

УКД 550.8

Мирхайдарова Виктория Рафаэлевна, магистрант, Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

**СЕЙСМИЧЕСКИЕ АТТРИБУТЫ КАК ИНДИКАТОРЫ
ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И
ПОДХОДЫ К ВЫДЕЛЕНИЮ РАЗЛОМОВ**

В работе рассматриваются сейсмические атрибуты как инструменты выделения тектонических нарушений в 3D-сейсмических данных. Проведён анализ исторического развития атрибутов, начиная от первых амплитудных характеристик до современных многокомпонентных и геометрических атрибутов. Особое внимание уделено когерентности, кривизне и атрибутам разрывности, включая методы Собель-фильтрации, а также подходам, основанным на анализе трехмерных изображений. Рассмотрены современные методы комбинирования атрибутов и интеграции алгоритмов компьютерного зрения. На примере опубликованных исследований продемонстрирована эффективность совместного использования различных групп атрибутов для выявления малоамплитудных разломов. В выводе подчеркнуто, что тектонические нарушения наиболее надёжно выявляются при комплексном использовании геометрических, частотных и текстурных атрибутов, что обеспечивает более детальную и геологически корректную интерпретацию.

The paper examines seismic attributes as tools for identifying tectonic faults in 3D seismic data. An analysis of the historical development of attributes is presented, starting from the earliest amplitude characteristics to modern multi-component and geometric attributes. Special attention is paid to coherence, curvature, and discontinuity attributes, including Sobel filtering methods, as well as approaches based on the analysis of 3D images. Modern methods for combining attributes and

integrating computer vision algorithms are discussed. The effectiveness of jointly using different groups of attributes for detecting low-amplitude faults is demonstrated using published research examples. The conclusion emphasizes that tectonic faults are most reliably identified through the integrated use of geometric, frequency, and texture attributes, which ensures a more detailed and geologically correct interpretation.

Ключевые слова: сейсмические атрибуты, когерентность, кривизна, тектонические нарушения, разрывы, 3D-сейсморазведка, структурная интерпретация.

Keywords: seismic attributes, coherence, curvature, tectonic faults, fractures, 3D seismic, structural interpretation.

Сейсмические атрибуты представляют собой количественные характеристики волнового поля, позволяющие выявлять особенности геологического строения, которые могут быть слабо различимы на обычных временных разрезах. В основном атрибут определяется как «количественная мера интересующей сейсмической характеристики» [7], что объединяет широкий спектр параметров - от простейших амплитудных и временных до сложных многокомпонентных атрибутов, вычисляемых из множества трасс. Исторически развитие атрибутов тесно связано с совершенствованием методов регистрации и цифровой обработки данных. В 1950-1960-е годы интерпретаторы фиксировали зоны исчезновения отражений, соответствующие разрывам [7]. Появление цифровой записи в 1970-е годы позволило вычислять амплитудные, фазовые и частотные характеристики, а также формировать первые цветные атрибутивные изображения (см. Рисунок 1 и Рисунок 2). К середине 1970-х годов на основе комплекс-трассового анализа были выделены мгновенные амплитуда, фаза и частота – атрибуты, ставшие основой большинства современных методов интерпретации (см. Рисунок 3).

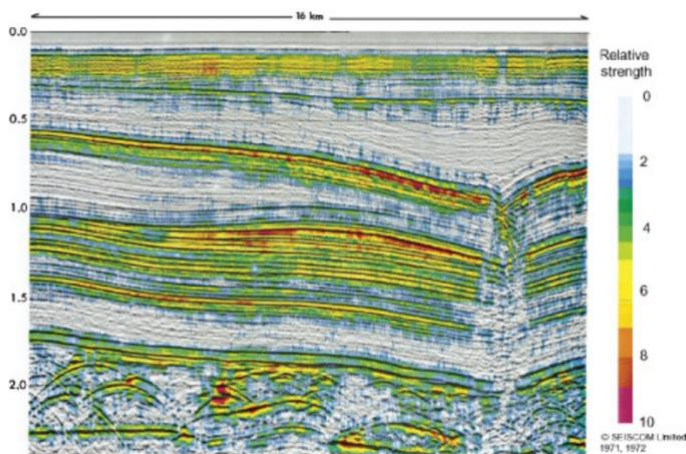


Рисунок 1. Составное изображение атрибутов начала 1970-х годов, показывающее силу отражения (в те времена самый популярный атрибут) [7]

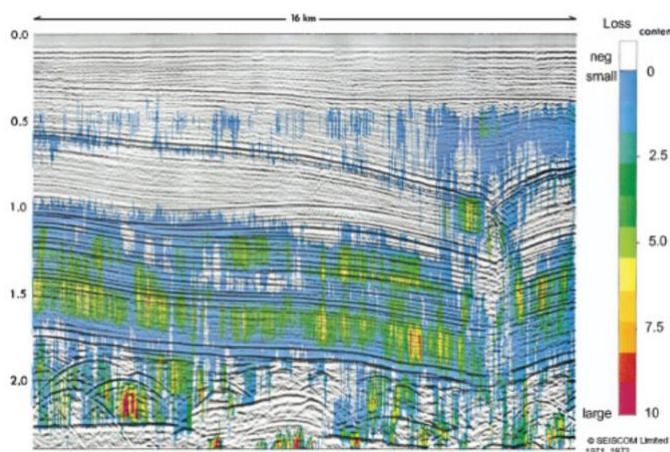


Рисунок 2. Составное изображение атрибутов начала 1970-х годов, показывающее дифференциальное частотное содержание (относительную потерю высоких частот вниз по разрезу) [7]

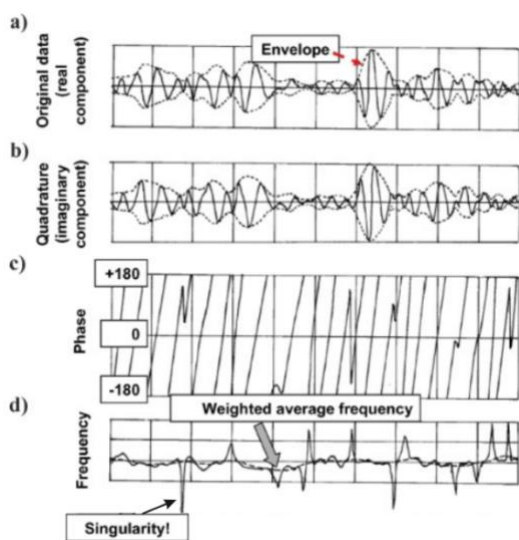


Рисунок 3. (a) Реальная сейсмическая трасса, (b) квадратная составляющая, (c) мгновенная фаза и (d) мгновенная частота [7]

Современная классификация атрибутов включает амплитудные, фазовые, частотные и геометрические параметры. Амплитудные атрибуты (например, отражательная способность)

отражают вариации импеданса и позволяют выделять литологические неоднородности и яркие аномалии. Фазовые атрибуты обладают низкой чувствительностью к шумам и амплитудным искажениям, обеспечивая устойчивость при трассировке горизонтов и выявлении несогласий. Частотные атрибуты, включая мгновенную и доминирующую частоту, чувствительны к

тонким пластам и зонам повышенного поглощения, что делает их полезными при поиске газонасыщенных объектов.

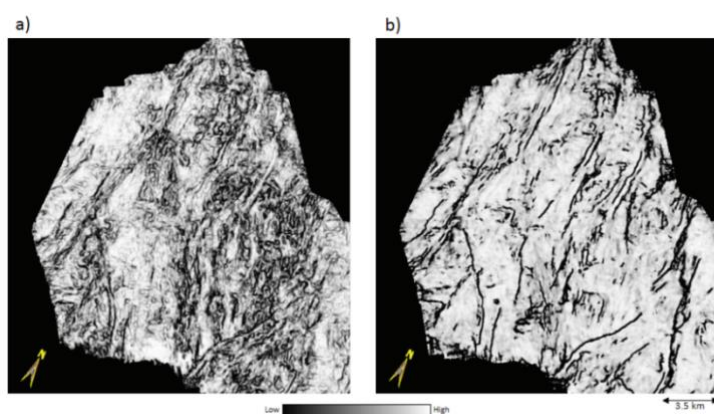
Существенное развитие геометрических атрибутов стало возможным с появлением 3D-сеймики. Наиболее широко применяемым из них является когерентность, представляющая собой меру сходства соседних трасс. Падение когерентности в местах нарушения непрерывности отражений позволяет автоматически выделять разломы и флексуры. Как отмечает Чопра С. [7], когерентность фиксирует те же признаки, которые ранее интерпретаторы определяли вручную на основе анализа разрывов и дифракций. Атрибут кривизны дополняет когерентность, выявляя изгибы и маломощные смещения отражающих поверхностей. Он особенно информативен при картировании зон деформации и трещиноватости, где классические методы могут быть недостаточно чувствительны.

Значительный вклад в развитие атрибутного анализа внес метод С.Н. Скрипкина [3], основанный на анализе трёхмерных изображений, ориентируемых в пространстве. В разломных зонах наблюдается устойчивость образцов вдоль направления нарушения и нестабильность – в перпендикулярных направлениях. Такой подход менее чувствителен к шуму и способен улавливать неоднородности различного масштаба без необходимости задавать априорные предположения о форме разлома. В отличие от методов, основанных на локальной корреляции, данный анализ обеспечивает более стабильное выделение тектонических элементов и позволяет оценивать углы падения и простирания пластов.

Атрибуты разрывности получили широкое распространение благодаря возможности автоматизированного картирования тектонических нарушений и геологических границ. Существенный вклад в это направление внесено использованием операторов, аналогичных градиентной фильтрации, позволяющих усилить переходы между различающимися по характеру отражениями. В работе Чопра С. и соавторов [6] показано, что использование модифицированного Собель-оператора усиливает амплитудные градиенты и,

соответственно, повышает контраст тектонических нарушений. На трехмерных данных атрибуты, основанные на Собель-фильтрации, позволяют чётко выделять разрывные поверхности, зоны смещения и края каналов, превосходя традиционную когерентность по детализации стратиграфических и структурных элементов (см. Рисунок 4).

Рисунок 4. Седиментационный слайс, выбранный около 1200 мс с помощью (а) фильтра подобия Собеля и (б) объемов когерентности отношения энергии. Эти два изображения существенно различаются: фильтр подобия Собеля показывает больше стратиграфических особенностей, а когерентность отношения энергии обеспечивает более четкие изображения разломов.



Исследование Тяпкина Ю.К. и соавторов [5] посвящено оценке чувствительности атрибута когерентности к параметрам моделирования. Установлено, что размер окон, степень

сглаживания, параметризация и уровень шума оказывают существенное влияние на итоговое распределение когерентности. Неправильный выбор параметров способен привести как к размыванию реальных разломов, так и к появлению ложных структур. Это подчёркивает необходимость тщательной настройки атрибутивных процедур для каждого конкретного набора данных.

С развитием методов компьютерного зрения возникла возможность объединения атрибутов с алгоритмами анализа изображений. В работе Лавал А., Алауда Я. и Аль-Региб Г. [2] предложено преобразовывать набор структурных атрибутов (когерентность, кривизна, дип и градиент) в карты выразительности, что позволяет усиливать локальные аномалии и повышать контрастность разломов по сравнению с использованием одиночных атрибутов. Современное направление объединения атрибутов представлено в исследовании Сун Л. и соавторов [4], где применяется физико-

ориентировочная методика, основанная на физике формирования отражённого сигнала. Авторы используют комбинацию мультиазимутальных и разнотипных атрибутов, что улучшает выявляемость разломов различных ориентировок и уменьшает вероятность пропуска пересекающихся нарушений.

Практическую значимость атрибутивного анализа демонстрирует работа Алибековой Е.Т. [1], выполненная на площади Говсаны. Исследование показывает, что применение кубов когерентности, дипов, азимутов и дополнительных структурных атрибутов позволяет проследить малоамплитудные нарушения, которые не фиксируются на стандартных временных разрезах. Сочетание дип-атрибутов с когерентностью является наиболее эффективным инструментом для картирования слабовыраженных разлома в условиях низкой амплитуды отражений.

Анализ представленных исследований демонстрирует общую тенденцию перехода от использования одиночных атрибутов к комплексным, многомерным и физически обоснованным методикам. Тектонические нарушения проявляются одновременно в геометрических, текстурных, амплитудных и частотных характеристиках волнового поля, поэтому их надёжное выделение требует комбинированного использования разнородных атрибутов и методов анализа изображений. Совместное применение когерентности, кривизны, дипов, Собель-фильтрации и анализа трехмерных изображений обеспечивает детальную, устойчивую и геологически корректную реконструкцию разломных систем. Таким образом, атрибутивный анализ является неотъемлемой частью современной структурной интерпретации и остаётся ключевым инструментом повышения информативности 3D-сейсмических данных.

Список литературы

1. Алибекова Е.Т. Выявление и прослеживание малоамплитудных разрывных нарушений при помощи сейсмических атрибутов на площади

Говсаны // Вектор ГеоНаук. Баку: Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, 2023. 8 с.

2. Лавал А., Алаудах Й., Аль-Реджиб Г. Выявление разломов с использованием сейсмических атрибутов и визуальной заметности // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2016. С. 1-6.

3. Скрипкин С.Н. Новые сейсмические атрибуты для структурного анализа // Вестник РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2009. Т. 15, № 3. С. 623-631.

4. Сонг Л., Чен Ю., Фу Л., Льюй Ц. Физически обусловленные многозенитные и многотипные сейсмические атрибуты для выявления разломов // Interpretation. 2021. Т. 9, № 2. С. Т381-Т394.

5. Тяпкин Ю.К., Евтушенко А.Н., Рождественский В.В. Сейсмическая когерентность при флуктуациях параметров модели // Геофизический журнал. 2018. Т. 40, № 2. С. 30-47.

6. Чопра С., Кумар Р., Марфурт К.Дж. Атрибуты сейсмических разрывов и фильтрация Собеля // CSEG Recorder. 2014. Т. 39, № 04. С. 36-47.

7. Чопра С., Марфурт К.Дж. Сейсмические атрибуты: исторический обзор // Geophysics. 2005. Т. 70, № 5. С. 3-28.

References

1. Alibekova E.T. Identification and tracing of small-amplitude faults using seismic attributes in the Govsany area. Vector GeoSciences. Baku: Azerbaijan State University of Oil and Industry, 2023. 8 p.

2. Lawal A., Alaudah Y., AlRegib G. Fault detection using seismic attributes and visual saliency. SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2016. pp. 1-6.

3. Skripkin S.N. New seismic attributes for structural analysis. Bulletin of Gubkin Russian State University of Oil and Gas. 2009. Vol. 15, No. 3, pp. 623-631.

4. Song L., Chen Y., Fu L., Liu Z. Physics-guided multi-azimuth multi-type seismic attributes for fault detection. Interpretation. 2021. Vol. 9, No. 2, pp. T381-T394.

5. Tyapkin Yu.K., Evtushenko A.N., Rozhdestvensky V.V. Seismic coherence under model parameter fluctuations. *Geophysical Journal*. 2018. Vol. 40, No. 2, pp. 30-47.
6. Chopra S., Kumar R., Marfurt K.J. Seismic discontinuity attributes and Sobel filtering. *CSEG Recorder*. 2014. Vol. 39, No. 04, pp. 36-47.
7. Chopra S., Marfurt K.J. Seismic attributes — A historical perspective. *Geophysics*. 2005. Vol. 70, No. 5, pp. 3-28.