

НОВЫЕ АСПЕКТЫ ВОСПОЛНЕНИЯ ДАННЫХ 3D НАБЛЮДЕНИЙ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ АЗИМУТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

© Т.В. Нефедкина, Е.В. Мезенцев, Р.Ф. Меликов, 2009

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия
ЗАО “Красноярскгеофизика”, Красноярск, Россия
Schlumberger, Москва, Россия

The paper presents results of testing the “sector” AVOA analysis algorithm by model data for conventional narrow azimuth towed streamer 3D data. The algorithm is intended for detection of fracture orientation and density in an oil collector with respect to compressional reflections. It is shown that observations for medium and large offsets are the most informative. The precision of inverse problem solution increases in case source- receiver lines are about normal to fracture orientation. Algorithms and computer programs have been created for reconstruction of data in condition of non-optimum systems of observations. Two algorithms are offered to create missing seismograms. The algorithms are based on 3D DMO (dip-moveout) transformation. The next algorithm approximates observed reflections amplitudes and calculates the amplitudes in empty intervals of azimuths and offsets. Testing the algorithms has showed that data reconstruction increases the precision of determination of fracture orientation by 3°–7°.

Введение. В настоящее время азимутальный анализ скоростей распространения и амплитуд отраженных продольных волн широко применяется во всем мире для обнаружения и картирования трещиноватых коллекторов нефти и газа. Коллектор с вертикально ориентированными трещинами может быть представлен в виде модели трансверсально-изотропной среды с горизонтальной осью симметрии (среда НТИ). Известно, что наиболее надежные результаты при изучении азимутальной анизотропии среды могут быть получены с использованием поперечных и обменных волн [6, 17]. Однако изучение азимутальных изменений кинематических и динамических характеристик продольных волн также дает решение этой задачи [7, 13].

Применяющиеся в настоящее время в России трехмерные системы наблюдений не являются оптимальными для проведения азимутального анализа данных. Это связано с неравномерной плотностью наблюдений на разных удалениях от источников и в различных азимутах. Неполнота данных ухудшает работу всех существующих алгоритмов азимутального скоростного (NMO) и амплитудного (AVOA) анализов и приводит к большим погрешностям определения параметров среды. Наши зарубежные коллеги при работах на море применяют усовершенствованные системы многоазимутальных сейсмических 3D съемок [8]. Однако при работах на суше в сложных поверхностных условиях такие методики трудно реализуемы. Решение этой проблемы может быть найдено алгоритмическим путем, постановкой задачи восполнения наблюденных 3D-данных.

В настоящей работе проводится исследование точности работы алгоритма посекторного AVOA анализа [5] в условиях неоптимальных систем

площадных наблюдений. Алгоритм разработан для определения направления трещиноватости коллектора. Нами этот алгоритм дополнен процедурами, вычисляющими плотность трещин, а также разработаны различные алгоритмы и компьютерные программы для пополнения данных в условиях неоптимальных систем наблюдений. Для восстановления недостающих сейсмограмм предлагается алгоритм, основанный на трехмерном преобразовании DMO (dip-moveout). Впервые трехмерное уравнение DMO было получено С.В. Гольдиным [9]. Е.В. Мезенцевым проведено исследование этого уравнения и разработан алгоритм его решения [1]. Второй алгоритм пополнения данных, основанный на аппроксимации амплитуд наблюденных отраженных волн, восстанавливает амплитуды в “пустых” интервалах по удалениям и азимутам. Первые результаты тестирования рассматриваемых алгоритмов на модельных данных приведены в работе [2]. В настоящей статье указаны исследования продолжены; предложен усовершенствованный алгоритм продолжения данных, основанный на трехмерном DMO-преобразовании с использованием метода наименьших квадратов с конечно-разностным регуляризатором. Приведены результаты тестирования всех разработанных алгоритмов на модельных данных.

Описание алгоритмов обработки площадных данных. Алгоритм посекторного азимутального AVO анализа [5]. Алгоритм AVOA основан на полиномиальной аппроксимации коэффициента отражения продольной PP-волны от кровли слабоанизотропного (НТИ) полупространства [14]:

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

где A , $B(\phi)$, $C(\phi)$ – коэффициенты полинома; θ – угол падения волны на границу; ϕ – азимут линии источник–приемник относительно горизонтальной оси анизотропии.

Коэффициент A в разложении (1) равен коэффициенту отражения при нормальном падении волны. Второй коэффициент $B(\phi)$, так называемый градиент AVO, может быть представлен в виде [12]

$$B(\phi) = B^{ISO} + B^{ANI} \cos[2(\phi - \phi_0)], \quad (2)$$

где B^{ISO} – его изотропная часть, равная градиенту AVO в изотропной среде; B^{ANI} – анизотропная добавка к градиенту, зависящая от параметров анизотропии среды, ϕ_0 – неизвестный азимут оси анизотропии относительно оси x . Коэффициент $C(\phi)$ в уравнении (1) вносит вклад в значение коэффициента отражения при больших углах падения.

На первом этапе алгоритма посекторного AVOA анализа определяются градиенты AVO для различных азимутов профиля (сектора). Для этого коэффициенты A , B и C зависимости (1) находим методом наименьших квадратов по данным амплитуд продольных отраженных волн для каждого азимута линии источник–приемник (сектора). Минимизируется функционал F :

$$F = \sum_i (D_i - R_i)^2 = \min,$$

где i – номер трассы в секторе; R_i – правая часть формулы (1), в которую подставлено значение соответствующего угла падения θ_i ; D_i – значение амплитуды отраженной волны, полученное из сейсмотрассы, соответствующей углу падения θ_i , и разделенное на масштабный множитель.

Коэффициенты A , B и C вычисляются из решения системы нормальных уравнений

$$\partial F / \partial A = 0, \quad \partial F / \partial B = 0, \quad \partial F / \partial C = 0.$$

На втором этапе определяется искомое направление оси анизотропии (или перпендикулярное к нему направление трещиноватости). Для этого на основе уравнения (2) записывается система нормальных уравнений метода наименьших квадратов, из которой могут быть найдены коэффициенты B^{ISO} , B^{ANI} и ϕ_0 . Третий коэффициент ϕ_0 является азимутом оси анизотропии.

Третий этап алгоритма предназначен для установления плотности трещин. Здесь используется значение коэффициента B^{ANI} , определяемое из той же системы нормальных уравнений. Формула для вычисления анизотропной составляющей градиента AVO B^{ANI} может быть записана в явном виде:

$$B^{ANI} = A \frac{\sum_j \frac{B_j}{A_j} \cos[2(\phi_0 - \phi_j)] - \frac{1}{N} \sum_j \frac{B_j}{A_j} \sum_j \cos[2(\phi_0 - \phi_j)]}{\sum_j \cos^2[2(\phi_0 - \phi_j)] - \frac{1}{N} [\sum_j \cos[2(\phi_0 - \phi_j)]]^2}, \quad (3)$$

где j – номер сектора; N – число секторов; $\frac{B_j}{A_j}$ – нормированный градиент AVO в j -секторе.

Коэффициент B^{ANI} связан с параметрами анизотропии и плотностью трещин. Эта связь зависит от модели рассматриваемых трещин. Наиболее известны две модели:

- сфероидальные трещины в форме монеты (spherical penny-shaped cracks) [10, 11];
- система параллельных плоских трещин [15, 16].

Для изолированных монетообразных трещин (spherical penny-shaped cracks) параметр анизотропии B^{ANI} определяется простой зависимостью [7]

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

Здесь e – плотность трещин; g – квадрат отношения скоростей V_S/V_P во вмещающей породе. Параметр анизотропии $\delta^{(V)}$ дополнительно зависит от флюидонасыщения трещин. Плотность трещин, заполненных газом или жидкостью, описывается выражениями [7]

$$e_{dry} = \frac{3(3 - 2g)(1 - g)}{4(-8g^2 + 12g - 3)} B^{ANI} \quad \text{– для газа;} \quad (4a)$$

$$e_{wet} = \frac{3(3 - 2g)}{16g} B^{ANI} \quad \text{– для жидкости.} \quad (4б)$$

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

Алгоритмы пополнения данных на основе трехмерного ДМО-преобразования [1]. Алгоритм 1. Для восстановления азимутально-неоднородных данных необходимо иметь два пересекающихся профиля, отработанных по методике многократных перекрытий. Для подсистемы, связанной с координатой общей средней точки, находящейся на пересечении двух профилей (рис. 1), трехмерное уравнение ДМО в цилиндрических координатах имеет следующий вид:

$$\left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial^2}{\partial X_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial X_2^2} \right) - \left(r \frac{\partial}{\partial r} + t_{nmo} \frac{\partial}{\partial t_{nmo}} \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) \right) u = 0. \quad (5)$$

Здесь u – волновое поле; (X_1, X_2) – координаты средней точки на плоскости наблюдений в глобальной декартовой системе координат X_1, X_2 ; r – удаление; ϕ – азимут; t_{nmo} – время после введения кинематической поправки.

Начально-краевые условия для этого уравнения вычисляются из наблюдаемых данных (сейсмотрасс) и могут быть записаны в виде

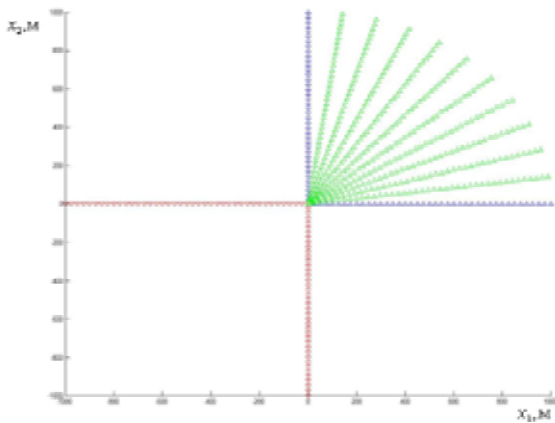


Рис. 1. Расстановка источников–приемников и восстановленные профили: (0,0) – координаты средней точки в локальной системе координат; красным цветом показаны источники, синим – приемники, зеленым – восстановленные по заданным азимутам данные

$$\begin{aligned}
 u|_{t_{nmo}=0} &= u_0(X_1, X_2, r, \phi); \\
 u|_{X_1=0} &= v_{0, X_2}(X_2, r, \phi, t_{nmo}); \quad u|_{X_1=L_1} = v_{L_1, X_2}(X_2, r, \phi, t_{nmo}); \\
 u|_{X_2=0} &= v_{X_1, 0}(X_1, r, \phi, t_{nmo}); \quad u|_{X_2=L_2} = v_{X_1, L_2}(X_1, r, \phi, t_{nmo}); \\
 u|_{\phi=\phi_1} &= w_0(X_1, X_2, r, t_{nmo}); \quad u|_{\phi=\phi_2} = w_{\phi_2}(X_1, X_2, r, t_{nmo}); \quad (6) \\
 u|_{r=0} &= q_0(X_1, X_2, \phi, t_{nmo}); \quad \frac{\partial u}{\partial r}|_{r=0} = q_1(X_1, X_2, \phi, t_{nmo}); \\
 u|_{r=R} &= q_R(X_1, X_2, \phi, t_{nmo}).
 \end{aligned}$$

Проведенные исследования показали, что данная начально-краевая задача корректна и достаточно устойчиво решается численными методами. Для ее решения использована следующая конечно-разностная схема:

$$\begin{aligned}
 r_i(u_{r_i, r_i} + u_{r_i, r_i}) - \left(r_i u_{r_i, r_i} + u_{r_i, r_i} - \frac{1}{r_i} u_r - \frac{2}{r_i^2} u_{\phi\phi} \right) - \\
 - t_k \left(u_{r_i, r_i} + \frac{1}{r_i} u_r + \frac{1}{r_i^2} u_{\phi\phi} \right) = 0, \quad (7)
 \end{aligned}$$

где $u_r = \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta r}$ и $u_{r_i} = \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta r}$ – соответственно правая и левая разностные производные в узле сетки r_i . Аналогично вычисляются производные по X_1, X_2, t_{nmo} .

Изложенный алгоритм позволяет восстановить недостающие сейсмограммы на фиктивных профилях в заданных азимутах.

Алгоритм 2. Пополнение данных на основе трехмерного ДМО-преобразования с использованием метода наименьших квадратов. Конечно-разностная схема (7), как и любая конечно-разностная схема, по сути является системой алгебраических уравнений, аппроксимирующих с некоторой точностью исходное дифференциальное уравнение. Поэтому ее можно представить в виде

$$Am = b, \quad (8)$$

где m и b – векторы размерности N ; A – матрица размерности $N \times N$.

Пусть нам известны некоторые значения вектора m : $m_{i_1} = c_1, m_{i_2} = c_2, \dots, m_{i_n} = c_n$; $n < N$. Тогда система (8) переписывается в виде

$$\begin{cases} Am = b; \\ Bm = c, \end{cases} \quad (9)$$

где $c = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$; B – матрица размерности $N \times n$, элементы которой имеют вид

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & j = j_i, \\ 0, & j \neq j_i, \end{cases} \quad i = 1, \dots, n.$$

Систему (9) можно переписать в виде

$$\tilde{A}m = \tilde{b}, \quad (10)$$

где $\tilde{A} = \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}$, $\tilde{b} = \begin{pmatrix} b \\ c \end{pmatrix}$.

Умножив в системе (10) левую и правую части слева на \tilde{A}^T , окончательно получим систему уравнений

$$Km = \tilde{A}^T \tilde{A}m = \tilde{A}^T \tilde{b} = p,$$

где K – квадратная симметричная матрица размерности $N \times N$; p – вектор размерности N .

В сущности описанный метод является методом наименьших квадратов с конечно-разностным регуляризатором. Он позволяет учитывать не только граничные условия, но и известные данные внутри восстанавливаемой области, что дает возможность значительно улучшить результат восстановления.

Алгоритм пополнения данных по амплитудам отраженных волн. Предполагается, что переход от амплитуд отраженных волн к коэффициентам отражения известен. В основе алгоритма лежит интерполяция значений коэффициентов отражения на равномерной сетке по удалениям и азимутам. Для этого коэффициент отражения продольной волны в радиальных направлениях аппроксимируется полиномами второй степени: $R(x) = ax^2 + bx + c$, где $x = \theta$ (θ – угол падения волны на границу).

В азимутальном направлении при постоянных удалениях от источника коэффициент отражения аппроксимируется косинусоидами: $R(y) = k + m \cos [2(n + y)]$, где y – азимут точки наблюдения в градусах. Коэффициенты аппроксимационных формул a, b, c, k, m, n определяются методом наименьших квадратов.

Тестирование разработанных алгоритмов на модельных данных. Тестирование программ проводилось на модельных данных для Юрубчено-Тохомской зоны. Обобщенная модель зоны представлена 11-слоистой горизонтальнослоистой средой с двумя трансверсально-изотропными слоями. Верхний слой соответствует анизотропной ВЧР, нижний анизотропный слой имитирует трещиноватые рифейские отложения. Направления

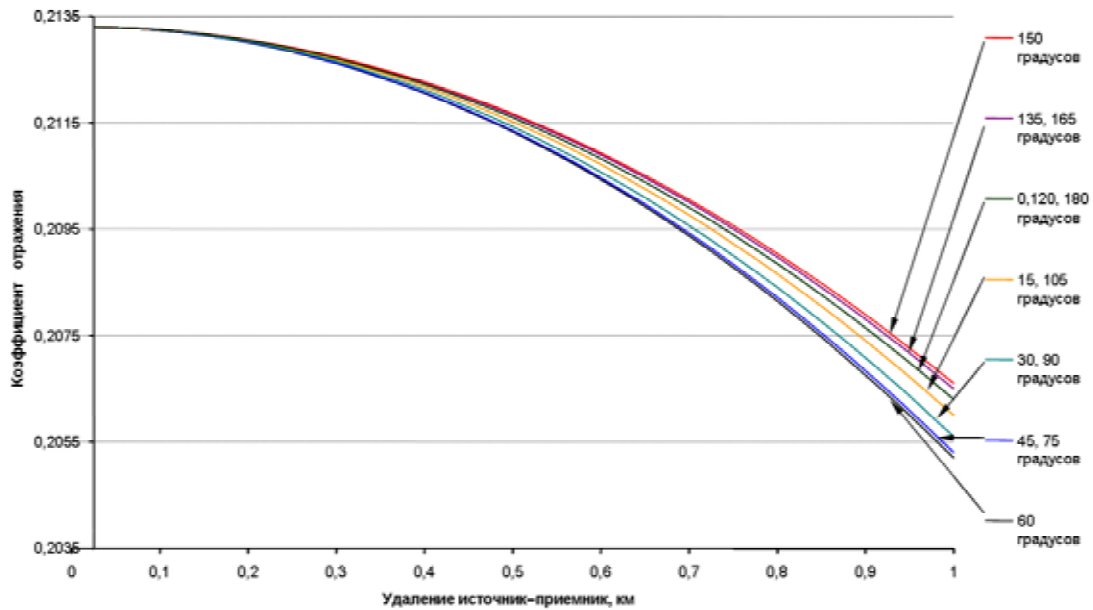


Рис. 2. Коэффициенты отражения продольной волны от границы R_0 (поверхность рифея) для различных азимутов профиля

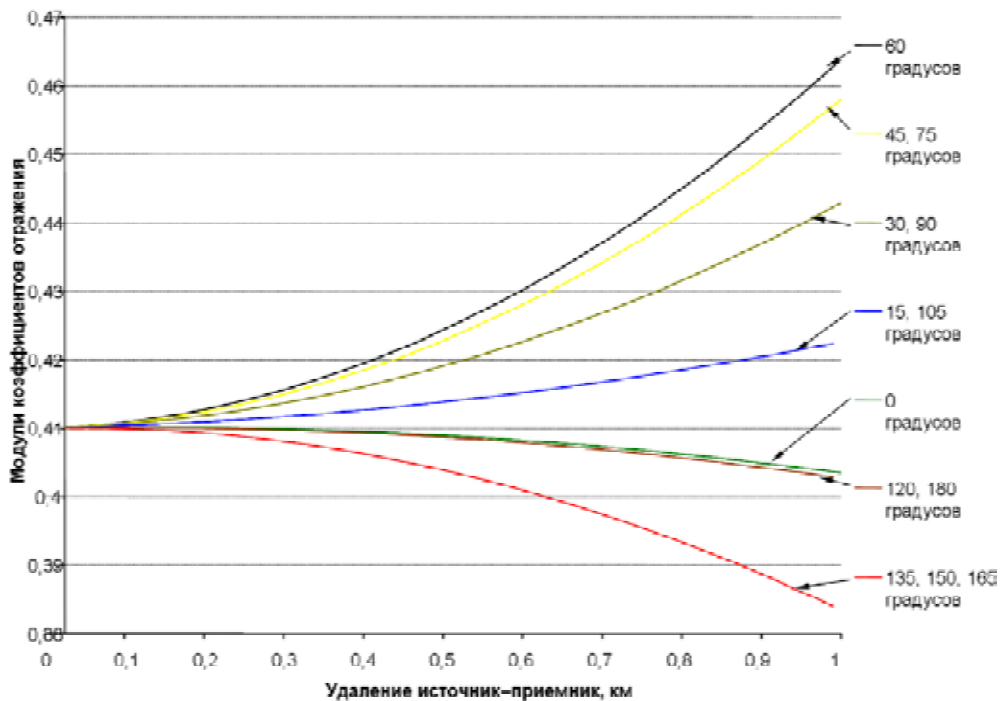


Рис. 3. Модули коэффициентов отражения продольной волны от рифейской границы R_4 для различных азимутов профиля

осей симметрии в анизотропных слоях горизонтальны и составляют с осью X углы 30° и 60° в верхнем и нижнем слоях соответственно. Были построены зависимости коэффициентов отражения от удалений до источника для горизонтов R_0 и R_4 (кровля и подошва анизотропных рифейских отложений), представленные на рис. 2, 3. Расчеты выполнялись по формулам лучевого метода для анизотропных слоистых сред [3, 4]. Трехкомпо-

нентные синтетические сейсмограммы получены для трех профилей с азимутами 0° , 45° , 90° (расчеты выполнены в ГФУП ВНИИГеофизика). Вычислялись векторы смещений P - и PS -волн для источника типа “центр давления”, расположенного на глубине 10 м от свободной поверхности. Трехкомпонентная система наблюдений располагалась на свободной поверхности среды. Интервал удалений 0–3000 м, шаг точек наблюдения

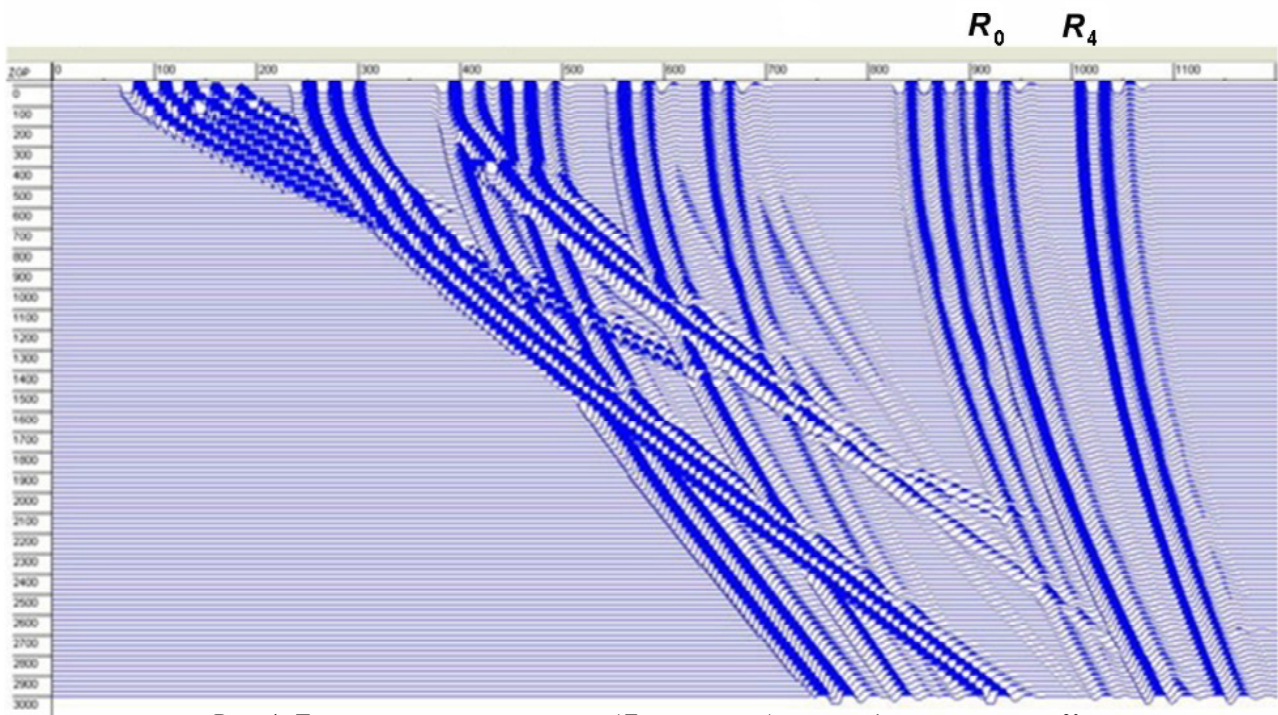


Рис. 4. Теоретическая сейсмограмма (Z -компонента) для профиля с азимутом 0°

25 м. На рис. 4 в качестве примера показана синтетическая сейсмограмма продольных и обменных волн (z -компонента) по профилю с азимутом 0° . Индексами R_0 и R_4 помечены отраженные продольные волны от кровли и подошвы рифейских отложений.

Алгоритм посекторного AVOA анализа. Тестирование выполнено по коэффициентам отражения от границы R_0 . На теоретические значения коэффициентов отражения накладывался случайный шум, составляющий 10 % среднего уровня коэффициента отражения на базе наблюдения. Вначале исследовалось, как влияет регистрация амплитуд волн в различных диапазонах удалений от источника на точность определения направления оси симметрии. Входная информация задавалась на семи профилях. Показано, что наиболее информативны средние удаления. На средних удалениях от 1000 до 2000 м погрешность определения угла ϕ_0 не превышает $0,25^\circ$. При использовании только ближних удалений до 1000 м ошибка определения направления оси симметрии составляет 4° . На малых удалениях до 500 м алгоритм работает неустойчиво, что связано с плохим разрешением по азимуту коэффициентов отражения вблизи источника. На дальних расстановках сейсмоприемников (1500–2500 м) погрешность решения обратной задачи возрастает до $1,6^\circ$ из-за погрешностей линейной аппроксимации (см. рис. 2, 3).

Большое влияние на точность решения обратной задачи оказывает неполнота данных по азимутам. Погрешность определения направления оси анизотропии растет при уменьшении количества профилей, особенно важно наличие профилей с азимутами, близкими к направлению оси

симметрии. Численные эксперименты проведены на пяти профилях с азимутами 20, 35, 50, 80, 105 градусов, из которых один профиль (азимут 50°) близок к ориентации оси анизотропии в рифейских отложениях (азимут 60°). При наличии данных на этом профиле погрешность определения угла ϕ_0 равна $1,5^\circ$, при их отсутствии она возрастает до $3,7^\circ$. На профилях с азимутами 20, 90, 105, 150 градусов, среди которых нет ни одного профиля, близкого по направлению к оси симметрии, но есть профиль, который проходит вдоль направления трещин (азимут 150°), получена погрешность $4,5^\circ$. Таким образом, отсутствие профилей, ориентированных вкрест трещиноватости, уменьшает точность определения параметров коллектора. Погрешности возрастают еще больше, если наблюдаемые данные имеются только на трех профилях (это минимально возможное количество профилей для решения обратной задачи). На рис. 5 видно, что при уровне помехи 10 % ошибка определения направления трещиноватости достигает $7,5^\circ$. Общее число точек не оказывает существенного влияния на точность решения обратной задачи.

Алгоритм пополнения данных по амплитудам отраженных волн. Тестирование алгоритма проводилось по теоретическим коэффициентам отражения и синтетическим сейсмограммам. Изучалось влияние пополнения данных по удалениям и азимутам на точность определения оси симметрии. На рис. 5 показаны зависимости абсолютной погрешности определения оси симметрии от уровня случайного шума до и после пополнения при наличии исходных данных о коэффициентах отражения на трех профилях. В результате пополнения данных с

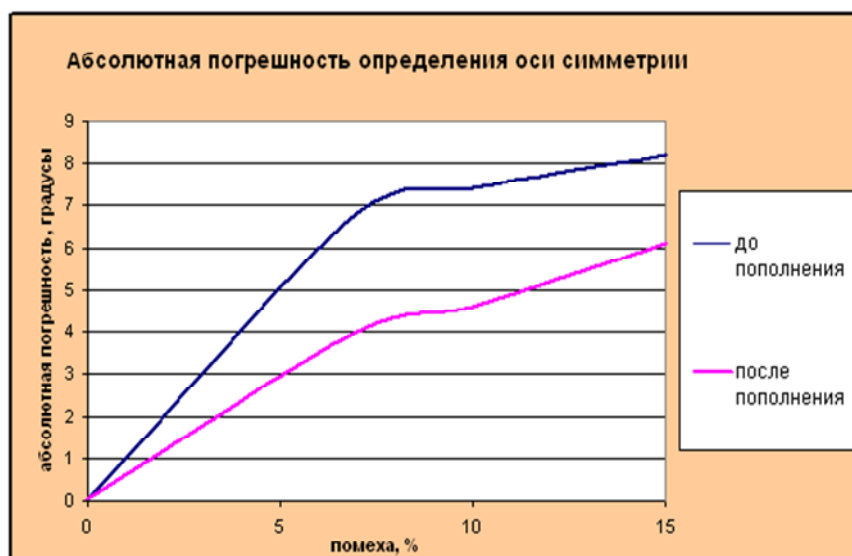


Рис. 5. Абсолютная погрешность определения оси симметрии при разном уровне шума. Входные данные на трех профилях с азимутами 20°, 80°, 105°. Пополнение данных с шагом 15° по азимуту

шагом 15° по азимуту погрешность определения направления оси анизотропии уменьшается примерно на 3°. Алгоритм AVOA работает эффективно при уровне помех не более 15–20 %.

Дальнейшее тестирование алгоритма осуществлялось по синтетическим сейсмограммам. В программном пакете VspLab были получены значения амплитуд Z -компоненты отраженных продольных волн от горизонтов R_0 и R_4 по трем профилям с азимутами 0°, 45°, 90°. Затем в амплитуды были введены поправки за расхождение фронта волны в амплитуды и установлено направление трещин по программе AVOA. Направление трещин для границы R_0 отличается от модельных данных на 13,5°, для границы R_4 — на 1,4°. Меньшая точность решения обратной задачи по горизонту R_0 связана с мешающим влиянием интерференции различных отраженных волн на удалениях 1300–1400 м (см. рис. 4).

Далее на синтетические сейсмограммы была наложена случайная помеха, составляющая 10 % от амплитуд полезных волн. При наличии помех направление трещин по горизонту R_4 определяется с ошибкой порядка 10°. После пополнения данных по азимутам с шагом 25° ошибка уменьшилась примерно на 7° и составила 3,2°. Для пополнения использовались амплитуды отражения от горизонта R_4 на удалениях 0–3000 м. Таким образом, алгоритм пополнения данных в массиве амплитуд обеспечивает существенное увеличение точности решения обратной задачи.

Алгоритмы пополнения данных на основе ДМО-преобразования. Алгоритм 1. Для численной проверки разностной схемы была использована простейшая модель двухслойной среды с наклонной отражающей границей. На рис. 1 показана расстановка источников—приемников для двух ортого-

нальных профилей, проходящих через выделенную среднюю точку, и восстанавливаемые по заданным азимутам профили. Эксперименты проводились на моделях с углом наклона границы 10, 15 и 20 градусов. Из анализа восстановленных сейсмограмм следует, что алгоритм достаточно хорошо работает для наклонов границы до 20°. Восстановленные сейсмограммы практически совпадают с теоретическими. На больших удалениях от источника форма отраженной волны незначительно искажается, однако данный алгоритм можно использовать и в этом случае.

Для апробации алгоритма в качестве исходных данных взяты Z -компоненты синтетических сейсмограмм по профилям с азимутами 0° и 90°. В них введены кинематические поправки и проведен расчет волнового поля по алгоритму пополнения для профиля с азимутом 45°. Фрагмент полученной сейсмограммы показан на рис. 6. Видно, что отражения от горизонтов R_0 и R_4 восстанавливаются очень хорошо. По синтетическим сейсмограммам для азимуты 0° и 90° и восстановленной сейсмограмме для азимута 45° были сняты амплитуды по отражению R_4 , в них введена поправка за расхождение фронта волны и определен азимут оси симметрии по программе AVOA. Направление трещин, установленное для границы R_4 , отличается от модельных данных на 2,8°. При наличии помех направление трещин по горизонту R_4 определяется с ошибкой 3,5°. Следовательно, точность решения обратной задачи по трем профилям с восстановленной информацией на третьем профиле выше, чем в случае с имеющейся зашумленной входной информацией на трех профилях (ошибка порядка 10°). Можно предположить, что это связано с устранением случайной помехи на восстановленном профиле при ДМО-преобразовании.

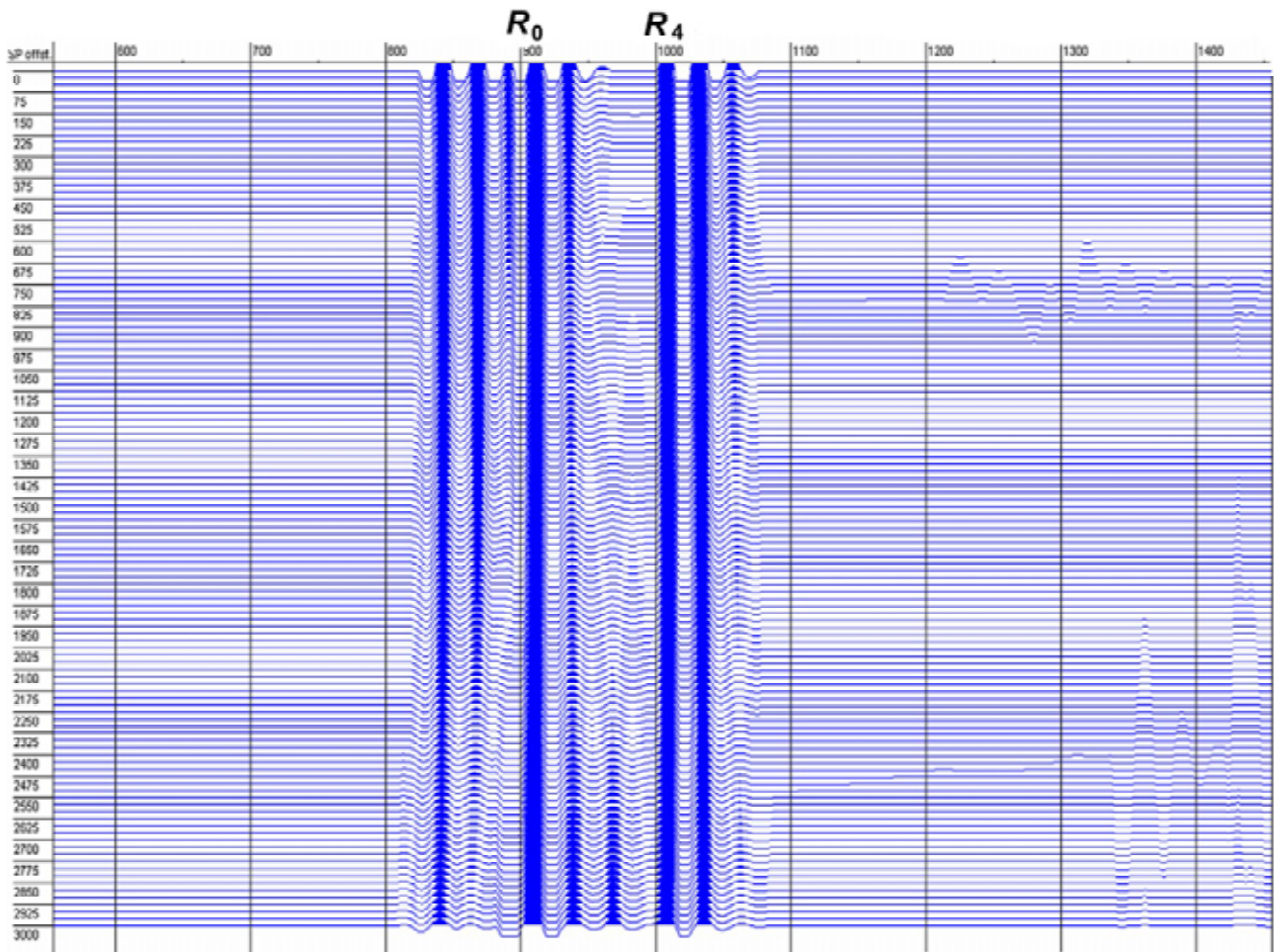


Рис. 6. Фрагмент восстановленной сейсмограммы (Z -компонента) после ввода кинематических поправок для профиля с азимутом 45°

Были сделаны попытки решать обратную задачу по пяти профилям с азимутами 0 , $22,5$, 45 , $67,5$ и 90 градусов. В этом случае погрешность определения направления оси симметрии увеличивается до $3,9^\circ$ для данных без шума и до $7,9^\circ$ для данных с шумом. По-видимому, малые ошибки в динамике восстановленного волнового поля накапливаются, в связи с чем нецелесообразно использовать этот алгоритм ДМО-преобразования для пополнения данных на большом количестве профилей.

Алгоритм 2. Для тестирования алгоритма ДМО-преобразования, основанного на методе наименьших квадратов, в качестве исходных данных были использованы Z -компоненты синтетических сейсмограмм по профилям с азимутами 0° и 90° . В качестве дополнительных данных для метода наименьших квадратов взяты Z -компоненты синтетических сейсмограмм по профилю с азимутом 45° . Было восстановлено 11 профилей с шагом 9° по азимуту в секторе от 0° до 90° . По ним решена обратная задача. Погрешность определения оси симметрии по данным без шума составила $3,3^\circ$, а с шумом — $3,8^\circ$. Таким образом, можно сделать вывод, что использование метода наименьших квадратов с конечно-разностным ре-

гуляризатором позволяет с достаточно большой точностью восстанавливать динамику полезных волн на сейсмических трассах и избавляться от шума на них.

Заключение. В статье рассмотрены алгоритмы восполнения площадных сейсмических данных для многократной системы наблюдения при отсутствии части исходных данных или в случае неравномерного их представления по каким-либо координатам, например, по удалениям или азимутам. Для решения задачи восполнения наблюдаемых 3D данных применены два подхода: восстановление недостающих сейсмограмм на основе трехмерного ДМО-преобразования и восстановление амплитуд отраженных волн. В рамках первого направления разработаны два алгоритма. Первый из них является численным алгоритмом решения трехмерного уравнения ДМО. Расчеты проводятся с помощью конечно-разностной схемы. Второй алгоритм основан на методе наименьших квадратов с конечно-разностным регуляризатором для уравнения ДМО. По второму направлению разработан и реализован алгоритм для пополнения данных в массиве амплитуд отраженных волн, основанный на интерполяции наблюдаемых амплитуд на равномерной сетке по

удалениям и азимутам. Решение обратной задачи по определению параметров азимутально-анизотропной среды осуществлено по программе посекторного AVOA анализа.

Основные результаты проведенных исследований следующие.

1. На тестовом материале выполнено исследование точности и устойчивости решения обратной задачи (определение направления трещин) по алгоритму посекторного AVOA анализа в условиях неоптимальной системы наблюдений. Показано, что наиболее информативны наблюдения на средних и больших удалениях. Неполнота данных по азимутам вносит значительную погрешность в ориентацию трещин. Особенно большое значение имеет наличие профилей с азимутами, близкими к направлению оси симметрии азимутально-анизотропной среды.
2. Пополнение данных в массиве амплитуд по удалениям и азимутам приводит к повышению точности определения преобладающего направления трещин на 3–7° при помехе не более 15 %.
3. Алгоритм 1 пополнения данных на основе ДМО-преобразования дает возможность получить восстановленные сейсмограммы, очищенные от случайных помех. Этот алгоритм хорошо восстанавливает кинематику волн. Форма волны немного искажается на больших удалениях источник–приемник. Установлено, что пополнение данных на одном профиле по имеющейся информации на двух других профилях, во-первых, позволяет решить обратную задачу и, во-вторых, повышает точность ее решения. Дальнейшее увеличение количества восстановленных профилей ухудшает результат вследствие накопления алгоритмической погрешности.
4. Алгоритм 2 пополнения данных на основе ДМО-преобразования, базирующийся на методе наименьших квадратов с конечно-разностным регуляризатором, дал весьма хорошие результаты. Он позволяет восстанавливать данные с большой точностью на любом количестве профилей, что обеспечивает повышение точности определения параметров азимутально-анизотропной среды.
5. В целом проведенные исследования показали, что все разработанные алгоритмы пополнения площадных данных обеспечивают существенное увеличение точности решения задачи AVO инверсии. Необходима дальнейшая апробация этих алгоритмов на реальных данных.

Выражаем большую благодарность С.В. Гольдину за постановку задачи и М.В. Черепанову за предоставленные компьютерные программы.

1. Мезенцев Е.В. Использование трехмерного уравнения ДМО для восстановления азимутально-неоднородных сейсмических данных: Восьмая уральская молодежная школа по геофизике: Сб. науч. материалов. – Пермь, 2007. – С. 154–158.
2. Нефедкина Т.В., Мезенцев Е.В., Меликов Р.Ф. AVO инверсия с восполнением данных площадных наблюдений продольных волн. Материалы Междунар. конф. геологов и геофизиков, 4–7 дек. 2007, Тюмень, Россия, N 18.
3. Оболенцева И.Р., Гречка В.Ю. Лучевой метод в анизотропной среде (алгоритмы, программы). – Новосибирск, 1989. – 225 с.
4. Распространение объемных волн и методы расчета волновых полей в анизотропных упругих средах / Под ред. Г.И. Петрашеня. – Л.: Наука, 1984. – 282 с.
5. Чичина Т.И., Сабинин В.И., Корсунов В.И., Ронкийо-Харийо Х. Амплитудный анализ отраженных продольных волн в азимутально-анизотропных средах при разведке нефтегазовых резервуаров // Доклады междунар. науч. конф. “Сейсмические исследования земной коры”. – Новосибирск, 2004. – С. 196–202.
6. Ata E., Michelena R.J. Mapping distribution of fractures in a reservoir with P-S converted waves // The Leading Edge. 1996. – 12. – P. 664–676.
7. Bakulin A., Grechka V., Tsavkin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data. P. I: HTI model due to a single fracture set // Geophysics. – 2000. – 65. – P. 1788–1802.
8. Fontana P., Summers T. Report on EAGE Vienna 2006 workshop on marine multi-azimuth seismic // First Break. 2007. – 25. – P. 35–38.
9. Goldin S.V. Theoretical aspects of 3-D DMO: 72nd Ann. Int. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Salt Lake City, Oct. 6–11, 2002, Tulsa, Expanded Abstr. – Tulsa, 2002. – P. 2333–2336.
10. Hudson J.A. Overall properties of a crack solid: Math // Proc. Camb. Phil. Soc. 1980. – 88. – P. 371–384.
11. Hudson J.A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. – 1981. – 64. – P. 133–150.
12. Mallic S., Craft K.L., Meister L.J., Chambers R.E. Determination of the principal directions of azimuthal anisotropy from P-wave seismic data // Geophysics. – 1998. – 63. – P. 692–706.
13. Perez M.A., Gibson R.L., Toksoz M.N. Detection of fracture orientation using azimuthal variation of P-wave AVO responses // Ibid. – 1999. – 64, № 4. – P. 1253–1265.
14. Ruger A. Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media // Ibid. – 1998. – 63. – P. 935–947.
15. Schoenberg M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces // J. Acoust. Soc. Amer. – 1980. – 68. – P. 1516–1521.
16. Schoenberg M., Douma J. Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks // Geophysical Prospecting. – 1988. – 36. – P. 571–590.
17. Thomsen L. Reflection seismology over azimuthally anisotropic media // Geophysics. – 1988. – 53, № 3. – P. 304–313.

Поступила в редакцию 18.02.2008 г.

Т.В. Нефедкина, Е.В. Мезенцев, Р.Ф. Меликов

НОВЫЕ АСПЕКТЫ ВОСПОЛНЕНИЯ ДАННЫХ 3D НАБЛЮДЕНИЙ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ АЗИМУТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

На модельных данных проведено исследование точности работы алгоритма посекторного AVOA анализа в условиях неоптимальных систем площадных наблюдений. Алгоритм предназначен для определения направления и плотности трещин нефтяного коллектора по отраженным продольным волнам. Показано, что наиболее информативны средние и большие удаления. Точность решения обратной задачи возрастает при увеличении количества профилей, особенно большое значение имеет наличие профилей с азимутами, близкими к направлению вкрест трещиноватости. Разработаны алгоритмы и компьютерные программы для пополнения данных в условиях неоптимальных систем наблюдений. Для восстановления недостающих сейсмограмм предложены два алгоритма, основанных на трехмерном преобразовании DMO (dip-moveout). Следующий алгоритм, основанный на аппроксимации амплитуд наблюдаемых отраженных волн, восстанавливает амплитуды в “пустых” интервалах по удалениям и азимутам. Тестирование разработанных алгоритмов показало, что восполнение недостающих данных повышает точность определения направления трещин на 3° – 7° .

Т.В. Нефедкина, Е.В. Мезенцев, Р.Ф. Меликов

НОВІ АСПЕКТИ ЗАПОВНЕННЯ ДАНИХ 3D СПОСТЕРЕЖЕНЬ ПОДОВЖНІХ ХВИЛЬ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ АЗИМУТНОГО АНАЛІЗУ

На модельних даних проведено дослідження точності роботи алгоритму посекторного AVOA аналізу в умовах неоптимальних систем площадкових спостережень. Алгоритм призначено для визначення напрямку і щільності тріщин нафтового колектору за відбитими подовжніми хвилями. Показано, що найінформативнішими є середні та великі віддалі. Точність розв'язку оберненої задачі зростає зі збільшенням кількості профілів, особливо велике значення має наявність профілів з азимутами, близькими до напрямку поперек тріщиноватості. Розроблено алгоритми і комп'ютерні програми для поповнення даних в умовах неоптимальних систем спостережень. Для відновлення сейсмограм, яких бракує, запропоновано два алгоритми, що ґрунтуються на тривимірному перетворенні DMO (dip-moveout). Наступний алгоритм, який ґрунтується на апроксимації амплітуд спостережених відбитих хвиль, відновлює амплітуди в “порожніх” інтервалах за віддаленнями та азимутами. Тестування розроблених алгоритмів показало, що заповнення даних, яких бракує, підвищує точність визначення напрямку тріщин на 3° – 7° .