

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕАНТИКЛИНАЛЬНЫХ ЛОВУШЕК УГЛЕВОДОРОДОВ НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИИ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ КРИВЫХ ГАММА-КАРОТАЖА**

Нургалиева Н.Г.\*, Утемов Э.В., Косарев В.Е.

*Казанский государственный университет*

\* [nouria.nourgalieva@ksu.ru](mailto:nouria.nourgalieva@ksu.ru)

*В настоящей работе представлены результаты применения фрактальной размерности кривых гамма-каротажа (ГК) в корреляции пермских отложений по линии скважин, проходящей в зоне распространения локальных песчаных раздувов уфимского возраста в междуречье рек Зая и Шешмы (Республика Татарстан), вмещающих высоковязкие нефти и битумы. Проведенная корреляция позволила выявить характеристические границы между состояниями среды осадконакопления, интерпретируемые в терминах секвентной стратиграфии. Установлены границы выдвигения проградационных серий дельтовых и авандельтовых комплексов, с которыми связаны неантиклинальные ловушки углеводородов уфимского яруса. Эти характеристические границы определены как перспективные критерии при прогнозировании ловушек углеводородов в поисково-разведочных работах, ведущихся в отложениях, формировавшихся в зонах активного взаимодействия моря и суши.*

Основой большинства геологических реконструкций, используемых для изучения строения нефтеносных природных резервуаров является рутинная корреляция подповерхностных толщ на основе литологии слоев, форм кривых геофизических исследований скважин или характеристик отражений в сейсмических записях. Вообще, исторически сложились две точки зрения на корреляцию. Строгая точка зрения определяет корреляцию как временную эквивалентность коррелируемых единиц, как образовавшихся в один и тот же период времени [1,2]. Согласно этой точке зрения, установление эквивалентности двух литостратиграфических единиц на основе литологического сходства не является корреляцией. Более либеральное понимание корреляции разрешает проводить ее по разным критериям: литологическому, палеонтологическому или хронологическому [3]. Другими словами, два объекта могут быть скоррелированы как принадлежащие к одной и той же литостратиграфической или биостратиграфической единице, даже, если они имеют, возможно, разный возраст. Ясно, что в прагматическом смысле, большинству геологов, в том числе и геолого-нефтяников, удобно либеральное понимание корреляции.

Таким образом, применяются три вида корреляции:

- литокорреляция, связывающая единицы со сходной литологией и стратиграфическим положением;

- биокорреляция, выражающая сходство ископаемых биоккомплексов и биостратиграфического положения;
- хронокорреляция, выражающая соответствие возраста и хроностратиграфического положения.

Важно подчеркнуть взаимоотношения между хронокорреляцией и литокорреляцией. Хронокорреляция возможна только при установлении эквивалентности возраста сопоставляемых единиц. Корреляция на литологической основе может совпадать с хроностратиграфической корреляцией в локальном, местном масштабе, однако при региональном трассировании многие литостратиграфические единицы пересекают хронограницы. Стратиграфические единицы, сформировавшиеся во время крупных трансгрессий и регрессий являются замечательными примерами таких пересечений изохрон и литологических границ. Речь идет о различных критериях корреляции - литологическом и хронологическом. Поэтому применение различных методов корреляции: литокорреляции, биокорреляции, хронокорреляции при приложении к одной и той же исследуемой системе даст различные результаты.

Другой момент, требующий разъяснения, состоит в различии между простым совпадением единиц и корреляцией этих единиц. Совпадение определяется просто как соответствие данных безотносительно стратиграфической позиции [4]. Например, две породные единицы в разных местах идентифицируются в разрезах как подобные литологические единицы (черные сланцы), совпадающие литологически. Однако они могут иметь различный возраст. Одна пачка в стратиграфическом отношении может залегать над другой. В этом случае литологическая идентичность не является корреляционной эквивалентностью.

Различают прямую (формальную) и непрямую (неформальную) корреляцию. Прямая корреляция связана с физическим трассированием слоев от одной точки к другой. Непрямая корреляция может быть проведена различными методами, такими как визуальное сравнение форм кривых ГИС, записей прямой и обращенной полярности магнитного поля Земли, ископаемых комплексов и т.д. Эта корреляция может быть моносетной, то есть базироваться на одном существенном базисе (физическое свойство, биологическое свойство) или

полисетной, то есть на комплексе свойств. Полисетная корреляция требует более систематического исследования, выходящего за рамки простых визуальных сравнений и включающего в себя статистические исследования.

Так как литологическая идентичность не является достаточным условием эквивалентности, то корреляция по литологии в разных случаях имеет разную степень достоверности. Успех такой корреляции зависит от выбора коррелятивных литологических параметров, природы стратиграфической последовательности, характера литологических изменений от одной точки наблюдений до другой. Фациальные изменения в литостратиграфической единице существенно осложняют литологическую корреляцию. Литологическая корреляция становится более достоверной, если удастся идентифицировать не один-два слоя, а комплекс слоев, или ассоциацию слоев. Эта достоверность повышается, если удастся доказать ее статистико-вероятностными методами [5].

При изучении подповерхностных толщ используют колонки керна, для которых справедливо все выше сказанное, а также кривые ГИС, которые отражают изменения в общей литологии слоев, минералогии, флюидонасыщении, радиоактивности, пористости и т.д. В общем, корреляция по кривым ГИС близка по сути к корреляции по литологии, однако и отличается от нее в силу более непрерывной записи свойств геологического разреза. Определенные виды ГИС отражают определенные физические свойства. Комплекс сигнатур разных кривых ГИС позволяет идентифицировать различные слои и сопоставлять их по латерали. Корреляция по ГИС базируется в большей степени на положении слоя внутри последовательности, нежели на строгой форме соответствующего участка кривой. Кривые ГИС часто схватывают изменения пород, которые невозможно различить визуально.

В настоящей работе в качестве объекта разработки коррелятивных критериев на основе ГИС рассмотрены пермские отложения Республики Татарстан, содержащие многочисленные залежи высоковязких нефтей и битумов в небольших ловушках антиклинального и неантиклинального типов.

Отсутствие сейсмических данных по подповерхностным пермским отложениям приводит в основном к анализу по данным скважин. При этом возможности такого анализа ограничены расстояниями между скважинами,

небольшим диаметром кернов, что препятствует наблюдению особенностей крупномасштабной слоистости, а также трудностями при сопоставлении данных каротажа и фаций, выделяемым по кернам скважин. Керны скважин ценны, особенно если они отобраны непрерывно и вскрывают контакты между фациями. Анализ кернов сходен с анализом обнажений. Он представляет надежный метод изучения подповерхностных фаций, интерпретации данных геофизики и каротажа с целью выявления обстановок осадкообразования. Трудности заключаются в том, что отбор керна проводится обычно лишь при проходке интервалов, представляющих экономический интерес. В результате теряется важная информация о соотношениях этих толщ с соседними. В этих случаях особое значение начинают приобретать каротажные записи, непрерывные по всей длине скважины. При этом для последовательного анализа слоев и соответствующих условий осадконакопления необходимо использовать измерения, в большей степени отражающие седиментологические параметры пород, а не свойства поровой жидкости или другие вторичные характеристики. Этим требованиям отвечает гамма-каротаж (ГК). При гамма-каротаже измеряется естественное гамма-излучение толщ пород, указывающее на концентрацию калия, а местами урана и тория. Обычно данные ГК принимаются как показатели гранулометрического состава пород, поскольку высокие значения обычно соответствуют глинам.

Визуальное сравнение сигнатур кривых ГК сходно с корреляцией по литологии и приводит к выделению литологических границ, пересекающихся с хроностратиграфическими границами или изохронами.

Реальные изохроны, картирование которых дает информацию о конфигурации поверхности дна бассейна седиментации, могут быть обнаружены только при корреляции событий или последовательностей событий, оказывающих воздействие на седиментацию осадков вдоль всего прослеживаемого профиля дна бассейна седиментации. Реально изохрона проходит по породам различного литологического состава: около берега это пески, далее – глины.

В качестве событий и последовательностей событий, по которым могут быть выявлены изохроны, мы предлагаем использовать режим изменчивости окружающей среды (климат, тектоника, биосфера, а также колебания вызванные

взаимодействием этих факторов). Предполагается наличие двух состояний изменчивости окружающей среды: *стабильное* и *возбужденное*. Такая дифференциация является условной, она критична с многих точек зрения (турбидиты, вторичные преобразования пород, перерывы осадконакопления и многое другое), но позволяет упростить регистрацию характера влияния окружающей среды на седиментацию. Стабильное и возбужденное состояния окружающей среды являются условными еще по другой причине. Возбуждение окружающей среды по-разному отражается в различных фациальных условиях, различные типы осцилляций окружающей среды по-разному отражаются в показаниях различных методов ГИС и т.д. Т.е. мы должны провести нормировку осцилляций, учитывающую амплитуду сигнала, на фоне которого происходят осцилляции (учет влияния фациальной зависимости показаний ГК). Такая процедура осуществляется нами путем подсчета локальной фрактальной размерности диаграмм ГК.

#### **Методика расчета фрактальной размерности диаграмм гамма-каротажа**

Введение понятия фрактальной размерности при решении задач геофизики позволяет придать количественную характеристику некоторым интуитивно воспринимаемым в геофизике терминам, как, например "неустойчивость", "неоднородность", "изменчивость", "сложность" [6-8]. Проявление фрактальности, будучи необычайно разнообразными, могут указать способ сравнения таких свойств систем, которые, на первый взгляд, не имеют никакого конкретного количественного параметра для сравнения. Результат вычисления фрактальной размерности, в таком контексте, ценен сам по себе, и здесь на первый план выступает роль процедуры вычисления размерности. Существуют разнообразные способы вычисления фрактальной размерности. Фрактальную размерность можно вычислить, если исследуемый объект является монофракталом или мультифракталом, то есть если отдельные его части подобны целому, что означает целостность фрактальных свойств исследуемого объекта. Между тем известно, например, что физико-геологические свойства среды существенно меняются с глубиной, что должно отражаться на локальной фрактальной размерности физических параметров, и подобных примеров в

природе можно найти достаточно. Для исследования структуры геологических объектов необходимо знать их локальные характеристики, и для этой задачи применение традиционных методов теории фракталов ограничено. Таким образом, мы подходим к понятию фрактальных множеств, имеющих пространственное распределение локальных фрактальных свойств, это - нестационарные фрактальные множества.

Классическая теория фракталов рассматривает объекты, отдельные части которых имеют одинаковые фрактальные характеристики. Однако при изучении различных природных объектов, которые традиционно принято считать фракталами, выясняется, что многие из них обладают способностью изменять в пространстве или во времени свои фрактальные свойства. Приведем пример, ставший классическим в теории фракталов (рис. 1): размерности береговых линий для побережий Британии, Португалии, Германии, вычисленные Мандельбротом [9]. Несмотря на близкое расположение побережий, фрактальная размерность береговых линий для них существенно различна. Такие объекты естественно назвать нестационарными фракталами, подчеркивая локальную неоднородность их фрактальных характеристик.

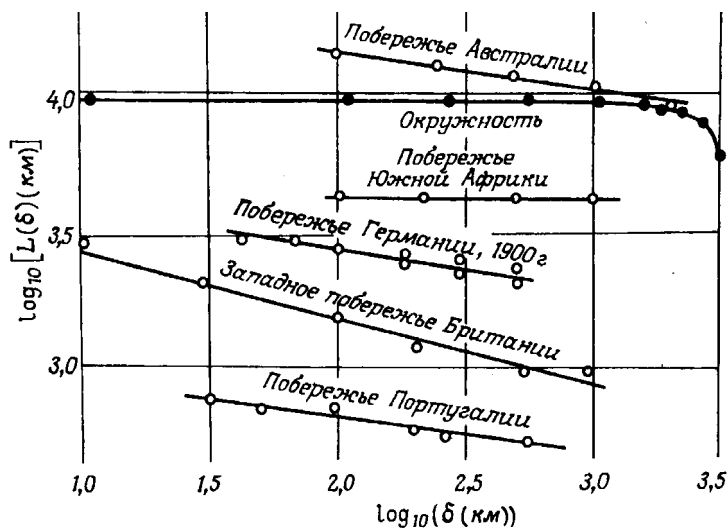


Рисунок 1. График зависимости длины береговых линий как функции выбранного шага  $\delta$  (км) для различных районов земного шара [9]

Если принять нашу точку зрения на то, что размерность  $d$  может быть функцией координат, то есть иметь нестационарные свойства,

$$d = d(\mathbf{r}), \quad (1)$$

то количество пробных функций  $N(\varepsilon)$  будет зависеть от конкретного вида функции (1), поэтому асимптотическая зависимость

$$N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-d} \quad (2)$$

в общем случае выполняться не будет.

Рассмотрим простейший случай  $E = 1$ , когда в окрестности  $T$  некоторой точки  $x_0$  функция (1) является линейной:

$$d(x) = \alpha x + d_0 \quad (3)$$

Покажем, что при определенных условиях фрактальная размерность (в данном случае более удобной оказывается размерность Минковского) не зависит от  $\alpha$  и равна  $d = d_0$ . Для этого найдем выражение для среднего на интервале  $2T$  значения количества пробных функций  $N(\square)$ , используя соотношение (2):

$$\langle N(\varepsilon) \rangle_{2T} = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T N(\varepsilon, x) dx \propto \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \varepsilon^{-(\alpha x + d_0)} dx = \varepsilon^{-d_0} \frac{\varepsilon^{\alpha T} - \varepsilon^{-\alpha T}}{2\alpha T \ln(\varepsilon)} \quad (4)$$

Здесь для упрощения записи выбрана точка  $x_0 = 0$ . Запишем это выражение более компактно:

$$\langle N(\varepsilon) \rangle_{2T} \propto \varepsilon^{-d_0} \frac{\text{sh}(q)}{q} = \varepsilon^{-d_0} g(q), \quad (5)$$

где  $q = \alpha T \ln(\varepsilon)$ .

Значение меры  $B_d$  в окрестности точки  $x_0$  нестационарного фрактального множества будет той же, что и для обычного фрактального множества с размерностью Минковского  $d = d_0$  при выполнении условия

$$T = \left| \frac{\text{const}}{\ln(\varepsilon)} \right| \quad (6)$$

Отметим, что из  $\varepsilon \rightarrow 0$  следует  $T(\varepsilon) \rightarrow 0$ . Полученный результат может быть по аналогии перенесен и на пространства большей размерности (двумерный, трехмерный случаи).

Таким образом, вычисление локальной размерности Минковского для нестационарных фрактальных множеств можно осуществлять, например, клеточным методом при выполнении условия (6). Значение константы в этом выражении определяется эмпирически с учетом выбора максимального и минимального значения размеров клеток покрытия.

Таким образом, вычисление локальной размерности Минковского для нестационарных фрактальных множеств можно осуществлять, например, клеточным методом при выполнении условия (6). Значение константы в этом выражении определяется эмпирически с учетом выбора максимального и минимального значения размеров клеток покрытия.

Результат, аналогичный результату (6) можно получить, вычисляя среднее значение количества пробных функций с помощью интеграла свертки. Перепишем выражение (4) в следующем виде:

$$\langle N(\varepsilon, x) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} N(\varepsilon, x') K(x - x') dx' \quad (7)$$

где функция  $K(x)$  неотрицательна и нормирована на единицу:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} K(x) dx = 1 \quad (8)$$

Этим требованиям удовлетворяет, например, функция Гаусса.

$$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

Подставив ее выражение в правую часть уравнения (7), получим:

$$\langle N(\varepsilon, x) \rangle = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} N(\varepsilon, x') e^{-\frac{(x'-x)^2}{2\sigma^2}} dx' = \varepsilon^{-(\alpha x + D_0)} e^{\frac{1}{2}(\sigma \alpha \ln \varepsilon)^2} \quad (10)$$

Оценка значения локальной размерности окажется несмещенной в случае, если

$$\sigma = \left| \frac{const}{\ln(\varepsilon)} \right| \quad (11)$$

Полученные выше результаты легко адаптировать к фрактальным множествам, являющимся графиками функций типа одномерного броуновского блуждания. Для оценки фрактальной размерности таких функций удобно



воспользоваться степенной зависимостью среднего значения абсолютных приращений функции от приращения координат  $\Delta x$ :

$$\langle N(\Delta x) \rangle \propto \Delta x^H \quad (12)$$

Здесь  $H$  - показатель Херста, связанный с фрактальной размерностью соотношением  $D = 2 - H$ . Для нестационарных броуновских функций мы получим выражение, аналогичное выражению (5):

$$\langle N(\Delta x) \rangle \propto \Delta x^{H_0} \frac{\text{sh}(q)}{q} = \Delta x^{H_0} g(q) \quad (13)$$

где  $q = \alpha T \ln(\Delta x)$ . Условия, при которых можно корректно определить локальную размерность, по форме совпадает с (6):

$$T = \left| \frac{\text{const}}{\ln(\Delta x)} \right| \quad (14)$$

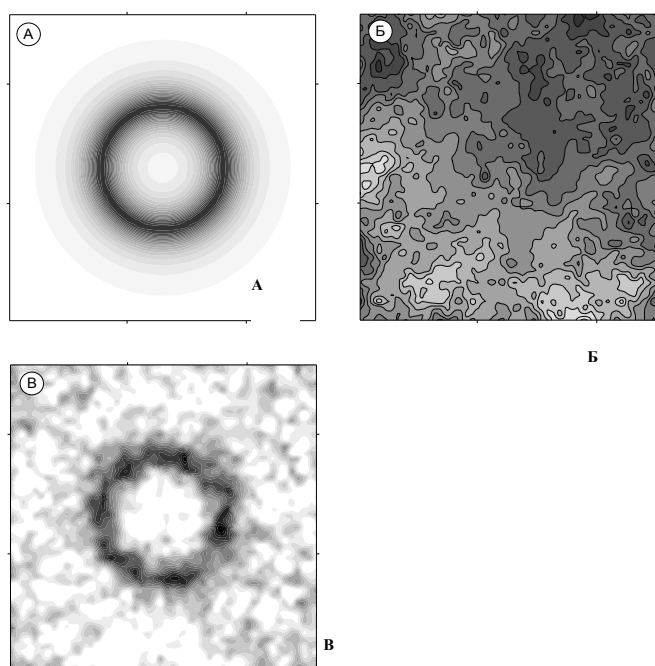


Рисунок 2. Пример определения распределения локальной фрактальной размерности в двумерном варианте:

*A – заданное распределение локальной фрактальной размерности.*

*Б – смоделированная функция с заданным распределением локальной фрактальной размерности.*

*В – вычисленное распределение локальной фрактальной размерности*

Введение понятия нестационарных броуновских функций, позволяет сделать новый шаг в направлении от частного к общему: от обычных броуновских функций с показателем Херста  $H = 0.5$ , далее к обобщенным броуновским ( $0 < H = const < 1$ ), и, наконец, к броуновским траекториям, для которых показатель Херста является функцией координат:  $0 < H = H(x) < 1$ . На рис. 2. демонстрируется корректность вычисления локальных размерностей при соблюдении условия (14). Исходные нестационарные функции типа броуновских генерировались с помощью модифицированного алгоритма Фосса. Заметим, что на рис. 2Б не обнаруживается визуально кольцевая структура, которую мы видим при вычислении локальных размерностей (рис. 2В).

### **Вычисление изменчивости локальной фрактальной размерности данных гамма-каротажа**

Процессы осадконакопления зависят от влияния многих факторов (климатических, тектонических, биологических и др.) и носят сложный нестационарный характер. Значения локальной фрактальной размерности физических параметров среды в данном случае могут служить количественной характеристикой сложности процессов седиментации, следовательно, являться критерием, разделяющим различные фазы колебаний уровня моря. При этом наиболее информативной характеристикой, позволяющей диагностировать реальные изохроны осадконакопления, оказалась вертикальная производная локальной размерности (показателя Херста):

$$H_z(x, z) = \frac{\partial H(x, z)}{\partial z} \quad (15)$$

Алгоритмически, процедура фрактального анализа данных гамма каротажа заключалась в следующем.

Вычислялись функции локальной размерности  $H(z)$  кривых гамма каротажа по каждой скважине.

Вычислялась функция вертикальной производной локальной размерности  $H_z(z)$ .

Координаты скважин, для которых производились расчеты, проектировались на линию профиля, при этом учитывалась также альтитуда скважин.

В программе “Surfer” фирмы “Golden Software” строился разрез по параметру  $H_z(x, z)$ . При построении разреза использовался метод интерполяции Kriging с параметрами:

search ellipse R1:	10000
search ellipse R2:	100
numbers of sectors to reach:	4
Maximum number of data to use from each sector:	6
Minimum number of data in all sectors:	5

### **Корреляция фрактальной размерности диаграмм ГК пермских отложений**

На рис. 3 представлена корреляция фрактальной размерности ГК-диаграмм по линии, включавшей в себя более 100 скважин в междуречье р. Зай и р.Шешма (Республика Татарстан). Эта линия проходит по полосе развития локальных песчаных тел барового типа (ловушек неантиклинального типа) уфимского возраста, в которых сосредоточены многочисленные мелкие скопления высоковязких нефтей и природных битумов. Так как формирование песчаных баров происходило в зоне активного влияния относительных колебаний уровня моря, то применение аппарата секвентной стратиграфии для интерпретации границ, выявляемых при корреляции фрактальной размерности ГК – диаграмм оказывается целесообразным.

На рис.3 показано соотношение картины фрактальных образов кривых ГК (вертикальная производная) и рутинной литолого-стратиграфической корреляции. Полученные на разрезе фрактальных образов границы зон с различным состоянием окружающей среды пересекаются с литолого-стратиграфическими границами и по конфигурации отвечают требованиям секвентной стратиграфии [10].

Выделяются, по крайней мере, четыре границы секвенсов: А, В, С, D. Граница В на многих участках соответствует структурно-эрозионной поверхности сакмарского яруса.

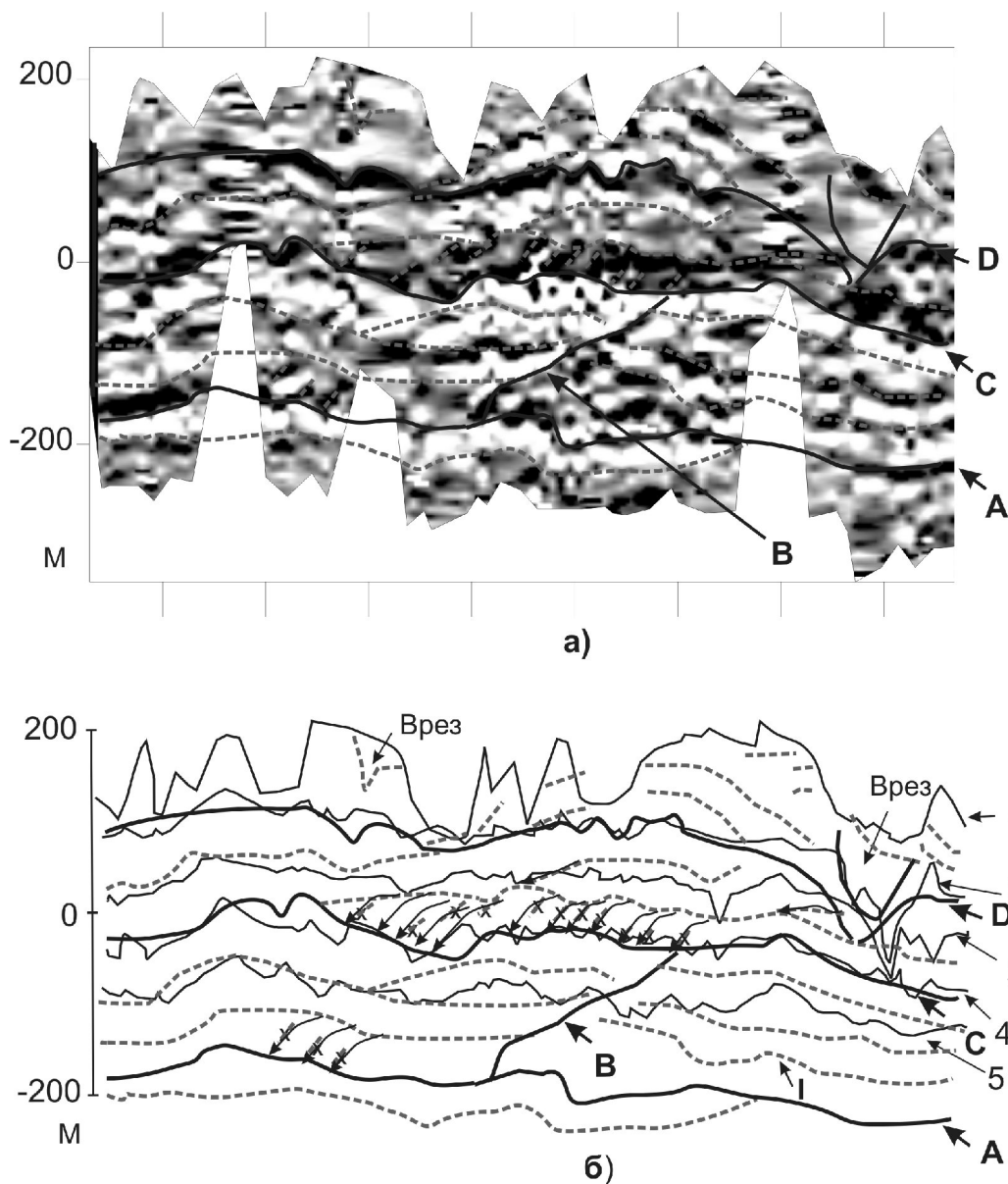



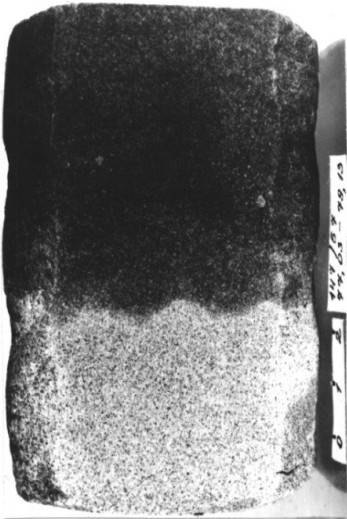
Рисунок 3. Разрез фрактальной размерности ГК (а) и реконструкция секвентного строения (б) меридионального профиля в междуречье Зая и Шешмы по данным более 100 скважин

Литостратиграфические границы: 1 - рельеф; кровли: 2 - нижнеказанского подъяруса, 3 - уфимского яруса, 4 - сакмарского яруса, 5 - ассельского яруса.

А, В, С, D - границы секвенсов; X - характеристические линии, отражающие границы выдвигения проградационных серий комплекса низкого уровня моря (шешминские песчаники, насыщенные высоковязкой нефтью и битумами).

Наиболее замечательными являются характеристические линии типа X, отвечающие границам выдвигения проградационных серий отложений, свойственных седиментационным комплексам низкого уровня моря. В секвенсе, ограниченном снизу границей А, это возможно, серии обломочных потоков или кальциевых турбидитов. В секвенсе, ограниченном снизу границей С, это, по-видимому, проградационные серии песчаников дельтовых и авандельтовых комплексов. Характерные литотипы этих песчаников показаны в таблице 1 на фото 1-3.

Таблица 1

Характерные литотипы пород проградационных серий		
		
<p><b>Фото 1</b> Глинисто-песчаная конгломерато - брекчия. Светло-серые глинистые обломки сцементированы битумонасыщенным песчаником. Сугушлинская площадь, базальные слои песчаниковой пачки шешминского горизонта</p>	<p><b>Фото 2</b> Песчаник мелкозернистый, равномерно битумонасыщенный, переходит в светло-серый известковистый песчаник. Сугушлинская площадь, средняя часть песчаниковой пачки</p>	<p><b>Фото 3</b> Песчаник мелкозернистый, тонкослоистый, послойно неравномерно известковистый и в разной степени нефтенасыщенный. На волнистых плоскостях наложения наблюдаются тонкие глинистые примазки. Сугушлинская площадь, верхняя часть песчаниковой пачки шешминского горизонта</p>

Серии, сложенные этими литотипами, отвечают отложениям низкого уровня моря и при перекрытии их надежной покрывкой, сформированной во время трансгрессивной фазы, являются ловушками углеводородов. В нашем случае к отложениям трансгрессивного комплекса относятся «лингуловые глины» [11]. Следует подчеркнуть, что керн в верхнепермских отложениях отобран на изучаемом объекте в недостаточных объемах, что не позволяет проследить изменения реальной литологии и сопоставить их с полученными границами. Однако уже имеющиеся данные позволяют интерпретировать характеристические линии типа X как поисковый критерий, расширяющий возможности установления низких палеоуровней и распределения коллекторов в терригенных и терригенно-карбонатных комплексах.

В целом, полученные результаты позволили выявить важное значение фрактальной размерности диаграмм ГК для более достоверной моносетной корреляции и прогнозирования неантиклинальных ловушек углеводородов, соответствующих наиболее молодым зонам седиментационных комплексов низкого уровня моря.

### Литература

1. Dunbar C.O. and J.Rodgers, 1957, Principles of stratigraphy: John Wiley&Sons, New York, 356p.
2. Rodgers, J., 1959, The meaning of correlation: Am.Jour. Sci., v.257, p.89-107.
3. Krumbein, W.C., and L.L. Sloss, 1963, Stratigraphy and aedimentation: W.H.Freeman, San Francisco, 660p.
4. Shaw, B.R., 1982, The correlation of geologic sequences, in J.M.Cubbit and R.A.Reyment (eds.), Quantitative stratigraphic correlation: John Wiley&Sons, New York, p.11.
5. Agterberg, F.P.,1990 Automated stratigraphic correlation: Elsevier, Amsterdam, 424p
6. Федер Е.,1991, Фракталы. М.: Мир, 260 с.
7. Turcotte D. L. Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge University Press, New York, 1997, 398 p.

8. Утёмов Э.В. Некоторые аспекты использования анализа фрактальных свойств геофизических данных при их геологической интерпретации. Казан. ун-т. - Казань, 1998 - 11с. Деп. в ВИНТИ 18.09.98, №2822-В98.

9. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco, 1982, 460p.

10. Vail P.R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy interpretation procedure. Atlas of Seismic Stratigraphy // Amer. Assoc.Petrol.Geol., Stud.Geol., 1987, v.27, N1, P.1-10.

11. Эллерн С.С., Шельдяшова Л.В. Типы ловушек и залежей в уфимских отложениях Татарии/ Геология и геохимия нефтеносных отложений. – Казань: Изд-во КГУ, 1985. – С.81-94.