

С.Н. Скрипкин

ГОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина»,  
г. Москва

**Ключевые слова и фразы:** автоматическая интерпретация разломов; автоматическая сейсмическая интерпретация; атрибутивный анализ; структурный анализ; трехмерная сейсморастведка.

**Аннотация:** В статье описывается новый подход к вычислению атрибутов для выделения структурных нарушений на основе результатов трехмерной сейсморастведки. Предлагаемый набор сейсмических атрибутов позволяет более точно извлекать из данных информацию о местоположении структурных нарушений, а также лишен многих недостатков, свойственных другим методам, применяемым в настоящее время для идентификации зон неоднородностей. Описанные методы позволяют также получать достоверную оценку углов падения пласта, что также является необходимым при проведении структурного анализа. В отличие от большинства существующих методов данная оценка не является локальной, что повышает качество итоговых результатов. В статье приводится математическое описание предлагаемого подхода, а также отличия от альтернативных методов.

Атрибутивный анализ является одним из важных методов интерпретации результатов трехмерной сейсморастведки, позволяющим повысить качество результатов, а также облегчить выделение отдельных объектов в структуре горных пород, например, тектонических нарушений. С самого начала интенсивного промышленного использования трехмерной сейсморастведки в середине 90-х гг. широкое освещение получила проблема быстрой идентификации разломных зон, что позволило бы сократить время, затрачиваемое геофизиками на интерпретацию данных вручную. К наиболее известным и используемым в настоящее время методам относятся атрибуты, основанные на вычислении т.н. «когерентности» [1], схожий с когерентностью метод вычисления локальной дисперсии сигнала [2], а также ряд атрибутов, основанных на стабильности локальной оценки вектора градиента в трехмерном поле амплитуд [3, 4]. Основное предположение, лежащее в основе большинства используемых сейчас методов, состоит в том, что разломная зона характеризуется слабой пространственной корреляцией значений амплитуд сейсмических волн, и, соответственно, может быть выявлена с помощью оценки такой корреляции. Существенным недостатком такого подхода является то, что при наличии шумов в сейсмических данных пространственная корреляция значений амплитуд относительно низка также и в зонах отсутствия нарушений, что приводит к появлению ложных разломов. Также, некоторые из указанных методов позволяют получать только локальную оценку неоднородности, а это затрудняет и замедляет интерпретацию поверхностей разломов. Часть атрибутов построена, исходя из предположения о горизонтальном простираии пластов, что сильно ограничивает область их применения.

В данной статье приводится метод, позволяющий вычислять семейство сейсмических атрибутов, лишенных упомянутых выше недостатков.

Целью метода атрибутивного анализа, предназначенного для выявления зон структурных нарушений, является расчет атрибута, имеющего высокие значения только в зонах наличия нарушений, и низкие – во всех других (или наоборот).

Для эффективного описания предлагаемого алгоритма и принципов, на которых он основан, необходимо ввести некоторые определения.

*Шаблон.* Шаблоном  $\Omega$  будем далее называть совокупность точек  $\omega$  с целочисленными декартовыми координатами  $(i, j, k)$  составленную согласно определенному правилу:

$$\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_n\} \quad \omega_m = (i_m, j_m, k_m) \quad (1)$$

*Образец.* Образцом  $\Lambda$  извлеченным по шаблону  $\Omega$  вокруг точки-ядра  $K$  с угловыми параметрами  $(\varphi, \theta, \psi)$  назовем совокупность значений  $\lambda$ , задаваемых следующим выражением:

$$\Lambda_{\Omega}(K, \varphi, \theta, \psi) = (\lambda_1, \dots, \lambda_m), \quad \lambda_m = S(K + \omega^{\varphi, \theta, \psi}) \quad (2)$$

где  $S(t)$  – значение сейсмического атрибута в точке  $t$  с некоторыми пространственными координатами  $(i, j, k)$ , а угловые индексы  $(\varphi, \theta, \psi)$  точки  $\omega$  означают последовательное вращение исходного шаблона  $\Omega$  на угол  $\varphi$  вокруг оси  $Z$ , на угол  $\theta$  вокруг новой оси  $X$  и угол  $\psi$  вокруг новой оси  $Y$ .

*Расстояние по образцам.* Используя введенные выше понятия образца и шаблона можно ввести меру расстояния между двумя произвольными точками  $K_1$  и  $K_2$  в сейсмическом объеме:

$$d(K_1, K_2) = L(\Lambda_{\Omega}(K_1, \varphi, \theta, \psi), \Lambda_{\Omega}(K_2, \varphi, \theta, \psi)) = \frac{|\Lambda_{\Omega}(K_1, \varphi, \theta, \psi) - \Lambda_{\Omega}(K_2, \varphi, \theta, \psi)|}{|\Lambda_{\Omega}(K_1, \varphi, \theta, \psi) + \Lambda_{\Omega}(K_2, \varphi, \theta, \psi)|} \quad (3)$$

В приведенном выше выражении (3) в качестве нормы обычно используется, евклидова норма  $L_2$ .

В отличие от большинства существующих методов, предлагаемый подход не основан на прямом измерении в каждой точке сейсмического объема степени неоднородности сигнала в некоторой окрестности. Вместо этого предлагается выявить и использовать фундаментальные отличия между тремя типами зон в сейсмическом сигнале – зоной отсутствия нарушений, разломной зоной, и хаотичной зоной, когда в сигнале отсутствует какая-либо пространственная упорядоченность. Конечно, такое деление достаточно условно, однако, мера принадлежности каждой точки разломной зоне может быть использована в качестве индикатора наличия структурного нарушения в данной точке.

Приведем основные характеристики каждой из упомянутых зон, важные для определения нарушений.

Разлом:

- Стабильность образцов вдоль некоторого направления в плоскости разлома (основное направление).

- Нестабильность образцов в направлениях перпендикулярных основному.

Хаотичный участок:

- Нестабильность вдоль любого направления, отсутствие доминирующего основного направления.

Отсутствие нарушений:

- Стабильность по всем направлениям в некоторой плоскости, отсутствие в этой плоскости доминирующего основного направления.

Отметим, что под стабильностью образцов в некотором направлении понимается низкое значение расстояния по образцам (3) между точками в этом направлении.

На приведенных различиях построен предлагаемый метод атрибутного анализа, в котором хаотичные зоны и зоны отсутствия нарушений объединяются в один класс.

Введем необходимые далее понятия обобщенного образца и обобщенного шаблона.

Обобщенный шаблон  $\hat{\Omega}$  определяется с помощью обычного шаблона  $\Omega$  следующим образом:

$$\hat{\Omega} = \bigcup_{i=-\tau, j=-\tau}^{i=\tau, j=\tau} \eta_{ij} (\omega + (i, j, 0)) \quad \forall \omega \in \Omega$$

, где  $\tau$  - ширина обобщения, коэффициенты  $\eta$  принимают значения 1 или 0 в зависимости от того, входит ли точка  $(i, j, 0)$  в обобщение. Удаление части точек из обобщения обусловлено лишь повышением производительности алгоритма.

Обобщенный образец определим следующим образом:

$$\hat{\Lambda}_{\hat{\Omega}}(K, \varphi, \theta, \psi) = \bigcup_{i=-\tau, j=-\tau}^{i=\tau, j=\tau} \eta_{ij} \Lambda(K + (i, j, 0), \varphi, \theta, \psi) \quad (4)$$

Отметим, что вращение, определяемое угловыми параметрами  $(\varphi, \theta, \psi)$  относится в данном случае к обобщенному шаблону  $\hat{\Omega}$ , то есть начало системы координат, в которой происходит вращение, находится в ядре образца с нулевым смещением.

Далее, для обобщенного образца введем понятия подобия вдоль направлений  $i$  и  $j$ .

$$SimI(K, \varphi, \theta, \psi) = \sum_{\Lambda_i, \Lambda_j \in \hat{\Lambda}_{\hat{\Omega}}, i > j} L(\Lambda_i(K, \varphi, \theta, \psi), \Lambda_j(K, \varphi, \theta, \psi)) \mu_i^I \quad (5)$$

$$SimJ(K, \varphi, \theta, \psi) = \sum_{\Lambda_i, \Lambda_j \in \hat{\Lambda}_{\hat{\Omega}}, i > j} L(\Lambda_i(K, \varphi, \theta, \psi), \Lambda_j(K, \varphi, \theta, \psi)) \mu_j^J \quad (6)$$

Весовые коэффициенты  $\mu$  в каждом случае определяют конкретный вид функции подобия. Пример матриц  $\mu$  для простейшего случая, когда ширина обобщения равна 1, представлен ниже. Матрицы можно задать с помощью следующих матриц  $\mu$

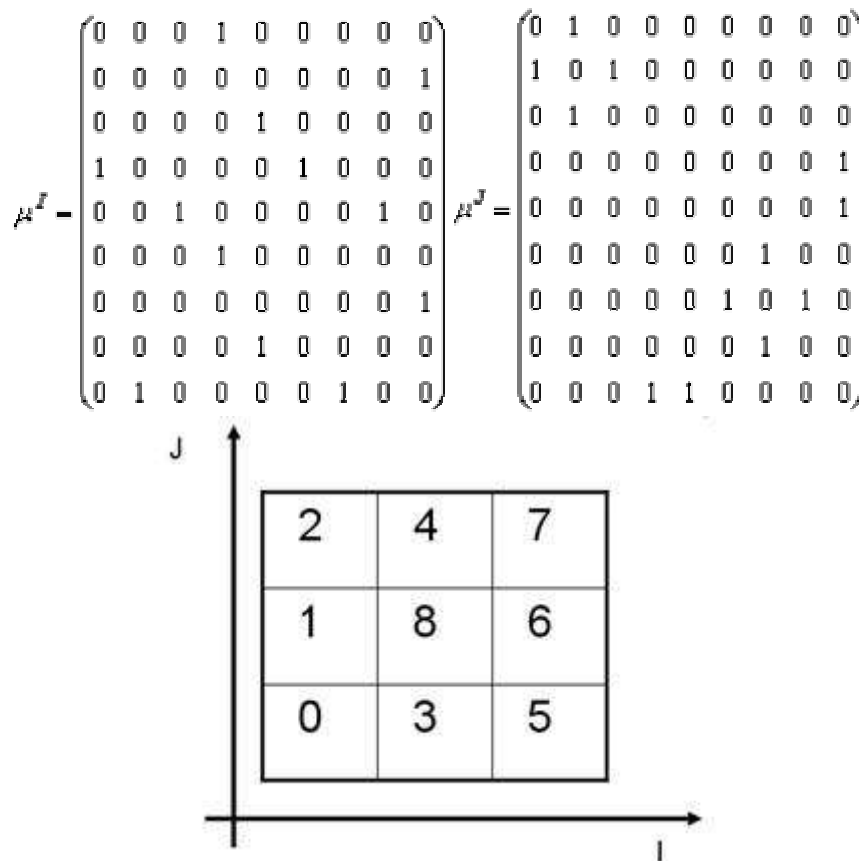


Рис. 1. Нумерация в обобщенном шаблоне шириной 1

Пусть нумерация в обобщенном шаблоне задается следующим образом (рис. 1). Применение, например матрицы,  $\mu^I$  приводит к функции подобия равной сумме расстояний между всеми образцами такими, что разница между координатами их ядер равна (1, 0, 0) либо (-1, 0, 0).

Используя введенные выше функции подобия определим функцию G, рассчитываемую в каждой точке K сейсмического объема:

$$G(K) = \min_{\varphi, \theta, \psi} D(K, \varphi, \theta, \psi) \quad (7)$$

$$D(K, \varphi, \theta, \psi) = (SimI^2(K, \varphi, \theta, \psi) + SimJ^2(K, \varphi, \theta, \psi)) \quad (8)$$

$$(\varphi^*, \theta^*, \psi^*) = \arg \min_{\varphi, \theta, \psi} D(K, \varphi, \theta, \psi) \quad (9)$$

$$\varphi \in \Phi, \theta \in \Theta, \psi \in \Psi \quad (10)$$

Как видно, смысл этой функции состоит в нахождении такого положения обобщенного шаблона, которое обеспечивало бы максимально возможное в точке K подобие по направлениям I и J в доступном диапазоне значений углов вращения.

Значения G в точках отсутствия нарушений заметно ниже, чем в участках тектонических нарушений. Таким образом, ее можно использовать в качестве фильтра зон с высокой пространственной корреляцией сигнала. Однако, наряду с зонами разломов G, будет иметь также высокие значения в зонах третьего типа (см. выше) – полного отсутствия пространственной корреляции сигнала. Для выявления различий между такими зонами и разломными участками можно использовать функцию следующего вида:

$$G^*(K) = | SimI^2(K, \varphi^*, \theta^*, \psi^*) - SimJ^2(K, \varphi^*, \theta^*, \psi^*) | \quad (11) \quad \text{где } (\varphi^*, \theta^*, \psi^*) \text{ являются}$$

аргументом минимума в определении G(K). Использование этой функции обусловлено тем, что в зонах отсутствия пространственной корреляции сигнала (также как в зонах с отсутствием нарушений) значения подобия по взаимноперпендикулярным направлениям I и J в области минимума функции G(K) одного порядка. В то же самое время в областях разломов, где, как отмечено выше, присутствует доминирующее основное направление, разность, определенная формулой выше принимает высокие значения.

Таким образом, значение  $G^*(K)$  в каждой точке сейсмического объема является индикатором принадлежности этой точки разломной зоне, что является искомой характеристикой.

Отметим также, что минимизация функции  $G(K)$ , необходимая для определения  $G^*(K)$  позволяет оценивать в каждой точке сейсмического объема углы простираения пластов, что является ценной информацией для структурного анализа. В тройке  $(\varphi^*, \theta^*, \psi^*)$  наибольшее значение представляет  $\varphi^*$ , характеризующий угол падения пласта. Большинство существующих методов определения углов падения на основе 3Д сейсморазведки основаны на аппроксимации градиента поля амплитуд. Получаемая с их помощью оценка является локальной, в то время как предлагаемый метод позволяет задавать размер окрестности, в которой происходит расчет.

Изложенный выше подход к расчету трехмерных атрибутов был реализован программно и протестирован на ряде трехмерных сейсмических съемок тектонически-сложных участков в различных регионах мира.

Полученные результаты позволяют сделать выводы о существенном превосходстве предлагаемого метода над стандартными алгоритмами, основанными на измерении пространственной корреляции сигнала:

- Предлагаемый метод лишен одного из главных недостатков альтернативных подходов – ложных прослеживаний в зонах хаотично распределенного сигнала.
- В отличие от альтернативных подходов описанный алгоритм позволяет идентифицировать как крупные, так и небольшие нарушения, причем требуемая степень детальности может регулироваться.
- Предлагаемый метод не основан на предположениях о геометрической форме нарушений, геометрии простираения пластов и пр., что расширяет область его возможного применения.
- Наряду с определением положения тектонических нарушений предлагаемый метод позволяет получать надежную оценку углов простираения пластов. Эта информация может быть использована при структурном анализе объекта, выделении зон интенсивной трещиноватости и пр.

#### *Список литературы*

1. Adam Gersztenkorn, Kurt J. Marfurt. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping / SEG GEOPHYSICS, Volume 64, №5 (September-October 1999); P. 1468–1479.
2. van Bemmel, P., and Pepper, R.E.F. SEISMIC SIGNAL PROCESSING AND APPARATUS FOR GENERATING A CUBE OF VARIANCE VALUES, U.S. Patent Number 6, 151, 555. 2000.
3. Randen, T. et al. (2001), Automatic extraction of fault surfaces from three-dimensional seismic data. Extended Abstracts of 71st Annual International Meeting, Society Of Exploration Geophysics.
4. Randen, T. et al. (2000), Three-Dimensional Texture Attributes for Seismic Data Analysis. SEG 2000 Expanded Abstracts

---

## **New Seismic Attributes for Structural Analysis**

**S.N. Skripkin**

*Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkin, Moscow*

**Key words and phrases:** automated interpretation of splits; automated seismic interpretation; attribute analysis; structural analysis; three-dimensional seismic exploration.

**Abstract:** The paper describes a new approach to calculation of attributes for identification of structural faults on the basis of three-dimensional seismic exploration. The proposed set of seismic attributes enables to produce more accurate data on location of structural defaults; it lack disadvantages typical of other methods applied to identify these faults. The described method allows estimating formation dip which is essential for structural analysis. As opposed to the majority of the existing methods this estimation isn't local which improves the quality of final results. The paper presents mathematical description of the proposed method and its differences from alternative methods.

