

AVP АНАЛИЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПЕДАНСА ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН**Л.Т. Сантос, М. Тигель***Department of Applied Mathematics, IMECC, State University of Campinas, CP 6065, 13081-970, Campinas (SP), Brazil*

Вариации амплитуды в зависимости от удаления (угла падения) отраженных волн, кривые AVO (AVA), широко используются в настоящее время для исследования свойств коллекторов. После соответствующей обработки они представляют зависимость коэффициента отражения от удаления (угла) в определенных точках целевого горизонта, например, кровли пласта. Кроме информации, получаемой непосредственно из формы кривых AVO/AVA, можно количественно оценить параметры аппроксимирующей прямой, а также выявить вариации упругих свойств среды. При обработке данных ОГТ кривые AVA, как правило, выводятся из соответствующих кривых AVO с помощью известной зависимости угла отражения от удаления. Показано, что надежность определения упругих свойств среды зависит от принятого приближения для коэффициента отражения.

Недавно предложенный метод, в котором используется величина импеданса отраженной волны, позволяет получить приближенную зависимость коэффициента отражения упругих продольных волн от лучевого параметра. Такое приближение может быть полезно для анализа наблюдаемых кривых AVP (зависимость амплитуды от лучевого параметра). Показано, что кривые AVP более надежны, чем соответствующие кривые AVA, поскольку лучевой параметр как функция удаления зависит только от среднеквадратичной скорости в отличие от угла падения, который зависит также от менее стабильной интервальной скорости.

В данной работе предложен алгоритм обращения кривых AVP для исследования вариаций упругих параметров среды, предполагающий приближение коэффициента отражения продольных волн с использованием импеданса отраженной волны. Предварительные результаты обработки синтетических данных показывают, что эта процедура может составить хорошую альтернативу существующим методам изучения свойств коллекторов по кривым AVO/AVA.

*Отраженная волна, импеданс, инверсия, AVO, AVA, AVP.***INVERTING AMPLITUDE VERSUS RAY PARAMETER CURVES USING THE REFLECTION IMPEDANCE CONCEPT****L.T. Santos and M. Tygel**

Amplitude versus offset (AVO) or amplitude versus angle (AVA) curves are nowadays regularly extracted from seismic data for various purposes of reservoir studies and characterization. After adequate processing, these curves represent the variation of the reflection coefficients with respect of offset or angle at points of key target reflectors, such as, for example, the top of a reservoir. Besides the information that can be obtained merely from their shape, AVO/AVA curves can also be used to invert more quantitative attributes, such as the intercept and the gradient of the reflection coefficient or, even better, the elastic-parameter contrasts. For a common-midpoint gather, the AVA curve is generally derived from its AVO counterpart by means of a well-known expression that relates the reflection angle to offset. It is to be observed that a successful inversion of the sought-for attributes is strongly dependent on the approximations of the reflection coefficient that are considered.

The recently introduced reflection impedance concept provides an attractive approximation of the elastic PP-reflection coefficient as a function of the ray parameter. This approximation can be of value when amplitude versus ray parameter (AVP) curves are available from seismic data. It is to be observed that an AVP curve tends to be more reliable than its AVA counterpart. This is because the ray parameter, as a function of offset, depends on the RMS velocity only, as opposed to the incidence angle, which also depends on the more unstable interval velocity.

In this paper, we propose an algorithm to invert elastic-parameter contrasts from AVP curves using the reflection impedance approximation of the PP-reflection coefficient. First results shown on synthetic data indicate that the procedure may offer a promising alternative to existing methods of inverting reservoir attributes from AVO/AVA curves.

*Reflected wave, impedance, inversion, AVO, AVA, AVP***ВВЕДЕНИЕ**

Классический метод общей средней точки (ОСТ) — в англоязычной литературе CMP (common-midpoint) [1], в котором осуществляется накопление сигналов, отраженных от одной границы, позволяет получить модельный разрез среды и соответствующую скоростную модель во временной области в пределах этого разреза.

В этом методе суммируются отобранные записи ОСТ, т. е. записи пар источник—приемник, расположенных симметрично относительно неподвижной точки на профиле. В двумерном случае профильных наблюдений вдоль горизонтального профиля, в пределах одного разреза ОСТ, суммирование производится по годографу

$$T(h) = \sqrt{T_0^2 + Ch^2}, \quad (1)$$

с нормальным приращением времени пробега, называемым кинематической поправкой (*NMO*). В этом уравнении $T(h)$ — время пробега волны от пункта возбуждения до отражающего горизонта и обратно до пункта приема, h — половина расстояния между источником и приемником. Время пробега центрального луча при совмещенном положении источника и приемника соответствует T_0 , а параметр C максимизирует когерентность данных относительно годографа (1). Для времени пробега центрального луча относительно средней точки имеем

$$C = \frac{4}{V_{NMO}^2}, \quad (2)$$

где V_{NMO} — скорость с учетом кинематической поправки. Процедура, описанная в литературе как скоростной анализ, выполняется для всех положений средней точки и отобранных временных разрезов ОСТ и позволяет получить в результате интерполяции распределение скорости с учетом кинематической поправки. Распределение для (X_m, T_0) получают путем суммирования записей ОСТ в точках с координатой X_m по кривой *NMO* (1), используя данное время пробега центрального луча годографа ОСТ и параметр C , определяемый скоростью с учетом кинематической поправки $v_{NMO} = v_{NMO}(X_m, T_0)$.

В моделях слоистой среды с горизонтальными или пологими границами, лучевой параметр отраженного луча в методе ОСТ можно приближенно представить [2] как

$$p = \frac{1}{2} \frac{d}{dh} T(h) = \frac{C}{2\sqrt{C + T_0^2/h^2}}. \quad (3)$$

В известном соотношении

$$p = \frac{\sin \theta}{v}, \quad (4)$$

где θ — угол падения волны на отражающую границу и v — интервальная скорость, угол падения определяется выражением

$$\sin \theta = \frac{Cv}{2\sqrt{C + T_0^2/h^2}}. \quad (5)$$

Для монотипных продольных отраженных волн угол падения на отражающую границу (θ) совпадает с соответствующим углом отражения.

Напомним, что распределение интервальной скорости по глубине выводится из соответствующих значений скорости v_{NMO} с помощью известной формулы Дикса [3]. Таким образом, лучевой параметр, полученный непосредственно из наблюдаемых сейсмических данных, более надежен, чем используемый для той же цели угол падения, который, в свою очередь, выводится дополнительно путем инверсии.

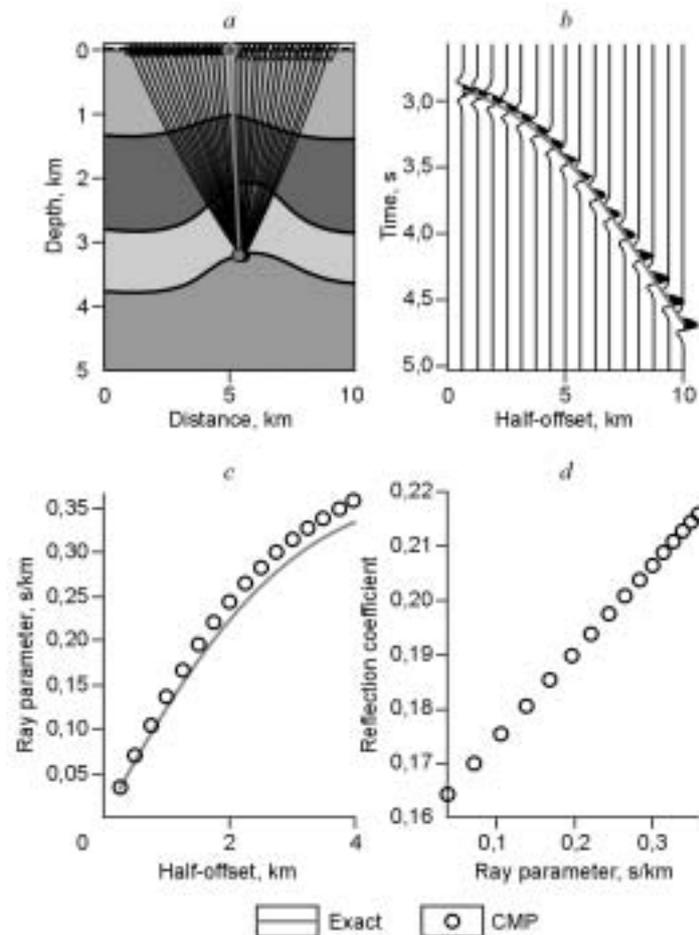


Рис. 1. Пример анализа AVP:

a — синтетическая модель, метод ОСТ; *b* — сейсмограмма ОСТ с годографом; *c* — точные и приближенные значения лучевого параметра; *d* — зависимость амплитуды от лучевого параметра.

На следующем этапе выполняется обращение кривых AVP (зависимости амплитуды от лучевого параметра) для лучей OCT. Пример AVP анализа показан на рис. 1 для синтетической модели.

СКОРОСТНОЙ АНАЛИЗ МЕТОДОМ CRS

Метод CRS (common reflection surface или общая поверхность фронта отраженной волны), предложенный П. Хубралом с соавторами [4], является естественным развитием метода OCT в двух важных аспектах. Во-первых, для каждой точки суммирования (которую называют теперь просто центральной точкой) рассматривается совокупность записей пар источник—приемник, расположенных произвольно относительно центральной точки. Таким образом, разрез не ограничивается условиями конкретной OCT. Во-вторых, кроме скорости v_{NMO} из наблюдаемых данных рассчитываются другие параметры. В нашем двумерном случае для каждой центральной точки и всех времен пробега центрального луча определяются три параметра. Эта процедура выполняется автоматически без предварительного отбора времен пробега.

Чтобы суммировать записи пар источник—приемник, которые не удовлетворяют условиям OCT, в методе CRS используется обобщенное гиперболическое приращение времени

$$T(x, h) = \sqrt{(T_0 + Ax)^2 + Bx^2 + Ch^2}, \quad (6)$$

где x и h — соответственно координаты OCT (относительно центральной точки) и полуудаление для пары источник—приемник, а T_0 — время пробега центрального луча относительно центральной точки. Как показано в [4], параметры A , B , C связаны с физическими величинами — параметрами или атрибутами CRS — выражением

$$A = \frac{2 \sin \varphi}{v_0}, \quad B = \frac{2T_0 \cos^2 \varphi}{v_0} K_N, \quad C = \frac{2T_0 \cos^2 \varphi}{v_0} K_{NIP}, \quad (7)$$

где φ — угол выхода центрального луча относительно нормали к поверхности, а K_N и K_{NIP} — кривизна фронтов волн N и NIP соответственно [5]. Все эти величины оцениваются в центральной точке. Наконец, v_0 — средняя скорость, также в центральной точке. Видно, что формула (6) для разреза OCT сводится к выражению кинематической поправки (1), т. е. при $x = 0$. Кроме того, очевидно, что V_{NMO} и параметры CRS связаны выражением

$$V_{NMO}^2 = \frac{4}{C} = \frac{2v_0}{T_0 \cos^2 \varphi K_{NIP}}. \quad (8)$$

В [5] волна NIP описывается как фиктивная волна, распространяющаяся от основания центрального луча, нормального к отражающей поверхности (NIP — normal incident point), вверх со скоростью вдвое меньше, чем скорость в данной среде. Волна N — это тоже фиктивная волна, распространяющаяся в виде волнового фронта, совпадающего с отражающей поверхностью в окрестности основания центрального луча. Понятие фиктивной волны, соответствующей NIP (без специального названия), а также выражение, аналогичное (8), связывающее кривизну ее фронта и скорость v_{NMO} , приводятся в работе [6].

Метод CRS можно применять в AVP анализе таким же образом, как метод OCT. Преимущество подхода CRS состоит в том, что исследуется когерентность совокупности возможных значений параметров для центральной точки и времен пробега центрального луча с использованием всех записей, а не только разрезов OCT. Таким образом, следует ожидать, что большая избыточность данных наряду с процедурами осреднения и сглаживания позволят получить методом CRS более надежное распределение скоростей. Подтверждение этому можно найти в новой работе Х. Перру и М. Тигеля [7].

Кроме того, в результате обработки методом CRS получают разрез, отражающий меру когерентности в каждой точке разреза OCT. Его анализ позволяет выделить области с высокими значениями функции когерентности и уделить этим областям особое внимание. Такой разрез для синтетической модели (см. рис. 1,а) и соответствующее изображение параметра C показаны на рис. 2.

ИМПЕДАНС ОТРАЖЕННОЙ ВОЛНЫ

Как было впервые показано в [8] и обсуждалось в [9], можно получить функцию импеданса волны (I), при которой коэффициент отражения представлен удобным приближением

$$R_{PP} = \frac{I(\rho_2, \alpha_2, \beta_2, p) - I(\rho_1, \alpha_1, \beta_1, p)}{I(\rho_2, \alpha_2, \beta_2, p) + I(\rho_1, \alpha_1, \beta_1, p)}, \quad (9)$$

где ρ_j , α_j , β_j — плотность и скорости продольных и поперечных волн соответственно по обе стороны отражающей границы ($j = 1$ и $j = 2$). При этом лучевой параметр $p = \sin \theta/\alpha$, а θ — угол падения.

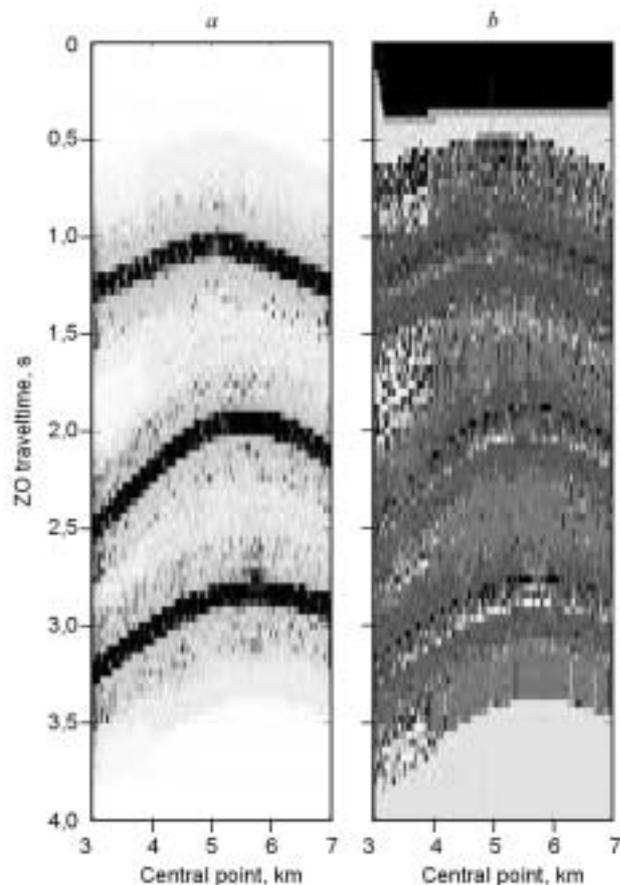


Рис. 2. Разрез, отражающий меру когерентности в каждой точке разреза ОСТ, полученный методом CRS для модели, показанной на рис. 1, *a*; *b* — параметр *C*.

В общем виде уравнение (9) не позволяет учитывать замкнутую функцию импеданса I , которая служит адекватным приближением коэффициента отражения для произвольных упругих параметров ρ , α и всех лучевых параметров p . Таким образом, требуются дополнительные ограничения. В [9] рассматривается зависимость типа соотношения Гарднера

$$\rho = b\beta^\gamma, \quad (10)$$

где b и γ — некоторые постоянные. При таком ограничении импеданс отраженной волны имеет вид

$$I = \frac{\rho\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2p^2}} \exp \{-2[2 + \gamma]\beta^2p^2\}. \quad (11)$$

Заменяя (10) на условие

$$K = \beta^2/\alpha^2, \quad (12)$$

где K — постоянная, можно получить импеданс упругой волны, представленный выражением

$$I = \rho^{(1-4K \sin^2 \theta)} \alpha^{\sec^2 \theta} \beta^{-8K \sin^2 \theta}, \quad (13)$$

полученным ранее [8] и содержащим не лучевой параметр, а угол падения.

На практике обычно требуется рассчитать по данным каротажа значения постоянных b и γ для отраженной волны и постоянной K для упругой волны.

На рис. 3 приближения, полученные с помощью выражений (9), (11) и (13), сравниваются с линейным приближением К. Аки и П. Ричардса [10] для представительной упругой модели. Видно, что импеданс отраженной волны дает хорошую точность даже для углов в критическом диапазоне значений.

ИНВЕРСИЯ КРИВЫХ AVP

В предыдущих двух разделах было показано, что лучевой параметр можно легко вывести непосредственно из данных наблюдений и коэффициент отражения PP можно представить в приближенном виде через импеданс отраженной волны. Учитывая эти возможности, переходим к основной задаче нашей работы — обращению кривых AVP.

Прежде чем приступить к описанию процедуры анализа, уместно переписать выражение для

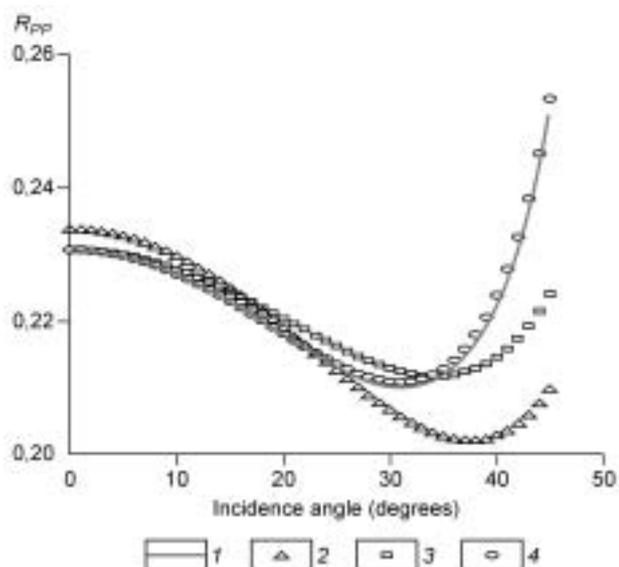


Рис. 3. Приближения R_{PP} :

1 — точная зависимость, 2 — линейное приближение, 3 — импеданс упругой волны, 4 — импеданс отраженной волны.

коэффициента отражения (9) в более удобном для нас виде. Из уравнений (9) и (11) следует, что

$$R_{PP}(p) = \frac{J(p) - 1}{J(p) + 1}, \quad (14)$$

где

$$J(p) = \frac{I(\rho_2, \alpha_2, \beta_2, p)}{I(\rho_1, \alpha_1, \beta_1, p)} = \frac{\rho_2 \alpha_2}{\rho_1 \alpha_1} \sqrt{\frac{1 - \alpha_1^2 p^2}{1 - \alpha_2^2 p^2}} \exp \{-2[2 + \gamma] (\beta_2^2 - \beta_1^2)\}. \quad (15)$$

В целях инверсии теперь запишем

$$J(p) = \Lambda_3 \sqrt{\frac{1 - \Lambda_1^2 p^2}{1 - \Lambda_2^2 p^2}} \exp \{\Lambda_4 p^2\}, \quad (16)$$

где

$$\Lambda_1 = \alpha_1, \quad \Lambda_2 = \alpha_2, \quad \Lambda_3 = \frac{\rho_2 \alpha_2}{\rho_1 \alpha_1}, \quad \Lambda_4 = -2[2 + \gamma] (\beta_2^2 - \beta_1^2). \quad (17)$$

Параметры Λ_i можно вывести из набора лучевых параметров $\{p_n\}$ и соответствующих коэффициентов отражения $\{R_n\}$ с помощью метода наименьших квадратов. Тогда задача оптимизации формулируется как

$$\min_{\Lambda_i} \sum_{n=1}^N \left[R_n - \frac{J(p_n) - 1}{J(p_n) + 1} \right]^2. \quad (18)$$

Получив оптимальное решение, находим отношения для скоростей продольных волн и плотность:

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{\Lambda_2}{\Lambda_1}, \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \Lambda_3 \frac{\Lambda_1}{\Lambda_2}. \quad (19)$$

Чтобы получить такое отношение для скорости поперечных волн, необходимо иметь дополнительную информацию по полевым данным. Например, для оценки значений постоянной γ в уравнении (10) используются данные каротажа:

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{1/\gamma}. \quad (20)$$

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Точность описанного выше анализа AVP можно протестировать простым способом с помощью наглядной четырехслойной модели (рис. 4). Скорости поперечных волн по обе стороны отражающей границы даны для каждой границы через соответствующие скорости продольных волн, деленные на $\sqrt{2}$ и $\sqrt{3}$. Плотность принята равной 1,2 и 1,5 г/см³ соответственно над и под границей. Для центральной точки x_0 и времен пробега по центральному лучу T_0 в расчетах по методу CRS [11] приняты значения в интервалах [3, 7] км и [0, 4] с соответственно.

Для каждой границы выбирается область с большими значениями функции когерентности, и процедура инверсии выполняется в пределах этой области для каждой точки x_0 . Рассмотрим два случая: а) с точными значениями коэффициента отражения и б) в присутствии 10 % помех. Постоянная γ из уравнения (20) принимается равной среднему значению:

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{3} \frac{\ln \sum_{j=1}^3 [\beta_{j+1}/\beta_j]}{\ln(1,5/1,2)} = -0,4795. \quad (21)$$

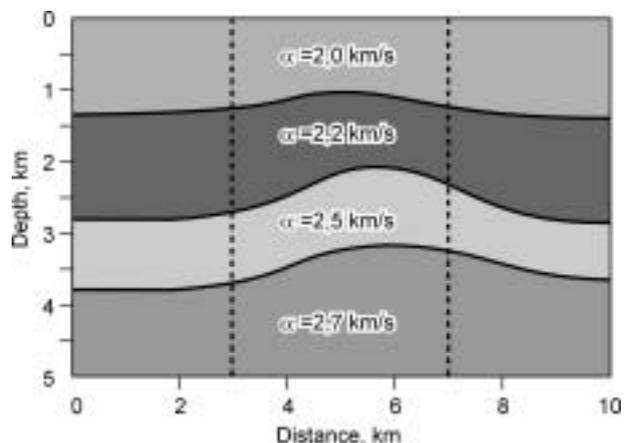


Рис. 4. Синтетическая модель, численное моделирование.

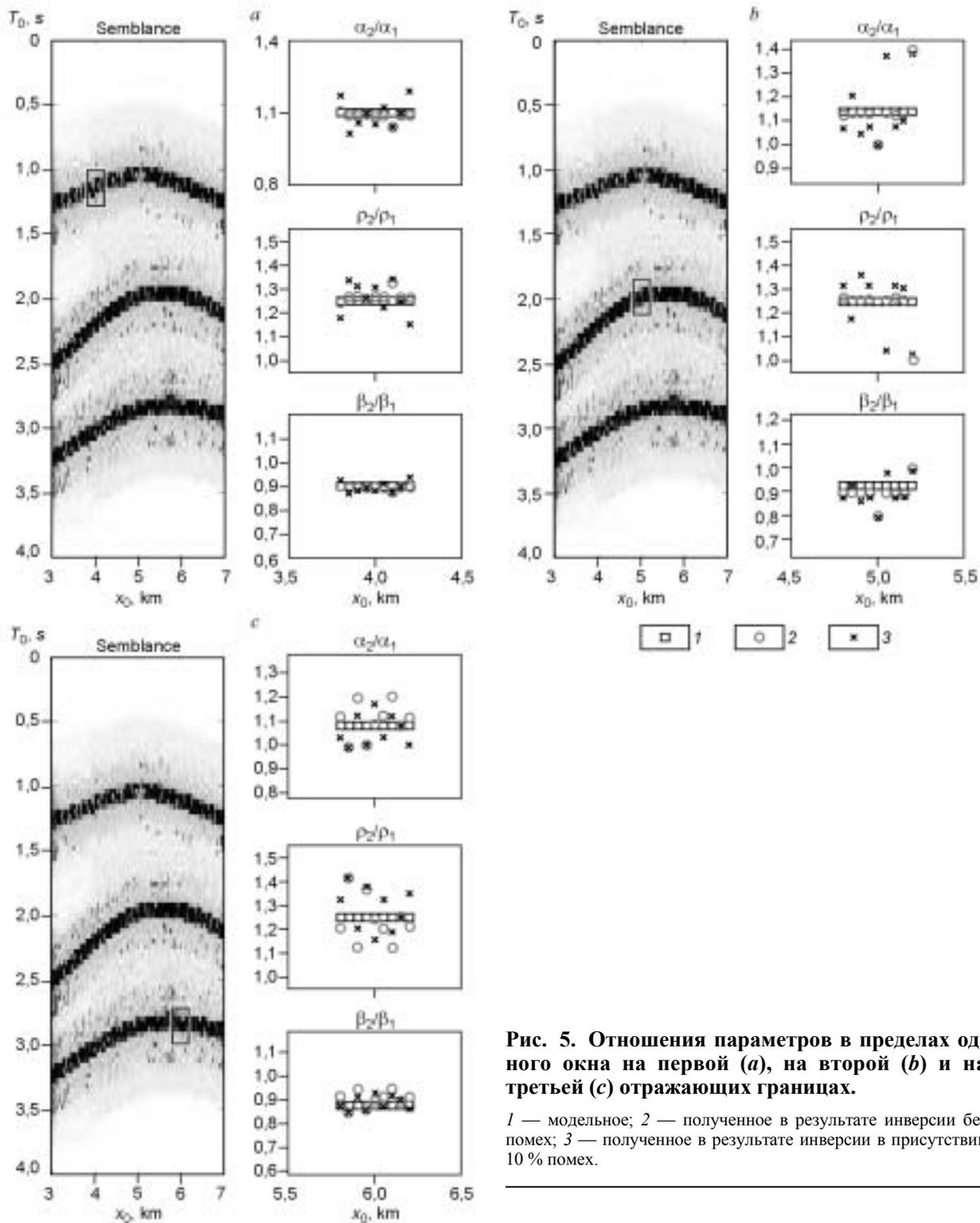


Рис. 5. Отношения параметров в пределах одного окна на первой (а), на второй (b) и на третьей (c) отражающих границах.

1 — модельное; 2 — полученное в результате инверсии без помех; 3 — полученное в результате инверсии в присутствии 10 % помех.

Результаты показаны на рис. 5. Следует отметить, что поскольку слои однородны, все отношения параметров постоянны вдоль оси x_0 для каждой границы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена интерпретация зависимости амплитуды отражений от лучевого параметра (AVP анализ) с помощью метода CRS в сочетании с методом, в котором коэффициент отражения продольных волн выражен через параметр импеданса. Метод CRS позволяет исследовать когерентность и сейсмиче-

ские атрибуты, отражающие вариации лучевого параметра в точке отражения от целевых горизонтов в рамках модели упругой среды. Приближение коэффициента отражения с использованием параметра сопротивления оказывается более удобным для целей инверсии.

Точность предложенного алгоритма инверсии оценивалась на синтетической модели четырехслойной среды, и было получено хорошее приближение параметров упругости для всех трех границ. Результаты численного моделирования показывают, что предложенный алгоритм может успешно применяться для обработки сейсмических наблюдений.

Работа выполнена при поддержке Совета научно-технического развития Бразилии (гранты 307165/2003-5 и 301733/2004-0), фонда FAPESP поддержки научных исследований Бразилии (грант 01/01068-0) и Консорциума WIT (Wave Inversion Technology).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Dix C.H.** Seismic velocities from surface measurements // *Geophysics*, 1955, v. 20, p. 68—86.
2. **Castagna J.P., Backus M.M.** Offset-dependent reflectivity — theory and practice of AVO analysis // *SEG*, 1993, № 8, p. 103—111.
3. **Hubral P., Krey T.** Interval velocities from seismic reflection time measurements // *SEG*, 1980.
4. **Hubral P., Höcht G., Jäger R.** An introduction to the common reflection surface stack // 60th EAGE Conference & Exhibition: Expanded Abstracts, Session 01-19, 1998.
5. **Hubral P.** Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth // *Geophysics*, 1983, v. 48, p. 1051—1062.
6. **Черняк В.С., Гриценко С.А.** Интерпретация эффективных параметров ОГТ для пространственной системы однородных слоев с криволинейными границами // *Геология и геофизика*, 1979 (12), с. 112—120.
7. **Perroud H., Tygel M.** Velocity estimation by the CRS method: Using GPR data // *Geophysics*, 2005, v. 70, p. B43—B52.
8. **Connolly P.A.** Elastic impedance // *The Leading Edge*, 1999, v. 18, p. 438—452.
9. **Santos L.T., Tygel M.** Impedance-type approximations of the *P-P* elastic reflection coefficient: Modeling and AVO inversion // *Geophysics*, 2004, v. 69, p. 592—598.
10. **Аки К., Ричардс П.Г.** Количественная сейсмология, теория и методы, Т. 1. М., Мир, 1983, 520 с.
11. **Santos L., Yano F., Salvatierra M. et al.** A global optimization algorithm applied to the CRS problem // *J. Seismic Exploration*, 2005, v. 14, № 2—3, p. 217—233.

*Поступила в редакцию
3 октября 2005 г.*