



НОВЫЙ ПОДХОД К КЛАСТЕРИЗАЦИИ ТРЕЩИННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ 3D СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

В.В. Масюков, В.В. Харахинов

ООО “Славнефть – НПЦ”

170002, Тверь, просп. Чайковского, 21а, Россия; e-mail: tvergw@slavneft.ru

Для анализа структуры трещинного резервуара предлагается кластеризация сейсмического атрибута “синергетических сингулярностей”, на котором отображаются особенности сейсмического поля, ассоциируемые с разрывными нарушениями, трещинами и зонами дезинтеграции среды. На кластеризацию подаются карты (кубы) ее фрактальной размерности и атрибуты, характеризующие направления сингулярностей, их плотность и интенсивность. Обсуждаются возможности использования предложенной технологии для структурирования запасов углеводородного сырья в трещинных коллекторах Восточной Сибири.

Трещинные коллекторы, интерпретация сейсмических данных, “синергетические сингулярности”, фрактальная размерность, кластеризация, цифровая обработка изображений

A NEW APPROACH TO CLUSTER ANALYSIS OF FRACTURED RESERVOIRS BASED ON 3D SEISMIC DATA

V.V. Masjukov, V.V. Harahinov

“SlavNeft NPC” Ltd, R&D Department

170002, Tver, Chaykovsky av., 21a, Russia; e-mail: tvergw@slavneft.ru

For clustering the structure of fractured reservoirs, the authors suggest using a seismic attribute known as synergetic singularities (SS), which indicates seismic data singularities associated with faults, fractures and disintegrated zones. Specifically we use a map (cube) of SS fractal dimension and the derived attributes of SS density, amplitude and directions. Possible applications of the method for structuring fractured reservoirs and estimation of petroleum reserves in Eastern Siberia oil deposits are discussed.

Fractured reservoir, seismic interpretation, synergetic singularities, fractal dimension, cluster analysis, digital image processing

ВВЕДЕНИЕ

Активная промышленная разработка некоторых месторождений Восточной Сибири, для которых характерны массивные трещинные коллекторы углеводородов, требует выработки новых подходов к оценке запасов углеводородного сырья для этих типов коллекторов с целью оптимизации промышленного бурения. Известно, что объемный метод подсчета запасов, основанный на стандартных оценках объема пористого пространства, не всегда применим для трещинных коллекторов. Продуктивность нефтедобычи и объем запасов часто обуславливаются лишь открытой трещиноватостью. Поэтому необходимы ее качественные и количественные оценки.

Пространственные оценки трещиноватости в объеме на основе данных сейсморазведки 3D в настоящее время основаны на получении и изучении сейсмических атрибутов, отображающих особенности сейсмического поля (сингулярности). В работах [Shlionkin et al., 2008; Шлэнкин и др., 2012] предложена технология “синергетические сингулярности” (*Synergetic Singularity*, SS), которая была успешно использована для отображения и анализа трещинных коллекторов Восточной Сибири [Харахинов и др., 2012, 2013].

Данная технология, несмотря на ряд уникальных алгоритмов, лежит в русле традиционных подходов, а именно: сначала выделяются особенности сейсмического поля на основе оценки его когерентности, а затем эти особенности усиливаются (подчеркиваются) с помощью алгоритмов типа ACS (*Ant Colony Simulation*) [Dorigo, Stutzle, 2004]. Слово “синергетика” (*synergy* или *synergism*) произошло от лат. *synergismus* или греч. *sunergos*, что означает совместную работу (греч. *ergos* – работа). Термин “сингулярность” в широком смысле означает “особенность”. Таким образом, название технологии “синергетические сингулярности” соответствует ее основной направленности – выделению особенностей исходных данных на основе коллективной (синергетической) эволюции колонии абстрактных примитивных существ, поведение каждого из которых подчиняется очень простым законам. Синергетический эффект, или эффект самоорганизации, проявляется, когда суммарный эффект от одновременного коллективного действия оказывается принципиально другим, чем сумма независимых одиночных действий элементов системы. В работе [Шлэнкин и др., 2012] проведено сравнение технологии SS с

конкурирующими технологиями и показана ее эффективность.

До настоящего времени часто требовалась трудоемкая “ручная” интерпретация атрибутов сингулярностей. Целью настоящей статьи является автоматизация этого процесса для выделения перспективных зон эксплуатационного бурения. При этом обсуждение вопросов оценки запасов трещинных коллекторов [Левянт и др., 2010] и конкретные геологические примеры выходят за рамки нашего исследования.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АТРИБУТОВ SS ДЛЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОЙ СРЕДЫ

Эффективность прогнозирования трещинных коллекторов проверяется бурением. Детальные количественные оценки связи прогноза трещиноватости и измеренной трещиноватости в скважине удастся провести только в горизонтальных стволах.

Из рис. 1 видно, что высокий коэффициент корреляции обеспечивается вхождением ствола скважины в сильно трещиноватую область (по атрибуту SS и по сканеру), но при малых показателях трещинова-

тости соответствие нельзя признать хорошим. В целом (для нескольких горизонтальных скважин) наши исследования показали наличие достаточно надежной корреляции между атрибутом SS и трещиноватостью по сканеру, что подтверждает эффективность использования атрибутов “синергетические сингулярности” для прогноза трещиноватости в условиях Восточной Сибири.

В настоящее время требуется не только детальная (разрешенная по латерали) информация об особенностях сейсмического поля для закладки горизонтальных стволов отдельных скважин, но и выделение крупных перспективных участков для эксплуатационного бурения, т. е. зональная интерпретация атрибутов типа SS.

При непосредственной интерпретации сложной картины сингулярностей (рис. 2) имеет место высокий уровень неоднозначности результатов. Поэтому для повышения объективности анализа атрибутов трещиноватости требуется их автоматическая интерпретация. Нами предлагается реализация этой цели с помощью кластеризации сейсмических атрибутов, отображающих сингулярности сейсмического поля.



Рис. 1. Результаты количественного сопоставления прогноза трещиноватости по атрибуту SS со скважинными измерениями.

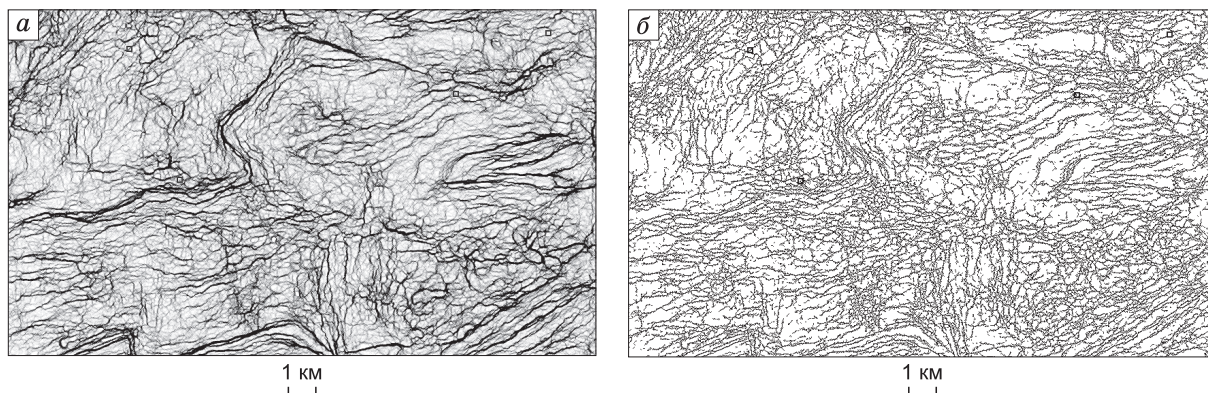


Рис. 2. Срез куба “синергетических сингулярностей” (а) и выделение на нем “хребтов” – бинарная карта (б).

МЕТОДИКА КЛАСТЕРИЗАЦИЯ КАРТ (КУБОВ) “СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИНГУЛЯРНОСТЕЙ”

Будем считать, что атрибут SS характеризует именно трещиноватую среду, и видимые на рис. 2, а сингулярности ассоциируются с разрывными нарушениями, разломами, зонами трещиноватости, в целом с дезинтеграцией среды. Основной идеей классификации такой трещиноватой среды является использование нескольких трансформаций “синергетических сингулярностей”, а именно использование атрибутов, характеризующих:

- 1) густоту и выраженность сингулярностей (с учетом или без учета амплитуд);
- 2) ориентацию сингулярностей в пространстве (фактор направленности);
- 3) сложность “рисунка” сингулярностей, их извилистость (текстурный фактор).

Для простоты и наглядности изложения мы подробно рассмотрим двумерный случай – кластеризацию карты атрибута SS. Очевидно, что плотность сингулярностей с учетом амплитуд легко получить просто пространственным сглаживанием SS. Этот атрибут часто используется для получения тренда развития трещиноватости, например, при гидродинамическом моделировании резервуара. Для оценки плотности сингулярностей без учета амплитуд мы предлагаем использовать сглаженную карту “хребтов” (см. рис. 2, б).

Что касается направлений, то они снимаются после усреднения градиента в скользящем окне. Карта направлений сингулярностей легко читается и интерпретируется “глазами” (рис. 3), однако для после-

дующего количественного анализа ее использовать нельзя, так как по геологическому смыслу противоположные направления (например, 0 и 180 градусов) идентичны, а их числовые значения на карте направлений максимально отличаются. То есть невозможно одновременно выполнить условие периодичности (с периодом 180°) и условие монотонности (большим углам соответствуют большие значения с карты). Выходом является либо использование специальных алгоритмов расчета расстояния при кластеризации карты направлений, либо использование двух карт (синуса и косинуса двойного угла).

Необходимо отметить, что использование карты направлений при кластеризации важно потому, что направление кластеров трещин может коррелировать с их открытостью (а ведь именно открытые трещины определяют продуктивность коллектора). Безусловно, по возможности, следует проводить детальную палеотектоническую реконструкцию с выходом на моделирование современных полей напряжений в среде.

Как охарактеризовать сложность “рисунка” сейсмических сингулярностей, их извилистость? Для этого мы предлагаем воспользоваться оценкой фрактальной размерности, которая эффективна для классификации текстур [Shmuel et al., 1984; James, 1990; Costa et al., 2012], а именно: вычислять размерность Минковского в скользящем окне.

Основные этапы кластеризации SS изображены на блок-схеме (рис. 4). Отметим, что в ряде случаев, помимо описанных выше трансформаций SS, для кластеризации именно трещиноватого коллектора це-

Рис. 3. Карта направлений “синергетических сингулярностей” с наложением основных сингулярностей с рис. 2, а.

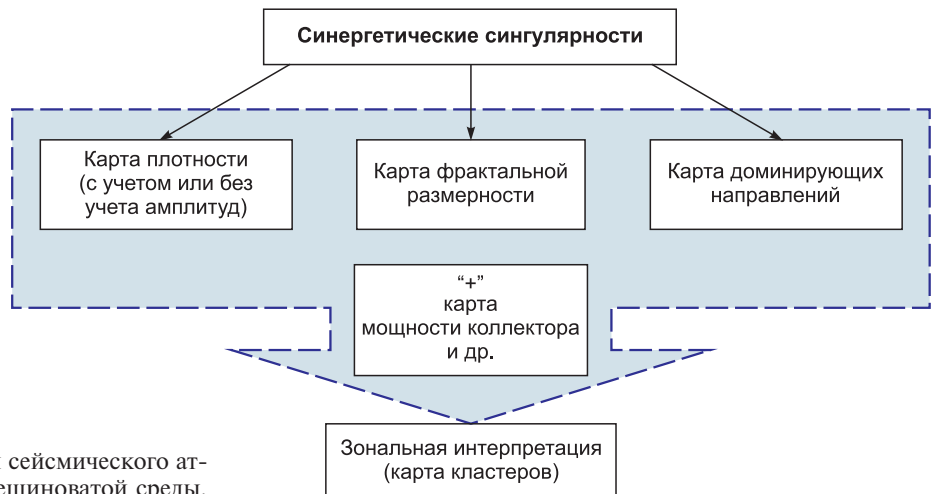
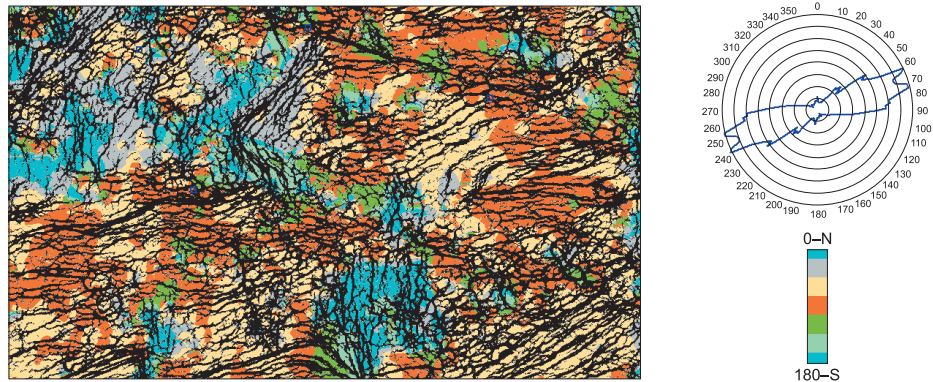


Рис. 4. Блок-схема кластеризации сейсмического атрибута SS для классификации трещиноватой среды.

лесообразно использовать его общую мощность и другие дополнительные атрибуты.

Предложенная методика может быть обобщена на 3D случай.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Алгоритм вычисления фрактальной размерности для полутоновых изображений состоит из следующих шагов [Costa et al., 2012]:

1) исходный грид $A(i, j)$ (заданный на регулярной сетке $N \times N$ точек) превращается в бинарный грид $\tilde{A}(i, j)$ (или несколько бинарных гридов за счет амплитудной декомпозиции)

$$\tilde{A} = \begin{cases} 1 & \text{if } A_1 < A < A_2; \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}; \quad (1)$$

2) к полученному бинарному гриду применяется алгоритм выделения границы

$$\tilde{\tilde{A}}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } \tilde{A}(i, j) = 1 \text{ and } (\exists (i_1, j_1) \neq (i, j) : \sqrt{(i - i_1)^2 + (j - j_1)^2} \leq \sqrt{2} \\ & \text{and } \tilde{A}(i_1, j_1) = 0) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}; \quad (2)$$

(формула (2) означает, что если значение равно 1 и хотя бы одна из соседних точек нулевая, то сохраняется значение 1, в остальных случаях значение становится нулевым);

3) вычисляется число квадратов $N(\mu)$ со стороной μ , в которых есть хотя бы одно ненулевое значение грида для всех $\mu = 0.1 \cdot N, 0.1 \cdot N - 1 \dots 1$;

4) и, наконец, вычисляется фрактальная размерность изображения.

Для этого мы используем наиболее простой и известный метод *Box Counting Algorithm* (подсчет числа покрывающих фрактал квадратов). Пусть $N(\epsilon)$ – минимальное число квадратов со стороной ϵ , необходимых для покрытия компактного множества A . Если имеет место степенной закон

$$N(\epsilon) \sim \epsilon^{-D}, \quad (3)$$

то D в формуле (3) и определяет клеточную размерность (удобную оценку фрактальной размерности). Очевидно, что для прямой (или очень гладкой кривой) оценка D будет близка к единице, так как если сторону квадрата уменьшить в k раз, то число квадратов, необходимых для покрытия кривой, увеличится примерно в k раз. Для двумерной плоской фигуры (круг, квадрат и т. п.) оценка D будет близка к двойке. То есть для простых объектов оценка величины их фрактальной размерности D близка к топологической. Если D существенно отличается от топологической размерности, то можно говорить о выраженных фрактальных свойствах исследуемого объекта. Логарифмируя выражение (3), получаем

$$\ln(N(\epsilon)) = -D \ln(\epsilon) + C. \quad (4)$$

Из (4) видно, что фрактальная размерность D равна угловому коэффициенту линейной регрессии (зависимости $\ln(N(\epsilon))$ от $\ln(\epsilon)$), который может быть получен методом наименьших квадратов. Именно так чаще всего осуществляется оценка D на практике.

Фрактальную размерность можно рассчитать для всего изображения, а также выполнить расчет в скользящем окне, получив таким образом карту фрактальной размерности (или просто фрактальности) изображения. На рис. 5 показаны основные этапы алгоритма расчета фрактальной размерности.

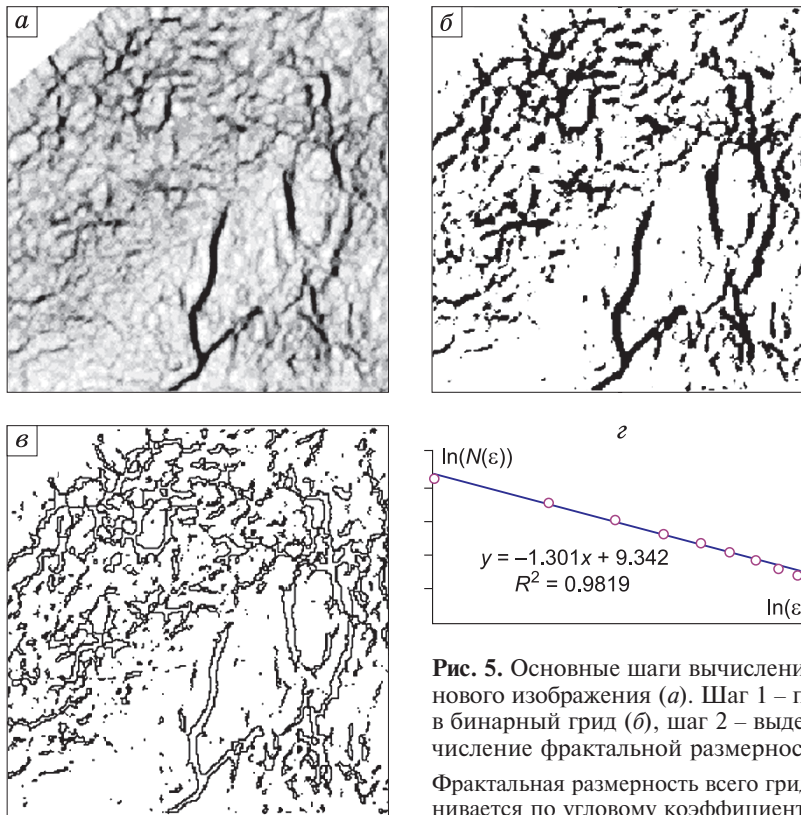


Рис. 5. Основные шаги вычисления фрактальной размерности полутонового изображения (а). Шаг 1 – превращение исходного изображения в бинарный грид (б), шаг 2 – выделение границы (в), шаги 3 и 4 – вычисление фрактальной размерности с помощью кросс-плота (г).

Фрактальная размерность всего грида приблизительно равна 1.3, она оценивается по угловому коэффициенту регрессии ($\ln(N(\epsilon))$ от $\ln(\epsilon)$).

Заметим, что вместо амплитудной декомпозиции (шаг 1) и выделения границы (шаг 2) можно использовать для превращения в бинарный грид нашего полутонового изображения алгоритм выделения “хребтов” (см. рис. 2, б). Правда, и он часто требует клипирования малоамплитудных событий для получения более выраженной картины.

Пример расчета фрактальной размерности в скользящем окне приведен на рис. 6. Видно, что на карте фрактальности хорошо выделяются зоны с “усложненным” рисунком линеаментов и наиболее простым. Не углубляясь в оценку фрактальных свойств геологической среды, отметим следующее: многие авторы считают, что степенные законы типа (3), приводящие к фрактальным свойствам, порождаются самим механизмом разрушения и образования трещин (например, закон распределения трещин по длине, величине смещения и т. п.) [Sherman, Gladkov, 1999; Базай и др., 2009; Захаров, 2014].

ПРИМЕРЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ АТТРИБУТА SS

На рис. 7 показан результат кластеризации атрибута SS (см. рис. 2) с учетом карты фрактальности (см. рис. 6) и направлений (см. рис. 3) в соответствии с блок-схемой рис. 4.

При этих расчетах использовались карты плотности сингулярностей с учетом и без учета амплитуд (рис. 8). Процедуры расчета фрактальной размерности (фрактальности) полутоновых карт и их кластеризации реализованы в пакете атрибутивного анализа и математической обработки карт CLUST+ [Шлёнкин и др., 2006].

Наши эксперименты на большом количестве реальных и синтетических данных показали, что при

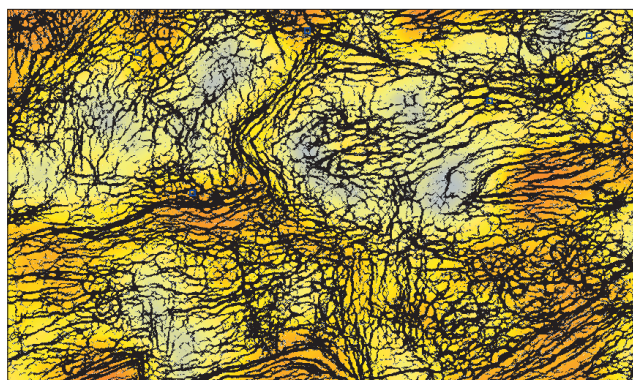


Рис. 6. Пример расчета фрактальной размерности атрибута SS с рис. 2, б в скользящем окне с наложением основных линеаментов.

Более теплые тона соответствуют большей “сложности” рисунка и повышенной фрактальности. Палитра отображает значения от 1 до 1.4.

использовании различных методов кластеризации по конфигурации карты кластеров очень близки. Хотя, конечно, имеется неизбежная неопределенность в переходных зонах. Поэтому мы считаем, что выбор метода кластеризации карт не является принципиальным (мы, например, используем метод средней связи Кинга [Гладышев, 2001]), а существенным является именно то, что подается на вход кластеризации.

Интересно, что для кластеризации всего одной карты атрибута SS используются несколько ее трансформаций, а именно: сглаженная карта, учитывающая амплитудный фактор, карты, характеризующие направ-

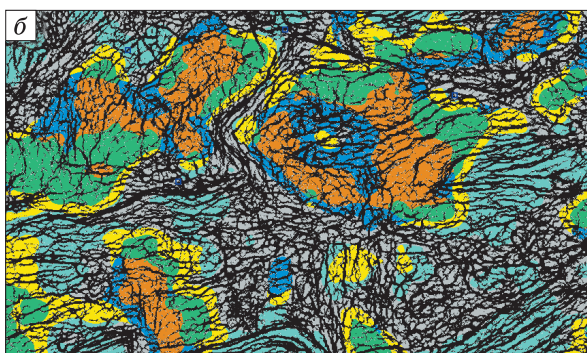
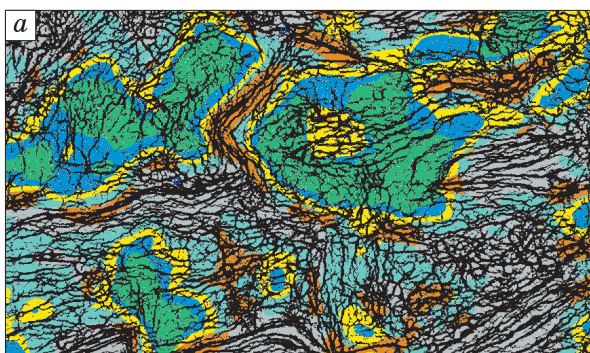


Рис. 7. Пример кластеризации (6 кластеров) карты “синергетических сингулярностей” (см. рис. 1) на основе блок-схемы, показанной на рис. 3: с учетом (а) и без учета (б) амплитуд при расчете плотности сингулярностей.

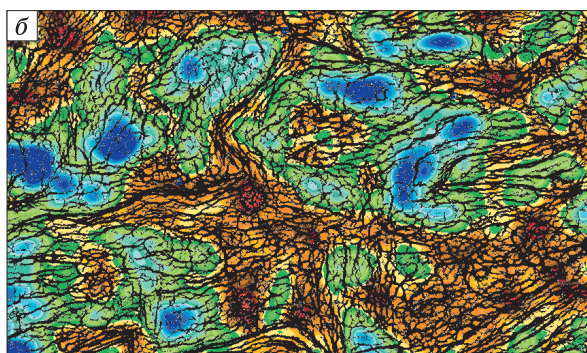
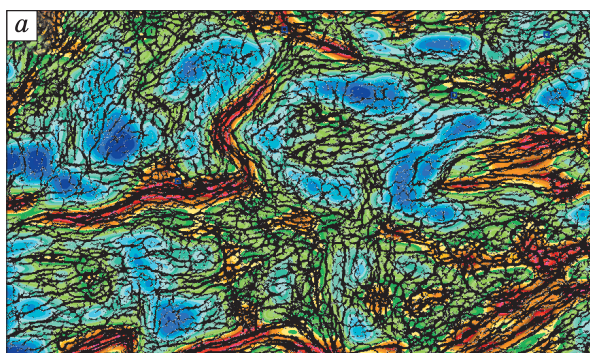


Рис. 8. Карты плотности сингулярностей: а – с учетом амплитуд, б – без учета амплитуд (на основе карты хребтов рис. 2, б).

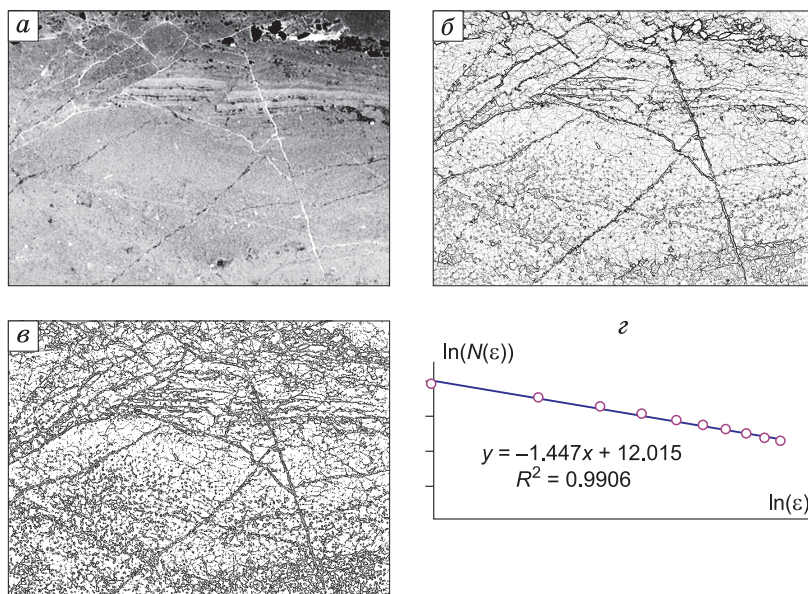


Рис. 9. Пример сантиметрового шлифа трещиноватой породы (а) из керна (Куюмбинское месторождение, Восточная Сибирь), специальная обработка изображения (б), бинарный грид (в) и результат расчета его фрактальности (д). Фрактальная размерность оценивается по регрессионной зависимости и приблизительно равна 1.45.

ления, и карта фрактальности изображения (фрактальная размерность в скользящем окне). Это показывает сложность “ручной” интерпретации, при которой специалист при анализе картинке должен одновременно уделять внимание нескольким ее параметрам и анализировать различные ее свойства.

Чем может управлять пользователь при использовании описанной нами методики? Прежде всего, выбором масштабного фактора – уровня генерализации информации на финальной карте. Если мы хотим выделить крупные блоки, то должны использовать большее сглаживание и большие размеры скользящих окон. Безусловно, эксперт-интерпретатор должен учитывать и характерный размер естественных (выделяемых глазами) кластеров на исходном изображении или естественных размеров кластеров трещин. Целесообразно использовать для интерпретации не больше семи кластеров, а для большей детализации следует просто перейти к анализу (кластеризации) меньшего объема данных.

Заметим, что в некоторых направлениях за счет дополнительной информации (полученной, например, реконструкцией полей напряжений) не должно быть открытой трещиноватости. Поэтому зоны с выраженной запрещенной направленностью линейментов могут просто клиппироваться и не участвовать в дальнейшей кластеризации. Кроме того, как отмечалось выше, для исследования трещинного резервуара на кластеризацию могут быть поданы дополнительные атрибуты, такие как мощность коллектора, энергия поля рассеянных волн и др. Поэтому несмотря на повышение объективности анализа получение осмысленных и надежных геологических результатов предполагает очень вдумчивое и неформальное применение изложенной в статье методики.

В заключение для демонстрации возможности применения методики на других масштабах приведем пример расчета фрактальной размерности на шлифе трещиноватой среды (рис. 9), размеры которого составляют примерно 1×1 см. Шлиф сделан из керна с

Куюмбинского месторождения Восточной Сибири, срез куба сингулярностей которого представлен на рис. 2 и имеет размеры примерно 20×10 км.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Для кластеризации трещиноватой среды необходимо использовать специальные атрибуты, отображающие сингулярности сейсмического поля. Напрямую подавать эти атрибуты на кластеризацию нельзя. Предлагается кластеризация некоторого набора производных атрибутов, получение которых соответствует мыслительному процессу интерпретатора при анализе сложной картины сингулярностей сейсмического поля, а именно: атрибуты плотности сингулярностей, их фрактальной размерности и доминирующих направлений.

Можно ли в качестве основы для описанной в статье методики вместо “синергетических сингулярностей” взять другие атрибуты, характеризующие трещиноватую среду? Тем более что в литературе появляется множество новых атрибутов трещиноватости [Jaglan et al., 2015] и реанимируются старые, известные атрибуты. Конечно, можно, но сравнительный анализ SS с другими известными технологиями подтверждает преимущества наших подходов. Нам неизвестны результаты других авторов о достаточно надежных корреляционных связях других известных атрибутов трещиноватости со скважинными измерениями трещиноватости в горизонтальных стволах, что свидетельствует либо об их недостаточной разрешенности, либо об их недостаточной адекватности трещиноватой среде вообще.

Заметим, что фрактальная размерность для кластеризации и классификации структур используется давно. Новыми в развитии подходе являются лишь методика кластеризации (блок-схема которой показана на рис. 4) и применение этой методики к атрибутам, подчеркивающим особенности сейсмического поля, для анализа структуры массивных трещинных коллекторов.

Литература

Вообще фрактальные свойства природы на разных масштабах достаточно хорошо изучены [Mandelbrot, 1982; Sherman, Gladkov, 1999] и продолжают интенсивно исследоваться [Захаров, 2014]. Мы не обсуждаем саму фрактальность трещинных коллекторов углеводородов (так как для этого необходимо прежде собрать и обобщить значительный фактический материал), а рассматриваем фрактальную размерность просто как удобный инструмент для объективной оценки сложности “рисунка” сейсмических сингулярностей.

Заметим также, что фрактальная размерность оценивается по регрессии (см. рис. 5), при этом точки не строго ложатся на прямую линию. Более того, на разных масштабах (от километров до миллиметров) степенной закон (3) может выполняться, но с различным значением показателя степени (фрактальной размерности). Насколько сохраняются фрактальные свойства среды на разных масштабах? Можно ли их экстраполировать в область отсутствия информации о среде? Эти вопросы должны явиться предметом дальнейших исследований.

К недостаточному изученным вопросам, важным для развития технологии, можно отнести алгоритм амплитудной декомпозиции, что фактически сводится к независимому анализу разноамплитудных систем линейных элементов (возможно, с их последующей совместной кластеризацией), а также сравнение альтернативных подходов для перехода к бинарному отображению среды для ее последующей кластеризации.

Необходимо отметить, что в статье описывается преимущественно методика и приводятся примеры для 2D случая (для карт “синергетических сингулярностей”). Результатом дальнейших исследований станет развитие полноценной 3D-технологии и объемная кластеризация трещиноватой среды. Это может позволить с новых позиций подойти к проблеме кластеризации трещинных коллекторов углеводородов для структурирования и оценки запасов углеводородного сырья.

Важно, что технология “синергетические сингулярности” постоянно совершенствуется. Доклады, посвященные этой тематике, были сделаны на научно-практических конференциях “Сейсмические технологии” в 2014 и 2015 гг. (www.seismictchnologies.ru).

Предложенная методика применима для кластеризации практически любых полутоновых графических изображений с выраженными линейными элементами. Поэтому область ее использования не ограничивается кластеризацией трещиноватой среды. Ее можно применять для выделения зон дезинтеграции на вертикальных сечениях сейсмических данных, для обработки аэрокосмических снимков и т. п. В целом предложенная методика может повысить уровень объективности геолого-геофизической интерпретации.

Авторы выражают благодарность коллегам из ООО “Славнефть – НПЦ” за содержательное обсуждение полученных результатов.

Базай А.В., Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. и др. Самоорганизация рудных комплексов (синергетические принципы прогнозирования и поисков полезных ископаемых). М.: Геокарт-Геос, 2009. 392 с.

Гладышев И. Анализ и обработка данных. СПб.: Питер, 2001. 752 с.

Захаров В.С. Самоподобие структур и процессов в литосфере по результатам фрактального и динамического анализа: дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 2014.

Левянт В.Б., Хромова И.Ю., Козлов Е.А. и др. Методические рекомендации по использованию данных сейсморазведки для подсчета запасов углеводородов в условиях карбонатных пород с пористостью трещинно-кавернозного типа / Федеральное агентство по недропользованию. М., 2010.

Харахинов В.В., Шлёнкин С.И., Зеренинов В.А. и др. Новые подходы к созданию геологических моделей трещинных резервуаров в древних комплексах Восточной Сибири // Нефтяное хозяйство. 2012. № 11. С. 93–97.

Харахинов В.В., Шлёнкин С.И., Афонасин В.В. и др. Особенности геологического и гидродинамического моделирования трещинных резервуаров в древних комплексах Восточной Сибири // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2013. № 2. С. 11–20.

Шлёнкин С.И., Масюков А.В., Масюков В.В., Козлова А.Н. Вычисление кубов когерентности и сингулярностей // Технологии сейсморазведки. 2012. № 2. С. 5–15.

Шлёнкин С.И., Федоров В.В., Масюков В.В. Исследование и совершенствование технологий атрибутного прогнозирования свойств терригенных коллекторов на основе данных ГИС и 3D-сейсморазведки // Каротажник. 2006. № 2–4. С. 454–468.

Costa A.F., Humpire-Mamani G.E., Traina A.J.M. An efficient algorithm for fractal analysis of textures // Conference on Graphics. 2012. V. 1. P. 39–46.

Dorigo M., Stutzle T. Ant colony optimization. MIT Press, Cambridge, 2004.

Jaglan H., Qayyum F., Huck H. Unconventional seismic attributes for fracture characterization // First Break. 2015. V. 3.

Mandelbrot B.B. Fractal geometry of nature. Freeman; N. Y., 1982.

Sherman S.I., Gladkov A.S. Fractals in studies of faulting and seismicity in the Baikal rift zone // Tectonophysics. 1999. V. 308. P. 133–142.

Shlionkin S.I., Masjukov A.V., Masjukov V.V., Yurchenko O.S. Seismic data discontinuity computation for fault // Fracture Imaging, EAGE. Sant-Petersburg Intern. Geophys. conf. Expanded Abstracts. 2008.

Shmuel Peleg, Naor Joseph, Harley Ralht, Avnir David. Multiple resolution texture analysis and classification // IEEE V-PAMI-6. 1984. N 4.

Theiler J. Estimating Fractal Dimension // Otc. Soc. Am. A. 1990. V., N 6.

*Поступила 7 мая 2015 г.,
в окончательном варианте – 27 мая 2015 г.*

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

МАСЮКОВ Владимир Вадимович – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий математик-программист ООО “Славнефть – НПЦ” (Тверь). E-mail: masvol@mail.ru

ХАРАХИНОВ Валерий Владимирович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, начальник департамента геологии ООО “Славнефть – НПЦ” (Тверь).