



ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ АМПЛИТУД ОТРАЖЕННЫХ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН В АЗИМУТАЛЬНО-АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

Т.В. Нефедкина¹, В.В. Карстен¹, А.А. Егорова²

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия, e-mail: NefedkinaTV@ipgg.nsc.ru, KarstenVV@ipgg.nsc.ru

²Новосибирский государственный университет, кафедра геофизики,
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия, e-mail: AngelinaEgorova87@gmail.com

Разработан алгоритм пространственного AVOA-анализа продольных волн, применяемого для изучения анизотропных сред. В отличие от традиционного посекторного AVOA-анализа обратная задача решается по полному набору данных, извлекаемых из 3D наблюдений продольных волн и относящихся к общей отражающей площадке. Проведено тестирование алгоритма на модельных данных для обобщенной модели среды Юрубчено-Тохомской зоны. Исследовались точность и помехоустойчивость метода. Показано, что метод обеспечивает достаточно высокую точность определения азимута горизонтальной оси симметрии как на регулярных, так и на нерегулярных сетках входных данных при отношении сигнал/помеха >4–5.

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

SPATIAL AMPLITUDE ANALYSIS OF COMPRESSIONAL WAVE REFLECTIONS IN AZIMUTHALLY ANISOTROPIC MEDIA

T.V. Nefedkina¹, V.V. Karsten¹, A.A. Egorova²

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Acad. Koptyuga prosp., 3, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: NefedkinaTV@ipgg.nsc.ru, KarstenVV@ipgg.nsc.ru

²Novosibirsk State University, Geophysics department,
Pirogova str., 2, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: AngelinaEgorova87@gmail.com

Algorithm for spatial AVOA analysis of *P*-wave reflections used for the study of anisotropic media is developed. In contrast to the traditional sector-based AVOA analysis, the inverse problem is being solved using the complete set of data extracted from *P*-waves of 3D data and related to the common reflecting area. Testing of the method was accomplished using the simulated data for YTZ (Yurubchen-Tohomo Zone – a big oil-gas field in Russia). Results show a sufficiently high accuracy in determining the horizontal symmetry axis azimuth for both regular and irregular acquisition grids with signal to noise ratio >4–5.

Azimuthal AVO analysis, spatial AVOA analysis, reflections amplitudes, AVOA inversion, transversely isotropic HTI medium, accuracy and noise immunity of the method

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время азимутальный анализ амплитуд, или AVOA-анализ, широко применяется во всем мире для обнаружения и картирования зон повышенной азимутально-ориентированной трещиноватости коллекторов углеводородов, а также для определения преимущественного направления трещин. Наиболее простым и поэтому часто используемым классом моделей, аппроксимирующих среды, образованные системой трещин, является класс трансверсально-изотропных сред (ТИ) [1–3]. В частности, система вертикальных азимутально-ориентированных трещин может быть представлена трансверсально-изотропной средой с горизонтальной осью симметрии (HTI).

Наибольшими возможностями для изучения азимутальной анизотропии среды обладают поперечные и обменные волны [4, 5]. Имеется также достаточно большой опыт определения главных направлений азимутальной анизотропии по данным азимутальных скоростного (NMO) и AVO-анализов продольных волн [3, 6].

Применяющиеся в настоящее время в России трехмерные системы наблюдений не являются оптимальными для проведения азимутального анализа данных. Это связано с неравномерной плотностью наблюдений на различных удалениях от источников и в различных азимутах. Неполнота данных ухудшает ра-

боту существующих алгоритмов азимутального скоростного и амплитудного анализов и приводит к большим погрешностям определения параметров среды. В работе [7] были предложены несколько алгоритмов восполнения наблюдаемых 3D данных, позволяющих повысить точность решения обратной задачи. При тестировании этих алгоритмов AVO-инверсия проводилась по методу посекторного AVOA-анализа [8].

Метод посекторного AVOA-анализа оказался весьма чувствительным к неполноте данных по азимутам. Кроме того, в этом методе все точки наблюдений, которые находятся внутри одного сектора, относятся к биссектрисе данного сектора. Это приводит к дополнительным погрешностям в определении параметров среды.

В настоящей работе предлагается новый метод пространственного AVOA-анализа. В этом методе входная информация об амплитудах волн и координатах точек наблюдения извлекается из 3D данных продольных волн без искажений. При этом обратная задача решается сразу по полному набору данных, относящихся к общей отражающей площадке. Такой подход обещает существенное увеличение точности решения обратной задачи. Дано теоретическое обоснование метода и приведены результаты его тестирования на модельных данных. Все результаты сравниваются с данными посекторного AVOA-анализа.

МЕТОДОЛОГИЯ

Постановка задачи. Отражающий коллектор с вертикальной трещиноватостью представляется в виде модели трансверсально-изотропной среды с горизонтальной осью симметрии x (среда НТИ). Рассматривается отражение продольной PP -волны от кровли слабоанизотропного полупространства. Коэффициент отражения для продольной волны представляется аппроксимационной формулой Рюге [9, 10]:

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

где θ – угол падения волны на границу; φ – азимут линии источник–приемник относительно направления горизонтальной оси анизотропии. Коэффициент A в разложении (1) равен коэффициенту отражения при нормальном падении волны; $B(\varphi)$ – градиент AVO; $C(\varphi)$ вносит вклад в значение коэффициента отражения при больших удалениях (или углах падения).

В рассматриваемом случае направление оси симметрии неизвестно. Пусть оно составляет некоторый угол φ_0 относительно оси x (рис. 1). Тогда градиент AVO запишется как [9, 11]

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

где B^{iso} – его изотропная часть, равная градиенту AVO в изотропной среде; B^{ani} – анизотропная добавка к градиенту, зависящая от параметров анизотропии среды.

Задача состоит в определении параметров анизотропии среды и, в первую очередь, азимутального угла оси анизотропии φ_0 или ортогонального к нему направления трещин.

На практике имеют дело с амплитудами, а не с коэффициентами отражения. Чтобы применить зави-

симость (1) к амплитудам отраженных волн, необходимо ввести поправку за геометрическое расхождение в наблюдаемые амплитуды и разделить амплитуды на масштабный множитель, равный соотношению наблюдаемой амплитуды и теоретического коэффициента отражения при нормальном падении.

Метод решения. В алгоритме пространственного AVOA-анализа параметры анизотропии среды и, в первую очередь, направление оси симметрии определяются методом наименьших квадратов из аппроксимационного выражения для коэффициента отражения. При этом обратная задача решается по полному набору данных об амплитудах отраженных волн, относящихся к общей точке (площадке) отражения.

Ограничившись удалениями от источника, не превышающими глубины отражающей границы, и подставляя в аппроксимационную формулу Рюге (1) выражение для градиента B (2), получим для коэффициента отражения

$$R_{PP} = A + (B^{\text{iso}} + B^{\text{ani}} \cos^2(\varphi - \varphi_0)) \sin^2(\theta). \quad (3)$$

Используя формулы тригонометрии, преобразуем (3) к виду

$$R_{PP} = A + [B^{\text{iso}} + B^{\text{ani}} (1 + \cos(2\varphi - 2\varphi_0))/2] \sin^2(\theta). \quad (4)$$

Введем обозначения:

$$B^{\text{iso}} + \frac{B^{\text{ani}}}{2} = a, \quad \frac{B^{\text{ani}}}{2} \cos 2\varphi_0 = b, \quad (5)$$

$$\frac{B^{\text{ani}}}{2} \sin 2\varphi_0 = q,$$

и перепишем (4) в виде

$$R_{PP} = A + (a + b \cos 2\varphi + q \sin 2\varphi) \sin^2(\theta). \quad (6)$$

Коэффициенты A , B^{iso} , B^{ani} , φ_0 определяются методом наименьших квадратов из (6) и (5).

Минимизируется функционал невязки между теоретическими и наблюдаемыми данными:

$$F = \sum_{i=1}^N [A + (a + b \cos 2\varphi_i + q \sin 2\varphi_i) \sin^2(\theta_i) - D_i]^2 = \min, \quad (7)$$

где i – номер трассы в полном наборе трасс, относящихся к общей отражающей площадке; D_i – значение амплитуды отраженной волны, полученное из сейсмотрассы, соответствующей углу падения θ_i и азимуту наблюдения φ_i .

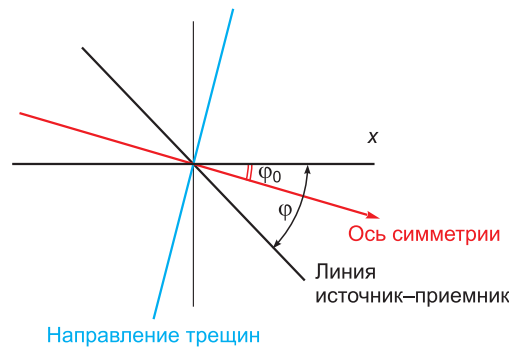


Рис. 1. К постановке задачи.

Вид сверху на плоскость наблюдений.

Дифференцируя (7) по параметрам A , a , b и q и приравнявая к нулю производные, получаем систему

$$\begin{pmatrix} N & \sum_{i=1}^N \sin^2 \theta_i & \sum_{i=1}^N \cos 2\varphi_i \sin^2 \theta_i & \sum_{i=1}^N \sin 2\varphi_i \sin^2 \theta_i \\ \sum_{i=1}^N \sin^2 \theta_i & \sum_{i=1}^N \sin^4 \theta_i & \sum_{i=1}^N \cos 2\varphi_i \sin^4 \theta_i & \sum_{i=1}^N \sin 2\varphi_i \sin^4 \theta_i \\ \sum_{i=1}^N \cos 2\varphi_i \sin^2 \theta_i & \sum_{i=1}^N \cos 2\varphi_i \sin^4 \theta_i & \sum_{i=1}^N \cos^2 2\varphi_i \sin^4 \theta_i & \sum_{i=1}^N \cos 2\varphi_i \sin 2\varphi_i \sin^4 \theta_i \\ \sum_{i=1}^N \sin 2\varphi_i \sin^2 \theta_i & \sum_{i=1}^N \sin 2\varphi_i \sin^4 \theta_i & \sum_{i=1}^N \cos 2\varphi_i \sin 2\varphi_i \sin^4 \theta_i & \sum_{i=1}^N \sin^2 2\varphi_i \sin^4 \theta_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N D_i \\ \sum_{i=1}^N D_i \sin^2 \theta_i \\ \sum_{i=1}^N D_i \cos 2\varphi_i \sin^2 \theta_i \\ \sum_{i=1}^N D_i \sin 2\varphi_i \sin^2 \theta_i \end{pmatrix} \quad (8)$$

Здесь N – количество трасс.

Из системы (8) получаем значения параметров аппроксимации.

Азимут оси симметрии φ_0 может быть получен из уравнения $\operatorname{tg}(2\varphi_0) = \frac{q}{b}$.

Анизотропная составляющая градиента AVO B^{ani} определяется выражением

$$B^{\text{ani}} = \frac{2b}{\cos(2\varphi_0)} = \frac{2q}{\sin(2\varphi_0)} = 2\sqrt{b^2 + q^2}.$$

Связь параметров аппроксимации с параметрами среды. Величина B^{ani} связана с параметрами анизотропии и параметром, характеризующим трещиноватый коллектор, – плотностью трещин. Конкретный вид зависимостей определяется принятой моделью строения трещиноватой среды. Наиболее известны две модели трещин [12]:

⇒ сфероидальные трещины в форме монеты – теория Хадсона [2];

⇒ система параллельных плоских трещин – теория Шонберга [1, 13].

Анизотропная часть градиента B^{ani} связана с параметрами анизотропии $\delta^{(V)}$ и $\gamma^{(V)}$ следующим образом [14]:

$$B^{\text{ani}} \approx \frac{1}{2} \delta^{(V)} - 4g\gamma^{(V)},$$

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

Для изолированных монетообразных трещин для параметра $\gamma^{(V)}$ справедливо соотношение

$$\gamma^{(V)} = -\frac{8e}{3(3-2g)}.$$

Параметр $\delta^{(V)}$ дополнительно зависит от флюидонасыщения трещин. Для газосодержащих трещин [12]

$$\delta^{(V)} = -\frac{8e}{3} \left(1 + \frac{g(1-2g)}{(3-2g)(1-g)} \right).$$

Для трещин, заполненных жидкостью, он равен

$$\delta^{(V)} = -\frac{32ge}{3(3-2g)}.$$

Для плотности трещин, заполненных газом, запишем

$$e_{\text{dry}} = -\frac{3(3-2g)(1-g)}{4(-8g^2 + 12g - 3)} B^{\text{ani}}.$$

из четырех уравнений, матрица коэффициентов и правая часть которой имеют вид

Плотность трещин, заполненных флюидом, определяется

$$e_{\text{wet}} = -\frac{3(3-2g)}{16g} B^{\text{ani}}.$$

Таким образом, по вычисленному значению B^{ani} можно определить плотность трещин e , если имеется дополнительная петрофизическая информация о структуре коллектора, об отношении V_S/V_P во вмещающей породе и о типе флюида в трещинах.

ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА НА МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Тестовая модель и модельные данные. Тестирование алгоритма проводилось на модельных данных для Юрубчено-Тохомской зоны (ЮТЗ) нефтегазонакопления. Обобщенной моделью ЮТЗ является 12-слойная горизонтально-слоистая среда с двумя трансверсально-изотропными слоями. Верхний слой соответствует анизотропной верхней части разреза (ВЧР, слой 2), нижний анизотропный слой имитирует трещиноватые рифейские отложения (слой 11). Параметры модели приведены на рис. 2.

Направления горизонтальных осей симметрии в анизотропных слоях составляют с осью x углы 30° (слой 2) и 60° (слой 11).

Обращение зависимостей коэффициентов отражения от угла падения является в чистом виде задачей AVO -инверсии. Входными данными алгоритма служили теоретические плосковолновые коэффициенты отражения P -волн от кровли (горизонт R_0) и подошвы (горизонт R_4) рифея. Расчеты коэффициентов отражения выполнены по формулам лучевого метода в анизотропных средах [15, 16]. На рис. 3 представлены коэффициенты отражения от границы R_0 (а) и R_4 (б).

Из анализа рис. 3, а, б следует, что зависимости коэффициентов отражения от $\sin^2(\theta)$ для горизонта R_4 более линейны, чем для горизонта R_0 . Для последнего линейность сохраняется в интервале значений $\sin^2(\theta) = 0-0,15$, что соответствует удалениям 0–1800 м (см. рис. 3, а). Диапазон линейности варьирует для разных азимутов. Кроме того, наблюдается очень плохая разрешенность коэффициентов отражения от R_0 по азимутам на малых удалениях от источника, что может привести к неустойчивому решению обратной задачи. На удалениях, превышающих 1800 м, линейная аппроксимация становится неправомочной. Для горизонта R_4 линейность зависимости коэффициентов отражения от $\sin^2(\theta)$ наблюдает-



Рис. 2. Обобщенная модель ЮТЗ.

Зеленым цветом даны анизотропные слои.

ся до значений $\sin^2(\theta) = 0,22-0,25$, что соответствует удалениям 2400–2500 м. Разрешенность коэффициентов отражения по азимутам для этого горизонта значительно выше, чем для горизонта R_0 . Следовательно, точность решения обратной задачи по отражению от горизонта R_4 должна быть выше.

Результаты тестирования на данных без помех.

Погрешности в решение обратной задачи вносят три фактора: погрешности аппроксимации, неполнота данных по удалениям и азимутам и наличие случайных помех в данных. На первом этапе исследовались погрешности *линейной аппроксимации*. Коэффициенты отражения насчитывались по радиальным профилям в разных азимутах (регулярная сетка). AVO-инверсия проводилась по двум алгоритмам – пространственно-му и посекторному. Поскольку входные данные зада-

вались в диапазоне удалений, оптимальных для исследуемых горизонтов, погрешности аппроксимации были минимальны. Оба алгоритма определили азимут оси симметрии с высокой точностью, погрешность составила $<1^\circ$ при задании входной информации на шести профилях. Известно, что точность решения повышается при увеличении количества азимутов профилей. Нами были определены эталонные значения параметров аппроксимации по теоретическим коэффициентам отражения, заданным на 10 радиальных профилях (азимуты 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 180°). Эти значения использовались в дальнейшем при тестировании алгоритмов.

На втором этапе для исследования *влияния неполноты данных* на эффективность работы алгоритмов входная информация (теоретические коэффициенты

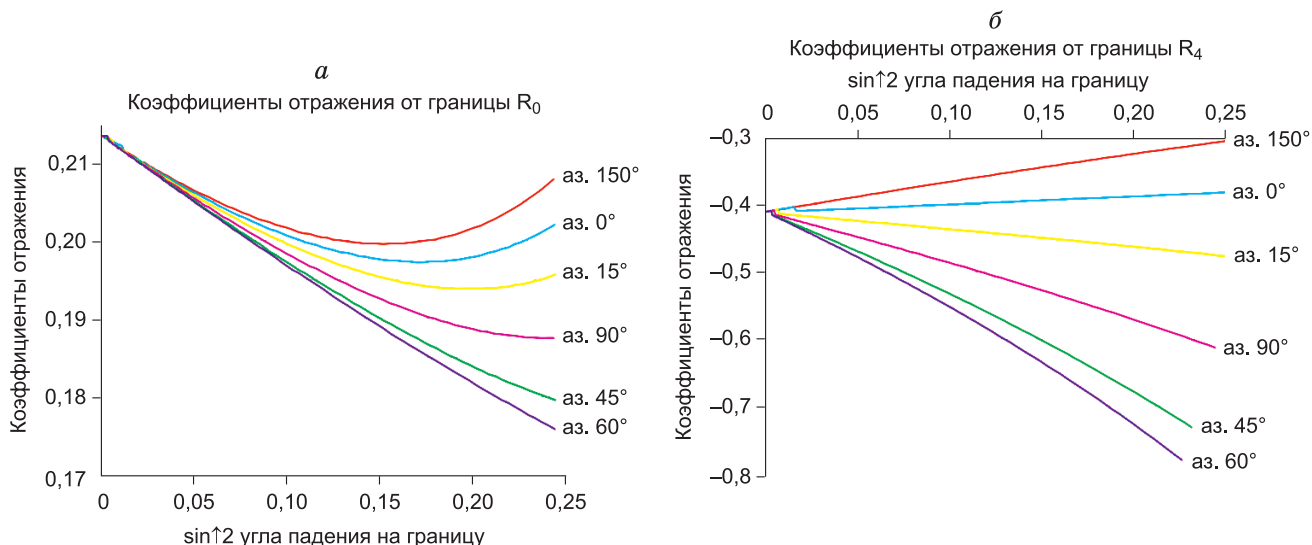


Рис. 3. Коэффициенты отражения продольной волны от кровли (а) и подошвы (б) анизотропного слоя в зависимости от угла падения на границу.

отражения) задавалась в реальной системе 3D наблюдений, применяющейся на практике. Была использована ортогональная система наблюдений с номинальной кратностью перекрытий на времени целевых горизонтов R_0 и R_4 , равной 25. Проведено площадное бинирование по сетке 25×25 м на площади $402,75 \text{ км}^2$. Образована сеть ортогональных профилей: 1164 Inline и 860 Xline. Для тестирования алгоритмов использовался один супербин размером 150×300 м, состоящий из 6×12 малых бинов, каждый размером 25×25 м (рис. 4).

При использовании алгоритма пространственного AVOA-анализа, названного нами AVOA-space, обработка данных проводилась по всем выбранным точкам. Для реализации посекторного анализа отдельно выбирались секторы в 30° . Кратность по секторам различается: самая высокая кратность наблюдается в секторах $0-30^\circ$, $150-180^\circ$, самая маленькая – для сек-

торов $60-90^\circ$, $90-120^\circ$. Это обстоятельство существенно влияет на точность решения обратной задачи.

В табл. 1 представлены результаты пространственного AVOA-анализа по горизонтам R_0 и R_4 для супербина размером 150×300 м. Для сравнения приведены также эталонные параметры аппроксимации, вычисленные на 10 радиальных профилях алгоритмом AVOA-space.

Мы видим, что азимут оси симметрии и параметр A определяются алгоритмом AVOA-space с большой точностью на реальной системе наблюдений (нерегулярная сетка). Параметры B^{iso} и B^{ani} вычисляются с меньшей точностью, погрешности определения B^{iso} колеблются от 3 до 28 %, для B^{ani} они составляют 6–11 %.

В табл. 2 представлены результаты посекторного AVOA-анализа по горизонтам R_0 и R_4 для того же супербина. По сравнению с результатами пространственного AVOA анализа точность определения пара-

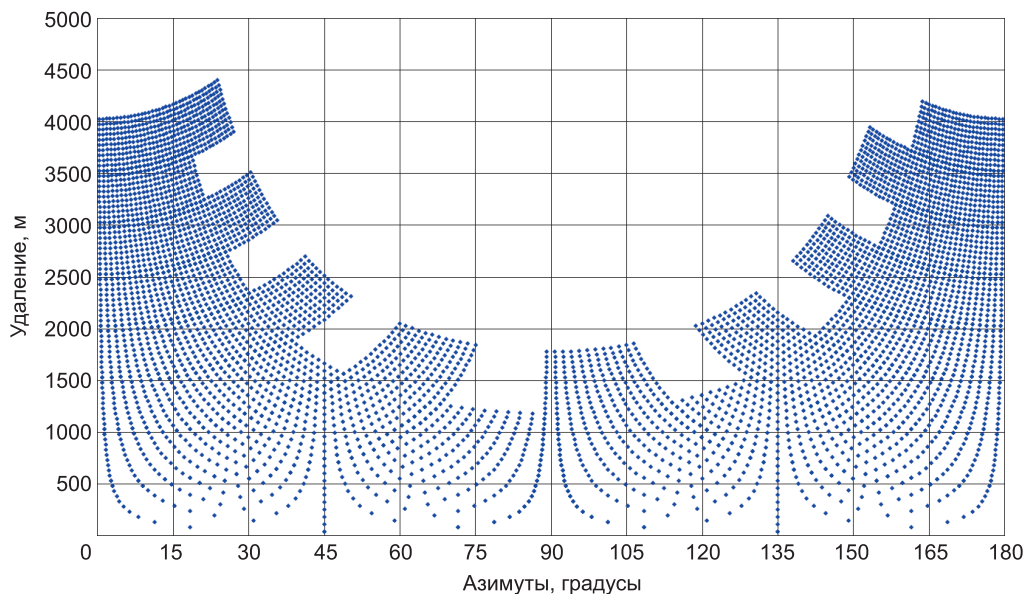


Рис. 4. Карта распределения азимутов и удалений трасс в супербине размера 150×300 м.

Результаты пространственного AVOA-анализа по горизонтам R_0 и R_4 для супербина

R_0				R_4			
Супербин		Эталон		Супербин		Эталон	
A	0,21	A	0,21	A	-0,41	A	-0,41
B^{iso}	-0,123	B^{iso}	-0,13	B^{iso}	0,485	B^{iso}	0,678
B^{ani}	-0,158	B^{ani}	-0,17	B^{ani}	-1,91	B^{ani}	-2,14
φ_0 , град.	60,96	φ_0 , град.	59,95	φ_0 , град.	60,9	φ_0 , град.	59,78
Погрешность φ_0 , град.	0,96	Погрешность φ_0 , град.	0,05	Погрешность φ_0 , град.	0,9	Погрешность φ_0 , град.	0,22

метров аппроксимации падает. Ошибка определения оси симметрии по горизонту R_0 составляет 4° . Для горизонта R_4 значительно отличается от эталонного значение B^{iso} , превосходя его в 2 раза.

Результаты тестирования на данных с шумами. На теоретические значения коэффициентов отражения накладывался случайный шум, составляющий 5–50 % от среднего уровня коэффициента отражения на базе наблюдения. Помехоустойчивость алгоритмов исследовалась как на регулярной, так и на нерегулярной сетке данных.

Влияние помех резко ухудшает результаты AVO-инверсии по отражению от кровли анизотропного слоя (горизонт R_0). Метод пространственного AVOA-анализа имеет существенное преимущество перед посекторным методом. Независимо от системы наблюдений он обеспечивает погрешность определения оси анизотропии не более 10° при шумах до 10 % (рис. 5). Метод посекторного анализа дает такую же точность при уровне шума не более 5–7 %. Видно, что при наблюдениях в реальной системе помехоустойчивость алгоритма резко падает с увеличением шума выше 5 %.

По отражению от подошвы анизотропного слоя (горизонт R_4) помехоустойчивость AVO-инверсии значительно выше. Метод пространственного AVOA-анализа обеспечивает высокую точность определения оси анизотропии при уровне помех до 50 %. Погрешность не превышает 5° независимо от системы наблюдений (рис. 6). Метод посекторного анализа дает приблизительно такую же точность (погрешность составляет 7° при помехах 50 %) только на регулярной сетке (6 профилей). В реальной системе наблюдений точность метода падает. Погрешности определения оси анизотропии становятся выше 5– 7° при уровне шума больше 20 % (см. рис. 6).

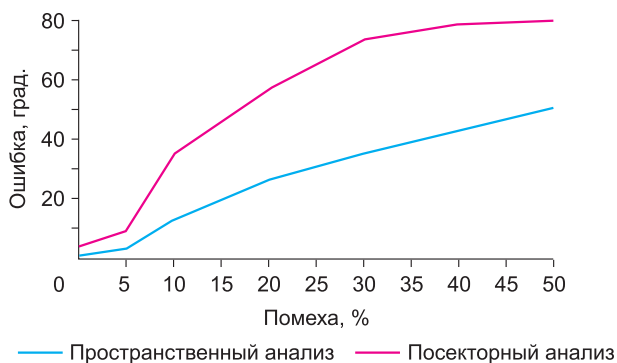


Рис. 5. Ошибка определения азимута оси симметрии по горизонту R_0 в зависимости от уровня шума.

Входные данные заданы в реальной 3D системе наблюдений.

Таблица 2
Результаты посекторного AVOA-анализа по горизонтам R_0 и R_4 для супербина

R_0		R_4	
A	0,21	A	-0,41
B^{iso}	-0,116	B^{iso}	1,34
B^{ani}	-0,177	B^{ani}	-1,83
φ_0 , град.	64	φ_0 , град.	60,24
Погрешность φ_0 , град.	4	Погрешность φ_0 , град.	0,24

Наряду с исследованием точности определения азимута оси симметрии проведен анализ погрешностей определения остальных параметров аппроксимации Рюге A , B^{iso} , B^{ani} при наблюдениях с помехами в реальной 3D системе. Для параметра A четко проявилось преимущество пространственного алгоритма над посекторным. По горизонтам R_0 и R_4 алгоритм AVOA-спрае определяет этот параметр с ошибкой не более 5 % для уровня помех до 50 %, алгоритм посекторного анализа – только до 15 %.

По горизонту R_0 параметры B^{iso} и B^{ani} не определяются устойчиво при помехах больше 5 %. По горизонту R_4 алгоритм пространственного анализа определяет параметр B^{ani} с погрешностью 11–12 % при помехах до 20–30 %. Алгоритм посекторного анализа при таких же помехах дает ошибку 20 %. Параметр B^{iso} достоверно не определяется. Таким образом, мы видим, что из четырех параметров аппроксимации наиболее точно может быть вычислен азимут оси анизотропии. Алгоритм пространственного AVOA-анализа показал существенное преимущество в точности и помехоустойчивости над алгоритмом посекторного анализа.

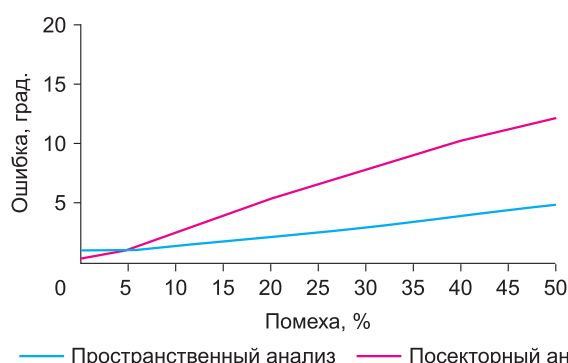


Рис. 6. Ошибка определения азимута оси симметрии по горизонту R_4 при разном уровне шума.

Входные данные заданы на реальной площадной системе наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и исследован метод пространственного азимутального AVO-анализа продольных волн, применяемого для изучения анизотропных сред. В отличие от традиционного посекторного анализа в этом методе используется пространственный подход к анализу амплитуд сейсмических волн, при котором весь набор данных, относящихся к общей площадке отражения, обрабатывается одновременно. Тестирование алгоритма проведено на данных численного моделирования коэффициентов отражения лучевым методом. Исследование точности и помехоустойчивости метода выполнено как на идеальной системе наблюдений с радиальным распределением приемных линий, так и на реалистичной площадной системе.

Полученные результаты убедительно демонстрируют преимущество пространственного подхода к азимутальному анализу амплитуд по сравнению с посекторным анализом. Показано, что алгоритм пространственного AVOA-анализа обеспечивает высокую точность определения азимута оси анизотропии (или ортогонального к нему направления трещин коллектора) на любых системах наблюдений при уровне шума до 50 % от уровня полезного сигнала. Другие параметры аппроксимации коэффициента отражения определяются с меньшей точностью. Так, параметр V^{ani} , очень важный для определения плотности трещин, может быть вычислен с удовлетворительной точностью при уровне помех не выше 25 %. Метод посекторного анализа амплитуд может быть конкурентоспособным только при наблюдениях на радиальных профилях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России".

Литература

1. **Schoenberg M.** Elastic wave behavior across linear slip interfaces // *J. Acoust. Soc. of Amer.* 1980. V. 68, N 5. P. 1516–1521.
2. **Hudson J.A.** Overall properties of a cracked solid // *Math. Proc. of Camb. Phil. Soc.* 1980. V. 88, N 2. P. 371–384.
3. **Crampin S., McGonigle R., Bamford D.** Estimating crack parameters from observations of *P*-wave velocity anisotropy // *Geophysics.* 1980. V. 46, N 3. P. 345–360.
4. **Thomsen L.** Reflection seismology over azimuthally anisotropic media // *Geophysics.* 1988. V. 53, N 3. P. 304–313.
5. **Ata E., Michelena R.J.** Mapping distribution of fractures in a reservoir with *P-S* converted waves // *The Leading Edge.* 1995. V. 14, N 6. P. 664–676.
6. **Perez M.A., Gibson R.L., Toksoz M.N.** Detection of fracture orientation using azimuthal variation of *P*-wave AVO responses // *Geophysics.* 1999. V. 64, N 4. P. 1253–1265.
7. **Нефедкина Т.В., Мезенцев Е.В., Меликов Р.Ф.** Восполнение данных 3D наблюдений продольных волн для оптимизации азимутального анализа // *Технологии сейсморазведки.* 2008. № 1. С. 16–24.
8. **Чичинина 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 ноября 2004 г.).* Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. С. 196–202.
9. **Ruger A., Tsvankin I.** Using AVO for fracture detection: Analytic basis and practical solutions // *The Leading Edge.* 1997. V. 16, N 10. P. 1429–1434.
10. **Ruger A.** Variation of *P*-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media // *Geophysics.* 1998. V. 63, N 3. P. 935–947.
11. **Mallick S., Craft K.L., Meister J.L., Chambers R.E.** Determination of the principal directions of azimuthal anisotropy from *P*-wave seismic data // *Geophysics.* 1998. V. 63, N 2. P. 692–706.
12. **Grechka V., Bakulin A., Tsvankin I.** Estimation of fracture parameters from reflection seismic data. Pt 1: HTI model due to a single fracture set // *Geophysics.* 2000. V. 65, N 6. P. 1788–1802.
13. **Schoenberg M.** Reflection of elastic waves from periodically stratified media with interfacial slip // *Geophys. Prosp.* 1983. V. 3, N 2. P. 265–292.
14. **Ruger A.** *P*-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry // *Geophysics.* 1997. V. 62, N 3. P. 713–722.
15. **Оболенцева И.Р., Гречка В.Ю.** Лучевой метод в анизотропной среде (алгоритмы, программы). Новосибирск: Изд. ИГиГ СО АН СССР, 1989. 225 с.
16. **Распространение** объемных волн и методы расчета волновых полей в анизотропных упругих средах: Сб. науч. трудов / Под ред. Г.И. Петрашеня. Л.: Наука, 1984. 282 с.