

We 01 05

The Method of the AVOA Space Analysis of the PP Reflections in Anisotropic Media in the Wide-Angle Range of Observations

P.A. Lykhin* (Inst. of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS) & T.V. Nefedkina (Inst. of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS)

SUMMARY

The paper presents the new method of AVOA space analysis of the PP-reflections, which allows to study the anisotropic medium properties at large (pre-critical) offsets. The system of vertical azimuthally oriented fractures is represented as a model of transversely isotropic medium with a horizontal symmetry axis (HTI medium). Methodology is based on the joint use of a linear (two-term) approximation of the reflection coefficient at small offsets and parabolic (trinomial) at large distances. For a more accurate finding of the anisotropy medium parameters and the direction of the symmetry axis, we offer two consecutive methods of solution: the method of least squares at small offsets, and the optimization algorithm of Nelder-Mead method.

Testing of algorithm was performed on model data for Verkhnechonskoe oil field in Eastern Siberia. It has been shown that the parabolic approximation improves the accuracy of determining the parameters Biso and Bani, commonly used in the interpretation. The proposed technique can be recommended to application at good data quality with a signal/noise ratio not less than 10. In this case, the azimuth of the symmetry axis is determined with a high accuracy, the error is less than 2-7°.

МЕТОДИКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО AVOA АНАЛИЗА РР ОТРАЖЕНИЙ В АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ В ШИРОКОУГЛОВОМ ДИАПАЗОНЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Лыхин П.А. (Институт нефтегазовой геологии и геофизики (ИНГГ) СО РАН), Нефедкина Т.В. (ИНГГ СО РАН)*

Введение

Во всем мире азимутальный AVO анализ широко применяется для обнаружения зон повышенной азимутально-ориентированной трещиноватости и их картирования, к которым часто приурочены месторождения нефти и газа. Методология анализа AVOA (Amplitude Versus Offset and Azimuth), основывается на известном теоретическом факте, состоящем в том, что азимутальная анизотропия скоростей, вызванная наличием вертикально ориентированных трещин в среде, влечет за собой и азимутальную анизотропию амплитуд, в частности коэффициентов отражения [1].

Целью данной работы является разработка алгоритма пространственного азимутального анализа амплитуд продольных отраженных волн на больших удалениях источник-приемник. В отличие от традиционного «посекторного» AVOA анализа [1] предлагаемый алгоритм «пространственного» AVOA анализа [2] использует полноазимутальную информацию об амплитудах волн и координатах точек наблюдения. Второй особенностью алгоритма является возможность обработки сейсмических записей на больших (докритических) удалениях источник-приёмник. Тестирование алгоритма проведено на модельных данных для Верхнечонского нефтяного месторождения в Восточной Сибири.

Постановка задачи

Система вертикальных азимутально-ориентированных трещин представляется в виде модели трансверсально-изотропной среды с горизонтальной осью симметрии (среда НТИ). Коэффициент отражения продольной волны на границе изотропного и анизотропного (НТИ) полупространств, аппроксимируется линеаризованной формулой Рюгера [3], полученной в предположении малости изменений упругих свойств среды на границе:

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

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

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

где θ — угол падения волны на границу; φ — азимут линии источник — приемник, φ_0 — азимут оси симметрии относительно оси X. Коэффициент A в разложении (1) равен коэффициенту отражения при нормальном падении волны, $B(\varphi)$ — так называемый градиент AVO, где B^{iso} — его изотропная часть, равная градиенту AVO в изотропной среде, B^{ani} — анизотропная добавка к градиенту, зависящая от параметров анизотропии сред; $C(\varphi)$ — вносит вклад в значение коэффициента отражения при больших удалениях (или углах падения). Задача состоит в определении направления трещин или азимутального угла оси анизотропии φ_0 и параметров аппроксимации Рюгера. Параметры A , B^{iso} и C^{iso} могут быть выражены через скачки скоростей продольных и поперечных волн и плотностей на границе [3], а параметры B^{ani} , C^{ani1} и C^{ani2} через коэффициенты анизотропии Томсена [3, 4], зависящие от плотности трещин. Таким образом, имеется принципиальная возможность определения упругих параметров анизотропной среды и связанных с ними направления и плотности трещин.

Методы решения задачи

В алгоритме пространственного AVOA анализа используются два следующих друг за другом метода решения: метод наименьших квадратов и оптимизационный метод Нелдера-Мида [5].

На первом этапе на малых удалениях от источника используется линейная зависимость $R_{pp}(\sin^2 \theta)$ (двухчленная аппроксимация) и методом наименьших квадратов определяются 4 параметра аппроксимации Рюгера (1, 2): A , B^{iso} , B^{ani} , φ_0 [2]. Параметры B^{iso} и B^{ani} рассчитываются с погрешностью и являются начальным приближением для следующего метода решения обратной задачи.

На втором этапе на полной базе наблюдений для аппроксимации зависимости $R_{pp}(\sin^2 \theta)$ используется трёхчленный полином (параболический). Параметры A и φ_0 считаются известными из первого этапа, определяются 5 оставшихся параметров аппроксимации Рюгера (1 - 3): B^{iso} , B^{ani} , C^{iso} , C^{ani1} , C^{ani2} методом Нелдера-Мида. Для углов падения, не превышающих критический угол, коэффициент R_{pp} при больших удалениях имеет следующий вид:

$$R_{pp} = A + (B^{iso} + B^{ani} \cos^2(\varphi - \varphi_0)) \sin^2 \theta + (C^{iso} + C^{ani1} \cos^4(\varphi - \varphi_0) + C^{ani2} \sin^2(\varphi - \varphi_0) \cos^2(\varphi - \varphi_0)) \operatorname{tg}^2 \theta \sin^2 \theta \quad (4)$$

В ходе решения обратной задачи осуществляется минимизация следующей функции:

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

где n - число наблюдений, l - расстояние от источника до i -го приёмника, \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; $A_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v})$ - теоретическое описание коэффициента отражения. В качестве теоретического описания принималась аппроксимация Рюге (4).

Тестирование алгоритмов обработки на модельных данных

Тестирование алгоритмов проводилось на модельных данных для целевого карбонатного комплекса Верхнечонского нефтяного месторождения (Рисунок 1).

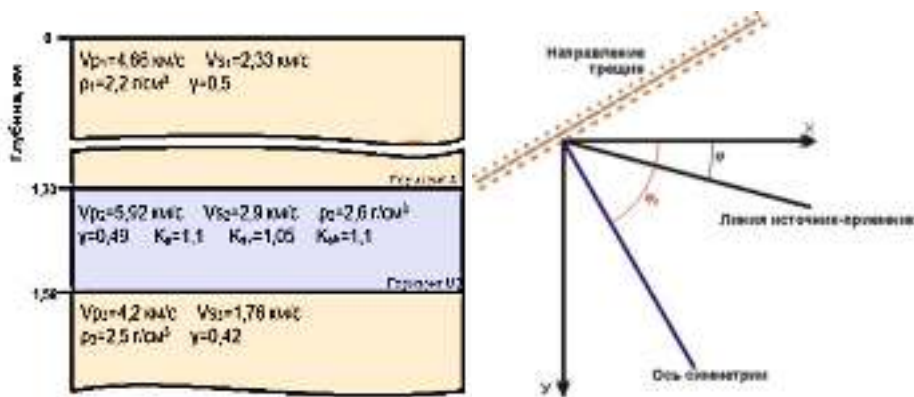


Рисунок 1 Слева изображена обобщенная сейсмогеологическая модель Верхнечонского месторождения. Трансверсально-изотропный слой выделен сиреневым цветом. В правой части рисунка изображена модель в плане.

Обобщенная сейсмогеологическая модель месторождения была составлена по данным вертикального сейсмического профилирования (ВСП) и акустического каротажа (АК) в скважинах №73 и №78.

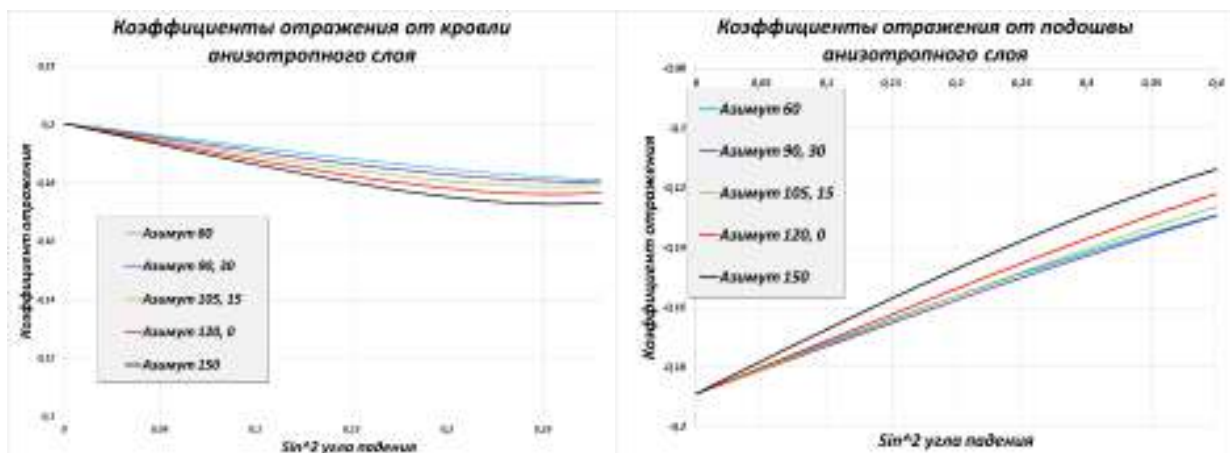


Рисунок 2 Коэффициенты отражения от кровли и подошвы анизотропного слоя для различных азимутов наблюдения.

Модельными данными являлись теоретические коэффициенты отражения. Расчеты коэффициентов отражения Р-волн от кровли (горизонт А) и подошвы (горизонт М2) трещиноватого анизотропного слоя выполнены на основе теории лучевого метода в анизотропных средах [6] (автор программы Лыхин П.А). Результаты расчётов показаны на рисунке 2. Линейность зависимостей R_{pp} ($\sin^2 \theta$) для

обоих горизонтов сохраняется примерно до углов падения 19°-20°. Для горизонта А наблюдается плохая разрешенность коэффициентов отражения в зависимости от азимутов на малых удалениях, отсюда можно ожидать неустойчивое решение обратной задачи. Для горизонта М2 разрешенность коэффициентов отражения по азимутам выше, что является благоприятным фактором для определения параметров анизотропии.

Для решения обратной задачи использовались теоретические значения коэффициентов отражения для 8 азимутов радиальных профилей наблюдений 0°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 120°, 150°, 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 и 20 % от среднего уровня коэффициента отражения на базе наблюдения.

Анализ результатов

Результаты решения обратной задачи на данных без помех и с помехами приведены в таблицах 1 (для кровли анизотропного слоя) и 2 (для подошвы). Углы падения для МНК до 19° (двухчленная аппроксимация), для метода Нелдера-Мида до 40° (трёхчленная аппроксимация)

Таблица 1 Зависимость параметров аппроксимации от уровня шума для горизонта А.

По 8 азимутам: 0°, 15°, 30°, 60°, 90°, 105°, 120°, 150° Модель Верхнечонского нефтяного месторождения Отражение от кровли анизотропного слоя						
Шум, %	0		10		20	
Обр. задача	2-чл (До 19°)	3-чл (До 40°)	2-чл (До 19°)	3-чл (До 40°)	2-чл (До 19°)	3-чл (До 40°)
А	0,200	-	0,200	-	0,201	-
Biso	-0,081	-0,204	-0,066	-0,200	-0,060	-0,186
Vani	-0,059	0,102	-0,070	0,099	-0,149	0,083
Ciso	-	0,301	-	0,297	-	0,272
Сan1	-	-0,216	-	-0,209	-	-0,186
Сan2	-	-0,138	-	-0,113	-	-0,090
φ°	60	-	67,448	-	69,298	-
Погрешность,°	0	-	7,448	-	9,298	-

Таблица 2 Зависимость параметров аппроксимации от уровня шума для горизонта М2.

По 8 азимутам: 0°, 15°, 30°, 60°, 90°, 105°, 120°, 150° Модель Верхнечонского нефтяного месторождения Отражение от подошвы анизотропного слоя						
Шум, %	0		10		20	
Обр. задача	2-чл (До 19°)	3-чл (До 40°)	2-чл (До 19°)	3-чл (До 40°)	2-чл (До 19°)	3-чл (До 40°)
А	-0,189	-	-0,189	-	-0,189	-
Biso	0,262	0,268	0,271	0,271	0,276	0,255
Vani	-0,093	-0,096	-0,118	-0,103	-0,196	-0,074
Ciso	-	-0,099	-	-0,102	-	-0,079
Сan1	-	0,067	-	0,084	-	0,025
Сan2	-	0,080	-	0,067	-	0,071
φ°	60	-	62,703	-	71,238	-
Погрешность,°	0	-	2,703	-	11,238	-

На данных без помех азимут оси симметрии определяется точно как по горизонту А, так и по горизонту М₂. Значения параметров аппроксимации B^{iso} и B^{ani} существенно зависят от вида аппроксимации (двух - или трёхчленная) для горизонта А. Погрешность аппроксимации коэффициента отражения по параметрам, определённым из инверсии, не превышает 4% для кровли и 1% для подошвы анизотропного слоя. С наложением шума точность определения азимута оси симметрии падает. При помехе 10% погрешности составляют 7,5° для горизонта А и 2,7° для горизонта М₂. С увеличением уровня помехи до 20% ошибка определения азимута оси симметрии возрастает до 9-11°. Коэффициенты C^{iso} , C^{ani1} и C^{ani2} определяются относительно устойчиво для уровня помехи не более 10%.

Заключение

В работе предложена новая методика пространственного AVOA анализа, позволяющая изучать анизотропные свойства среды на больших (докритических) удалениях от источника. Методика базируется на совместном использовании линейной (двухчленной) аппроксимации коэффициента отражения на малых удалениях от источника и параболической (трёхчленной) на больших удалениях. Тестирование алгоритмов на модельных данных для Верхнечонского нефтяного месторождения показало, что параболическая аппроксимация повышает точность определения параметров B^{iso} и B^{ani} , обычно используемых в интерпретации. В то же время она характеризуется меньшей помехоустойчивостью при определении параметров C^{iso} , C^{ani1} и C^{ani2} и поэтому может быть рекомендована к применению 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°, причём по отражению от подошвы анизотропного слоя точность выше. По величине B^{ani} можно на качественном уровне судить о плотности трещин. Количественный переход от параметров аппроксимации коэффициентов отражения, определённых из инверсии, к параметрам анизотропии среды по формулам Рюгера [3] является неправомерным, поскольку перепад упругих параметров на кровле и подошве анизотропного слоя для модели Верхнечонского нефтяного месторождения нельзя считать малым.

Благодарности

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

Литература

1. Чичина Т.И., Сабинин В.И., Корсунов В.И., Ронкийо-Харийо Х. Амплитудный анализ отражённых продольных волн в азимутально-анизотропных средах при разведке нефтегазовых резервуаров // Сборник докладов международной научной конференции. Сейсмические исследования земной коры, Новосибирск, 2004.
2. Нефедкина Т.В., Карстен В.В., Егорова А.А. Пространственный анализ амплитуд отражённых продольных волн в азимутально-анизотропных средах // Технологии сейсморазведки. 2011. № 3. С. 42-48.
3. Ruger A. Reflection Coefficients and Azimuthal AVO Analysis in Anisotropic Media: Society of Exploration Geophysics. 2001.
4. Thomsen L. Reflection seismology over azimuthally anisotropic media // Geophysics, №3, 1988.
5. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М., «Мир», 1975. 534 с.
6. Петрашень Г.И. Распространение объёмных волн и методы расчета волновых полей в анизотропных упругих средах // Сборник научных трудов под ред. Г.И. Петрашень, Л., «Наука», 1984.