

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТИ ОПТИМИЗАЦИОННОГО АЛГОРИТМА AVOA ИНВЕРСИИ ОТРАЖЕННЫХ ПРОДОЛЬНЫХ И ОБМЕННЫХ ВОЛН В АЗИМУТАЛЬНО-АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

Гэсэр Александрович Дугаров

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-49-57, e-mail: DugarovGA@ipgg.sbras.ru

Татьяна Викторовна Неведкина

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-90-16, e-mail: NefedkinaTV@ipgg.sbras.ru

В статье исследуется точность и устойчивость оптимизационного алгоритма совместной нелинейной AVOA инверсии PP+PS отражений в анизотропной HTI среде. Тестирование алгоритма проведено на синтетических сейсмограммах. Выполнен анализ целевых функций с целью изучения чувствительности методики к определению различных параметров анизотропной модели. Показано, что использование двух типов волн значительно повышает помехоустойчивость метода и точность оценок всех параметров среды.

Ключевые слова: нелинейная AVOA инверсия, обменные волны, трансверсально-изотропная (HTI) среда, оптимизация, помехоустойчивость, целевая функция.

OPTIMIZATION ALGORITHM ACCURACY AND STABILITY STUDY OF AVOA INVERSION OF PP+PS REFLECTIONS IN AZIMUTHALLY ANISOTROPIC MEDIA

Geser A. Dugarov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-49-57, e-mail: DugarovGA@ipgg.sbras.ru

Tatyana V. Nefedkina

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-90-16, e-mail: NefedkinaTV@ipgg.sbras.ru

The article investigates the accuracy and stability of the optimization algorithm for joint non-linear AVOA inversion of PP+PS reflections in an anisotropic HTI medium. Algorithm was tested using synthetic seismograms. The analysis of objective functions is performed in order to study the sensitivity of the method to the determination of different parameters of the anisotropic model. Using two types of waves significantly increases the noise robustness of the method and the accuracy of all parameters estimation.

Key words: nonlinear AVOA inversion, converted waves, transversely isotropic (HTI) media, optimization, noise robustness, objective function.

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 и определения преимущественного направления трещин.

В основе метода AVOA-анализа лежат линейаризованные аппроксимации уравнения Рюгера [1] для плоско-волнового коэффициента отражения продольной волны на границе изотропного и анизотропного (НТИ) полупространств, полученные в предположении малого контраста упругих свойств на границе и слабой анизотропии. Перечисленные ограничения делают невозможным применение традиционных методов AVOA-анализа в средах с контрастными отражающими границами и сильной анизотропией [2]. 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 [3]. Для повышения помехоустойчивости нелинейной AVOA инверсии в работе [4] было предложено использовать комплекс продольных и обменных волн. На целесообразность такого подхода указывалось ранее в работах [5, 6].

В настоящей статье мы продолжаем эти исследования и особое внимание уделяем анализу целевых функций, получаемых в процессе работы оптимизационного алгоритма, вопросам разрешенности определяемых параметров среды, однозначности и устойчивости решения задачи AVOA инверсии. В статье исследуется случай отражения продольных и обменных волн от кровли анизотропного слоя. Тестирование разработанного алгоритма проведено на модельных данных PP+PS волн для Верхнечонского нефтяного месторождения в Восточной Сибири. В качестве модельных данных используются синтетические сейсмограммы, рассчитанные лучевым методом.

Методология

Система вертикальных азимутально-ориентированных трещин представляется в виде эффективной модели трансверсально-изотропной среды с горизонтальной осью симметрии (среда НТИ). 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 [7].

В матричной форме эту систему можно записать:

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (1)$$

где \mathbf{A} – матрица смещений-напряжений для образующихся волн, \mathbf{b} – вектор-столбец смещений-напряжений для падающей волны, \mathbf{x} – вектор-столбец коэффициентов отражения и преломления. Из решения системы (1) может быть получено точное значение плоско-волновых коэффициентов отражения PP и PS волн на границе изотропного и анизотропного (НТИ) 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 [1] и методом наименьших квадратов определяется азимут оси симметрии φ_0 [2]. 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 $\varepsilon^{(V)}$, $\delta^{(V)}$, 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 с амплитудой, равной векторной сумме модулей коэффициентов отражения Rpsv и RpsH. В этом случае в оптимизационном алгоритме осуществляется минимизация функционала невязки, состоящего из суммы квадратичных невязок между наблюдаемыми и теоретическими данными по продольной и обменной волнам:

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

где n – число наблюдений, l_i – расстояние от источника до i -го приемника, \mathbf{v} – вектор неизвестных параметров модели, $App_{obs}(l_i, \varphi_i)$ и $Aps_{obs}(l_i, \varphi_i)$ – наблюдаемые амплитуды PP и PS отражений, соответственно, исправленные за геометрическое расхождение, $App_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v})$ и $Aps_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v})$ – теоретическое описание коэффициентов PP и PS отражений, вычисляемое с помощью системы (1).

Тестирование алгоритмов обработки на модельных данных

Тестирование алгоритмов проводилось на модельных данных для Верхне-чонского 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 с горизонтальной осью симметрии, азимут которой составляет 60° с осью X, и имитирует трещиноватые отложения осинского горизонта и подсолевого карбонатного комплекса. Значения

параметров анизотропии второго слоя были взяты из работы [1]. Относительные перепады скоростей на кровле анизотропного слоя составляют 20–25%. Параметры модели даны в таблице.

Параметры модели

№ слоя	Глубина, м	Мощность, м	V_p , м/с	V_s , м/с	ρ , г/см ³	$\varepsilon^{(V)}$	$\delta^{(V)}$	γ
1	0	1300	4660	2330	2,2	0	0	0
2	1300	280	5920	2900	2,6	-0,039	-0,194	0,253
3	1580	-	4200	1760	2,5	0	0	0

Модельными данными являлись синтетические сейсмограммы, рассчитанные лучевым методом для 7 радиальных профилей наблюдений с азимутами 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135° и 150°, относящихся к одному источнику. Источник колебаний (типа центр давлений) помещался на поверхности первого изотропного слоя. Выносы приемников относительно источника для каждого азимута варьировались от 50 до 2000 м, расстояние между приемниками – 50 м.

При моделировании использовался импульс Риккера с несущей частотой 25 Гц. Для изучения помехоустойчивости алгоритмов AVOA-инверсии на теоретические сейсмограммы X, Y и Z компонент накладывался реальный шум, зарегистрированный вертикальными и горизонтальными сейсмоприемниками при проведении опытно-методических работ по мониторингу локальной и региональной сейсмичности в Забайкальском крае. Интенсивность шума составляла 10% и 20% от среднего уровня энергии отраженной PP волны на сумме компонент для профиля с азимутом 150°. Процедура наложения шумов повторялась 10 раз для получения среднестатистических оценок параметров среды при наличии шума. Сейсмограммы для азимута профиля 60° (направление оси симметрии) с наложенными шумами 10% показаны на рис. 1. Первой приходит отраженная продольная PP-волна, второй – отраженная обменная PS-волна.

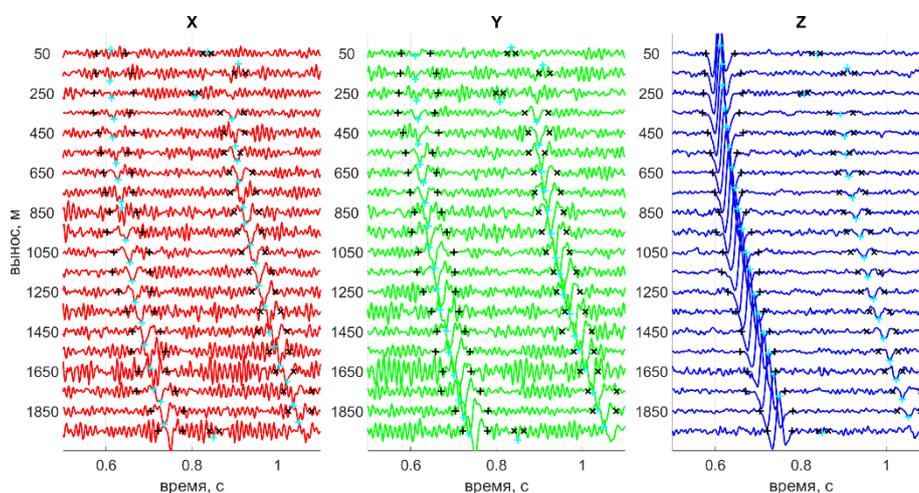


Рис. 1. Синтетические сейсмограммы для профиля с азимутом 60°, шум 10%

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 $<10^\circ$).

Анализ результатов AVOA инверсии

Нелинейная AVOA инверсия выполнена оптимизационным методом Нелдера-Мида. В реальности такой параметр, как плотность слоя, изменяется в незначительных пределах и его можно считать известным. В связи с этим определялись следующие параметры анизотропного слоя 2: V_P , V_S и коэффициенты анизотропии $\varepsilon^{(V)}$, $\delta^{(V)}$, γ , а также уточнялся азимут оси симметрии, определенный на первом этапе. Параметры слоя 1 считались известными. Углы падения волны изменялись от 0 до 40° , что соответствует докритическим удалениям. Погрешность начального приближения для скоростных параметров составляла 15%, для коэффициентов анизотропии начальное приближение принималось равным 0,01 (слабая анизотропия).

В оптимизационных процедурах существенную роль играет структура функционала невязки, который может иметь как глобальный, так и локальный минимумы, что приводит к неоднозначности решения обратной задачи. При выбранных нами значениях начального приближения параметров мы не сталкивались с попаданием алгоритма в локальные минимумы. Большой интерес представляет анализ формы глобального минимума целевой функции в зависимости от параметров модели.

На рис. 2 показаны двумерные сечения целевых функций, полученных для данных без помех. На рис. 3 – то же самое для данных с наложенным шумом 20%. Для каждого сечения варьировались только два параметра, скорости в пределах 1 км/с, параметры Томсена – 0,2, азимут оси – 10° от точных значений, остальные параметры оставались постоянными и равными истинным значениям.

Плоско-волновые коэффициенты отражения обладают разной чувствительностью к параметрам модели. В связи с этим форма сечений целевой функции существенно зависит от выбора пар изменяемых параметров. Так, при инверсии по одной PP волне овражный характер целевой функции вдоль направлений $\varepsilon^{(V)}$, γ и φ_0 свидетельствует о большей неопределенности этих параметров по сравнению с параметрами V_P , V_S и $\delta^{(V)}$. В тоже время параметры $\delta^{(V)}$ и γ являются компромиссными по отношению друг к другу и могут быть определены примерно с одинаковой точностью. При совместной инверсии PP и PS волн форма целевой функции улучшается, что должно приводить к повышению точности определения всех параметров среды.

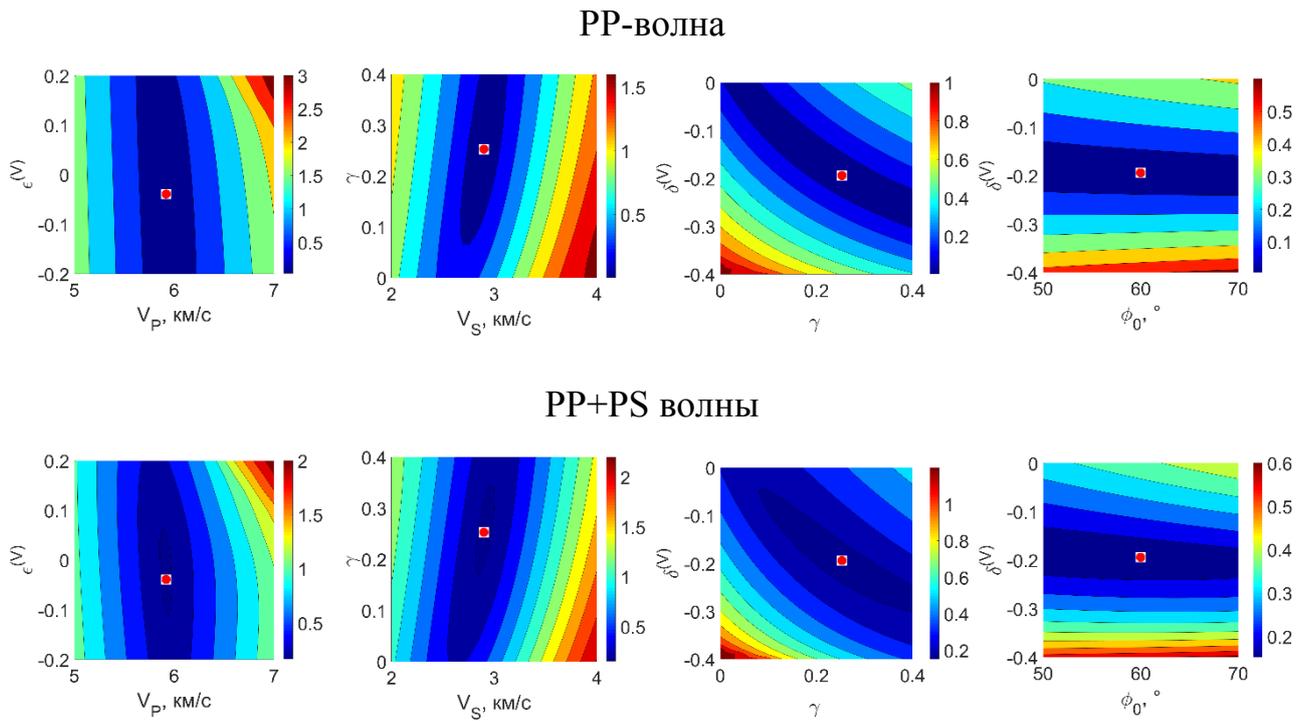


Рис. 2. Двумерные сечения целевой функции для данных без помех. Белые квадраты обозначают минимум, найденный из оптимизации, красные круги – истинные значения параметров

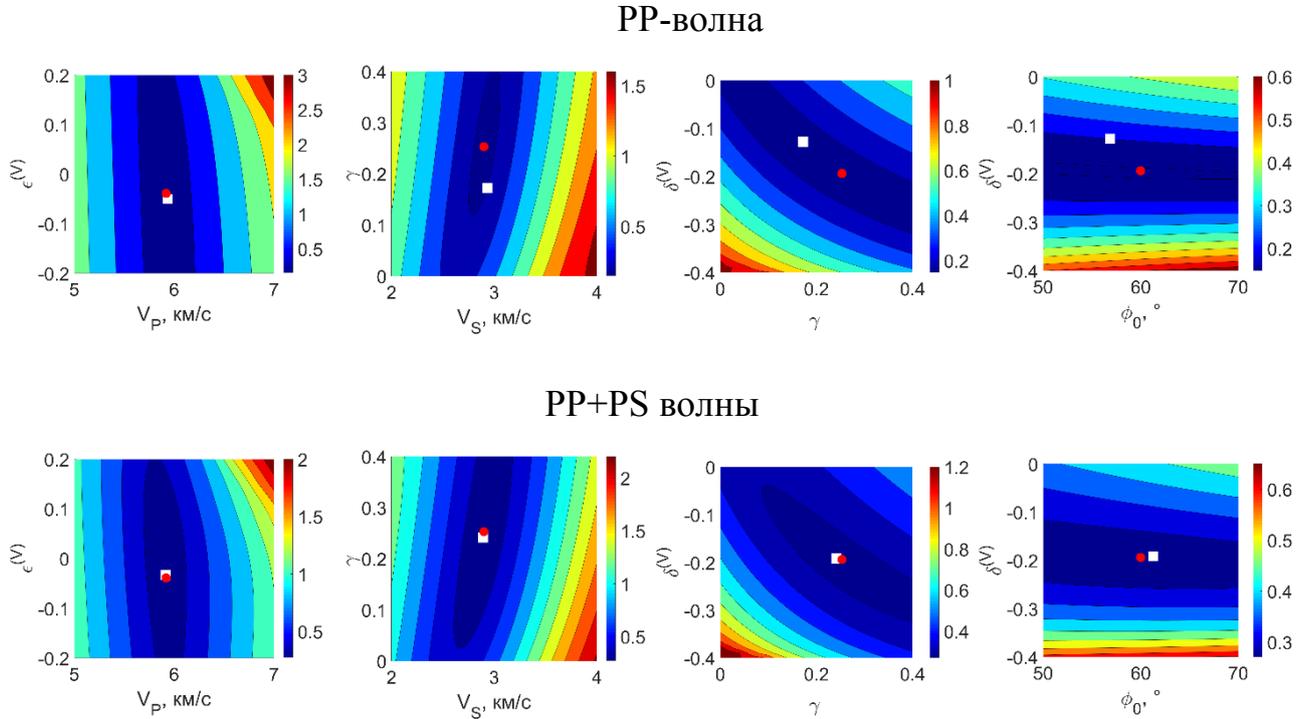


Рис. 3. Двумерные сечения целевых функций для данных с помехами, уровень шума 20%.

Обозначения – те же, что на рис. 2

Из сравнения рис. 2 и 3 следует, что при наложении помех форма целевой функции существенно не изменяется. Но при инверсии зашумленных данных минимум целевой функции часто не совпадает с точным значением параметров (наибольшее расхождение для PP волн), что должно уменьшать точность решения обратной задачи. Целевые функции, полученные по комплексу PP+PS отражений, обладают большей помехоустойчивостью.

На рис. 4 представлены погрешности решения обратной задачи по данным продольных волн, на рис. 5 – по комплексу продольных и обменных волн.

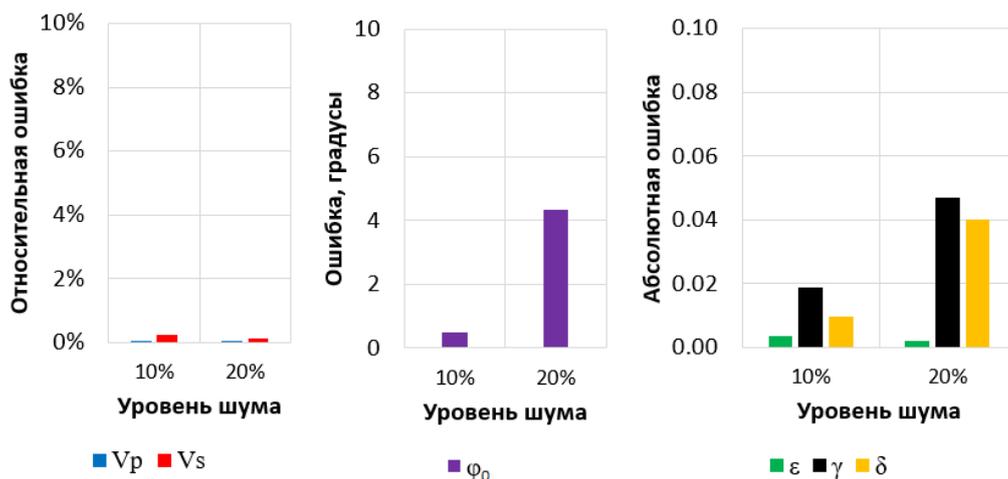


Рис.4. Погрешности определения параметров среды при AVOA инверсии PP волн

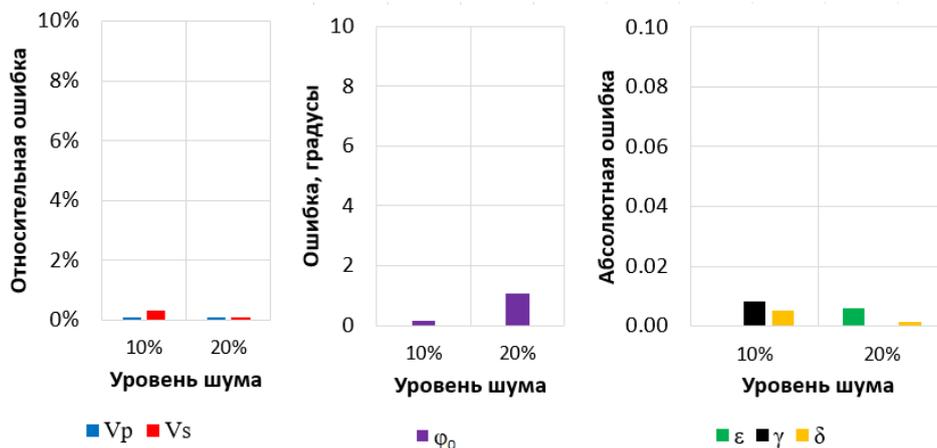


Рис. 5. Погрешности определения параметров среды при совместной AVOA инверсии PP и PS волн

По одним продольным волнам в случае 10% шума скорости продольных и поперечных волн определяются практически точно, азимут оси симметрии с ошибкой менее 1° , а коэффициенты анизотропии с погрешностью до 0,02.

В случае 20% шума погрешности определения параметров анизотропии увеличиваются до 0,06, а ошибка определения азимута оси симметрии до 5° , что нельзя считать допустимым. Из сравнения рис. 4 и 5 видно, что решение обратной задачи по комплексу PP и PS волн дает значительно большую точность оценок всех параметров модели и особенно коэффициентов анизотропии, погрешности которых не превышают 0,01 при уровне помех 10% и 20%. Существенно увеличивается точность определения направления оси симметрии.

Заключение

В работе проведено исследование оптимизационного алгоритма совместной нелинейной AVOA инверсии продольных и обменных отраженных волн в анизотропной НТИ среде. В алгоритме используется точное решение для коэффициентов отражения PP и PS волн. Анализ целевых функций, полученных в процедуре оптимизации, позволил изучить чувствительность метода к определению различных параметров анизотропной модели. Показано, что использование комплекса продольных и обменных волн значительно повышает помехоустойчивость алгоритма и точность оценок всех параметров анизотропной среды.

Тестирование алгоритма проведено на синтетических сейсмограммах, рассчитанных лучевым методом для модели Верхнечонского нефтяного месторождения. Показано, что при отношении сигнал/помеха >5 упругие параметры анизотропного слоя определяются с высокой точностью.

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0009, а также при частичной поддержке гранта РФФИ № 19-05-00730.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ruger A. Reflection Coefficients and Azimuthal AVO Analysis in Anisotropic Media: monograph. Tulsa: Society of Exploration Geophysics, 2001. – 185 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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. 17–29.
5. 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.
6. Jilek P. Modeling and inversion of converted-wave reflection coefficients in anisotropic media: a tool for quantitative AVO analysis: Doctoral Thesis, Geophysics. – Colorado: Center for Wave Phenomena Colorado School of Mines Golden, 2001 – 154 p.

7. 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.

8. Литгау О.А., Новокрецин 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.

© Г. А. Дугаров, Т. В. Нефедкина, 2019