



ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОВАТОЙ СРЕДЫ ПО ДАННЫМ ОБ АНИЗОТРОПИИ СКОРОСТЕЙ И ПОГЛОЩЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Г.А. Дугаров¹, И.Р. Оболенцева¹, Т.И. Чичинина²

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия, e-mail: geserdugarov@gmail.com, irobolentseva@ngs.ru

²Мексиканский институт нефти, Мексика, Eje Central Lazaro,
Cardenas 152, 07730, Mexico D.F., Mexico, e-mail: tichqvoa@yahoo.com

Решается обратная задача о распространении волн в поглощающей трансверсально-изотропной среде – эффективной модели изотропной среды, содержащей систему параллельных трещин. Среда характеризуется матрицей модулей упругости – поглощения, элементы которой зависят от шести параметров – двух констант Ламе изотропной среды и четырех констант, описывающих трещины: действительных и мнимых частей комплекснозначных ослабленностей, нормальной и касательной. Обратная задача ставится как задача нахождения четырех параметров трещин по анизотропии скоростей и поглощения волн qP , qSV и SH , наблюдаемой в заданном диапазоне направлений их распространения. Решение состоит в минимизации методом наименьших квадратов невязки между наблюдаемыми и теоретическими значениями скоростей и поглощения. Анализ решения приводит к следующим выводам. По данным квазипродольных волн qP хорошо определяются только нормальные ослабленности. Касательные ослабленности оптимально определять по данным поперечных волн SH , а квазипоперечные волны qSV можно использовать только при отсутствии петель на поверхностях лучевых скоростей. Наилучшие результаты дает совместное использование волн qP и SH в окрестности оси симметрии среды.

Трещиноватые коллекторы, анизотропия скоростей и поглощения

ESTIMATION OF FRACTURED MEDIUM PARAMETERS FROM DATA ON VELOCITY-ATTENUATION ANISOTROPY OF SEISMIC WAVES

G.A. Dugarov¹, I.R. Obolentseva¹, T.I. Chichinina²

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Acad. Koptuyga prosp., 3, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: geserdugarov@gmail.com, irobolentseva@ngs.ru

²Instituto Mexicano del Petroleo, Eje Central Lazaro,
Cardenas 152, 07730, Mexico D.F., Mexico, e-mail: tichqvoa@yahoo.com

An inverse problem of wave propagation in an attenuative transversely isotropic medium is solved. The medium is represented as an effective model of an isotropic medium with a system of parallel fractures. It is characterized by the matrix of elasticity-attenuation moduli with elements depending on six parameters: the two are Lamé constants of an isotropic background, and the four constants describe fractures, which are real and imaginary parts of complex-valued weaknesses, normal and tangential ones. The inverse problem is posed as a problem to find the four fracture parameters from the anisotropy of qP -, qSV -, and SH -waves velocities and attenuations observed in the preset interval of propagation directions. A solution is in minimization by the least square method of residuals between the observed and theoretical values of velocities and attenuations. The analysis of the solution of the forward problem and investigation of the properties of the minimized target function lead to the following conclusions. Data on the quasi-compressional wave qP permit to determine reasonably well only the normal weaknesses. The tangential weaknesses are best determined from shear-wave SH data, whereas the quasi-shear waves qSV are useful only in the absence of loops at the surfaces of ray velocities. The best results are attained by the joint use of qP - and SH -waves in the vicinity of the symmetry axis of the medium.

Fractured collectors, velocity and attenuation anisotropy

ВВЕДЕНИЕ

В развитии способов интерпретации записей сейсмических волн можно выделить два этапа: этап кинематической интерпретации – от ~1930-х годов до ~1960–1980-х, и этап кинематической и динамической интерпретации – от ~1960–1980-х годов и по настоящее время. На протяжении второго этапа вовлечение в интерпретацию динамических характеристик происходило по двум направлениям. Чаще всего они применя-

лись к интерпретации как дополнение к кинематическим, т. е. определялись и использовались не только времена прихода волн, но и амплитуды. Альтернативный подход – решение обратной динамической задачи, т. е. определение параметров среды, по полному волновому полю, без выделения отдельных волн.

На протяжении последних двух десятилетий серьезным шагом на пути использования амплитуд сейс-

мических волн явилось создание и развитие метода AVO (Amplitudes Versus Offset – амплитуды в функции расстояния), в котором амплитудами названы коэффициенты отражения. Метод AVO дает возможность находить скорости продольных (P) и поперечных (S) волн в среде ниже отражающей границы при известных скоростях P - и S -волн в среде над отражающей границей. Разработаны модификации метода AVO для анизотропных сред. В случае азимутальной анизотропии, связанной с вертикальной трещиноватостью пород, используют метод AVOA (Amplitudes Versus Offset and Azimuth – амплитуды в функции расстояния и азимута), который позволяет определить ориентацию системы вертикальных трещин и тип заполняющего их флюида. Другим важным направлением применения амплитуд стало нахождение поглощения по убыванию амплитуд в функции расстояния (QVO, QVOA). Это направление существенно отличается от направления AVO, AVOA тем, что позволяет находить принципиально другой параметр среды, одну из ее реологических характеристик. Изменение поглощения во многих случаях непосредственно связано с наличием газовых залежей. Вопрос о возможности поиска углеводородов на основе этого параметра обсуждался еще в 1980-е годы (“прямые поиски”), в настоящее время вновь возник интерес к измерению поглощения с целью поиска коллекторов.

Развитие в 1960–1980 гг. многоволновой сейсморазведки, основанной на использовании волн разной поляризации (P , S , PS), привело к осознанию того, что существует еще одно свойство геологической среды – анизотропия упругих свойств, – которым ни в коем случае нельзя пренебрегать и, более того, можно и нужно использовать. Ряд лет изучалась в основном анизотропия скоростей, причем для разведочной сейсмики важной оказалась азимутальная анизотропия скоростей, вызванная ориентированной, преимущественно вертикальной, трещиноватостью пород. Несколько позднее, в последнее десятилетие, стали исследовать анизотропию поглощения сейсмических волн, а именно азимутальную анизотропию поглощения, вызванную так же, как анизотропия скоростей, наличием в среде ориентированных трещин.

Настоящая работа посвящена решению обратной задачи – определению параметров системы параллельных трещин в изотропной среде по анизотропии скоростей и поглощения волн трех типов: qP , qSV , SH . Моделью среды, в рамках которой решается данная задача, является поглощающая трансверсально-изотропная среда с осью симметрии, перпендикулярной плоскостям трещин. Для этой модели нами получено и проанализировано решение прямой задачи [1]. Оно служит основой для представленного в настоящей работе решения обратной задачи.

МОДЕЛЬ СРЕДЫ

Исходная среда считается состоящей из одинаковых изотропных тонких слоев, на границах между которыми выполняются условия нежесткого контакта: напряжения равны, а смещения терпят разрыв. Для волн, длины которых много больше толщин отдельных слоев и тем более промежутков между слоями, такая среда в приближении линейной связи между напряжениями и деформациями аппроксимируется эффективной моделью: трансверсально-изотропной средой с осью симметрии, перпендикулярной плос-

костям трещин. Эта модель впервые предложена К.Д. Клем-Мусатовым с соавторами [2, 3]. Затем такую же модель представил М. Schoenberg [4, 5], который вместе с соавторами посвятил ей около десятка работ и довел до практического применения. Кроме того, еще позднее ту же по сути модель предложили и рассмотрели другие авторы [6–9]. Такая модель привлекательна тем, что она наиболее адекватно описывает изотропную среду с ориентированными трещинами, а также тем, что она справедлива и для среды, в которой ориентированными являются не протяженные трещины (в теории – промежутки между параллельными плоскостями), а так называемые пенниобразные трещины, плоскости которых параллельны друг другу [10]. Будем использовать для данной модели название LSTI (Linear Slip Transversely Isotropic – с линейным проскальзыванием трансверсально-изотропная).

Поглощение в модель LSTI введено Т.И. Чичиной с соавторами [11–16]. Матрица модулей упругости–поглощения \tilde{C} для поглощающей среды LSTI (эту среду мы обозначаем $LST\tilde{I}$) в системе координат xuz с осью симметрии по z имеет вид

$$\tilde{C} = \begin{pmatrix} M(1-\xi^2\tilde{\Delta}_N) & \lambda(1-\xi\tilde{\Delta}_N) & \lambda(1-\tilde{\Delta}_N) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(1-\xi\tilde{\Delta}_N) & M(1-\xi^2\tilde{\Delta}_N) & \lambda(1-\tilde{\Delta}_N) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda(1-\tilde{\Delta}_N) & \lambda(1-\tilde{\Delta}_N) & M(1-\tilde{\Delta}_N) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu(1-\tilde{\Delta}_T) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu(1-\tilde{\Delta}_T) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где λ , μ – константы Ламе среды без трещин; $M = \lambda + 2\mu$, $\xi = \lambda/M$; $\tilde{\Delta}_N$, $\tilde{\Delta}_T$ – нормальная (N) и касательная (T) ослабленности, характеризующие упругие и поглощающие свойства модели, связанные с наличием трещин. Матрица \tilde{C} содержит четыре независимые константы: две действительные (λ , μ) и две комплексные ($\tilde{\Delta}_N$, $\tilde{\Delta}_T$). Упругие свойства модели $LST\tilde{I}$, зависящие от исходной изотропной среды и трещин в ней, полностью описываются матрицей \tilde{C} , а что касается поглощения, то матрица \tilde{C} описывает только поглощение, вызванное трещинами, а изотропная среда, содержащая трещины, считается не поглощающей.

Действительные и мнимые части комплексных ослабленностей $\tilde{\Delta}_N = \Delta_N - i\Delta'_N$, $\tilde{\Delta}_T = \Delta_T - i\Delta'_T$ подчиняются неравенствам

$$0 < \Delta'_N \ll \Delta_N < 1, \quad 0 < \Delta'_T \ll \Delta_T < 1. \quad (2)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ МОДЕЛИ $LST\tilde{I}$

Скорости $V(\mathbf{n})$ и поглощение $Q^{-1}(\mathbf{n})$

Распространение в среде $LST\tilde{I}$ плоской волны круговой частоты ω с волновой нормалью \mathbf{n} описывается полем смещений

$$\tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{r}, t) = A\tilde{\mathbf{p}}(\mathbf{n}) \exp\left(i\omega\left(t - \mathbf{nr}/\tilde{V}(\mathbf{n})\right)\right), \quad (3)$$

удовлетворяющим волновому уравнению

$$\tilde{c}_{ijkl} \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_k} = \rho \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial t^2}. \quad (4)$$

Здесь ρ – плотность; A – константа; $\tilde{\mathbf{p}} = (\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \tilde{p}_3)$ – вектор поляризации; \tilde{V} – так называемая комплексная скорость, подробнее см. в [1]. Подстановка выражения (3) в уравнение (4) приводит к следующей системе уравнений относительно компонент вектора поляризации $\tilde{\mathbf{p}}$:

$$\tilde{c}_{ijk} n_j n_k \rho^{-1} \tilde{p}_l = \tilde{V}^2 \tilde{p}_l. \quad (5)$$

Выражение $\tilde{c}_{ijk} n_j n_k \rho^{-1}$ в (5) есть тензор второго ранга с комплексными компонентами, т. е. комплексный тензор Кристоффеля. Уравнения Кристоффеля (5) показывают, что вектор поляризации $\tilde{\mathbf{p}}$ волны, распространяющейся в направлении волновой нормали \mathbf{n} , является собственным вектором тензора Кристоффеля, а квадрат комплексной скорости \tilde{V}^2 – собственным значением.

Решение системы уравнений (5) сводится к нахождению комплексных собственных значений и собственных векторов тензора Кристоффеля $\tilde{c}_{ijk} n_j n_k \rho^{-1}$. Как и в случае действительного тензора Кристоффеля, его комплексный аналог имеет три собственных значения, являющихся комплексными, каждому из которых соответствует свой комплексный собственный вектор. Фазовые скорости $V_m(\mathbf{n})$ и поглощение $Q_m^{-1}(\mathbf{n})$ трех типов волн, $m = qP, qSV, SH$, с волновой нормалью \mathbf{n} выражаются через собственные значения \tilde{V}_m^2 тензора Кристоффеля $\tilde{c}_{ijk} n_j n_k \rho^{-1}$ следующим образом [1]:

$$V_m(\mathbf{n}) = \frac{|\tilde{V}_m(\mathbf{n})|^2}{\text{Re } \tilde{V}_m(\mathbf{n})}, \quad Q_m^{-1}(\mathbf{n}) = \frac{\text{Im} [\tilde{V}_m^2(\mathbf{n})]}{\text{Re} [\tilde{V}_m^2(\mathbf{n})]}, \quad (6)$$

поглощение $Q_m^{-1}(\mathbf{n})$ есть обратная величина добротности $Q_m(\mathbf{n})$.

Вид функций $V(\mathbf{n})$, $Q^{-1}(\mathbf{n})$ в зависимости от параметров трещин

В статье [1] представлены результаты расчетов функций $V_m(\alpha)$, $Q_m^{-1}(\alpha)$, $m = qP, qSV, SH$, где α – угол между волновой нормалью \mathbf{n} и осью симметрии среды z , для модели LSTI с разными значениями параметров $\gamma = V_{S, \text{iso}}/V_{P, \text{iso}}$, Δ_N , Δ_T , Δ_N^I , Δ_T^I , характеризующих изотропную среду ($V_{S, \text{iso}} = \sqrt{\mu/\rho}$, $V_{P, \text{iso}} = \sqrt{(\lambda+2\mu)/\rho}$) и трещины (Δ_N , Δ_T , Δ_N^I , Δ_T^I). Параметры трещин задавались на основе неравенств (2) и данных физического моделирования [17] на пластинчатой модели, имитирующей изотропную среду с параллельными плоскостями трещин.

На рис. 1 показано, как выглядят функции (6) при различных значениях параметров трещин, приведенных в табл. 1, 2. Параметр γ выбран равным 0,6 (при $V_{P, \text{iso}} = 5 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$, $V_{S, \text{iso}} = 3 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$), так как при больших значениях γ все эффекты для волн qP и qSV выглядят более ярко. Изображенные кривые 1–5 отобраны как наиболее характерные из полного набора графиков, содержащихся в статье [1].

Рассматривая графики на рис. 1, можно увидеть следующее.

Для волн qP скорости $V_{qP}(\alpha)$ и поглощение $Q_{qP}^{-1}(\alpha)$ в наибольшей степени зависят от нормальной ослабленности $\tilde{\Delta}_N$ (кривые 1, 3, 5), в то время как зависимость от касательной ослабленности $\tilde{\Delta}_T$ (кривые 2–4) весьма слабая, особенно для направлений,

близких к оси симметрии, $\alpha = 0^\circ$. Что касается направлений, близких к плоскости изотропии, $\alpha = 90^\circ$, то для них значения как скоростей, так и поглощения зависят от нормальной $\tilde{\Delta}_N$ и касательной $\tilde{\Delta}_T$ ослабленностей значительно меньше, чем для направлений в окрестности оси симметрии; в плоскости изотропии эта зависимость близка к нулевой. При $\Delta_T > \Delta_N$ на кривых $V_{qP}(\alpha)$ появляется минимум в интервале углов $20\text{--}40^\circ$, а на кривых $Q_{qP}^{-1}(\alpha)$ – максимум.

Для волн qSV зависимости скорости $V_{qSV}(\alpha)$ и поглощения $Q_{qSV}^{-1}(\alpha)$ от нормальной и касательной ослабленностей во многом прямо противоположны тем, которые характерны для волн qP . На скорости $V_{qSV}(\alpha)$ и поглощение $Q_{qSV}^{-1}(\alpha)$, см. кривые 1, 3, 5, на направлениях, близких к $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 90^\circ$, наиболее сильно влияют касательные ослабленности $\tilde{\Delta}_T$. На направлениях, близких к $\alpha = 45^\circ$, наоборот, значения функций $V_{qSV}(\alpha)$ и $Q_{qSV}^{-1}(\alpha)$ (кривые 2–4) больше зависят от нормальных ослабленностей $\tilde{\Delta}_N$, чем от касательных $\tilde{\Delta}_T$. С увеличением значений Δ_N , Δ_N^I , Δ_T , Δ_T^I экстремумы кривых $V_{qSV}(\alpha)$, $Q_{qSV}^{-1}(\alpha)$ смещаются по направлению к оси симметрии ($\alpha = 0^\circ$). Для решения обратных задач подойдут только зависимости $V_{qSV}(\alpha)$, $Q_{qSV}^{-1}(\alpha)$ для достаточно малых значений ослабленностей, когда на поверхностях лучевых скоростей $V_{qSV}(\alpha)$ нет петель; из кривых на рис. 1 этому условию не удовлетворяют кривые 5.

Для волн SH скорости $V_{SH}(\alpha)$ зависит в основном от Δ_T , а поглощение $Q^{-1}(\alpha)$ – от Δ_T , Δ_T^I .

Таким образом, можно прогнозировать, что нормальные ослабленности лучше всего будут определяться по данным qP -волн в интервале углов $\alpha \in (0^\circ, 45^\circ)$ и несколько хуже в интервале $\alpha \in (45^\circ, 90^\circ)$. Для определения касательных ослабленностей нужно использовать поперечные волны, главным образом типа SH .

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА

Постановка задачи

Обратная задача – определение параметров среды LSTI, эффективной модели изотропной среды с системой параллельных трещин, по зависимостям $V(\alpha)$, $Q^{-1}(\alpha)$ волн qP , qSV , SH – решается нами на основе проведенного анализа анизотропии скоростей и поглощения в средах LSTI с различными значениями нормальной $\tilde{\Delta}_N = \Delta_N - i\Delta_N^I$ и касательной $\tilde{\Delta}_T = \Delta_T - i\Delta_T^I$ ослабленностей, характеризующих трещины в изотропной среде с параметром $\gamma = V_{S, \text{iso}}/V_{P, \text{iso}}$. Искомые величины – действительные и мнимые части нормальной и касательной ослабленностей: Δ_N , Δ_T , Δ_N^I , Δ_T^I . Скорости $V_{P, \text{iso}}$ и $V_{S, \text{iso}}$ считаются известными. При решении обратной задачи нужны безразмерные величины, вследствие чего скорости используются в виде $V_P(\alpha)/V_{P, \text{iso}}$ и $V_S(\alpha)/V_{S, \text{iso}}$, $V_{SH}(\alpha)/V_{S, \text{iso}}$.

Для нахождения параметров Δ_N , Δ_T , Δ_N^I , Δ_T^I применяется метод наименьших квадратов. Минимизируемая целевая функция F задается как сумма квадратов отклонений значений скоростей V_m , поглощения Q_m^{-1} , $m = qP, qSV, SH$, найденных по экспериментальным

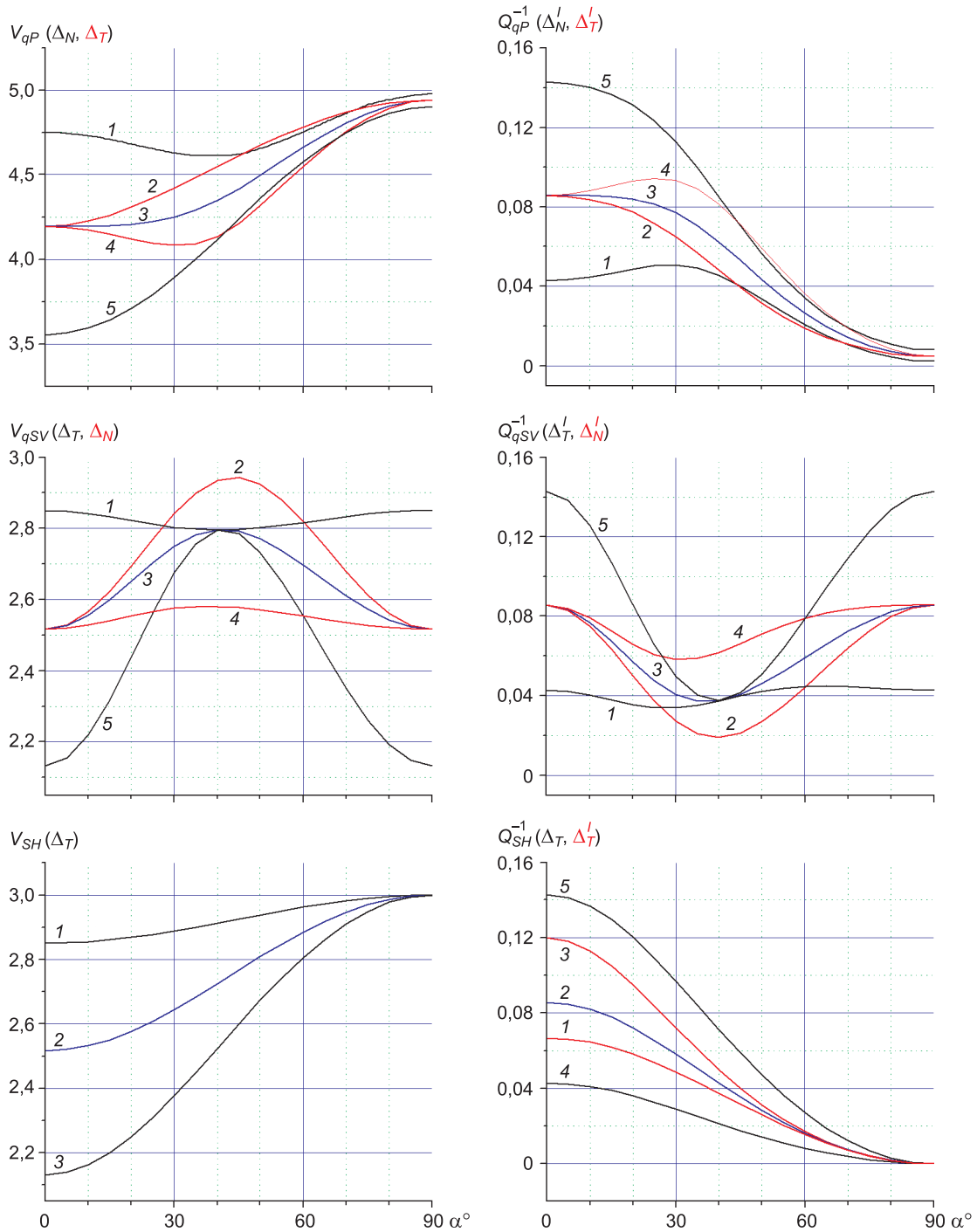


Рис. 1. Фазовые скорости (V) и поглощение (Q^{-1}) волн qP , qSV , SH в функции угла α между волновой нормалью и осью симметрии среды $LST\tilde{I}$ с различными значениями действительных и мнимых частей ослабленностей: нормальной $\tilde{\Delta}_N = \Delta_N - \Delta_N^I$ и касательной $\tilde{\Delta}_T = \Delta_T - \Delta_T^I$; $\gamma = V_{S, iso}/V_{P, iso} = 0,6$: 1–5 – цвет линий соответствует цвету чисел табл. 1.

Значения действительных частей Δ_N, Δ_T нормальной $\tilde{\Delta}_N$ и касательной $\tilde{\Delta}_T$ ослабленностей – параметров функций $V_{qP}(\alpha), V_{qSV}(\alpha), V_{SH}(\alpha)$, представленных на рис. 1

№ п/п	V_{qP}		V_{qSV}		V_{SH}
	Δ_N	Δ_T	Δ_N	Δ_T	Δ_T
1	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1
2	0,3	0,1	0,1	0,3	0,3
3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
4	0,3	0,5	0,5	0,3	
5	0,5	0,3	0,3	0,5	

Примечание. Здесь и в табл. 2 цвет чисел соответствует цвету линий на рис. 1.

Значения действительных и мнимых частей $\Delta_N, \Delta_N^I, \Delta_T, \Delta_T^I$ нормальной $\tilde{\Delta}_N$ и касательной $\tilde{\Delta}_T$ ослабленностей – параметров функций $Q_{qP}^{-1}(\alpha), Q_{qSV}^{-1}(\alpha), Q_{SH}^{-1}(\alpha)$, представленных на рис. 1

№ п/п	Q_{qP}^{-1}				Q_{qSV}^{-1}				Q_{SH}^{-1}	
	Δ_N	Δ_N^I	Δ_T	Δ_T^I	Δ_N	Δ_N^I	Δ_T	Δ_T^I	Δ_T	Δ_T^I
1	0,3	0,03	0,3	0,06	0,3	0,06	0,3	0,03	0,1	0,06
2	0,3	0,06	0,3	0,03	0,3	0,03	0,3	0,06	0,2	0,06
3	0,3	0,06	0,3	0,06	0,3	0,06	0,3	0,06	0,3	0,06
4	0,3	0,06	0,3	0,10	0,3	0,10	0,3	0,06	0,3	0,03
5	0,3	0,10	0,3	0,06	0,3	0,06	0,3	0,10	0,3	0,10

данным в точках $i = 1, 2, \dots, n$, от их теоретических значений. Поиск минимума может выполняться для следующих вариантов задания целевой функции:

$$\min_{\tilde{\Delta}_N, \tilde{\Delta}_T} F_{V_m} = \min \sum_{i=1}^n [V_{\text{теор},m,i}(\tilde{\Delta}_N, \tilde{\Delta}_T) - V_{\text{эксп},m,i}]^2, \quad (7)$$

$$\min_{\tilde{\Delta}_N, \tilde{\Delta}_T} F_{Q_m^{-1}} = \min \sum_{i=1}^n [Q_{\text{теор},m,i}^{-1}(\tilde{\Delta}_N, \tilde{\Delta}_T) - Q_{\text{эксп},m,i}^{-1}]^2, \quad (8)$$

$$\min_{\tilde{\Delta}_N, \tilde{\Delta}_T} F_{V_m, Q_m^{-1}} = \min \left\{ \sum_{i=1}^n [V_{\text{теор},m,i}(\tilde{\Delta}_N, \tilde{\Delta}_T) - V_{\text{эксп},m,i}]^2 + \sum_{i=1}^n [Q_{\text{теор},m,i}^{-1}(\tilde{\Delta}_N, \tilde{\Delta}_T) - Q_{\text{эксп},m,i}^{-1}]^2 \right\}, \quad (9)$$

$m = qP, qSV, SH.$

Задача состоит в том, чтобы найти из всех возможных вариантов задания целевой функции те, которые позволяют достаточно хорошо определять искомые параметры: действительные части Δ_N, Δ_T нормальной и касательной ослабленностей, ответственные главным образом за значения скоростей, и мнимые части Δ_N^I, Δ_T^I , вносящие основной вклад в поглощение. Кроме вида целевой функции F , см. (7)–(9), будем варьировать также типами волн ($m = qP, qSV, SH$) и различные комбинации qP, qSV, SH , входящих в функции F в (7)–(9). Переменными будут также интервалы углов $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$. Задаются два интервала: $\alpha = (0^\circ, \dots, 45^\circ)$, $\alpha = (45^\circ, \dots, 90^\circ)$, шаг равен 5° . Первый случай, $\alpha_{\text{эксп}} = (0^\circ, \dots, 45^\circ)$, это в основном данные ВСП и отраженных волн для среды VTI, по которым ищутся системы горизонтальных трещин, и, кроме того, это могут быть данные межскважинного просвечивания в среде НТИ, т. е. изотропной среде, содержащей систему вертикальных трещин. Ко второму случаю, $\alpha_{\text{эксп}} = (45^\circ, \dots, 90^\circ)$, относятся данные

ВСП и отраженных волн для среды НТИ и данные межскважинного просвечивания в среде VTI.

С вычислительной точки зрения задача сводится в каждом конкретном случае к исследованию свойств соответствующей целевой функции $F(\tilde{x})$ и к выбору подходящего метода ее минимизации. Вектор искомых параметров \tilde{x} может включать в себя как все четыре параметра: $\Delta_N, \Delta_T, \Delta_N^I, \Delta_T^I$, так и любые их комбинации.

Приемлемыми решениями будут считаться значения действительных частей ослабленностей Δ_N, Δ_T , найденные с погрешностью не более 1–2 %, и значения мнимых частей ослабленностей Δ_N^I, Δ_T^I , погрешности которых не превышают 10–20 %. Такой выбор связан с тем, что поглощение определяется по полевым данным на порядок менее точно, чем скорости.

Вид целевой функции в зависимости от параметров трещин

Свойства целевой функции $F(\Delta_N, \Delta_T, \Delta_N^I, \Delta_T^I)$, определяемой выражениями (7)–(9), при разных вариантах ее задания исследовались численно путем вычисления при полном переборе всех параметров: $\gamma, \Delta_N, \Delta_T, \Delta_N^I, \Delta_T^I$, от которых она зависит. Это значения γ , равные 0,3, 0,5, 0,6, и значения $\Delta_N, \Delta_T, \Delta_N^I, \Delta_T^I$, приведенные в табл. 1 статьи [1], для которых вычислялись функции $V_m(\alpha), Q_m^{-1}(\alpha)$, $m = qP, qSV, SH$, представленные на рисунка А–В указанной статьи. Наиболее характерные из этих функций изображены на рис. 1 настоящей статьи. Представить все полученные результаты нет никакой возможности, к тому же в этом нет необходимости, поскольку они в общем однотипны.

Характерный вид функции $F(\Delta_N, \Delta_T, \Delta_N^I, \Delta_T^I)$ показан на рис. 2. Функция четырех переменных представлена в виде поверхностей, зависящих от двух переменных (Δ_N, Δ_T) и (Δ_N^I, Δ_T^I) при фиксированных

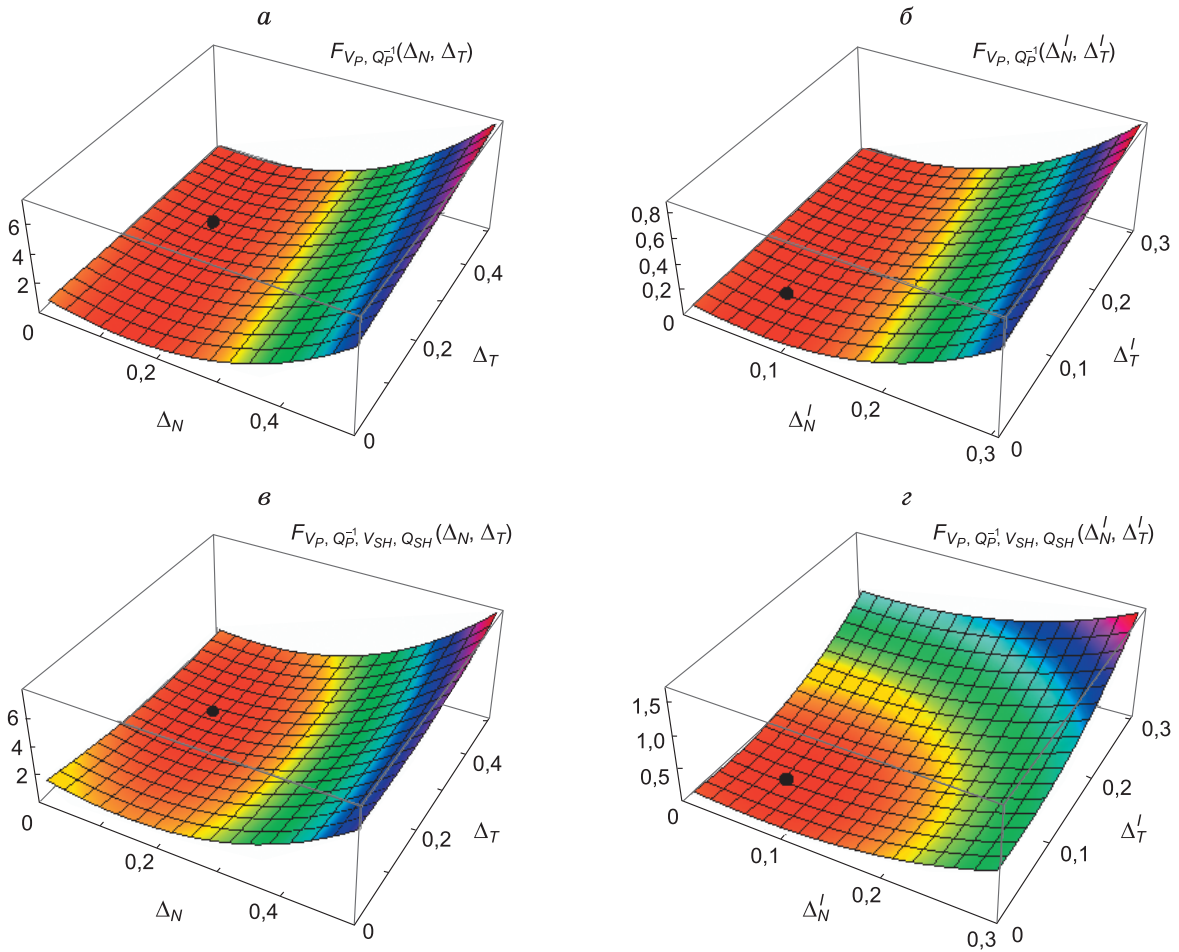


Рис. 2. Поверхности целевой функции $F(\Delta_N, \Delta_T, \Delta'_N, \Delta'_T)$ для случаев, когда используются скорости (V_P) и поглощение (Q_P^{-1}) только квазипродольной волны (а, б) и квазипродольной волны (P) и поперечной (SH) (в, з).

Зафиксированные параметры равны: $\Delta'_N = \Delta'_T = 0,06$ (а, в) и $\Delta_N = 0,1, \Delta_T = 0,3$ (б, з); $\gamma = V_{S, iso}/V_{P, iso} = 0,5$. Интервал наблюдений ($0^\circ, 45^\circ$). Искомые координаты точки минимума целевой функции равны: $\Delta_N = 0,1, \Delta_T = 0,3$ (а, в) и $\Delta'_N = \Delta'_T = 0,06$ (б, з).

значениях двух других переменных. Представленные поверхности вычислялись для целевой функции вида (9), когда минимум искался по данным о скоростях и поглощении. Сравниваются два способа задания целевой функции: по данным только qP -волн (см.

рис. 2, а, б) и по данным qP - и SH -волн (см. рис. 2, в, з). Видно, что поверхности, вычисленные по данным только qP -волн, имеют глубокие овраги, вытянутые вдоль осей Δ_T, Δ'_T , особенно вдоль оси Δ_T . Если же поверхности определяются по данным qP - и SH -волн, овраги уменьшаются или исчезают. Вклад в целевую функцию данных по qP -волнам проявляется при переменных (Δ_N, Δ_T) , что видно на рис. 2, в, и полностью отсутствует (см. рис. 2, з), когда переменными являются (Δ'_N, Δ'_T) .

Вид поверхностей целевой функции на рис. 2 был предсказан нами в разделе, посвященном результатам решения прямой задачи, где было показано (см. рис. 1), что скорости и поглощение волн qP зависят главным образом от нормальной ослабленности, $\tilde{\Delta}_N$, и очень незначительно от касательной ослабленности, $\tilde{\Delta}_T$. Отсюда ясно, почему на поверхностях целевой функции $F_{V_P, Q_P}(\tilde{\Delta}_N, \tilde{\Delta}_T)$ появляются овраги, вытянутые по направлениям осей Δ_T, Δ'_T , затрудняющие нахождение этих параметров. Для волн SH скорости и поглощение зависят только от касательной ослабленности $\tilde{\Delta}_T$, вид этих зависимостей показан на рис. 1. Поэтому объединение данных qP - и SH -волн в од-

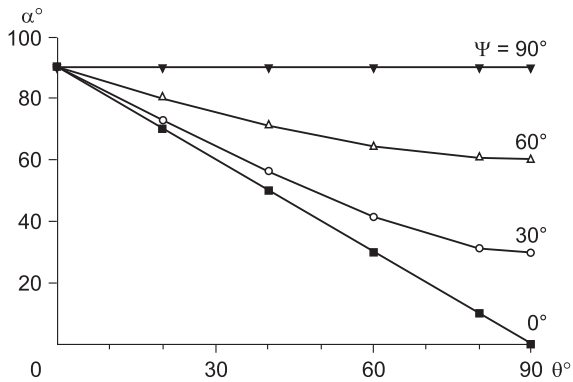


Рис. 3. Зависимости углов α между осью симметрии $\mathbf{n}_a = (1, 0, 0)$ и волновой нормалью от угла волновой нормали θ при разных значениях азимутального угла ψ .

ной целевой функции $F_{V_p, Q_p, V_{SH}, Q_{SH}}(\tilde{\Delta}_N, \tilde{\Delta}_T)$ помогает преодолеть овражный характер функции $F_{V_p, Q_p}(\tilde{\Delta}_N, \tilde{\Delta}_T)$ и найти как нормальные, так и касательные ослабленности $(\tilde{\Delta}_N, \tilde{\Delta}_T)$.

Алгоритмы оптимизации

Для минимизации целевой функции F вида (7)–(9) использовалась система компьютерной алгебры Mathematica 7. Применялись следующие встроенные в систему алгоритмы:

- сопряженных градиентов,
- Ньютона,
- квазиньютоновский, (10)
- Левенберга–Марквардта,
- внутренней точки.

Из них первые четыре – алгоритмы безусловной минимизации, в которых используются первые производные целевой функции – в методе сопряженных градиентов – и вторые производные в методах Ньютона, квазиньютоновском и Левенберга–Марквардта. Пятый алгоритм, внутренней точки, является алгоритмом минимизации с ограничениями, в качестве которых мы задавали неравенства (2). В качестве начального приближения задавались нулевые значения всех искомым параметров $(\Delta_N, \Delta_T, \Delta_N^I, \Delta_T^I)$, что соответствует среде без трещин.

Численное исследование результатов минимизации при разных вариантах задания целевой функции показало, что чаще всего все перечисленные алгоритмы работали одинаково, хотя во многих случаях лучшим оказывался алгоритм Левенберга–Марквардта. Этот алгоритм в своей последней модификации является по сути методом доверительных интервалов. В нем на каждом шаге итерационного процесса целевая функция сначала заменяется на доверительном интервале квадратичным приближением, а потом происходит скачок на его минимум. Размер доверительного интервала устанавливается путем подбора*.

Численное исследование решения

Ниже рассматриваются следующие случаи задания теоретических и экспериментальных значений скоростей и поглощения в целевой функции:

- I. $V_{\text{exp}, m}(\alpha)$, $Q_{\text{exp}, m}^{-1}(\alpha)$, $V_{\text{teor}, m}(\alpha)$, $Q_{\text{teor}, m}^{-1}(\alpha)$ – точные;
- II. $V_{\text{exp}, m}(\alpha)$, $Q_{\text{exp}, m}^{-1}(\alpha)$ – точные, $V_{\text{teor}, m}(\alpha)$, $Q_{\text{teor}, m}^{-1}(\alpha)$ – приближенные, см. (13)–(19) в [1];
- III. $V_{\text{exp}, m}(\alpha)$, $Q_{\text{exp}, m}^{-1}(\alpha)$ – с погрешностями, $V_{\text{teor}, m}(\alpha)$, $Q_{\text{teor}, m}^{-1}(\alpha)$ – точные.

В случае I проверяется работоспособность каждого из пяти алгоритмов (10). В случае II выясняется возможность использования при вычислении теоретических значений приближенных формул вместо численного точного расчета. В случае III имитируется работа с реальными экспериментальными данными, в качестве которых берутся вычисляемые точные данные с наложенными случайными гауссовыми помехами.

I. Применение всех пяти алгоритмов (10) к поиску минимума целевой функции оказалось успешным,

с погрешностями искомым параметров порядка нуля, для всех типов волн. В качестве экспериментальных данных $V_{\text{exp}, m}(\alpha)$, $Q_{\text{exp}, m}^{-1}(\alpha)$ и теоретических $V_{\text{teor}, m}(\alpha)$, $Q_{\text{teor}, m}^{-1}(\alpha)$ брались значения скоростей и поглощения, вычисленные по формулам (6) путем подстановки в них собственных значений $\tilde{V}_m^2(\mathbf{n})$ тензора Кристоффеля для заданных значений параметров – ослабленностей $\tilde{\Delta}_N$, $\tilde{\Delta}_T$. Был выполнен перебор всех возможных значений Δ_N , Δ_T , Δ_N^I , Δ_T^I по схеме задания этих параметров, выбранной для детального анализа решения прямой задачи в работе [1].

II. Результаты проверки работоспособности алгоритмов (10) для случая, когда в выражении (9) экспериментальными данными служили точные значения скоростей и поглощения, а теоретические значения $V_{\text{teor}, m}(\alpha)$, $Q_{\text{teor}, m}^{-1}(\alpha)$ вычислялись по приближенным формулам, приведенным в [1], даны в табл. 3.

■ Исходные данные – скорости и поглощение волн qP и (qP, qSV) .

Погрешности определения Δ_N , Δ_N^I . Для интервала углов $(0^\circ, 45^\circ)$ оценки таковы. Погрешности значений Δ_N изменяются в пределах: 0–0,3 % в случае данных V_p , Q_p^{-1} и 0,2–1 % в случае данных V_p , Q_p^{-1} , V_{SV} , Q_{SV}^{-1} . Погрешности значений Δ_N^I составляют 0,2–1 % в случае данных V_p , Q_p^{-1} и 0–1,2 % в случае данных V_p , Q_p^{-1} , V_{SV} , Q_{SV}^{-1} . Для интервала углов $(45^\circ, 90^\circ)$ погрешности больше. Для Δ_N они равны 0–2,9 % по данным V_p , Q_p^{-1} и 1,8–6,7 % по данным V_p , Q_p^{-1} , V_{SV} , Q_{SV}^{-1} . Для Δ_N^I погрешности таковы: 0,2–2,9 % по данным V_p , Q_p^{-1} и 2,1–5,7 % по данным V_p , Q_p^{-1} , V_{SV} , Q_{SV}^{-1} .

Результаты для интервала углов $(45^\circ, 90^\circ)$ говорят о том, что совместный поиск по данным qP - и qSV -волн может быть хуже, чем по данным только qP -волн. Следует напомнить, что и сами волны qSV можно зарегистрировать не для всех значений Δ_N , Δ_T , Δ_N^I , Δ_T^I из табл. 3.

Погрешности определения Δ_T , Δ_T^I . Для интервала углов $(0^\circ, 45^\circ)$ погрешности значений Δ_T велики (0–22,7 %) в случае данных V_{qP} , Q_{qP}^{-1} и малы (0–2,1 %) в случае данных V_{qP} , Q_{qP}^{-1} , V_{qSV} , Q_{qSV}^{-1} . Погрешности значений Δ_T^I изменяются в пределах 1,5–36,6 % в случае данных V_{qP} , Q_{qP}^{-1} и пренебрежимо малы (0–0,5 %) в случае данных V_{qP} , Q_{qP}^{-1} , V_{qSV} , Q_{qSV}^{-1} . В интервале углов $(45^\circ, 90^\circ)$ погрешности сопоставимы с погрешностями для интервала $(0^\circ, 45^\circ)$. Для Δ_T они равны 0,7–26,8 % по данным V_{qP} , Q_{qP}^{-1} и 1,7–5,9 % по данным V_{qP} , Q_{qP}^{-1} , V_{qSV} , Q_{qSV}^{-1} . Для Δ_T^I погрешности равны 7,6–45,8 % по данным V_{qP} , Q_{qP}^{-1} и 0,3–2,2 % по данным V_{qP} , Q_{qP}^{-1} , V_{qSV} , Q_{qSV}^{-1} , т. е. использование волн qSV позволяет определять параметры Δ_T , Δ_T^I достаточно точно.

■ Исходные данные – скорости и поглощение волн SH и (qP, SH) .

Из табл. 3 видно, что погрешности – нулевые по данным V_{SH} , Q_{SH}^{-1} во всем интервале углов $(0^\circ, 90^\circ)$. По данным V_{qP} , Q_{qP}^{-1} , V_{SH} , Q_{SH}^{-1} они не выходят за установленные рамки в интервале углов $(0^\circ, 45^\circ)$, а в интервале $(45^\circ, 90^\circ)$ погрешности Δ_T изменяются в пределах 0,1–4,7 %, а для Δ_T^I они пренебрежимо малы. Отсюда следует, что для определения параметров Δ_T , Δ_T^I наиболее оптимально использование данных V_{SH} , Q_{SH}^{-1} .

* <http://www.cc.gatech.edu/people/home/ananth/docs/lmtut.pdf>

Относительные погрешности (в %) определения параметров трещин Δ_N , Δ_T , Δ_N^I , Δ_T^I по приближенным формулам для скоростей $V(\alpha)$ и поглощения $Q^{-1}(\alpha)$ квазипроходной волны P , квазипоперечной SV и поперечной SH в интервалах углов $\alpha = (0^\circ, 45^\circ)$ и $\alpha = (45^\circ, 90^\circ)$

№ п/п	(0°, 45°)		V_P, Q_P^{-1}	V_{SH}, Q_{SH}^{-1}	$V_P, Q_P^{-1}, V_{SV}, Q_{SV}^{-1}$	$V_P, Q_P^{-1}, V_{SH}, Q_{SH}^{-1}$	(45°, 90°)		V_P, Q_P^{-1}	V_{SH}, Q_{SH}^{-1}	$V_P, Q_P^{-1}, V_{SV}, Q_{SV}^{-1}$	$V_P, Q_P^{-1}, V_{SH}, Q_{SH}^{-1}$
	1	Δ_N	0,3	0,0	–	0,7	0,8	Δ_N	0,3	0,0	–	1,8
	Δ_T	0,1	20,3	0,0	2,1	1,6	Δ_T	0,1	19,8	0,0	3,3	3,5
	Δ_N^I	0,06	0,4	–	0,2	1,4	Δ_N^I	0,06	0,2	–	2,1	7,4
	Δ_T^I	0,06	14,7	0,0	1,6	0,3	Δ_T^I	0,06	19,6	0,1	4,8	1,0
2	Δ_N	0,3	0,3	–	0,2	0,3	Δ_N	0,3	1,1	–	4,0	4,0
	Δ_T	0,3	5,1	0,0	0,4	0,3	Δ_T	0,3	8,9	0,0	3,5	1,5
	Δ_N^I	0,06	0,7	–	0,0	1,0	Δ_N^I	0,06	2,0	–	2,7	10,5
	Δ_T^I	0,06	13,4	0,0	0,1	0,2	Δ_T^I	0,06	23,0	0,0	7,2	1,0
3	Δ_N	0,3	0,2	–	0,2	0,3	Δ_N	0,3	2,8	–	6,7	6,6
	Δ_T	0,5	2,3	0,0	0,0	0,1	Δ_T	0,5	6,9	0,0	3,8	1,1
	Δ_N^I	0,06	0,8	–	0,1	0,8	Δ_N^I	0,06	2,9	–	5,4	14,0
	Δ_T^I	0,06	12,1	0,0	0,2	0,1	Δ_T^I	0,06	29,3	0,0	7,7	1,1
4	Δ_N	0,1	0,3	–	0,5	0,3	Δ_N	0,1	2,9	–	4,2	3,6
	Δ_T	0,3	0,0	0,0	0,5	0,0	Δ_T	0,3	0,7	0,0	1,7	0,1
	Δ_N^I	0,06	0,2	–	0,1	0,0	Δ_N^I	0,06	2,3	–	0,7	5,1
	Δ_T^I	0,06	1,5	0,0	0,2	0,0	Δ_T^I	0,06	7,6	0,0	4,8	0,3
5	Δ_N	0,5	0,3	–	1,0	1,2	Δ_N	0,5	0,4	–	5,4	5,7
	Δ_T	0,3	22,7	0,0	0,0	1,9	Δ_T	0,3	26,8	0,0	5,9	4,7
	Δ_N^I	0,06	1,0	–	1,2	3,1	Δ_N^I	0,06	1,2	–	5,7	18,2
	Δ_T^I	0,06	36,6	0,0	3,2	0,5	Δ_T^I	0,06	45,8	0,0	10,0	2,2

Примечание. Здесь и в табл. 4 серым цветом выделены значения погрешностей, превышающие предельные значения: ~2 % для действительных частей ослабленностей и ~20 % – для мнимых.

Общий вывод насчет использования приближенных формул состоит в том, что их можно применять практически во всех случаях. При этом параметры нормальной ослабленности Δ_N , Δ_N^I надо определять по данным qP -волн либо – при условии слабой анизотропии – по данным волн qP , qSV . Для определения параметров касательной ослабленности Δ_T , Δ_T^I оптимально использование данных о скоростях и поглощении SH -волн.

III. Результаты изучения влияния помех в экспериментальных данных $V_{\text{exp}, m}(\alpha)$, $Q_{\text{exp}, m}^{-1}(\alpha)$ на погрешности определения параметров Δ_N , Δ_T , Δ_N^I , Δ_T^I представлены в табл. 4. Теоретические значения $V_{\text{теор}, m}(\alpha)$, $Q_{\text{теор}, m}^{-1}(\alpha)$, входящие в целевую функцию (9), рассчитывались по точным формулам. В качестве экспериментальных данных $V_{\text{exp}, m}(\alpha)$, $Q_{\text{exp}, m}^{-1}(\alpha)$ брались вычисленные точные значения $V(\alpha_i)$, $Q^{-1}(\alpha_i)$, $i = 1, \dots, 10$, к которым добавлялись случайные величины, распределенные по нормальному закону со средним квадратическим отклонением 2 % от $V(\alpha_i)$ и 20 % от $Q^{-1}(\alpha_i)$.

■ Исходные данные – скорости и поглощение волн qP и (qP , qSV).

Погрешности определения Δ_N , Δ_N^I . Погрешности значений Δ_N и Δ_N^I примерно одинаковы в обоих интервалах углов, поэтому мы приводим данные для ин-

тервала (0°, 90°). Погрешности Δ_N изменяются в пределах 0,1–20,4 %, но выходят за установленный предел в 2 % лишь в нескольких случаях (в 6-ти из 20-ти). Погрешности значений Δ_N^I изменяются в пределах 0,5–11 %, при пределе 20 %.

Погрешности определения Δ_T , Δ_T^I . Погрешности значений Δ_T больше в интервале углов (45°, 90°), чем в интервале (0°, 45°), а погрешности Δ_T^I – наоборот.

Погрешности Δ_T в интервале углов (0°, 45°) равны 0,6–40 % по данным V_{qP} , Q_{qP}^{-1} и 1,3–7,5 % по данным V_{qP} , Q_{qP}^{-1} , V_{qSV} , Q_{qSV}^{-1} . В интервале (45°, 90°) они такие: 4,3–38,6 % по данным V_{qP} , Q_{qP}^{-1} и 0,5–12,6 % по данным V_{qP} , Q_{qP}^{-1} , V_{qSV} , Q_{qSV}^{-1} . Это означает, что привлечение волн qSV позволяет улучшить оценки параметра Δ_T , но не до 2 %.

Погрешности Δ_T^I в интервале углов (0°, 45°) по данным V_{qP} , Q_{qP}^{-1} равны 2,3–35,9 %, а по данным V_{qP} , Q_{qP}^{-1} , V_{qSV} , Q_{qSV}^{-1} они меньше: 2,2–11,3 %, т. е. до 20 %. В интервале (45°, 90°) погрешности Δ_T^I по данным V_{qP} , Q_{qP}^{-1} равны 2,3–24,1 %, а по данным V_{qP} , Q_{qP}^{-1} , V_{qSV} , Q_{qSV}^{-1} они меньше: 3,9–9,5 %, т. е. меньше 20 %. Как и для параметра Δ_T , погрешности Δ_T^I понижаются при использовании волн qSV и притом настолько, что становятся меньше установленного предела в 20 %.

Относительные погрешности (в %) определения параметров трещин Δ_N , Δ_T , Δ_N^I , Δ_T^I при наложении случайных помех на зависимости $V(\alpha)$ и $Q^{-1}(\alpha)$ для квазипродольной волны P , квазипоперечной SV и поперечной SH в интервалах углов $\alpha = (0^\circ, 45^\circ)$ и $\alpha = (45^\circ, 90^\circ)$

№ п/п	(0°, 45°)		V_P, Q_P^{-1}	V_{SH}, Q_{SH}^{-1}	$V_P, Q_P^{-1}, V_{SV}, Q_{SV}^{-1}$		(45°, 90°)		V_P, Q_P^{-1}	V_{SH}, Q_{SH}^{-1}	$V_P, Q_P^{-1}, V_{SV}, Q_{SV}^{-1}$		$V_P, Q_P^{-1}, V_{SH}, Q_{SH}^{-1}$
					$V_P, Q_P^{-1}, V_{SV}, Q_{SV}^{-1}$	$V_P, Q_P^{-1}, V_{SH}, Q_{SH}^{-1}$					$V_P, Q_P^{-1}, V_{SV}, Q_{SV}^{-1}$	$V_P, Q_P^{-1}, V_{SH}, Q_{SH}^{-1}$	
1	Δ_N	0,3	3,7	—	1,5	1,7	Δ_N	0,3	1,7	—	5,4	5,5	
	Δ_T	0,1	40,0	6,1	2,1	4,7	Δ_T	0,1	28,7	30,2	12,6	27,4	
	Δ_N^I	0,06	3,9	—	4,1	4,0	Δ_N^I	0,06	7,4	—	3,3	0,4	
	Δ_T^I	0,06	2,3	3,9	5,1	3,8	Δ_T^I	0,06	13,9	4,9	3,9	4,1	
2	Δ_N	0,3	6,6	—	5,2	4,5	Δ_N	0,3	11,1	—	1,5	1,3	
	Δ_T	0,3	14,7	3,0	7,5	2,7	Δ_T	0,3	38,6	4,3	1,2	6,1	
	Δ_N^I	0,06	2,0	—	2,1	4,2	Δ_N^I	0,06	9,4	—	11,0	11,3	
	Δ_T^I	0,06	9,6	8,3	4,2	7,9	Δ_T^I	0,06	2,3	7,1	8,3	6,8	
3	Δ_N	0,3	4,3	—	3,1	3,0	Δ_N	0,3	1,0	—	3,3	0,2	
	Δ_T	0,5	6,4	0,3	1,3	0,4	Δ_T	0,5	4,3	3,0	0,5	3,1	
	Δ_N^I	0,06	5,5	—	2,1	1,4	Δ_N^I	0,06	3,7	—	6,4	8,9	
	Δ_T^I	0,06	34,6	0,9	4,7	1,4	Δ_T^I	0,06	13,0	0,7	9,5	0,0	
4	Δ_N	0,1	5,0	—	6,2	6,0	Δ_N	0,1	7,4	—	20,4	19,5	
	Δ_T	0,3	0,6	3,0	2,2	3,0	Δ_T	0,3	15,4	4,3	1,3	4,8	
	Δ_N^I	0,06	6,0	—	0,5	2,5	Δ_N^I	0,06	1,0	—	9,3	5,3	
	Δ_T^I	0,06	35,9	8,3	4,6	8,7	Δ_T^I	0,06	24,1	7,1	6,7	7,9	
5	Δ_N	0,5	0,9	—	2,1	1,3	Δ_N	0,5	6,8	—	1,1	1,7	
	Δ_T	0,3	6,9	3,0	3,5	3,1	Δ_T	0,3	35,5	4,3	1,6	1,8	
	Δ_N^I	0,06	0,7	—	0,5	3,0	Δ_N^I	0,06	2,4	—	5,1	0,6	
	Δ_T^I	0,06	23,4	8,3	11,3	7,2	Δ_T^I	0,06	10,8	7,1	5,9	7,6	

Исходные данные – скорости и поглощение волн SH и (qP, SH).

Погрешности Δ_T в интервале углов (0°, 45°) равны 0,3–6,1 % по данным V_{SH}, Q_{SH}^{-1} и 1,3–7,5 % по данным $V_{qP}, Q_{qP}^{-1}, V_{SH}, Q_{SH}^{-1}$. В интервале (45°, 90°) погрешности Δ_T больше: 3–30,2 % по данным V_{SH}, Q_{SH}^{-1} и 1,8–27,4 % по данным $V_{qP}, Q_{qP}^{-1}, V_{SH}, Q_{SH}^{-1}$, т. е. в общем погрешности превышают 2 %.

Погрешности Δ_T^I в интервале углов (0°, 45°) равны 0,9–8,3 % по данным V_{SH}, Q_{SH}^{-1} и 1,4–8,7 % по данным $V_{qP}, Q_{qP}^{-1}, V_{SH}, Q_{SH}^{-1}$, а в интервале (45°, 90°) равны 0,7–7,1 % по данным V_{SH}, Q_{SH}^{-1} и 0–7,9 % по данным $V_{qP}, Q_{qP}^{-1}, V_{SH}, Q_{SH}^{-1}$, т. е. во всех случаях меньше 20 %.

Результаты оптимизации целевой функции (9) при наличии помех в экспериментальных данных приводят к выводу, что надо повысить помехоустойчивость экспериментальных данных. Известный способ борьбы с помехами – увеличение числа измерений. В приведенных примерах число экспериментальных точек было взято равным 10. В реальных данных их значительно больше, за счет чего влияние помех должно уменьшиться.

Здесь мы привели результаты численного исследования решения обратной задачи в случае целевой функции (9). При целевых функциях вида (7) и (8)

все операции при поиске минимума целевой функции в принципе такие же, но более простые.

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ В СЛУЧАЕ АЗИМУТАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ

В реальных средах плоскости трещин чаще всего являются вертикальными или наклонными. Приведенное в предыдущем разделе статьи решение обратной задачи справедливо для любой ориентации плоскостей параллельных трещин, так как теоретические значения скоростей и поглощения волн трех типов (qP, qSV и SH), входящие в минимизируемую целевую функцию (7)–(9) для трансверсально-изотропной (ТИ) среды, вычисляются для углов α между осью симметрии среды и волновой нормалью волны заданного типа.

В случае горизонтальных плоскостей трещин ось симметрии вертикальна (среда VTI), и решения прямой и обратной задач, приведенные в статье, могут быть использованы непосредственно. Если же по 3D-данным полевых наблюдений видно, что симметрии относительно вертикальной оси нет, т. е. анизотропия азимутальная (HTI или TTI), надо предварительно, до решения обратной задачи по поиску параметров трещин, найти пространственное положение оси симметрии для тех интервалов глубин, где анизотропия присутствует. В случае поперечных волн это делается по расщеплению поперечной волны S на две (S_1 и S_2 ,

или в среде ПI – на qSV и SH), которое происходит, когда волна S попадает из изотропной среды в анизотропную*. Для продольных волн отсутствие симметрии относительно вертикальной оси обнаруживается при сравнении наблюдений в разных вертикальных плоскостях: на профилях разных азимутов при наземных наблюдениях 3D и при выносе источников от скважины по разным азимутам при ВСП (особенно при walkaround VSP, т. е. при источниках вокруг скважины). Круговые наблюдения дают зависимости, характеризующиеся для каждого из трех типов волн своим видом и периодичностью.

При горизонтальной или наклонной оси симметрии, т. е. в случае сред НТИ и ТТИ, зависимости $V(\alpha)$, $Q^{-1}(\alpha)$ для волн qP , qSV , SH , показанные на рис. 1, можно использовать, предварительно вычислив углы α как $\arccos(\mathbf{n}_a, \mathbf{n}_{wn})$, где \mathbf{n}_a – единичный вектор оси симметрии, а \mathbf{n}_{wn} – единичный вектор волновой нормали. В системе координат xuz с осью z , направленной вертикально вниз, и осью x , направленной вдоль оси симметрии среды НТИ (для нее $\mathbf{n}_a = (1, 0, 0)$), на профилях с азимутами ψ , отсчитываемыми от оси x , угол α зависит только от направления волновой нормали: $\alpha = |\arccos(\sin \theta_{wn} \cos \psi_{wn})|$, $\alpha \in (0^\circ, 90^\circ)$. В первом приближении можно считать, что $\psi_{wn} = \psi$. Тогда на профилях заданных азимутов $\psi = \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$ угол $\alpha = |\arccos(\sin \theta_{wn} \cos \psi_{wn})|$ будет определяться только полярным углом $\theta = \theta_{wn}$, отсчитываемым от оси z . На рис. 3 приведены функции $\alpha(\theta)$ для нескольких значений азимута ψ ($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$).

Теперь посмотрим на зависимости $V(\alpha)$, $Q^{-1}(\alpha)$ на рис. 1, используя графики $\alpha(\theta)$ рис. 3, с помощью которых будем смотреть на зависимости $V(\alpha)$, $Q^{-1}(\alpha)$ как на зависимости $V(\theta)$, $Q^{-1}(\theta)$, $\theta = 0^\circ, \dots, 90^\circ$. Для распространения волн в вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии среды ($\psi = 0^\circ$), будем смотреть на все графики рис. 1 справа налево, т. е. от $\alpha = 90^\circ$ к $\alpha = 0^\circ$. Для распространения волн в вертикальных плоскостях с азимутами $\psi = (30^\circ, 60^\circ)$ на графики рис. 1 будем смотреть от $\alpha = 90^\circ$ до $\alpha = 30^\circ$ и $\alpha = 60^\circ$. А в случае распространения волн в вертикальной плоскости, нормальной оси симметрии, т. е. при $\psi = 90^\circ$, надо смотреть на значения $V(\alpha)$, $Q^{-1}(\alpha)$ при $\alpha = 90^\circ$, так как эта вертикальная плоскость есть плоскость изотропии. Таким образом, в случае среды НТИ мы попадаем в области малого влияния трещин на скорости и поглощение при наблюдениях отраженных волн и ВСП. Присутствие трещин становится заметным только при межскважинном просвечивании при расположении скважин с приемниками вокруг скважины с источниками, когда волны распространяются по горизонтальным и близгоризонтальным направлениям.

Обратимся к графикам поглощения $Q_{qP}^{-1}(\alpha)$ на рис. 1 и сравним поглощение в вертикальной плоскости изотропии ($\alpha = 90^\circ$) и в окрестности горизонтальной оси симметрии для углов $\alpha \in (0^\circ, 30^\circ)$. Видно, что в окрестности оси симметрии поглощение в несколько раз больше, чем в плоскости изотропии, где оно ничтожно мало. Эти данные хорошо объясняют поведение спектров продольных волн, показанных на

рис. 8 в статье [18]. В скважине в интервале глубин 2300–2700 м поглощение оказалось очень малым для направлений, находящихся в плоскости изотропии, и большим для направлений в окрестности оси симметрии. Интересно и то, что обнаружить анизотропию скоростей в этих данных продольных волн не удалось, а анизотропия поглощения оказалась ярко выраженной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективной моделью изотропной среды, содержащей одну систему параллельных трещин, является трансверсально-изотропная среда с осью симметрии, нормальной плоскостям трещин. Упругие и поглощающие свойства такой среды в настоящей работе описываются матрицей модулей упругости–поглощения. Элементами матрицы, описывающими трещины, являются комплексные ослабленности, нормальные и касательные. Поставленная задача оценки параметров трещин решается как задача нахождения четырех параметров – действительных и мнимых частей комплексных ослабленностей – по данным об анизотропии скоростей и поглощения волн разной поляризации: квазипродольных, квазипоперечных SV и поперечных SH .

Выполненное исследование показывает, что возможности поиска трещиноватых коллекторов с ориентированными системами трещин значительно возрастают, если к данным по анизотропии скоростей добавить данные по анизотропии поглощения. Хотя поглощение определяется по реальным данным намного хуже, чем скорости, этот недостаток компенсируется тем, что анизотропия поглощения на порядок больше анизотропии скоростей.

Использование только продольных волн qP для поиска трещиноватых коллекторов дает неполную информацию о параметрах трещин, так как по волнам qP хорошо определяются только нормальные ослабленности. Для определения касательных ослабленностей требуется использовать поперечные волны типа qSV , если анизотропия слабая, так что на индикатрисах лучевых скоростей волн qSV нет петель, либо типа SH , что предпочтительнее. Оптимальным способом оценки параметров трещин является определение нормальных и касательных ослабленностей путем минимизации целевой функции, включающей данные о скоростях и поглощении волн qP , SH либо qP , qSV . Наиболее подходящим алгоритмом минимизации оказался алгоритм Левенберга–Марквардта.

В случае вертикальных или наклонных систем трещин ось симметрии среды горизонтальна или наклонна, вследствие чего анизотропия становится азимутальной, и оценке параметров трещин предшествует поиск азимута оси симметрии среды. Зная это направление, можно предсказать азимут направления максимальной проницаемости пород, а по значениям ослабленностей найти такие характеристики среды, как плотность трещин, тип флюида и другие, какие именно – зависит от качества данных и полноты системы наблюдений.

* Об этом подробно написано в статье [18] настоящего выпуска, с. 60–70.

Литература

1. Дугаров Г.А., Оболенцева И.Р., Чичинина Т.И. Анализ анизотропии скоростей и поглощения сейсмических волн в среде с одной системой параллельных трещин // Технологии сейсморазведки. 2011. № 3. С. 29–41.
2. Клем-Мусатов К.Д., Оболенцева И.Р., Айзенберг А.М. Расчет полей упругих волн для одной модели анизотропной среды // Динамические характеристики сейсмических волн. Новосибирск: Наука, 1973. С. 73–98.
3. Айзенберг А.М., Клем-Мусатов К.Д., Ланда Е.И. Модель анизотропной сейсмической среды // Сейсмические волны в сложнопостроенных средах. Новосибирск: Наука, 1974. С. 64–110.
4. Schoenberg M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces // J. Acoust. Soc. Amer. 1980. V. 68. P. 1516–1521.
5. Schoenberg M. Reflection of elastic waves from periodically stratified media with interfacial slip // Geophys. Prosp. 1983. V. 31. P. 265–292.
6. Kitsunezaki C. Behavior of plane elastic waves across a plane crack // J. Min. Coll. Akita Univ. 1983. V. VI. P. 173–187.
7. Pyrak-Nolte L.J., Myer L.R., Cook N.J.W. Transmission of seismic waves across single natural fractures // J. Geophys. Res. 1990. V. 95, N B6. P. 8617–8638.
8. Pyrak-Nolte L.J., Myer L.R., Cook N.J.W. Anisotropy in seismic velocities and amplitudes from multiple parallel fractures // J. Geophys. Res. 1990. V. 95, N B7. P. 11345–11358.
9. Gu B., Suárez-Rivera R., Nihei K.T., Myer L.R. Incidence of plane waves upon a fracture // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 25337–25346.
10. Bakulin A., Grechka V., Tsvankin I. Estimation of fracture parameters from reflection seismic data – Part I: HTI model due to a single fracture set // Geophysics. 2000. V. 65. P. 1788–1802.
11. Чичинина Т.И., Сабинин В.И., Ронкийо-Харийо Х., Оболенцева И.Р. Метод QVOA для поиска трещиноватых коллекторов // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 2. С. 265–283.
12. Chichinina T., Sabinin V., Ronquillo-Jarillo G. QVOA analysis: *P*-wave attenuation anisotropy for fracture characterization // Geophysics. 2006. V. 71. P. C37–C48.
13. Chichinina T.I., Obolentseva I.R., Ronquillo-Jarillo G., Sabinin V.I., Gik L.D., Bobrov B.A. Attenuation anisotropy of *P*- and *S*-waves: Theory and laboratory experiment // J. Seismic Exploration. 2007. V. 16. P. 235–264.
14. Chichinina T.I., Obolentseva I.R., Ronquillo-Jarillo G. Anisotropy of seismic attenuation in fractured media: theory and ultrasonic experiment // Transport in Porous Media. 2009. V. 79, N 1. P. 1–14.
15. Chichinina T., Obolentseva I., Gik L., Bobrov B., Ronquillo-Jarillo G. Attenuation anisotropy in the linear-slip model: Interpretation of physical modeling data // Geophysics. 2009. V. 74, N 5. P. WB165–WB176.
16. Chichinina T., Obolentseva I., Ronquillo-Jarillo G. Generalization of Schoenberg’s linear-slip model to attenuative media: physical modeling versus theory // Expanded Abstracts of the 79th SEG Ann. Int. Meeting. 2009. P. 3451–3457.
17. Гик Л.Д., Бобров Б.А. Экспериментальное лабораторное изучение анизотропии тонкослойных сред // Геология и геофизика. 1996. Т. 37, № 5. С. 97–110.
18. Горшкалев С.Б., Карстен В.В., Афонина Е.В., Бекешко П.С., Корсунов И.В. Результаты изучения азимутальной анизотропии на Пеляткинской площади по данным многоволнового ВСП и сейсморазведки 3D // Технологии сейсморазведки. 2011. № 3. С. 60–70.