Геофизические технологии, № 2, 2018, с. 14–26

www.rjgt.ru

doi: 10.18303/2619-1563-2018-2-2

УДК 550.344.094

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ПАРАМЕТРОВ АЗИМУТАЛЬНО-АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД ИЗ МНОГОВОЛНОВЫХ AVOA-ДАННЫХ МЕТОДОМ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Т.В. Нефедкина, П.А. Лыхин, Г.А. Дугаров

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, DugarovGA@ipgg.sbras.ru

В статье исследуется оптимизационный алгоритм совместной нелинейной AVOA-инверсии PP+PS отражений в анизотропных средах. Алгоритм основан на точном решении для коэффициентов отражения PP- и PS- волн в анизотропной HTI-среде. Рассматривается случай отражения продольных и обменных волн от кровли анизотропного слоя. Тестирование алгоритма проведено на синтетических сейсмограммах, рассчитанных лучевым методом. Показано, что комплекс продольных и обменных волн повышает помехоустойчивость алгоритма и точность получаемых оценок параметров среды. Коэффициенты анизотропии могут быть определены с высокой точностью при отношении сигнал/помеха > 5 для PP-волны и > 2 для PS-волны.

Нелинейная AVOA-инверсия, обменные волны, синтетические сейсмограммы, лучевой метод, трансверсально-изотропная (HTI) среда, оптимизация, помехоустойчивость метода

DETERMINATION OF AZIMUTHAL ANISOTROPIC MEDIA ELASTIC PARAMETERS FROM MULTIWAVE AVOA DATA BY NONLINEAR OPTIMIZATION METHOD

T.V. Nefedkina, P.A. Lykhin, G.A. Dugarov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,

Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: NefedkinaTV@ipgg.sbras.ru, Pavel.lykhin@gmail.com, DugarovGA@ipgg.sbras.ru

In this paper, we investigate optimization algorithm of joint nonlinear AVOA inversion of PP+PS reflections in anisotropic media. Algorithm is based on the exact solution for PP and PS waves reflection coefficients in anisotropic HTI medium. The PP and PS wave's reflections from the top of the anisotropic layer are examined. We use synthetic seismograms generated by ray method for the algorithm testing. We show that joint compressional and converted wave's inversion allows increasing the robustness of the method and the accuracy of medium-parameter estimates. Coefficients of anisotropy are determined with better accuracy if signal-to-noise ratio is bigger than 5 for PP wave and bigger than 2 for PS wave.

Nonlinear AVOA inversion, converted waves, synthetic seismograms, ray method, transversely isotropic (HTI) media, optimization, robustness of the method

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность изучения анизотропии упругих свойств связана с необходимостью получения информации о параметрах трещиноватых сред по данным наземной трехмерной сейсморазведки. Изучение анизотропии по амплитудам отраженных волн (AVOA-анализ) применяется для обнаружения зон повышенной азимутально-ориентированной трещиноватости коллекторов углеводородов в терригенных отложениях, а также для определения их фильтрационно-емкостных свойств и преимущественного направления трещин.

В основе метода AVOA-анализа лежат линеаризованные аппроксимации уравнения Рюгера [Rüger, 2001] для плоско-волнового коэффициента отражения продольной волны на границе изотропного и анизотропного (HTI) полупространств, полученные в предположении малого контраста упругих свойств на границе и слабой анизотропии. На практике применяется преимущественно «посекторный» AVOA-анализ и линейная аппроксимация уравнения Рюгера на малых удалениях от источника. Перечисленные ограничения делают невозможным применение традиционных методов AVOA-анализа в средах с контрастными отражающими границами и сильной анизотропией [Нефедкина, Лыхин, 2016]. Примером таких сред могут служить нефтяные месторождения Восточной Сибири.

Для AVOA-инверсии продольных отраженных волн в анизотропных средах с контрастными границами был разработан нелинейный оптимизационный алгоритм, основанный на точном решении для плоско-волнового коэффициента отражения продольной волны [Лыхин, Нефедкина, 2017]. Тестирование алгоритма на модельных данных показало, что он обеспечивает удовлетворительную точность определения параметров анизотропии при высоком отношении сигнал/помеха ≥ 10. В настоящей статье мы продолжаем эти исследования и предлагаем использовать для повышения помехоустойчивости AVOA-инверсии комплекс продольных и обменных волн. Комбинация волн (PP+PS) позволяет при использовании симметричных источников типа центра давления и регистрации вертикальной и горизонтальных компонент смещений частиц существенно увеличить объем получаемой информации. В связи с этим в последние годы во всем мире существенно увеличился интерес к трехкомпонентным наблюдениям, в том числе и на море (с приемом колебаний донными станциями).

Целесообразность совместного использования продольных и обменных волн для повышения точности и устойчивости решения обратной динамической задачи по AVO-данным была показана ранее: для изотропных сред в работах [Ursin, Tjaland, 1992; Causse et al., 1998; Нефедкина и др., 1999; Side et al., 2000]; для анизотропных сред в работах [Haugen, Ursin, 1997; Jilek, 2001; Лыхин, Нефедкина, 2018].

В данной статье исследуется случай отражения продольных и обменных волн от кровли анизотропного слоя. В качестве модельных данных используются синтетические сейсмограммы, рассчитанные лучевым методом. Тестирование разработанного алгоритма многоволновой AVOA-инверсии проведено на синтетических сейсмограммах, полученных для сейсмогеологической модели Верхнечонского нефтяного месторождения в Восточной Сибири.

МЕТОДОЛОГИЯ

Система вертикальных азимутально-ориентированных трещин может быть представлена эффективной моделью трансверсально-изотропной среды с горизонтальной осью симметрии (среда HTI). В случае анизотропных сред коэффициенты отражения и прохождения плоских волн через плоскую границу не могут быть выражены в явном виде и определяются из решения системы 6 линейных уравнений, полученных из условий непрерывности вектора смещений и непрерывности вектора напряжений на жесткой границе [Петрашень и др., 1984].

В компактной форме можно записать [Schoenberg, Protazio, 1992]:

$$\mathbf{b} = \mathbf{AX},$$

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{P}^{d(1)} & \mathbf{t}_{P}^{d(1)} \end{pmatrix}^{T},$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\mathbf{I}_{P}^{u(1)} & -\mathbf{I}_{SV}^{u(1)} & -\mathbf{I}_{SH}^{u(1)} & \mathbf{I}_{P}^{d(2)} & \mathbf{I}_{SV}^{d(2)} & \mathbf{I}_{SH}^{d(2)} \\ -\mathbf{t}_{P}^{u(1)} & -\mathbf{t}_{SV}^{u(1)} & -\mathbf{t}_{SH}^{u(1)} & \mathbf{t}_{P}^{d(2)} & \mathbf{t}_{SV}^{d(2)} & \mathbf{t}_{SH}^{d(2)} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} R_{PP} & R_{PSV} & R_{PSH} & T_{PP} & T_{PSV} & T_{PSH} \end{pmatrix}^{T},$$

$$(1)$$

где **A** — матрица смещений-напряжений для образующихся волн, **b** — это вектор-столбец смещений-напряжений для падающей волны, **X** — вектор-столбец, состоящий из коэффициентов отражения и преломления, $\mathbf{I}_P^{d(1)}$ — 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, $\mathbf{t}_P^{d(2)}$ — 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 отражения волны i-го типа в верхнем слое. Из решения системы уравнений (1) может быть получено точное значение плоско-волновых коэффициентов отражения продольной PP- и обменной PS-волн на границе изотропного и анизотропного (HTI) полупространств для заданных параметров модели.

В предлагаемом методе полноазимутальной AVOA-инверсии решение обратной задачи осуществляется в два этапа. На первом этапе на малых удалениях от источника используется линейная аппроксимация Рюгера для коэффициента отражения PP-волны [Rüger, 2001] и методом наименьших квадратов определяется азимут оси симметрии φ_0 в первом приближении [Нефедкина, Лыхин, 2016]. На втором этапе на полной базе наблюдений оптимизационным методом Нелдера-Мида рассчитываются упругие параметры V_P, V_S и ρ , а также параметры анизотропии Томсена $\mathcal{E}^{(V)}$, $\delta^{(V)}$, γ и уточненный азимут оси симметрии φ_0 для анизотропного слоя.

Известно, что при отражении PS-волны от границы изотропного и анизотропного полупространств образуются две поперечные волны SV и SH со своей поляризацией и амплитудой. В случае отражения от

кровли анизотропного слоя обе поперечные волны сливаются в одну волну PS, распространяющуюся в верхней изотропной среде, с амплитудой равной векторной сумме модулей коэффициентов отражения RP SV и RP SH и вектором поляризации, равным векторной сумме векторов поляризации образовавшихся волн квазипоперечной SV и поперечной SH. При отражении от подошвы анизотропного слоя образовавшиеся квазипоперечные волны распространяются в анизотропной среде с разными скоростями и регистрируются на поверхности наблюдений на основной и побочной компонентах в виде суммы колебаний с различными временными задержками. В этом случае возможно разделение волн методами поляризационного анализа при наличии трехкомпонентных наблюдений [Alford, 1986; Горшкалев и др., 2014].

В данной работе мы рассматриваем только отражение от кровли анизотропного слоя. В этом случае в оптимизационном алгоритме осуществляется минимизация функционала невязки, состоящего из суммы квадратичных невязок между наблюденными и теоретическими данными по продольной и обменной волнам:

$$F(\mathbf{v}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(App_{obs}(l_i, \varphi_i, \mathbf{m}) - App_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v}) \right)^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(Aps_{obs}(l_i, \varphi_i, \mathbf{m}) - Aps_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v}) \right)^2} \rightarrow \min,$$

где n – число наблюдений, l_i – расстояние от источника до i -го приемника, ${\bf v}$ – вектор неизвестных параметров модели, ${\bf m}$ – вектор материальных параметров модели, $App_{obs}(l_i,\varphi_i,{\bf m})$ и $Aps_{obs}(l_i,\varphi_i,{\bf m})$ – наблюденные амплитуды РР и РЅ отражений, исправленные за геометрическое расхождение, $App_t(l_i,\varphi_i,{\bf v})$ и $Aps_t(l_i,\varphi_i,{\bf v})$ – теоретическое описание коэффициентов РР и РЅ отражений, рассчитываемое с помощью системы (1).

ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ НА МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Тестирование алгоритмов проводилось на модельных данных для Верхнечонского нефтяного месторождения. Целевым объектом исследований для этого месторождения является карбонатный комплекс, состоящий из трещиноватых доломитов осинского горизонта (низы усольской свиты) и подсолевых карбонатных отложений вендского возраста. С кровлей осинского горизонта связано устойчивое отражение, являющееся региональным репером, ОГ А. Ниже карбонатного комплекса залегают терригенные отложения непской свиты. С их кровлей связан опорный отражающий горизонт ОГ М2.

Обобщенная сейсмогеологическая модель месторождения (рис. 1) была составлена по данным вертикального сейсмического профилирования и акустического каротажа в скважинах № 73 и № 78. В качестве модели рассматривается трехслойная горизонтально слоистая среда. Второй слой задан

трансверсально-изотропным с горизонтальной осью симметрии, азимут оси составляет 60° с осью X и имитирует трещиноватые отложения осинского горизонта и подсолевого карбонатного комплекса. Скважины № 73 и № 78 находятся вдали от промыслового участка месторождения и по ним нельзя судить о степени анизотропии, вызванной упорядоченной вертикальной трещиноватостью отложений в целевом интервале разреза. В связи с этим значения параметров анизотропии второго слоя были взяты из петрофизических данных, приведенных в работе [Литтау и др., 2017]. Относительные перепады скоростей на кровле анизотропного слоя составляют 20–25 %.

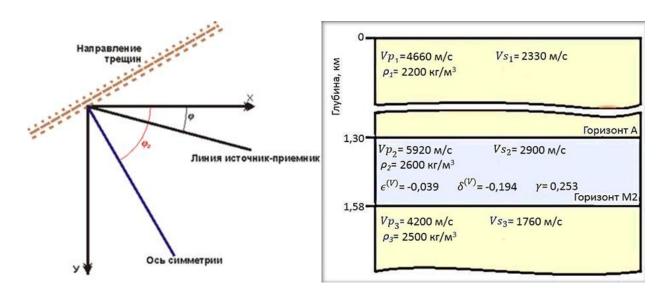


Рис. 1. Обобщенная сейсмогеологической модель Верхнечонского месторождения (слева – в плане, справа – в разрезе). Анизотропный слой выделен сиреневым цветом

Модельными данными являлись синтетические сейсмограммы, рассчитанные лучевым методом. Расчеты времен пробега, коэффициентов отражения PP- и PS-волн от кровли (горизонт A) трещиноватого анизотропного слоя, векторов поляризации отраженных и проходящих волн выполнены на основе теории лучевого метода в анизотропных средах [Петрашень и др., 1984] по программам, составленным Г.А. Дугаровым, и реализующим алгоритм, описанный в работе [Оболенцева, Гречка, 1989]. Для расчета синтетических сейсмограмм использовался импульс Риккера с несущей частотой 25 Гц, источник колебаний (типа центр давлений) помещался на поверхности изотропного слоя.

Для изучения помехоустойчивости алгоритмов AVOA-инверсии на теоретические сейсмограммы X, Y и Z компонент накладывался реальный случайный шум, зарегистрированный вертикальными и горизонтальными сейсмоприемниками при проведении опытно-методических работ по мониторингу локальной и региональной сейсмичности в Забайкальском крае [Дергач, 2018]. Пример записи шумов приводится на рис. 2.

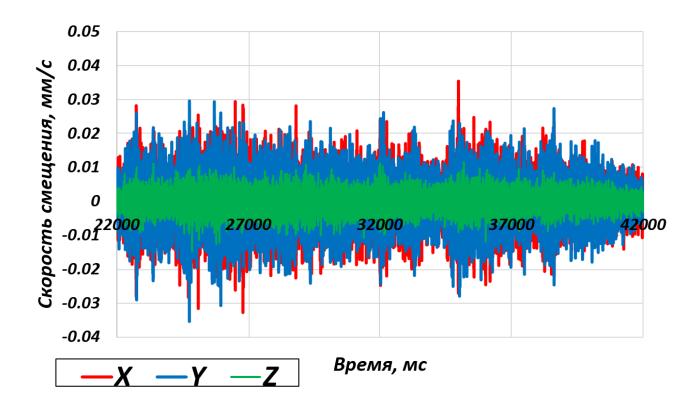


Рис. 2. Запись реальных шумов, зарегистрированных в Забайкальском крае

Отношение сигнал/помеха рассчитывалось по отношению энергий отраженной продольной волны и шума во временном окне полезного сигнала. Энергия с разных компонент складывалась. В первой серии экспериментов интенсивность шума составляла 10 % от среднего уровня энергии отраженной РР-волны на сумме компонент для профиля с азимутом 150°, что в среднем соответствовало отношению сигнал/помеха = 10 по продольной волне и 2–4 по обменной волне. Во второй серии экспериментов интенсивность шума была увеличена до 20 %, что в среднем соответствовало отношению сигнал/помеха = 5 по продольной волне и 1–2 по обменной волне. Затем путем извлечения квадратного корня из энергии переходили к среднеквадратичным амплитудам отражений, которые подавались на вход алгоритма решения обратной задачи. Вся процедура повторялась 10 раз для получения среднестатистических оценок параметров среды.

Сейсмограммы для азимутов профиля 60° (направление оси симметрии) и 150° (направление плоскости изотропии) с наложенными шумами 10 % показаны на рис. 3 и 4 (первой приходит отраженная продольная PP-волна, второй – отраженная обменная PS-волна). Сейсмограммы для профиля с азимутом 105° (45° от оси симметрии) даны на рис. 5. Из приведенных рисунков видно, что отношение сигнал/помеха на профилях с различными азимутами изменяется, поскольку амплитуды полезных волн зависят от азимута профиля, а уровень помех остается примерно постоянным, что соответствует условиям полевых наблюдений.

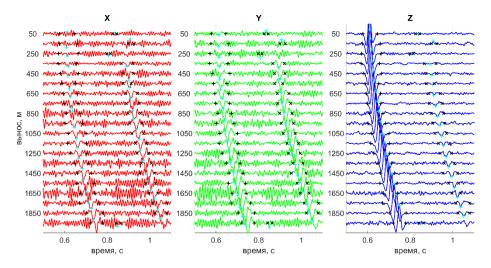


Рис. 3. Синтетические сейсмограммы для профиля с азимутом 60°. Шум 10 %

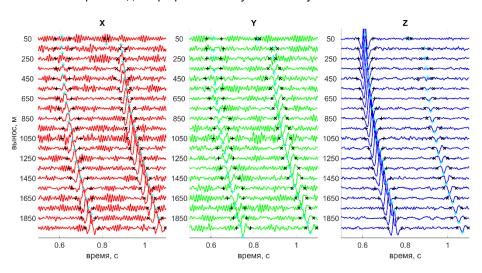


Рис. 4. Синтетические сейсмограммы для профиля с азимутом 150°. Шум 10 %

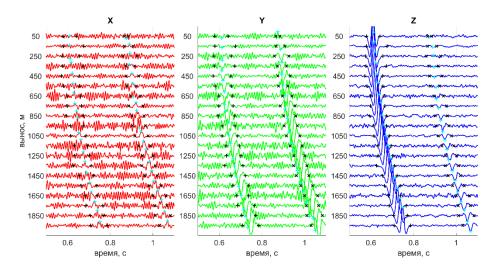


Рис. 5. Синтетические сейсмограммы для профиля с азимутом 105°. Шум 10 %

Для решения обратной задачи использовались среднеквадратичные амплитуды PP- и PS-волн для 7 азимутов радиальных профилей наблюдений 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150°, относящихся к одному источнику. Расстояние между приемниками 50 м. Среднеквадратичные амплитуды вычислялись во временном окне, равном 1.5 периодам отраженной волны. Входными данными программы AVOA-инверсии служила совокупность всех значений амплитуд и углов падений волн для всех азимутов и удалений (для PS-волны исключались амплитуды для углов падения < 10°).

Теоретические коэффициенты отражения продольных и обменных волн и их амплитуды, снятые с сейсмограмм с уровнем шума 10 %, для различных азимутов профилей показаны на рис. 6 и 7.

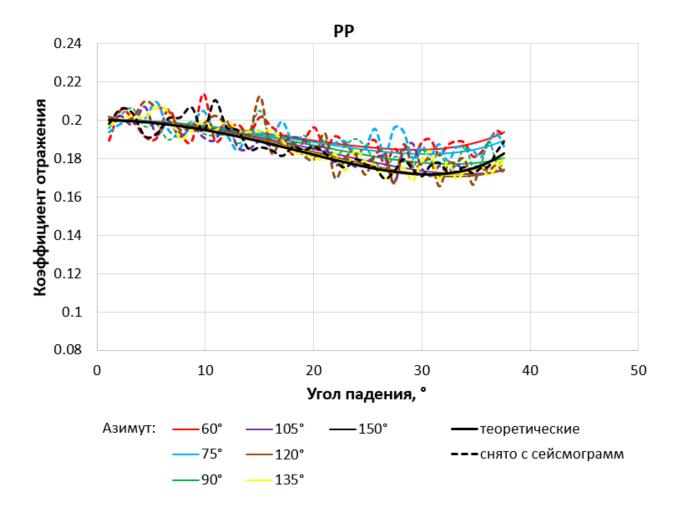


Рис. 6. Теоретические коэффициенты отражения продольных волн (сплошными линиями) и рассчитанные по амплитудам РР-волн с зашумленных сейсмограмм (пунктирными линиями), для различных азимутов профилей. Шум 10 %

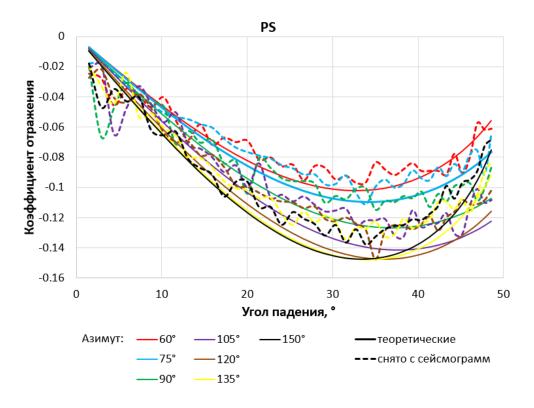


Рис. 7. Теоретические коэффициенты отражения обменных волн (сплошные линии) и рассчитанные по амплитудам PS-волн с зашумленных сейсмограмм (пунктирные линии), для различных азимутов профилей. Шум 10 % для PP-волны и 30 % для PS-волны

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Нелинейная AVOA-инверсия выполнена оптимизационным методом Нелдера-Мида. Известно, что устойчивость и точность решения обратной задачи оптимизационными методами зависит от числа определяемых неизвестных параметров. При большом числе неизвестных параметров процесс вычислений часто становится неустойчивым. В реальности такой параметр, как плотность слоя, изменяется в незначительных пределах и его можно считать известным. Первое приближение азимута оси симметрии было определено на первом этапе методом наименьших квадратов с использованием линеаризованной аппроксимации Pюгера [Rüger, 2001]. В связи с этим определялись следующие параметры анизотропного слоя 2 (см. рис. 1): V_P , V_S и коэффициенты анизотропии $\mathcal{E}^{(V)}$, $\mathcal{S}^{(V)}$, γ , а также уточнялся азимут оси симметрии. Параметры слоев 1 и 3 считались известными. Рассматривались удаления до 2000 м, что соответствует углам падения волны до 40°. Не использовались амплитуды обменной PS-волны на малых удалениях, для которых угол падения был < 10°. Погрешность начального приближения для скоростных параметров составляла 15 % ($V_{P2,0} = 5.0$ км/с, $V_{S2,0} = 2.5$ км/с), для коэффициентов анизотропии начальное приближение принималось равным 0.01 (слабая анизотропия).

В табл. 1 представлены результаты решения обратной задачи по данным продольных волн, в табл. 2 – по комплексу продольных и обменных волн. Приведены средние оценки параметров, полученные по 10 наборам данных.

Таблица 1 Результаты решения обратной задачи для кровли анизотропного слоя по продольным волнам

Параметры среды.		Решение обратной задачи для кровли (РР)		
Модель Верхнечонского нефтяного месторождения		Шум 0 %	Шум 10 %	Шум 20 %
V _{P1} =4.66	V _{P2} =5.92	V _{P2} =5.92	V _{P2} =5.91	V _{P2} =5.89
V _{S1} =2.33	V _{S2} =2.9	V _{S2} =2.9	V _{S2} =2.85	Vs2=2.84
ρ ₁ =2.2	ρ ₂ =2,6	ρ₂ – известна	ρ ₂ – известна	ρ₂ – известна
∈ ₁ (v)=0	€2 ^(v) = -0.039	€ ^(v) 2= -0.039	∈ ^(v) ₂ = -0.056	∈ ^(v) ₂ = -0.070
$\delta_1^{(v)} = 0$	$\delta_2^{(v)} = -0.194$	$\delta^{(v)}_2 = -0.194$	$\delta^{(v)}_{2}$ = -0.175	$\delta^{(v)}_{2} = -0.172$
γ1=0	γ2=0.253	γ2=0.253	γ2=0.230	γ2=0.221
-	φ ₀ =60°	φ ₀ =60°	φ ₀ =58.8°	φ ₀ =57.1°

Таблица 2 Результаты решения обратной задачи для кровли анизотропного слоя по комплексу продольных и обменных волн

Параметры среды.		Решение обратной задачи для кровли (PP+PS)		
Модель Верхнечонского нефтяного месторождения		Шум 0 %	Шум 10 % (PP) - 30 % (PS)	Шум 20 % (PP) - 60% (PS)
V _{P1} =4.66	V _{P2} =5.92	V _{P2} =5.92	V _{P2} =5.92	V _{P2} =5.90
V _{S1} =2.33	V _{S2} =2.9	V _{S2} =2.9	V _{S2} =2.86	V _{S2} =2.88
ρ ₁ =2.2	ρ ₂ =2,6	ρ₂ – известна	ρ₂ – известна	ρ₂ – известна
∈ ₁ (v)=0	∈ ₂ (v)= -0.039	∈ ^(v) ₂ = -0.039	∈ ^(v) ₂ = -0.035	∈ ^(v) ₂ = -0.033
δ ₁ (v)=0	$\delta_2^{(v)} = -0.194$	$\delta^{(v)}_2 = -0.194$	$\delta^{(v)}_{2}$ = -0.184	$\delta^{(v)}_{2} = -0.181$
γ ₁ =0	γ ₂ =0.253	γ ₂ =0.253	γ ₂ =0.235	γ₂=0.225
_	φ ₀ =60°	φ ₀ =60°	φ ₀ =59.2°	φ ₀ =58.1°

Из табл. 1 следует, что при решении обратной задачи по данным продольных волн в случае 10 % шума (отношение сигнал/помеха 10) скорости продольных и поперечных волн, а также азимут оси симметрии анизотропного слоя определяются с большой точностью (погрешности по скоростям не превышают 1 %, а в азимуте – 1°). Оценки коэффициентов анизотропии вычисляются с погрешностями около 0.02. С увеличением уровня помехи до 20 % результаты решения обратной задачи по данным продольных волн ухудшаются. При такой помехе плохо подбирается начальное приближение азимута оси симметрии по продольной волне с использованием линеаризованной аппроксимации Рюгера. Алгоритм оптимизации уточняет значение ϕ_0 , но при отдельных реализациях помехи ошибка может достигать 10° и более. В среднем точность определения азимута оси симметрии составляет около 3°. Погрешность определения коэффициентов анизотропии возрастает до 0.03.

Из сравнения табл. 1 и 2 видно, что решение обратной задачи по комплексу PP- и PS-волн дает большую точность оценок всех параметров анизотропного слоя. В случае 10 % шума погрешности определения коэффициентов анизотропии колеблются в пределах 0.004–0.020. При этом отношение сигнал/помеха по обменной волне изменяется от 1.8 до 4.3 в зависимости от азимута профиля. С увеличением уровня помехи до 20 % точность решения обратной задачи по комплексу PP+PS волн уменьшается незначительно. Это связано с тем, что коэффициенты отражения обменной PS-волны значительно более чувствительны к азимуту профиля, зависимости R_{PS} от угла падения лучше разрешены по азимуту, чем R_{PP}. Поэтому алгоритм оптимизации по 6 параметрам при работе по данным PS-волн хорошо уточняет оценку азимута оси симметрии ф₀ практически при всех реализациях помехи. Следует сказать, что в оптимизационных процедурах существенную роль играет структура функционала невязки, который может иметь как глобальный, так и локальные минимумы, что приводит к неоднозначности решения обратной задачи. При выбранных нами значениях начального приближения параметров мы не сталкивались с попаданием алгоритма в локальные минимумы. Однако изучение работы оптимизационного алгоритма при разных значениях начального приближения является важной задачей, которой планируется заняться в дальнейшем.

Таким образом, совместная инверсия амплитуд продольных и обменных волн в анизотропных средах значительно повышает точность получаемых оценок среды по сравнению с продольными волнами при отношении сигнал/помеха > 5 по продольной волне и > 2 по обменной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена новая методика AVOA-инверсии, позволяющая изучать анизотропные свойства среды по отражениям продольных и обменных волн от контрастных границ. Упругие параметры анизотропного слоя определяются методом нелинейной оптимизации. В оптимизационном алгоритме используется точное решение для коэффициентов отражения PP- и PS-волн. Использование комплекса продольных и обменных волн позволяет повысить помехоустойчивость алгоритма и увеличить точность определения параметров анизотропной среды. Тестирование алгоритма на модельных данных для Верхнечонского нефтяного месторождения показало, что при хорошем качестве полевых материалов (отношение сигнал/помеха > 5 по продольной волне и > 2 по обменной) упругие параметры анизотропного слоя определяются с высокой точностью. В дальнейшем предполагается опробовать разработанные алгоритмы на полевых материалах. При отсутствии данных по горизонтальным компонентам (в случае проведения однокомпонентной 3D съемки) алгоритм AVOA-инверсии может работать по Z-компоненте продольных волн.

ЛИТЕРАТУРА

Горшкалев С.Б., Афонина Е.В., Карстен В.В. Поляризационный анализ отраженных PS-волн в неоднородных азимутально-анизотропных средах // Геофизические методы исследования земной коры: Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 8-13 декабря 2014 г.) – Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014. – С. 6–11.

Дергач П.А. Расширение полосы рабочих частот записей короткопериодных сейсмометров методом низкочастотной деконволюции для задач локального сейсмического мониторинга // Воздействие внешних полей на сейсмический режим и мониторинг их проявлений: Тезисы докладов Международной Юбилейной научной конференции (г. Бишкек, 3-7 июля 2018 г.) – Бишкек: НС РАН, 2018. – С. 41.

Литтау О.А., Новокрещин А.В., Баюк И.О. Изучение амплитуд отраженных волн в лучевом приближении для анизотропных сред с высококонтрастными границами // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2017. – № 12. – С. 40–47.

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

Лыхин П.А., Нефедкина Т.В. Нелинейная AVOA-инверсия отраженных продольных и обменных волн в азимутально-анизотропных средах // XIV Международный научный конгресс и выставка «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2018»: Сб. материалов в 6 т. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – Т. 3. – С. 248.

Нефедкина Т.В., Курдюкова Т.В., Бузлуков В.В. Обратная динамическая задача сейсмики по AVO-данным продольных и обменных волн // Геология и геофизика. — 1999. — Т. 40, № 7. — С. 1109—1115.

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

Оболенцева И.Р., Гречка В.Ю. Лучевой метод в анизотропной среде (алгоритмы, программы) – Новосибирск: ИГиГ, 1989. – 225 с.

Петрашень Г.И., Каштан Б.М., Ковтун А.А. Распространение объемных волн и методы расчета волновых полей в анизотропных упругих средах / Сборник научных трудов под ред. Г.И. Петрашеня. — Л.: Наука, 1984. — 282 с.

Alford R. Shear data in the presence of azimuthal anisotropy: Dilley, Texas // 56th Ann. Intern. Mtg., Soc. Explor. Geophys: Expanded Abstracts. – 1986. – P. 476-479.

Causse E., Sollie R., Haugen G. AVO attributes from multicomponent ocean bottom seismic data // 60th EAGE Conference & Technical Exhibition, Leipzig: Extended abstracts, Geophysical Division. – 1998. – Vol. 1. – 13 p.

Haugen G.U., Ursin B. Analytic insight into PP and PS azimuthal AVO response for a vertically fractured reservoir // 59th EAGE Conf. and Techn. Exhib. – Geneva: Extended abstracts. – 1997. – Vol. 1. – P. BO55.

Jilek P. Modeling and inversion of converted-wave reflection coefficients in anisotropic media: a tool for quantitative AVO analysis: Ph.D. thesis. – Golden: Colorado School of Mines, 2001. – 154 p.

Rüger A. Reflection coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropic media. – Society of Exploration Geophysics, 2001. – 185 p.

Schoenberg M., Protazio J. "Zoeppritz" rationalized and generalized to anisotropy // Journal of seismic exploration. – 1992. – No. 1. – P. 125–144.

Side J., Cambois G., Vuillermoz C. Shear-wave velocity and density estimation from PS-wave AVO analysis: Application to an OBS dataset from the North Sea // Geophysics. – 2000. – Vol. 65, No. 5. – P. 1446–1454.

Ursin B., Tjaland E. Seismic amplitude analysis // Russ.-Norw. Oil Explor. Workshop II, Voss (Bergen): Abstr. Pap. – 1992. – No. 36. – P. 1–8.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

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, AVO-анализ и инверсия.

ПЫХИН Павел Александрович – магистр геологии, младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: азимутальный AVO-анализ и инверсия в анизотропных средах.

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.