

НОВЫЙ МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТРЕХМЕРНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

С.Н. Скрипкин

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

Рецензент И.Н. Дрогобыцкий

Ключевые слова и фразы: автоматическая интерпретация разломов; сейсмическая интерпретация; структурный анализ; трехмерная сейсморазведка.

Аннотация: Дано описание нового метода автоматической интерпретации структурно-тектонических нарушений в углеводородных пластах на основе результатов трехмерной сейсморазведки. Целью создания метода является повышение качества интерпретации с одновременным сокращением времени, затрачиваемого на ее проведение. Предложены формулировка и решение задачи как проблемы анализа трехмерных изображений, что позволяет применять предлагаемый алгоритм для трехмерного прослеживания различных объектов – как поверхностей разломов, так и границ каналов, соляных куполов и пр. Приведено математическое описание метода и пример автоматического прослеживания нарушений на реальных сейсмических данных. Полученные результаты позволяют сделать вывод о высокой точности автоматической интерпретации, возможности использования многоатрибутного анализа и учета наряду с этим экспертных знаний об исследуемом объекте.

Определение местоположения и геометрических характеристик структурно тектонических нарушений (разломов) является одной из наиболее сложных проблем при описании строения углеводородных пластов.

Качество интерпретации разломов оказывает решающее влияние на такие процессы цикла разработки месторождений как:

- построение статической трехмерной модели месторождения;
- прогноз фильтрационно-емкостных свойств и расчет запасов;
- прогноз добычи углеводородов;
- настройка гидродинамической модели на историю разработки;
- планирование и сопровождение бурения.

Наиболее полную информацию о строении пластов содержат результаты сейсмических исследований, в частности, получившей широкое распространение с середины 1990-х гг. трехмерной сейсморазведки.

Широкое применение 3Д-сейсморазведки вызвало, в свою очередь, стремительное развитие методов автоматизации сейсмической интерпретации. Подобная автоматизация необходима, в первую очередь, потому, что применение ручной интерпретации (являющейся основной при работе с 2Д-сейсмикой) нежелательно в силу длительности процесса, так как объем исследуемой информации при 3Д-сейсморазведке на порядок выше, чем при 2Д. Также, автоматические методы являются объективной альтернативой ручной интерпретации и используются для подтверждения достоверности ее результатов.

Методы автоматического прослеживания отражающих границ (сейсмических горизонтов) разработаны, внедрены и повсеместно используются во всех современных программных продуктах для сейсмической интерпретации (в частности, в продуктах ведущих мировых производителей программного обеспечения: Schlumberger, Landmark, Paradigm, SMT и др.).

С другой стороны, для прослеживания структурно-тектонических нарушений до сих пор преимущественно используется ручной метод, так как не существует надежной и стабильной методики автоматизации этого процесса. Предлагаемые в настоящее время подходы к решению этой проблемы лежат, в основном, в области атрибутного анализа сейсмических данных и не

являются в полном смысле автоматическими и универсальными. В частности, можно выделить работы по построению атрибутов так называемой «когерентности», описанные в [1], а также набор сейсмических атрибутов для структурного анализа, предложенный в работах [2, 3].

В данной работе предлагается новый метод прослеживания нарушений по всему объему сейсмических данных с использованием первичной информации, полученной от специалиста интерпретатора. В основе метода лежит обработка и формализация такой информации специальным образом, а также создание на ее основе критериев для автоматического распознавания искомых объектов. Указанная информация включает в себя одну или несколько точек в трехмерном пространстве, принадлежащих объекту, который необходимо проследить. Такими объектами, как уже сказано выше, являются, в первую очередь, разломы, однако метод также с успехом применим для анализа других типов нарушений – стратиграфических границ, контуров каналов и пр. Использование в качестве входной информации данных, полученных от специалиста, позволяет прослеживать только интересующие объекты, комбинируя опыт сейсмика-интерпретатора с возможностями математического моделирования, тем самым на порядок сокращая объем операций, выполняемых вручную.

Для описания работы алгоритма введем необходимые обозначения и определения.

Шаблон. Шаблоном Ω будем называть совокупность точек ω_m 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 Λ , извлеченным по шаблону Ω вокруг точки-ядра K с угловыми параметрами (φ, θ) , назовем совокупность значений λ_m , задаваемых выражением

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

где $S(t)$ – значение сейсмического атрибута в точке t с некоторыми пространственными координатами (i, j, k) , а угловые индексы φ, θ точки ω означают последовательное вращение исходного шаблона Ω на угол φ вокруг оси Z и на угол θ вокруг оси X .

Расстояние по образцам. Используя введенные выше понятия образца и шаблона, легко ввести новую меру расстояния между двумя произвольными точками K_1 и K_2 в трехмерном пространстве

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

Рассмотрим теперь подробнее детали предлагаемого алгоритма.

Шаг 1. На первом шаге необходимо выбрать сейсмические атрибуты, по которым будет проводиться анализ, а также соответствующие им шаблоны. Введенные выше понятия шаблона, образца и расстояния по образцам легко обобщаются на многомерный случай, что позволяет реализовать прослеживание объектов одновременно по различным наборам данных.

Шаг 2. Задание специалистом по сейсмической интерпретации начальных точек. На этом шаге вручную определяются точки, принадлежащие исследуемому объекту (например, разлому), которые будут использованы для дальнейшего прослеживания. По сути, данный шаг представляет собой ручную интерпретацию разлома на одном из сечений сейсмического объема – в отличие от стандартного подхода, когда ручная интерпретация проводится на каждом сечении. Пример выделения начальных точек представлен на рис. 1.

Шаг 3. Формирование эталонов. Множества эталонов представляют собой массивы образцов, извлеченных вокруг начальной точки I (это множество обозначено Et_1) и вокруг точки, являющейся решением задачи на предыдущей итерации работы алгоритма (множество Et_2). Исходную точку формирования образцов будем далее называть ядром соответствующего множества эталонов. На первой итерации множество Et_2 совпадает с Et_1 :

$$Et_1 = \bar{\Lambda}(I) = \begin{pmatrix} \Lambda(I, \varphi_1, \theta_1) & \dots & \Lambda(I, \varphi_1, \theta_r) \\ \dots & \dots & \dots \\ \Lambda(I, \varphi_q, \theta_1) & \dots & \Lambda(I, \varphi_q, \theta_r) \end{pmatrix}, \quad \varphi_j \in \Phi, \quad \theta_j \in \Theta; \quad (4)$$

$$Et_2 = Et_1 \quad (5)$$

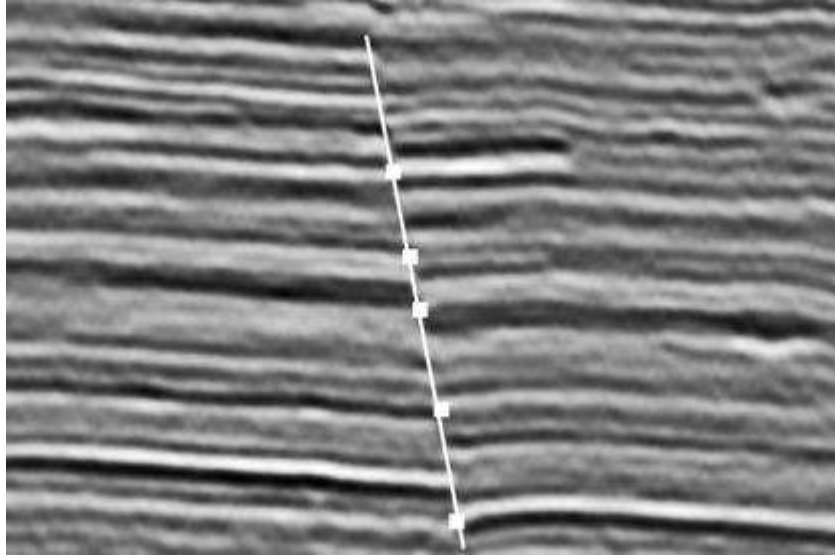


Рис. 1. Пример начальных точек (белые квадраты) на сечении сейсмического объема (прямая линия обозначает плоскость разлома)

Смысл определения эталонов состоит в извлечении полной информации о соответствующем ядре, причем инвариантность образцов относительно изменения геометрии простирающихся пластов или распространения разлома обеспечивается вращением шаблонов относительно координатных осей. Диапазоны вращения (Φ и Θ в выражении (4)) задаются пользователем и являются важными параметрами, влияющими на качество и точность прослеживания.

Шаг 4. Отбор кандидатов. После обновления множеств эталонов необходимо отобрать точки, являющиеся кандидатами для прослеживания на текущем шаге. Пусть номер текущей итерации алгоритма p , соответственно массив кандидатов на текущей итерации обозначим C_p , R_{p-1} – массив результатов за предыдущие $(p-1)$ шагов, а K_p – ядро второго множества эталонов на текущем шаге. Отбор кандидатов предлагается осуществлять в соответствии с приведенным ниже выражением

$$C_p = \left\{ \bigcup_{\tau_1, \tau_2, \tau_3 = \tau}^{\tau} (K_p + (\tau_1, \tau_2, \tau_3)) \setminus (C_{p-1} \cup R_{p-1}) \right\}, \quad (6)$$

которое означает, что на каждом шаге для отбора используются точки с целочисленными координатами, лежащие внутри куба со стороной $(2\tau+1)$, не принадлежащие к множеству кандидатов с предыдущей итерации, а также не входящие в массив результатов.

Шаг 5. Извлечение образцов для точек из массива кандидатов. Извлекая образцы для точек c_{p1}, \dots, c_{pn} , принадлежащих множеству C_p , формируем соответствующий им массив образцов $\tilde{A}(C_p) = (A(c_{p1}, 0, 0), \dots, A(c_{pn}, 0, 0))$.

Шаг 6. Отбор. Цель данного шага состоит в нахождении среди кандидатов точки, в которой достигается минимум специальной целевой функции, в определении которой используется расстояние по образцам:

$$d(c_{pv}, Et) = \min_{(i, j, l, m)} \left[(\eta_1 d_{ij}(c_{pv}, Et_1) + \eta_2 d_{lm}(c_{pv}, Et_2)) M_{pv} \right]; \quad (7)$$

$$d_{ij}(c_{pv}, Et_1) = L(A(c_{pv}), Et_1(i, j)); \quad (8)$$

$$M_{pv} = g \cos(\overline{c_{pv} - R_{p-\gamma}}, \overline{R_{p-1} - R_{p-\gamma-1}}); \quad (9)$$

$$v_{opt} = \underset{i}{\operatorname{argmin}}(d(c_{pv}, Et)) \quad (10)$$

где g, γ – параметры, задаваемые пользователем.

Как видно из формулы (7), целевая функция $d(c_{pv}, Et)$ является минимумом взвешенной суммы расстояний до множеств эталонов Et_1 и Et_2 , скорректированной на поправку M . Эта поправка, пропорциональная косинусу угла между двумя векторами, изображенными на рис. 2, является аналогом инерции и снижает вероятность скачкообразных изменений траектории прослеживаемого объекта (см. рис. 2 и формулы (8) и (9)).

Точка, в которой функция $d(c_{pv}, Et)$ достигает минимального значения, является наиболее близкой (в смысле расстояния по образцам) к ядрам множеств Et_1 и Et_2 при сохранении формы траектории прослеживаемого объекта, и соответственно аргумент минимума v_{opt} (см. (10)) является оптимальным решением задачи на текущей итерации.

Шаг 7. Обновление эталонов и массива результатов.

Так как оптимальное решение на текущей итерации является ядром множества Et_2 на следующей итерации, оно обновляется соответственным образом

$$Et_2 = \bar{A}(c_{pv_{opt}}) \quad (11)$$

Также обновляется массив результатов, используемый при отборе кандидатов на шаге 4

$$R_p = R_{p-1} \cup c_{pv_{opt}} \quad (12)$$

Шаг 8. Остановка, если необходимое количество итераций пройдено, или повтор алгоритма от шага 4.

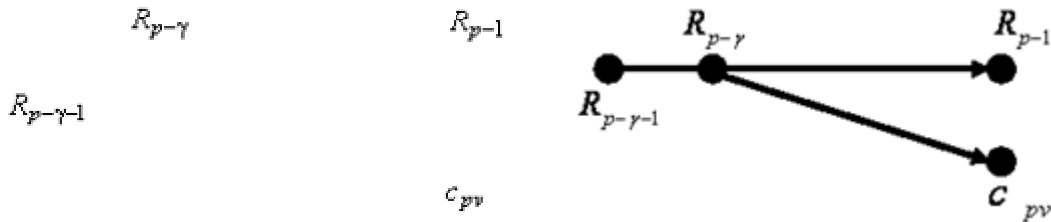


Рис. 2. Векторы, используемые для вычисления инерционной поправки M

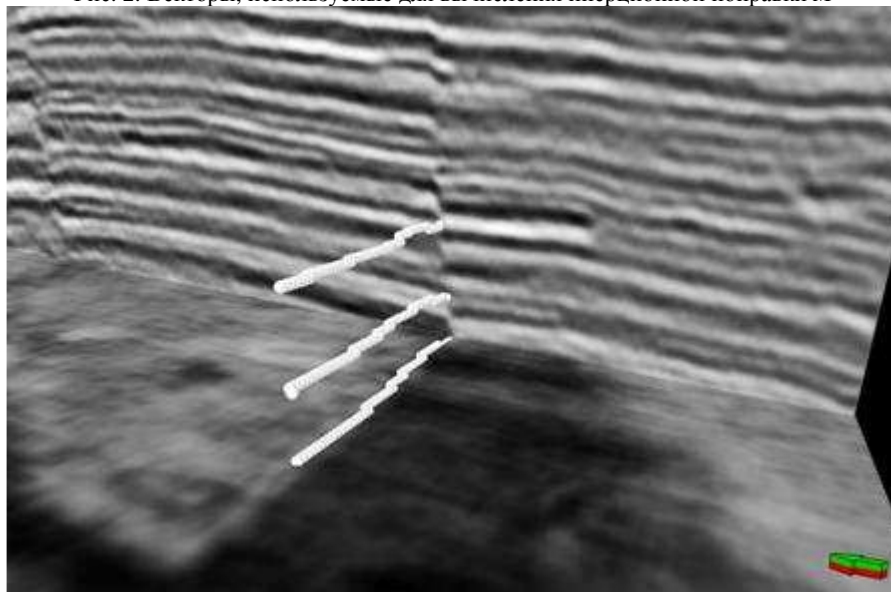


Рис. 3. Пример результатов трехмерного прослеживания нарушения

После остановки алгоритма множество R содержит в себе точки, отмечающие в трехмерном пространстве прослеживаемый объект (см. пример на рис. 3), и может быть использовано

соответственно для построения структурной модели месторождения, описания разломных блоков, как основа структурного анализа и пр.

Разработанный алгоритм исследования геометрии структурных нарушений был протестирован на реальных данных с месторождений нефти и газа в России, на Северном море и в США. Результаты тестирования позволяют сделать следующие выводы.

Высокая точность прослеживания. В подавляющем большинстве случаев результат автоматического прослеживания полностью совпадает с ручной интерпретацией исследуемого объекта. Для снижения вероятности ложного прослеживания был разработан специальный метод остановки алгоритма в неоднозначных ситуациях.

Резкое сокращение времени интерпретации. Использование предлагаемого метода позволяет на порядок сократить время, затраченное на интерпретацию нарушений с помощью трехмерной сейсморазведки. Количество сечений сейсмического объема, на которых необходимо проводить ручную интерпретацию, сокращается на порядок.

Учет знаний интерпретатора. Предлагаемый алгоритм позволяет формализовать и использовать знания интерпретатора о прослеживаемом объекте, что повышает надежность и согласованность результатов.

Многоатрибутный анализ. Существенным отличием данного метода от ручной интерпретации (помимо времени работы) является то, что он дает возможность проводить прослеживание с использованием различных типов данных – как исходного массива амплитуд, так и набора сейсмических атрибутов, задаваемых пользователем.

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, No. 5 (September-October 1999). – P. 1468–1479.
2. 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.
3. Randen, T. et al. (2000), Three-Dimensional Texture Attributes for Seismic Data Analysis. SEG 2000 Expanded Abstracts.

New Technique of Automated Interpretation of Structural and Tectonic Faulting Based on Three-Dimensional Seismic Survey Results

S.N. Skripkin

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

Key words and phrases: automated interpretation of seismic fault; automated seismic interpretation; seismic interpretation; structural analysis; three-dimensional seismic survey.

Abstract: The paper presents the description of a new technique of automated interpretation of structural and tectonic faulting in hydrocarbon bed on the basis of three-dimensional seismic survey. The objective of the technique is interpretation quality improvement as well as reduction in time spent on it. The paper proposes both definition and solution to the problem as the task of three-dimensional image processing; thus the proposed technique enables to apply this algorithm to three-dimensional examination of different objects, such as fault surface, drain interface, domed salt, etc. Mathematical description of the techniques and the example of automated examination of real seismic data on faulting are given. The produced results prove the accuracy of automated interpretation, the possibility of multi-attribute analysis application taking into account expert knowledge of the examined object.