophysics. 1984. V. 49, N 10. P. 1637–1648.
- Rüger A.** Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media // Geophysics. 1998. V. 63, N 3. P. 935–947.
- Rüger A.** Reflection Coefficients and Azimuthal AVO Analysis in Anisotropic Media. Society of Exploration Geophysics. 2001. 185 p.
- Rutherford S.R., Williams R.H.** Amplitude-versus-offset variations in gas sands // Geophysics. 1989. V. 54, N 6. P. 680–688.
- Schoenberg M., Protazio J.** “Zoeppritz” rationalized and generalized to anisotropy // J. Seism. Explor. 1992. N 1. P. 125–144.
- Shuey P.T.** A simplification of the Zoeppritz equation // Geophysics. 1985. V. 50. P. 609–614.
- Thomsen L.** Weak elastic anisotropy // Geophysics. 1986. V. 51, N 10. P. 1954–1966.
- Zoeppritz K.** Über Reflexion und Durchgang seismischer Wellen durch Unstetigkeitsflächen // Über Erdbebenwellen VII. Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, mathematisch-physikalische Klasse. 1919. P. 57–84.

*Статья поступила в редакцию 14 июля 2016 г., в окончательном варианте – 5 сентября 2016 г.*

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

**НЕФЕДКИНА Татьяна Викторовна** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, специалист в области многоволновой сейсморазведки, AVO-инверсии.  
E-mail: nefedkinaTV@ipgg.sbras.ru; тел. +7(383)330-90-16

**ЛЫХИН Павел Александрович** – магистр геологии, аспирант Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.  
E-mail: pavel.lykhin@gmail.com