



ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ АНИЗОТРОПИИ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ ОТРАЖЕНИЯ ОТ ГРАНИЦЫ ДВУХ АЗИМУТАЛЬНО-АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД

Г.А. Дугаров, Р.К. Бекренев, Т.В. Нефедкина

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

В работе рассматривается алгоритм расчета коэффициентов отражения от границы двух сред НТИ с последующим анализом влияния на коэффициенты отражения анизотропии выше и ниже целевого горизонта, а также вариаций параметров сред НТИ. Интерпретация данных отражения от границы двух НТИ-сред с учетом анизотропии, как выше, так и ниже целевой границы, приводит к существенным ошибкам в определении направления осей симметрии, а значит, направления упорядоченной трещиноватости. Завышение/занижение значений упругих параметров в вышележащей среде НТИ должно потенциально привести к соответствующему завышению/занижению аналогичных параметров в нижележащем целевом слое при AVAZ-инверсии. При этом среди параметров анизотропии наибольшее влияние на зависимости коэффициентов отражения оказывает параметр Томсена γ . Именно на оценку параметра анизотропии γ в результате AVAZ-инверсии целесообразно ориентироваться в первую очередь.

Плосковолновые коэффициенты отражения; трансверсально-изотропная (HTI) среда; продольные волны

STUDY OF THE INFLUENCE OF ANISOTROPY PARAMETERS ON REFLECTION COEFFICIENTS FROM A BOUNDARY BETWEEN TWO AZIMUTHALLY ANISOTROPIC MEDIA

G.A. Dugarov, R.K. Bekrenev, T.V. Nefedkina

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: DugarovGA@ipgg.sbras.ru*

The paper considers an algorithm for calculating reflection coefficients from boundary between two HTI media. Analysis of the presence of anisotropy above and below the target boundary, as well as variations in the parameters of HTI media, was done. Interpretation of reflection data from the boundary between two HTI media with neglect of anisotropy above or below potentially leads to significant errors in estimation of symmetry axes directions, and hence fracturing orientation. Overestimation/underestimation of an elastic parameter in the overlying HTI medium could lead to a corresponding overestimation/underestimation of similar parameter in the underlying target layer in the result of AVAZ inversion. Furthermore,

among the anisotropy parameters Thomsen parameter γ has most significant influence on the reflection coefficients dependences. Thus, the parameter γ could be used foremost as a result of the AVAZ inversion.

Plane wave reflection coefficients; transversely isotropic (HTI) media; compressional waves

ВВЕДЕНИЕ

Анализ амплитуд отраженных сейсмических волн в зависимости от удалений и азимутальных направлений источник-приемник (AVOA-анализ – Amplitude Versus Offset and Azimuth) по данным 3D-сейсморазведки стал в последнее время одной из общепринятых технологий для обнаружения зон повышенной азимутально-ориентированной трещиноватости, к которым часто приурочены месторождения углеводородов. При нахождении параметров систем ориентированных трещин по данным об анизотропии скоростей или амплитуд отраженных волн используют анизотропные аппроксимации сред с ориентированной трещиноватостью [Bakulin et al., 2000a-c]. Наиболее простой и принципиально важной является модель трансверсально-изотропной (TI) среды. Резервуары с системой параллельных трещин могут быть представлены эффективной моделью трансверсально изотропной среды с осью симметрии нормальной плоскостям трещин. В случае субвертикального расположения трещин данная среда описывается моделью TI с горизонтальной осью симметрии (HTI).

Методология AVOA-анализа основывается на том, что азимутальная зависимость скоростей, вызванная наличием вертикально ориентированных трещин в среде, влечет за собой и азимутальную анизотропию амплитуд отраженных волн, что позволяет оценивать параметры целевого анизотропного слоя по данным отражения от его кровли. За последние десятилетия было разработано множество подходов к анализу, инверсии и интерпретации AVOA-данных [Rüger, 1997, 2001; Vavryčuk, Pšenčík, 1998; Downton et al., 2011]. Но основные существующие подходы применимы лишь для слабоконтрастных границ и коллекторов со слабой анизотропией [Нефедкина, Лыхин, 2016]. В случае с контрастными отражающими границами и сильной анизотропией необходимо переходить к использованию точных формул для расчета плосковолновых коэффициентов отражения. Ранее уже был разработан подход для проведения AVOA-анализа с использованием точных формул [Лыхин, Нефедкина, 2017; Нефедкина и др., 2018], но был рассмотрен лишь случай отражения от границы изотропного и анизотропного (HTI) полупространств, как и в случае с аппроксимационными формулами Рюгера [Rüger, 1997, 2001].

Наличие трещиноватого анизотропного слоя, залегающего выше целевого слоя, существенно влияет на эффекты AVOA, осложняя общую картину зависимости коэффициентов отражения от удалений и азимутальных направлений источник–приемник. Влияние покрывающего слоя является причиной преимущественного распространения волны вдоль направления его трещин, что искажает амплитуды отражения от нижележащего слоя и качество картирования и интерпретации целевого горизонта [Luo, Evans, 2003]. В данной работе рассматривается разработка алгоритма расчета точных коэффициентов отражения от границы двух HTI сред, с дальнейшим проведением теоретических расчетов по изучению влияния HTI анизотропии вышележащей толщи на коэффициенты отражения от азимутально-анизотропных сред.

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ ОТ ГРАНИЦЫ АЗИМУТАЛЬНО-АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД

Расчет коэффициентов отражения по точным формулам подразумевает решение системы линейных уравнений вида [Schoenberg, Protazio, 1992]:

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

где \mathbf{A} – это матрица, составленная из векторов смещений и компонент тензоров напряжений для отраженных и преломленных волн, \mathbf{b} – вектор-столбец, составленный из векторов смещений и компонент тензора напряжения для падающей волны, \mathbf{x} – вектор-столбец, состоящий из коэффициентов отражения и преломления всех типов волн, $\mathbf{I}_i^{d(1)}$, $\mathbf{I}_i^{d(2)}$, $\mathbf{I}_i^{u(1)}$ – вектора поляризации падающей, преломленной и отраженной волны i -го типа соответственно, $\mathbf{t}_i^{d(1)}$, $\mathbf{t}_i^{d(2)}$, $\mathbf{t}_i^{u(1)}$ – нормальные к границе компоненты тензоров напряжений падающей, преломленной и отраженной волны i -го типа соответственно. Индексы d и u обозначают направление распространения волны – вниз и вверх соответственно. Индексы (1) и (2) обозначают рассматриваемую среду – верхнюю и нижнюю соответственно.

Данная система соответствует граничным условиям на непрерывность напряжений и смещений на границе. В случае плоских горизонтальных границ компоненты тензоров напряжений \mathbf{t} рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} t_k^{q(s)} &= C_{k3mn}^s p_m^{q(s)} t_n^{q(s)}, \\ q &= \{d, u\}, \\ s &= \{1, 2\}. \end{aligned} \quad (2)$$

где \mathbf{C}^s – тензор модулей упругости среды с индексом s , $\mathbf{p}^{q(s)}$ – вектор медленности волны с индексом q в среде с индексом s .

При расчете параметров, входящих в систему (1), проводится переход в локальную систему координат, при которой линия наблюдения совпадает с направлением оси X , т. е. необходимый поворот зависит от рассматриваемого азимутального направления источник-приемник. При этом тензоры модулей упругости \mathbf{C} сред НТИ сверху и снизу поворачиваются каждый на свой соответствующий угол в

зависимости от направления оси симметрии в глобальной системе координат и соответствующего перехода в локальную систему координат. В общем виде тензор упругих модулей C' после поворота будет иметь следующий вид:

$$C' = \begin{pmatrix} C'_{11} & C'_{12} & C'_{13} & 0 & 0 & C'_{16} \\ C'_{12} & C'_{22} & C'_{23} & 0 & 0 & C'_{26} \\ C'_{13} & C'_{23} & C'_{33} & 0 & 0 & C'_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C'_{44} & C'_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C'_{45} & C'_{55} & 0 \\ C'_{16} & C'_{26} & C'_{36} & 0 & 0 & C'_{66} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Вектора медленности отраженных и преломленных волн находятся из закона Снеллиуса для анизотропных сред [Slawinski et al., 2000], который в данном случае заключается в равенстве проекций векторов медленности на ось X падающей, отраженных и преломленных волн. Вектора поляризации находятся путем нахождения собственных векторов соответствующей матрицы Кристоффеля.

Заполнив систему уравнений (1) и решив ее относительно x мы получим коэффициенты отражения от границы двух сред НТИ. Из решения системы уравнений (1) может быть получено точное значение плосковолновых коэффициентов отражения монокрипной PP - и обменной PS -волн на границе двух НТИ-сред с заданными упругими параметрами без ограничений на степень анизотропии, контрастность границ и направление осей.

ВЛИЯНИЕ НАЛИЧИЯ АНИЗОТРОПИИ ВЫШЕ ИЛИ НИЖЕ ЦЕЛЕВОГО ОТРАЖАЮЩЕГО ГОРИЗОНТА

Расчет коэффициентов отражения по разработанному алгоритму и анализ влияния на них анизотропии проводился на синтетической горизонтально слоистой модели, приближенной к реальному строению среды на одном из месторождений паннонского бассейна (Центральная Европа) [Olneva et al., 2019]. Целевым объектом 3D сейсмических исследований, описанных в этой статье, являлись трещиноватые нефтенасыщенные породы донеогенового фундамента преимущественно палеозойского возраста. Скоростной и амплитудный анализы отражения от кровли P_z показали наличие азимутальной НТИ-анизотропии как в фундаменте, так и в покрывающей его неогеновой толще.

Параметры синтетической модели приведены в табл. 1. Модель состоит из пяти упругих однородных слоев, разделенных горизонтальными отражающими границами. Четвертая граница имитирует кровлю палеозоя. Трассирование лучей, отраженных от кровли палеозоя, проводилось через верхние четыре слоя, имитирующие четвертичные отложения (слой 1) и породы неогенового возраста (слои 2–4). Рассчитывались коэффициенты отражения от границы 4. Верхние три слоя модели – изотропные, четвертый и пятый слои анизотропны по типу НТИ, но параметры анизотропии в них разные, в том числе и направление горизонтальных осей симметрии. В таблице 1 параметр φ_0 – это азимут оси

симметрии, отсчитываемый от направления на север по часовой стрелке, H – глубина подошвы слоя, V_P , V_S – скорости P - и S -волн на вертикали, γ – параметр анизотропии Томсена, $\varepsilon^{(V)}$, $\delta^{(V)}$ – модифицированные параметры анизотропии Томсена, выраженные через V_P , V_S на вертикали [Tsvankin, 1997].

Таблица 1

Параметры синтетической модели

Слой	H , км	ρ , г/см ³	V_P , км/с	V_S , км/с	$\varepsilon^{(V)}$	$\delta^{(V)}$	γ	φ_0
1	0.40	1.98	1.75	0.88				
2	1.00	2.05	2.10	1.00				
3	1.70	2.33	2.90	1.50				
4	2.22	2.55	4.20	2.40	-0.07	0.1	0.07	30°
5		2.73	4.77	3.00	-0.05	0.08	0.05	150°

Результаты лучевого трассирования, проведенного в рамках рассматриваемой модели, позволили установить следующие соотношения между углами падения волны на целевую границу и удалениями источник–приемник. Удаления источник–приемник до 800 м соответствуют углам падения до 15°, будем называть их далее в данной работе ближними удалениями. Удаления в пределах 800–1600 м соответствуют углам падения в диапазоне 15–30°, будем называть их средними удалениями. Дальними будем называть удаления более 1600 м, что соответствует углам падения более 30°.

Далее приводятся расчеты для коэффициентов отражения от границы 4, разделяющей в общем случае две среды НТИ. Но поскольку большой интерес представляет изучение раздельного влияния на коэффициенты отражения анизотропии как выше, так и ниже отражающей границы, рассматривались следующие варианты контактирующих сред.

1. ISO–НТИ (изотропная среда сверху, НТИ – снизу),
2. НТИ–ISO (среда НТИ сверху, изотропная – снизу),
3. НТИ–НТИ (среда НТИ сверху и снизу).

Параметры изотропных сред, плотность и скорости P - и S -волн, также брались из табл. 1 для слоя 4 или 5, при этом параметры анизотропии Томсена занулялись. Все азимуты в дальнейшем отсчитываются от направления на север по часовой стрелке.

Расчет был произведен по точным формулам для плосковолновых коэффициентов отражения. В результате были рассчитаны зависимости как от углов падения, так и от азимутальных направлений. Стоит отметить, что для среды НТИ плоскость изотропии совпадает с направлением, перпендикулярным направлению оси симметрии. Поэтому при рассмотрении азимутального направления в 120° (плоскость изотропии для верхнего относительно границы слоя – четвертого в модели), зависимости коэффициентов отражения от углов падения для случаев границы ISO–НТИ и НТИ–НТИ совпадают (рис. 1, а). Аналогично для азимутального направления в 60°, для направления плоскости изотропии в пятом нижнем слое, совпадают результаты для случаев НТИ–ISO и НТИ–НТИ (рис. 1, б). Зависимости для остальных

азимутальных направлений имеют похожий характер. Для случая направления в 90° зависимости приведены на рис. 2. Видно, что характер зависимости коэффициентов отражения от удаления с изменением вида отражающей границы сохраняется.

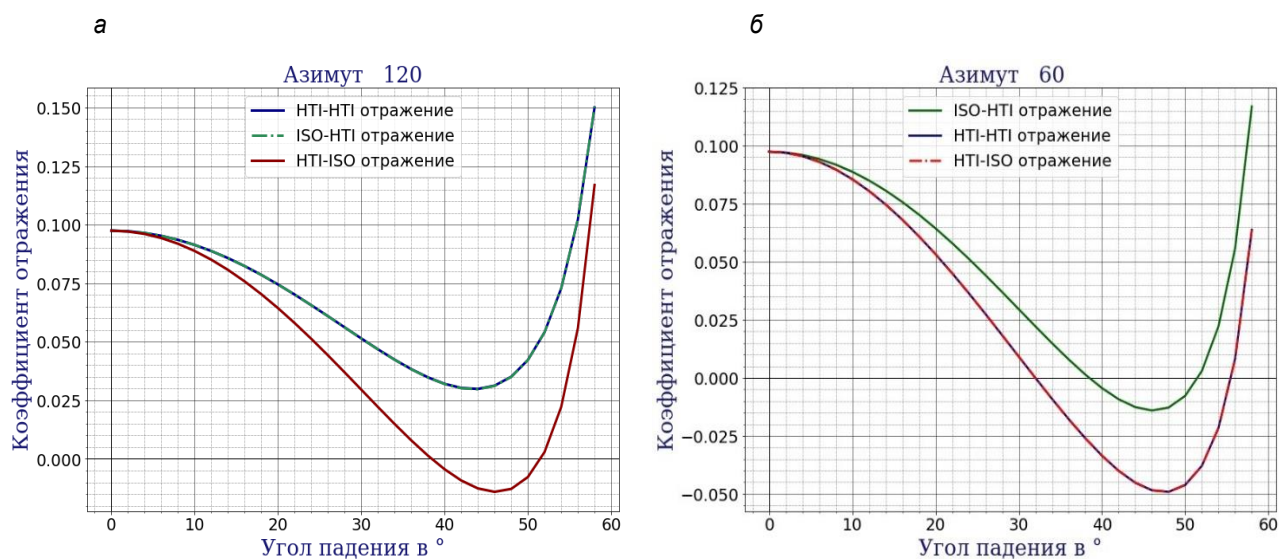


Рис. 1. Зависимость коэффициентов отражения от углов падения для азимутальных направлений: *а* – 120° , соответствует направлению плоскости изотропии в верхнем слое, *б* – 60° , соответствует направлению плоскости изотропии в нижнем слое. Азимуты отсчитываются от направления на север по часовой стрелке

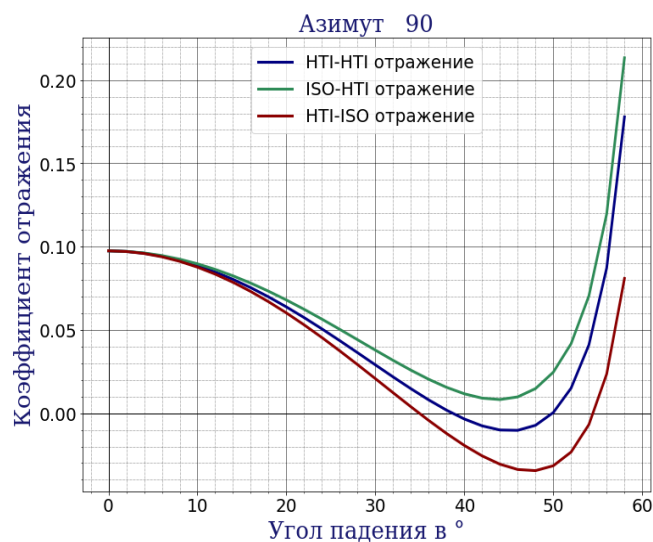


Рис. 2. Зависимость коэффициентов отражения от углов падения для азимутального направления в 90°

Наибольший интерес представляют азимутальные зависимости коэффициентов отражения для фиксированного значения угла падения (рис. 3), здесь приводятся азимутальные зависимости для угла падения в 30° . На этих зависимостях наиболее наглядно видны те эффекты, которые накладывает анизотропия нижнего и верхнего слоев на коэффициенты отражения. Направление оси симметрии

нижнего слоя в 150° для случая отражения от границы ISO–HTI (зеленая линия) соответствует максимуму на азимутальной зависимости коэффициентов отражения. При этом для случая отражения от границы HTI–ISO (красная линия) максимум, наоборот, соответствует направлению трещиноватости в верхнем слое. Направлению оси симметрии в верхнем слое для случая отражения HTI–ISO соответствует минимум на азимутальной зависимости.

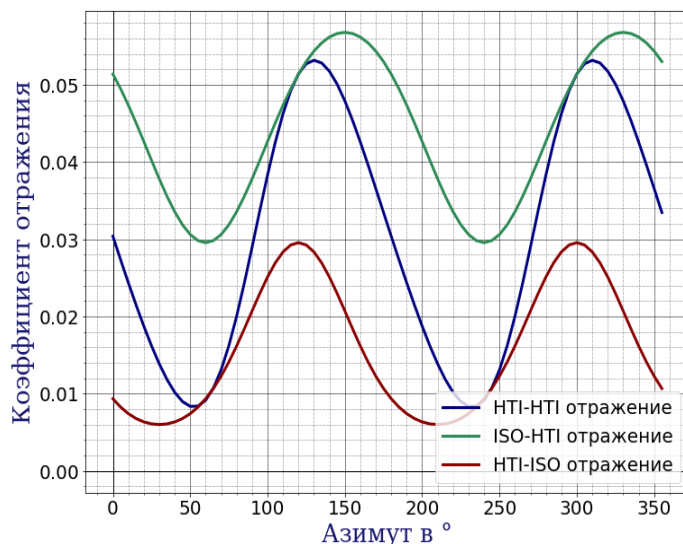


Рис. 3. Азимутальные зависимости коэффициентов отражения для трех видов отражающей границы при фиксированном значении угла падения в 30°

При наличии анизотропии сверху и снизу, отражения от границы HTI–HTI (синяя линия), график зависимости коэффициентов отражения от азимута представляет собой некоторую суперпозицию зависимостей отражений от границ ISO–HTI и HTI–ISO. В этом случае максимум азимутальной зависимости (130°) соответствует смещенному на 20° направлению оси симметрии нижнего слоя, минимум (55°) – смещенному на 25° направлению оси симметрии верхнего слоя. Азимутальная зависимость для отражения от границы HTI–HTI теряет синусоидальный вид. Интервал между экстремумами на восходящей ветке кривой (интервал азимутов от 50 до 130°) и нисходящей ветке (интервал азимутов от 130 до 230°) становится различен и равен соответственно 80 и 100° . При этом существенно увеличился перепад между минимумом и максимумом (амплитуда вариаций), практически в два раза больше в сравнении со случаями ISO–HTI и HTI–ISO. Данные факты говорят о том, что интерпретация данных отражения от границы двух HTI-сред с учетом анизотропии как выше, так и ниже целевой границы может привести к существенным ошибкам в определении направления осей, а значит направления трещиноватости. Важно также знать, какие параметры анизотропии верхней и нижней сред наибольшим образом влияют на характер зависимостей коэффициентов отражения от удалений и азимутов наблюдений. Далее приводятся результаты исследований по оценке чувствительности коэффициентов отражения к изменению упругих параметров двух контактирующих HTI сред.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ ОТ ГРАНИЦЫ ДВУХ СРЕД НТИ К ИЗМЕНЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ЭТИХ СРЕД

Варьируя значения упругих параметров нижнего и верхнего слоя, мы можем оценить влияние соответствующего параметра на коэффициент отражения. В качестве базовых значений упругих параметров берутся значения для слоев 4 и 5 из табл. 1. Ввиду сравнимой степени анизотропии верхнего и нижнего слоев, параметры Томсена варьировались одинаково для обоих слоев в абсолютных величинах – ± 0.03 от базовых значений. Также стоит отметить, что физический смысл самих параметров Томсена представляет собой относительное соотношение между скоростями волн, распространяющихся в различных направлениях (параметры $\epsilon^{(V)}$ и γ), а также относительное соотношение горизонтальных и вертикальных напряжений в среде (параметр $\delta^{(V)}$). Поэтому их вариация в относительных величинах не представляется разумной. Значения же скоростей P - и S -волн для верхнего и нижнего слоев варьировались в относительных величинах $\pm 10\%$.

Рассчитанные зависимости коэффициентов отражения показали, что вариации скорости P -волны как в верхнем слое, так и в нижнем оказывают большее влияние, чем вариации скоростей S -волны. При этом на азимутальных зависимостях, как и следовало ожидать, это проявляется в виде простого сдвига (рис. 4). Более интересный факт можно наблюдать на зависимостях от удалений (рис. 5). На малых удалениях коэффициент отражения продольной волны практически не зависит от скорости S -волны. Следовательно, не представляется возможным определение скорости S -волны при наличии данных об амплитудах продольных волн только на ближних удалениях (углы падения до 15°). При этом скорость P -волны по этим данным может быть определена уверенно.

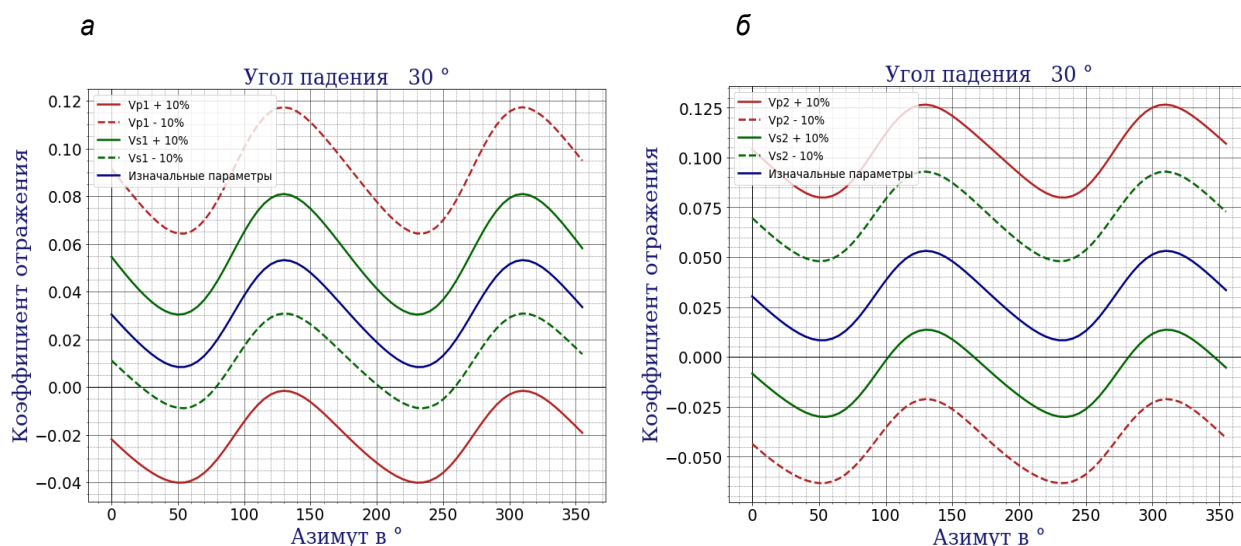


Рис. 4. Влияние изменения скоростей в верхнем (а) и нижнем (б) слоях на азимутальную зависимость коэффициентов отражения при фиксированном значении угла падения в 30°

Увеличение/уменьшение скоростей в верхнем слое и, наоборот, уменьшение/увеличение скоростей в нижнем слое приводят к аналогичным изменениям зависимостей коэффициентов отражения, поскольку они зависят только от перепада упругих параметров на границе. Это стоит учитывать при

решении обратной задачи по данным отражения от границы НТИ–НТИ. Обратная задача в такой постановке может решаться только в предположении наличия априорной информации (упругих параметров) по верхнему НТИ-слою и необходимости оценки параметров лишь нижнего слоя НТИ. Не представляется возможным определение параметров обеих сред сразу ввиду неустойчивости и неоднозначности решений такой задачи. При этом погрешности в задании априорной информации в верхней среде НТИ скажутся на результатах оценки параметров нижнего слоя. Завышение/занижение значений скоростей в вышележащей среде НТИ должно потенциально привести к соответствующему завышению/занижению скоростей в целевом слое при AVAZ-инверсии, что было ожидаемо.

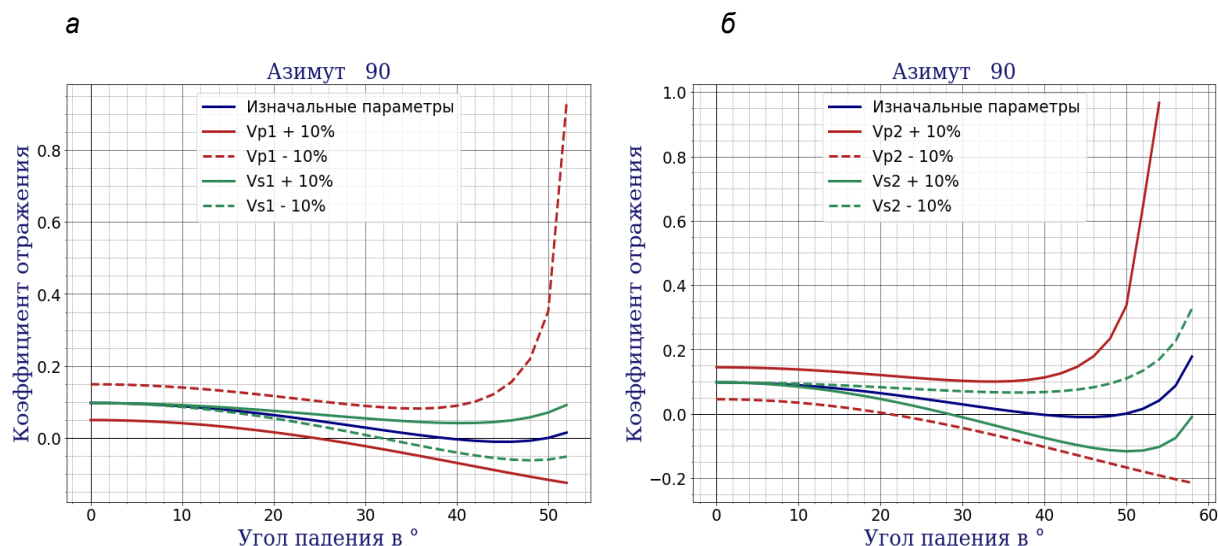


Рис. 5. Влияние изменения скоростей в верхнем (а) и нижнем (б) слоях на зависимость коэффициентов отражения от углов падения для азимутального направления в 90°

Более интересным представляется анализ чувствительности коэффициентов отражения к изменению параметров анизотропии Томсена в слоях. Из графиков азимутальной зависимости видно, что наибольшие отклонения значений коэффициентов отражения наблюдаются вблизи оси симметрии того слоя, параметры которого мы варьируем (рис. 6). При этом к наибольшему изменению зависимости коэффициентов отражения привела вариация параметра γ , хотя она связана с соотношением скоростей быстрой и медленной S -волн (это объясняется сильной зависимостью коэффициента отражения от соотношения скоростей V_s/V_p). К наименьшему изменению зависимости коэффициентов отражения привела вариация параметра $\epsilon^{(V)}$, связанная с соотношением скоростей P -волны вдоль и перпендикулярно трещиноватости. Некоторое промежуточное влияние оказывает изменение параметра анизотропии $\delta^{(V)}$.

Для оценки влияния вариации параметров Томсена на зависимости коэффициентов отражения от углов падения были выбраны направления, где изменения должны быть максимальны, т. е. вдоль осей симметрии соответствующего слоя (рис. 7). Для верхнего слоя изменение его параметров анализируется вдоль азимутального направления в 30°, для нижнего – вдоль азимутального направления в 150°.

Стоит отметить, что аналогично с результатами по скоростям, увеличение/уменьшение параметров анизотропии в верхнем слое и, наоборот, уменьшение/увеличение параметров анизотропии в нижнем слое приводят к схожим изменениям зависимостей коэффициентов отражения. Но при этом

вариации параметров анизотропии Томсена в верхнем слое приводят к меньшим изменениям в зависимостях коэффициентов отражения от углов падения, чем при аналогичных вариациях в нижнем слое. Также на рис. 7, б, видно, что вариации параметра $\epsilon^{(V)}$ оказывают влияние на коэффициенты отражения лишь на больших удалениях (углы падения волны более 30°). Вариация параметра $\delta^{(V)}$ оказывает влияние на данные больших и средних удалений (углы более 15°). Наибольшее влияние на зависимости коэффициентов отражения от удалений оказывает параметр γ , практически на всех удалениях. Проведенный анализ показывает, что, потенциально, для оценки величины параметра анизотропии $\epsilon^{(V)}$ при решении обратной задачи будут необходимы данные об амплитудах отраженных волн на больших удалениях, для оценки параметра $\delta^{(V)}$ – данные больших и средних удалений. На практике же, в основном, имеются данные о динамических характеристиках волн лишь на малых и средних удалениях. Поэтому потенциально наибольшее внимание стоит уделять оценке параметра анизотропии γ .

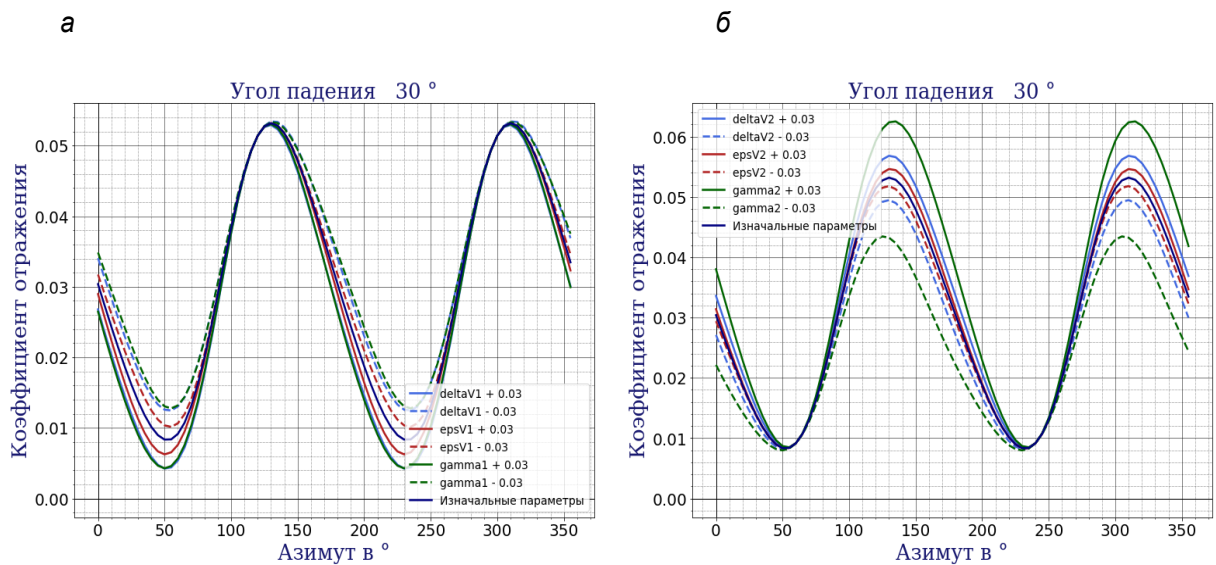


Рис. 6. Влияние изменения параметров Томсена в верхнем (а) и нижнем (б) слоях на азимутальную зависимость коэффициентов отражения при фиксированном значении угла падения в 30°

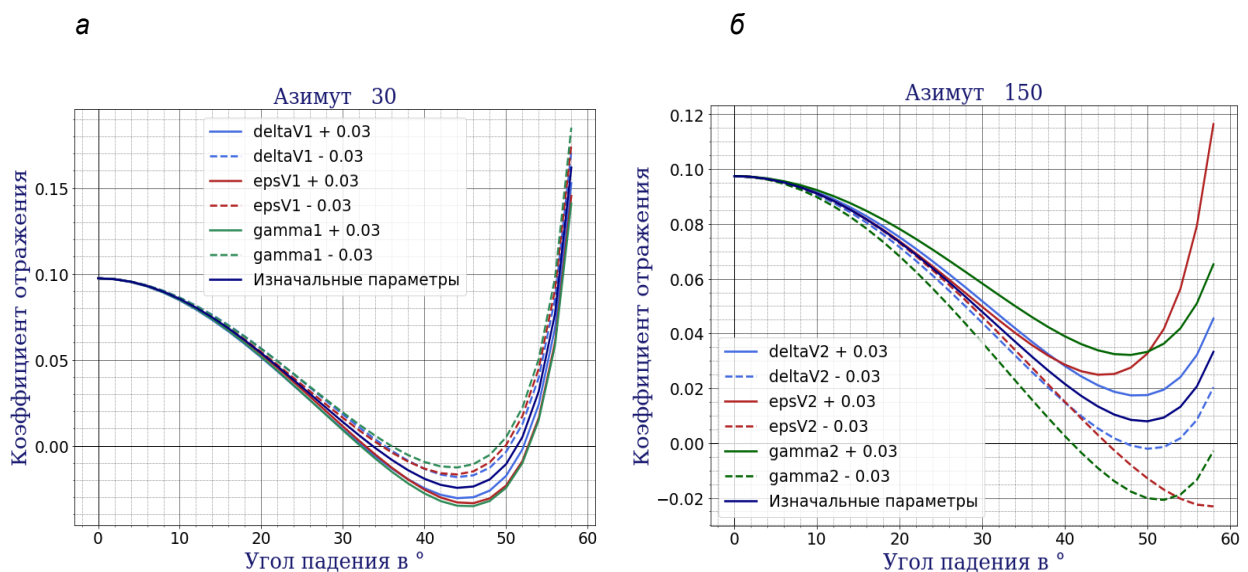


Рис. 7. Влияние изменения параметров Томсена в верхнем (а) и нижнем (б) слоях на зависимость коэффициентов отражения от углов падения для азимутальных направлений вдоль осей симметрии соответствующего слоя: 30° – для верхнего слоя (а), 150° – для нижнего слоя (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приведен алгоритм расчета плосковолновых коэффициентов отражения от границы двух азимутально-анизотропных сред НТИ с различным направлением горизонтальных осей симметрии. Проведено исследование зависимости коэффициентов отражения от соотношения упругих параметров этих сред. Поскольку коэффициенты отражения вносят основной вклад в амплитуды отраженных волн, по их поведению можно судить о динамических характеристиках отражений от границы двух анизотропных сред. Интерпретация данных об амплитудах отражения от границы двух НТИ-сред с учетом анизотропии как выше, так и ниже целевой границы потенциально приводит к существенным ошибкам в определении направления осей, а значит направления трещиноватости.

Проведенный в данной работе анализ чувствительности коэффициентов отражения к изменению упругих параметров двух контактирующих НТИ-сред позволяет сделать некоторый прогноз о возможности определения параметров анизотропии среды методом AVAZ-инверсии. Погрешности в задании априорной информации в верхней среде НТИ могут сказаться на результатах оценки параметров нижнего слоя. Завышение/занижение значений упругих параметров в вышележащей среде НТИ должно потенциально привести к соответствующему завышению/занижению аналогичных упругих параметров в нижележащем целевом слое. Поскольку вариации параметра $\varepsilon^{(V)}$ оказывают влияние на коэффициенты отражения и, следовательно, на амплитуды отраженных волн лишь на больших удалениях от источника (углы падения волны более 30°), определение этого параметра возможно только при наличии данных об амплитудах отражений на больших удалениях. Наличие данных об амплитудах волн на средних и больших удалениях (углы падения более 15°) может быть благоприятным для определения параметра $\delta^{(V)}$. Поскольку наибольшее влияние на амплитудные зависимости практически на всех удалениях оказывает параметр анизотропии γ , именно на оценку этого параметра стоит ориентироваться в первую очередь при проведении AVAZ-инверсии.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0009.

ЛИТЕРАТУРА

Лыхин П.А., Нефедкина Т.В. Потенциал нелинейной AVOA-инверсии отраженных продольных волн для изучения трещиноватых карбонатных коллекторов нефти и газа // Технологии сейсморазведки. – № 2. – 2017. – С. 59–68.

Нефедкина Т.В., Лыхин П.А. Применимость линеаризованных аппроксимаций коэффициента отражения продольных волн для азимутального анализа амплитуд *PP*-отражений в анизотропных средах // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 4. – С. 21–32.

Нефедкина Т.В., Лыхин П.А., Дугаров Г.А. Определение упругих параметров азимутально-анизотропных сред из многоволновых AVOA-данных методом нелинейной оптимизации // Геофизические технологии. – 2018. – № 2. – С. 14–26.

Bakulin A., Grechka V., Tsvankin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data – Part I: HTI model due to a single fracture set // Geophysics. – 2000a. – Vol. 65, No. 6. – P. 1788–1802.

Bakulin A., Grechka V., Tsvankin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data – Part II: Fractured models with orthorhombic symmetry // *Geophysics*. – 2000b. – Vol. 65, No. 6. – P. 1803–1817.

Bakulin A., Grechka V., Tsvankin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data – Part III: Fractured models with monoclinic symmetry // *Geophysics*. – 2000c. – Vol. 65, No. 6. – P. 1818–1830.

Downton J., Roure B., Hunt L. Azimuthal Fourier coefficients // *CSEG Recorder*. – 2011. – Vol. 36, No. 10. – P. 22–36.

Luo M., Evans B.J. 3D fracture assessment using AVAz and a layer-stripping approach // *Exploration Geophysics*. – 2003. – Vol. 34. – P. 1–6.

Olneva T., Semin D., Inozemtsev A., Bogatyrev I., Ezhov K., Kharyba E. and Koren Z. Improved seismic images through full-azimuth depth migration: updating the seismic geological model of an oil field in the pre-neogene base of the Pannonian Basin // *First Break*. – 2019. – Vol. 37, No 10. – P. 91–97.

Rüger, A. P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry // *Geophysics*. – 1997. – Vol. 62. – P. 713–722.

Rüger, A. Reflection coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropic media. Geophysical monograph series. – Tulsa, SEG, 2001. – No. 10. – 188 p.

Schoenberg, M., Protazio J. ‘Zoeppritz’ rationalized and generalized to anisotropy // *Journal of Seismic Exploration*. – 1992. – P. 125–144.

Slawinski M.A., Slawinski R.A., Brown R.J., Parkin J.M. A generalized form of Snell’s law in anisotropic media // *Geophysics*. – 2000. – Vol. 65, No. 2. – P. 632–637.

Tsvankin I. Reflection moveout and parameter estimation for horizontal transverse isotropy // *Geophysics*. – 1997. – Vol. 62, No. 2. – P. 614–629.

Vavryčuk V., Pšenčík I. PP-wave reflection coefficients in weakly anisotropic media // *Geophysics*. – 1998. – Vol. 63. – P. 2129–2141.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ДУГАРОВ Гэсэр Александрович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: теория распространения сейсмических волн в анизотропных и поглощающих средах, эффективные модели.

БЕКРЕНЕВ Руслан Камильевич – бакалавр геологии, лаборант Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: азимутальный AVO-анализ и инверсия в анизотропных средах.

НЕФЕДКИНА Татьяна Викторовна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: многоволновая сейсморазведка, обменные отраженные волны, AVOA-анализ и инверсия.