



АНАЛИЗ АМПЛИТУД ГЛУБИННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО МНОГОКОМПОНЕНТНЫМ ДАННЫМ ВСП

М.И. Протасов

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия; e-mail: ProtasovMI@ipgg.sbras.ru*

В статье предложен алгоритм построения сейсмических изображений в анизотропных средах в истинных амплитудах. Основу алгоритма составляют Гауссовы пучки и лучевой метод. Рассматривается возможность определения упругих параметров на основе получаемых изображений в зависимости от угла падения. На основе анализа сингулярного разложения предложен устойчивый, оптимальный способ AVA-обращения (Amplitude Variation with Angle) относительно импедансов.

AVA-анализ, Гауссовы пучки, глубинное изображение, многокомпонентные данные, анизотропия

AMPLITUDE ANALYSIS OF SEISMIC IMAGES OF MULTICOMPONENT VSP DATA

M.I. Protasov

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
630090, Novosibirsk, Acag. Koptuyug prosp., 3, Russia; e-mail: ProtasovMI@ipgg.sbras.ru*

The article presents a true amplitude imaging procedure for anisotropic media. The basis of the algorithm are Gaussian beams and ray method. Here is considered the possibility to determine the elastic parameters on the basis of the obtained images depending on the angle of incidence. Based on the analysis of singular value decomposition is proposed robust optimal AVA (Amplitude Variation with Angle)-inversion with respect to impedances.

AVA-analysis, Gaussian beams, depth imaging, multi-component data, anisotropy

ВВЕДЕНИЕ

На сегодня наиболее популярной является анизотропная миграция, основанная на конечных разностях. Это так называемая миграция в обратном времени. В работе [Alkhalifah, 2000] представлено псевдо-акустическое приближение для вертикально-трансверсально-изотропной модели среды. Хотя дисперсионное соотношение такого скалярного уравнения дает кинематику, близкую к кинематике квазипродольной волны в настоящей упругой анизотропной модели, одновременно уравнение порождает ложную квазиперечную волну (см.: [Grechka et al., 2004]). Чтобы избавиться от нежелательной энергии квазиперечной волны, было предложено несколько подходов (см.: [Fletcher et al., 2009; Etgen, Brandsberg-Dahl, 2009]), которые дают практически только квазипродольную волну. Но все же есть ограничения у этих методов. Такой подход нельзя использовать для произвольной анизотропной среды, также возникают трудности с тем, чтобы получить истинные амплитуды в общем случае. Кроме того, для миграции в обратном времени требуется PP -, PS -разделение волнового поля, особенно в случае вертикального сейсмического профилирования (ВСП).

Метод, представленный в настоящей статье, позволяет строить изображения в истинных амплитудах по данным ВСП в анизотропных средах с произвольной анизотропией. Он является модификацией метода, разработанного ранее (см.: [Protasov, Borodin, 2012; Protasov, Tcheverda, 2012]). Описываемая проце-

дура основывается на использовании Гауссовых пучков в анизотропных средах (см.: [Номофилов, 1981]) и лучевого метода (см.: [Cervený, 2001; Chapman, 2004]). Особенность упругого анизотропного алгоритма связана с многокомпонентностью. Предлагаемая здесь процедура подавляет артефакты, связанные с обменом волн, поэтому не требуется предварительного разделения данных на PP -, PS -волны. Трассирование из текущей точки целевой области позволяет получить изображение потенциала рассеяния в зависимости от угла падения. В результате данной миграции получается изображение, где значения равны линеаризованному коэффициенту отражения. Далее исследуется возможность определения упругих параметров на основе анализа сингулярного разложения (см.: [Годунов и др., 1990]). В результате определяются оптимальные параметры среды, а именно импедансы, и предлагается способ AVA-обращения относительно импедансов.

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассматривается полуплоскость $R_2^+ = \{x, z : z > 0\}$, заполненная неоднородной упругой средой с модулями упругости $c_{ijkl} = c_{ijkl}^0 + c_{ijkl}^1$ и плотностью $\rho = \rho_0 + \rho_1$. Параметры $c_{ijkl}^0(x, z)$, $\rho_0(x, z)$ задают макро-модель, которая считается известной, тогда как $c_{ijkl}^1(x, z)$, $\rho_1(x, z)$ отвечают за быстрые осцилляции па-

раметров модели. Считается, что вдоль оси $x = 0$ (“скважина”) зарегистрированы рассеянные / отраженные волновые поля для заданного набора источников:

$$\bar{\Phi}(z_r; x_s; \omega) = \int \Gamma^\circ L_1 < \bar{u}_0 > d\zeta d\eta, H_1 \leq z_r \leq H_2. \quad (1)$$

Здесь

$$(L_1 < \bar{u}_0 >)_{x_j} \equiv - \sum_{i,l,k=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(c_{ijkl}^1(x, z) \frac{\partial u_{0x_l}}{\partial x_k} \right) - \rho^1 \omega^2 u_{0x_j};$$

$$x_1 \equiv x, x_2 \equiv z,$$

где $\bar{u}_0(\xi, \eta; x_s, 0; \omega)$ – падающее волновое поле, которое распространяется в макромодели от источника $(x_s, 0)$. Вместе с тем $\Gamma(0, z_r; \xi, \eta; \omega)$ – это матрица Грина, посчитанная в макромодели. Задача состоит в отыскании функций c_{ijkl}^1 , ρ_1 либо их комбинации на основе данных (1).

Для того чтобы восстановить быстро осциллирующую компоненту модели в точке $\bar{x} = (x_i, z_i)$, трассируются два qP -луча в направлении системы наблюдения. Луч, идущий к приемникам, должен попасть в одну из точек расположения приемников. Лучу, идущему к источникам, достаточно попасть в пределы апертуры источников, и вдоль него строится Гауссов пучок (рис. 1). Затем вычисляется нормальная производная этого пучка на линии источников, а в точке приемника вычисляется вес, компенсирующий геометрическое расхождение, неоднородность и анизотропию среды, а также время пробега от точки изображения до приемника:

$$\bar{T}_{gbp}^r(z_r; \omega; \gamma, \beta_2) = ie^{\frac{\pi}{4}} \sqrt{2\pi\omega} 2\rho_0 v_{qp} c_{qp} \sqrt{S_{eff}} \cdot e^{-i\omega\tau(x; z_r)},$$

$$T_{gbp}^s(x_s; \omega; \gamma, \beta_2) = u_{qp}^{gbs}(x_s, z; \bar{x}; \gamma, \beta_2; \omega) \cdot \left(\frac{v_{qp}}{c_{qp}} \right)^{1/2} \cdot \frac{2\rho_0 \cdot \bar{v}_{qp}^z}{(\bar{P}_{qp}^s \cdot \bar{g}_{qp}^s)} \Big|_{z=0}.$$

Использование метода перевала, а также асимптотического анализа на основе метода стационарной фазы дает следующее соотношение:

$$M < f^{qpqp}(x; \beta_2) \gg \int - \left(\frac{\cos(\beta_2)}{c_{qp}(\bar{x}; \beta_2)} + \frac{\cos(\beta_1)}{c_{qp}(\bar{x}; \beta_1)} \right) \times$$

$$\times T_{gbp}^s(x_s; \omega; \gamma, \beta_2) \cdot \bar{T}_{gbp}^r(z_r; \omega; \gamma, \beta_2) \cdot$$

$$\times \bar{\Phi}(z_r; x_s; \omega) dx_s d\gamma d\omega =$$

$$= \iint_{X_{par}(\bar{x})} d\bar{p} \iint_{V(\bar{x})} f^{qpqp}(\bar{y}; \gamma(\bar{p}), \beta_2) \cdot \exp(i \cdot \bar{p} \cdot (\bar{x} - \bar{y})) d\bar{y}.$$

Оператор M является суперпозицией двух линейных интегральных операторов – прямого преобразования Фурье по пространственным переменным от искомого возмущения макроскоростной модели

$$f^{qpqp}(\bar{y}; \gamma(\bar{p}), \beta_2) = \sum_{i,j,l,k} c_{ijkl}^1 \cdot g_j^2 \cdot g_l^1 \cdot p_i^2 \cdot p_k^1 \cdot \rho^1 \cdot g_j^2 \cdot g_l^1 \quad (3)$$

и “неполного” “почти обратного” преобразования Фурье. Мы называем “почти обратное” преобразование “неполным” потому, что множество в спектральной плоскости, по которому оно выполняется, является лишь частью всего пространства. Что касается названия “почти обратное”, то в данном случае функция $f^{qpqp}(\bar{y}; \gamma(\bar{p}), \beta_2)$ зависит от γ в силу анизотропии макромодели среды, которое, в свою очередь, зависит

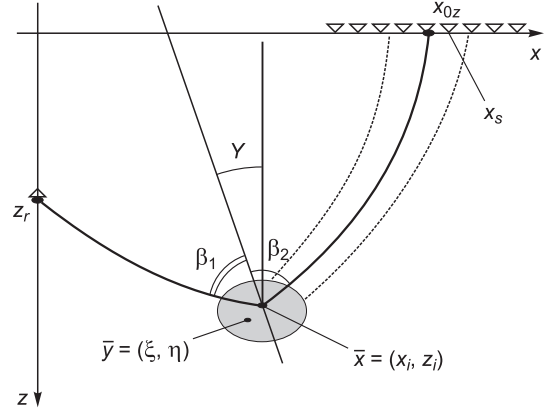


Рис. 1. Геометрия метода.

от спектральных переменных \bar{p} , поэтому вместо обращения получаем осреднение функции f^{qpqp} .

AVA-АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Результатом применения процедуры построения изображений является функция, которая в изотропной среде зависит только от угла падения:

$$f^{qpqp}(\bar{y}; \beta) = \lambda_1 + 2\mu_1 \cos^2(2\beta) + v_0^{\rho^2} \rho_1 \cos(2\beta).$$

Таким образом, чтобы получить значения упругих параметров в изотропном случае, нужно решить переопределенную или недоопределенную (в зависимости от количества углов падения) систему уравнений по отношению к упругим параметрам. При этом количество уравнений равно количеству углов наклона, для которых удастся построить изображение. Ясно, что для разных точек изображения будет разное количество уравнений ввиду разной освещенности. Поэтому важно понять, что можно обратить, а что нельзя для различных доступных диапазонов углов падения. Кроме того, важно понять, какая параметризация является наилучшей. Для этого были применены анализ сингулярного разложения (см.: [Годунов и др., 1990]) и понятие r -решения (см.: [Kostin, Tcheverda, 1995]). В анизотропном случае восстанавливаемая функция $f^{qpqp}(\bar{y}; \gamma(\bar{p}), \beta_2)$ зависит не только от угла падения, но и от угла наклона. Действительно, ведь скорость зависит от направления, а тогда для разных углов наклона границы коэффициенты отражения будут иметь различные значения. Поэтому здесь предложено делать обращение для каждого угла наклона, а затем результат суммировать. Таким образом, на первом шаге получим параметры среды для фиксированного угла наклона, а на втором шаге, просуммировав по всем углам, получим конечный результат.

В изотропном случае исследовалось три параметризации: параметры Ламе и плотность, AVO-параметры, импедансы и плотность. Результаты использования сингулярного разложения в случае, когда имеется достаточно широкий диапазон углов наклона – $\beta = [0^\circ : 1^\circ : 45^\circ]$, приведены на рис. 2. Видно, что наиболее точно и устойчиво определяются импедансы при использовании двух старших сингулярных векторов. В анизотропном случае исследовалась параметризация упругими модулями и импедансами с плотностью и с параметрами Томсона для VTI и TTI. Про-

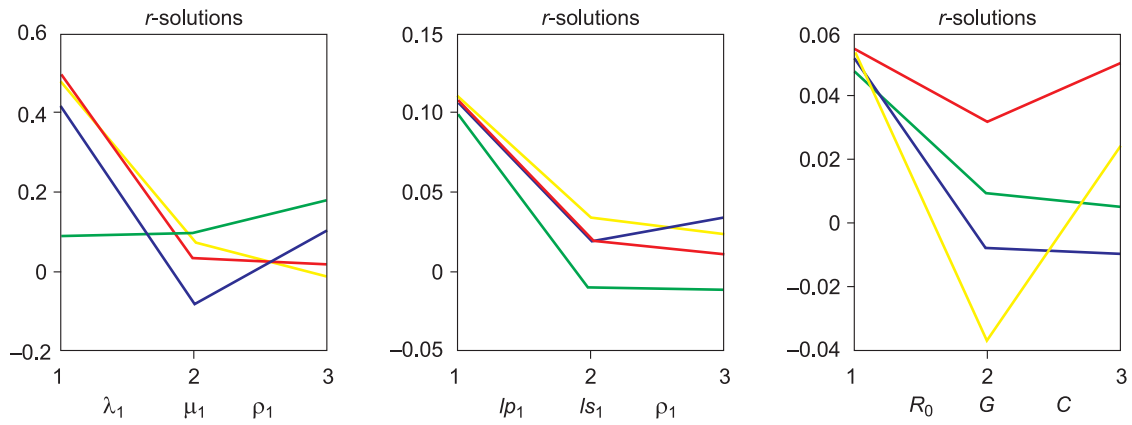


Рис. 2. Три r -решения (зеленым цветом – 1 сингулярный вектор, синим – 2, желтым – 3) для разных параметризаций (слева параметры Ламе и плотность, справа AVO-параметры, в центре импедансы), красным – истинные значения.

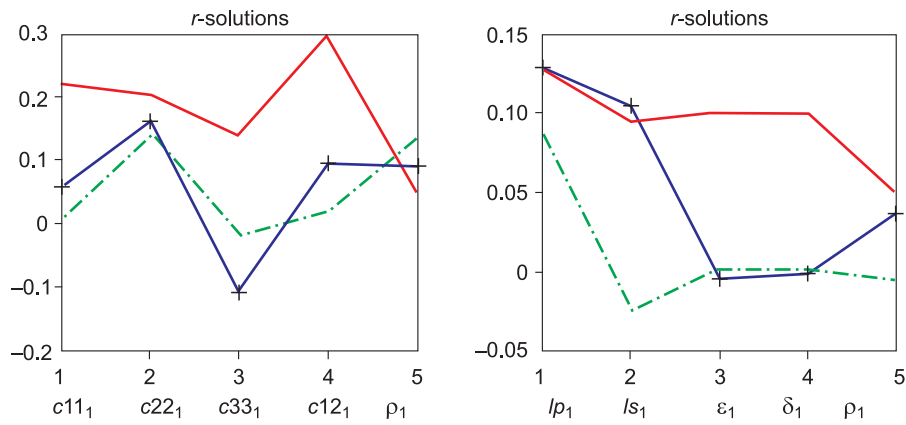


Рис. 3. Два r -решения (зеленым цветом – 1 сингулярный вектор, синим – 2) для разных параметризаций (слева – упругие параметры и плотность, справа – импедансы, параметры Томсона и плотность), красным – истинные значения.

екции на сингулярные векторы в случае достаточно широкого диапазона углов наклона $-\beta = [0^\circ : 1^\circ : 45^\circ]$, приведены на рис. 3. Результат оказался аналогичным изотропному. Видно, что наиболее точно и устойчиво определяются импедансы, где решение является проекцией на старшие сингулярные векторы. Для более узких диапазонов углов наклона достаточно точно и устойчиво определяется P -импеданс, S -импеданс ведет себя неустойчиво, особенно в окрестности нормального угла падения.

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Численные результаты были получены для реалистичной модели, которая содержит горизонтальные слои (рис. 4). Многокомпонентные синтетические данные были посчитаны посредством лучевого метода. Зондирующий сигнал – импульс Рикера с доминирующей частотой 30 Гц. Целевая область, выбранная для построения изображений, обозначена черным прямоугольником на рис. 4. На рис. 5 справа приведены синтетические сейсмограммы для горизонтальной и вертикальной компоненты смещения, рассчитанные для источника с выносом 1200 м. На рис. 6, а представлены истинные значения P -импеданса, а на рис. 6, б, в – результаты построения изображения с последую-

щим AVA-обращением для горизонтально-слоистой модели среды. Видно достаточно хорошее совпадение истинных значений импедансов в обоих случаях в

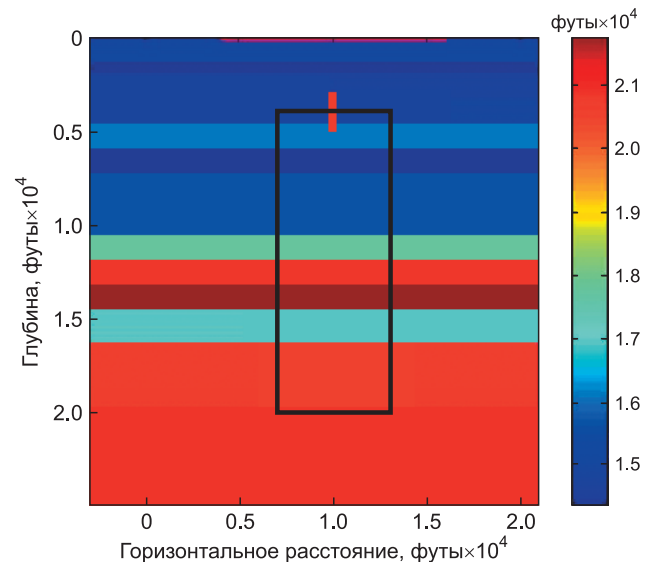


Рис. 4. Модель, система наблюдения и целевая область.

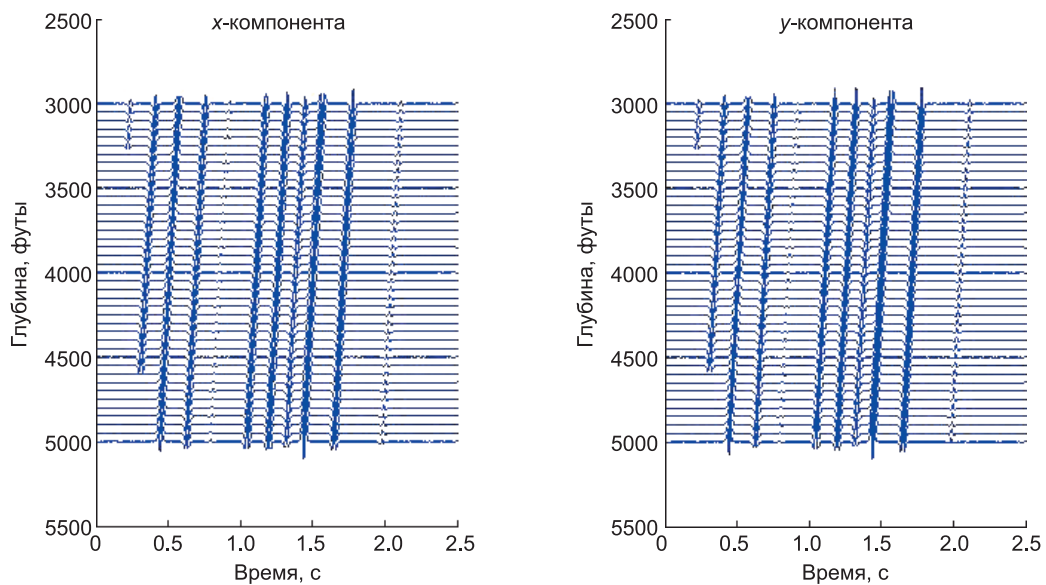


Рис. 5. Сейсмограммы для одного из источников.

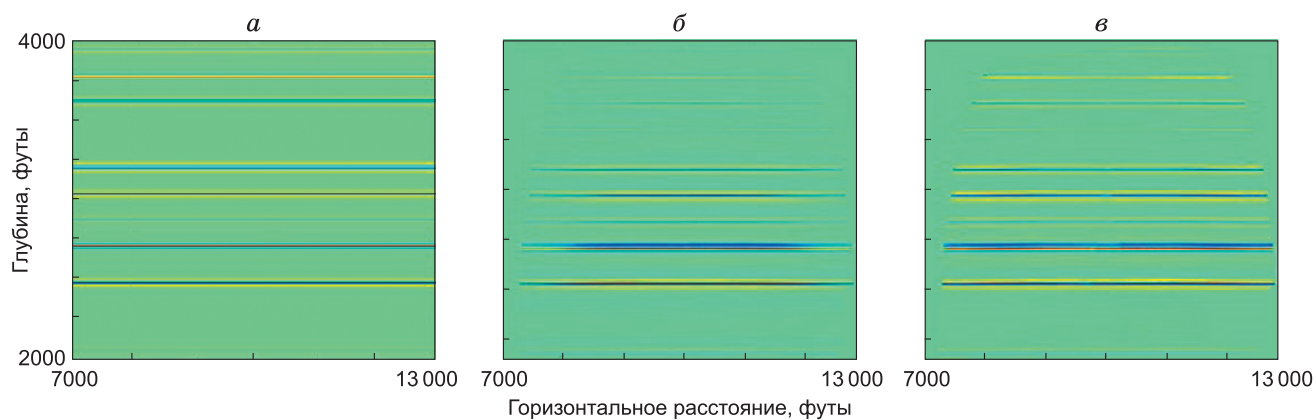


Рис. 6. Значения P -импеданса: истинные (*а*), восстановленные: проекция на один старший сингулярный вектор (*б*), проекция на два старших сингулярных вектора (*в*).

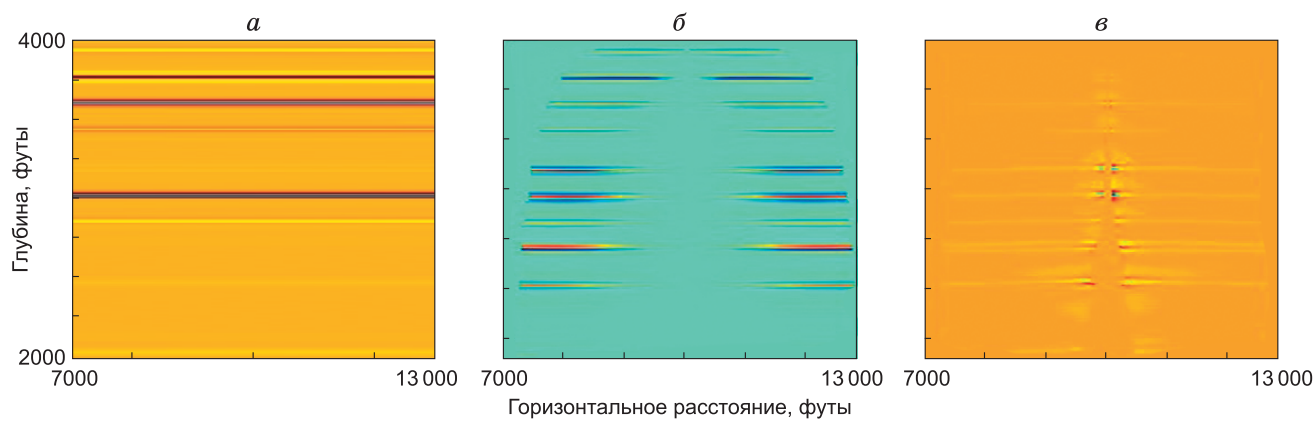


Рис. 7. Значения S -импеданса: истинные (*а*), восстановленные: проекция на один старший сингулярный вектор (*б*), проекция на два старших сингулярных вектора (*в*).

центральной части, т. е. вблизи нулевого выноса. Однако ближе к дальним выносам амплитуды r -решения с одним сингулярным вектором становятся меньше по отношению к истинным значениям, тогда как r -решение с использованием двух сингулярных векторов дает довольно точное решение в этом случае. На рис. 7, а представлены истинные значения S -импеданса, а на рис. 6, б, в приведены восстановленные значения S -импеданса для разных r -решений. Видна неплохая корреляция восстановленных значений S -импеданса в случае проекции на один старший сингулярный вектор и истинных значений S -импеданса вне центральной части, т. е. вдали от нормального падения. Однако вблизи нормального падения амплитуды r -решения с одним сингулярным вектором становятся существенно меньше по отношению к истинным значениям, а r -решение с использованием двух сингулярных векторов дает неустойчивое решение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в статье модификация развитой ранее процедуры построения изображений на основе гауссовых пучков наследует многие свойства своего аналога. Кроме того, данный алгоритм дает возможность провести AVA-анализ получаемых изображений в условиях геометрии ВСП. Для такой системы наблюдения оптимальной параметризацией для обращения являются импедансы. При этом наиболее устойчиво и точно восстанавливается P -импеданс. Использование r -решения с одним сингулярным вектором дает заведомо устойчивое обращение P -импеданса, однако более точное и одновременно достаточно устойчивое решение получается в результате использования двух сингулярных векторов.

Исследования выполнены при частичной поддержке РФФИ, грант 14-05-31257, а также при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-2909.2014.5.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

ПРОТАСОВ Максим Игоревич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.
Тел.: +7 (383) 330 27 96, e-mail: ProtasovMI@ipgg.sbras.ru

Литература

- Годунов С.К., Антонов А.Г., Кирилюк О.П., Костин В.И.** Гарантированная точность решения систем линейных уравнений в евклидовых пространствах. Новосибирск: Наука, 1990. 352 с.
- Номофилов В.Е.** Асимптотические решения системы дифференциальных уравнений второго порядка, сосредоточенные в окрестности луча // Записки научн. семин. ЛОМИ. 1981. Т. 104. С. 170–179.
- Alkhalifah T.** An acoustic wave equation for anisotropic media // Geophysics. 2000. V. 65. P. 1239–1250.
- Cerveny V.** Seismic Ray Theory. Cambridge Univ. Press, 2001.
- Chapman C.** Fundamentals of seismic wave propagation. Cambridge Univ. Press, 2004.
- Etgen J., Brandsberg-Dahl S.** The pseudo-analytical method: application of pseudo-Laplacians to acoustic and acoustic anisotropic wave propagation // 79th SEG Annual Intern. Meeting. 2009. Extended Abstracts. P. 2552–2555.
- Fletcher R., Du X., Fowler P.J.** Reverse time migration in tilted transversely isotropic (TTI) media // Geophysics. 2009. V. 74, N 6. P. 179–187.
- Grechka V., Zhang L., Rector J.W.** Shear waves in acoustic anisotropic media // Geophysics. 2004. V. 69. P. 576–582.
- Kostin V., Tcheverda V.** R-pseudoinverse for compact operator in Hilbert spaces: existence and stability // J. Inverse and Ill-Posed Problems. 1995. V. 3, N 2. P. 131–148.
- Protasov M., Borodin I.** Anisotropic Gaussian beam imaging of walk-away VSP data // 74th EAGE Conf. and Exhibition. 2012. Extended Abstracts. P098.
- Protasov M.I., Tcheverda V.A.** True-amplitude elastic Gaussian beam imaging of multi-component walk-away VSP data // Geophys. Prosp. 2012. V. 60. P. 1030–1042.

*Поступила 15 октября 2014 г.,
в окончательном варианте – 4 декабря 2014 г.*