УДК

# ФРАКТАЛЬНОСТЬ СТРУКТУР ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

В.В.Кузнецов

Проводится аналогия между процессами образования облаков и залежей углеводородов. В обоих случаях основными механизмами образования являются перенос и диффузия (перколяция). Взаимодействие этих механизмов является основой самоорганизующихся процессов. Фрактальность облаков оценивается по отношению их площадей и периметров. Аналогичный подход предлагается к месторождениям нефти и газа. Показано, что это отношение сохраняется практически неизменным на интервале площадей и периметров в два порядка, что показывает масштабную инвариантность (скейлинг) залежей углеводородов.

В течение последнего десятилетия многими геологами и геофизиками интенсивно изучается фрактальность природных структур. Такие природные явления, как землетрясения и магнитосферные возмущения, отношение периметров береговых линий и строение облаков, возникновение конвективных ячеек в ядре Земли и вспышки на Солнце, все они оказываются фрактальными структурами. Фрактальные структуры возникают в открытых самоорганизующихся системах, как результат и реакция на прохождение процессов переноса и перколяции. Более того, образование кластеров - фракталов, в конечном счете, приводит к прекращению работы механизма самоорганизации.

1. Проследим фрактальность на примере образования облаков. Солнце нагревает океан, что способствует испарению и переносу водяного пара в область конденсации, т.е. на высоту эффективного образования облаков. Пересыщение водяного пара достигает критической величины, возникает состояние самоорганизованной критичности и незначительная порция молекул воды вызывает быстрый рост водяных кластеров - облаков. За счет процессов конденсации выделяется дополнительная теплота, которая увеличивает температуру водяного пара, на определенном этапе процессе образования облаков, повышая их диффузионную скорость. В этот момент между переносом пара и его диффузией существует положительная обратная связь. Затем возникают плотные облака, которые экранируют поток солнечного тепла на поверхность Земли. Процессы испарения с поверхности океана замедляются, капли в облаках либо продолжают коагулировать и выливаются дождем, либо испаряются, а облака при этом распадаются.

Исследование облаков показало, что при изменении их размеров в широком интервале (площадь варьировалась на 6 десятичных порядков) периметр облака P оказывается связанным с его площадью S соотношением: $P = S^{D/2}$. Эта зависимость показывает, что в атмосфере отсутствуют пространственные масштабы, а облака самоаффинные фракталы. Фрактальная размерность D = 1.35 (по другим данным: $1.37 < D < 1.41$).

Приведем некоторые теоретические модели, объясняющие этот экспериментальный факт (Федер, 1991). Из всего многообразия значимых для описания атмосферы параметров выбирается один, например, локальная температура θ (x, y, z). Точку (θ, x, y, z) можно рассматривать в 4-х мерном пространстве. Множество точек $L_o = \{(\theta, x, y, z)\}$ в четырехмерном пространстве фрактально и его размерность равна D = 4 - H, где H - коразмерность. Поверхность облака представляет собой множество точек $L$ в обычном трехмерном пространстве, фрактальная размерность его D = 3 - H. Формально мы имеем $L \cap L_o$. Пересекая в трехмерном пространстве поверхность облака плоскостью, параллельной поверхности Земли, получаем множество точек, описывающих границу облака, размерность которой D = 2 - H. Экспериментальные наблюдения с помощью радиолокаторов позволяют оценить $H \approx 0.6$ для облаков и зон дождя.

Атмосфера стратифицирована, и это означает, что вертикальное направление неравноправно с горизонтальным, следовательно, облака не могут быть самоподобны, а они самоаффинны. Облака являются примером мультифрактальности.

2. Проблема образования нефти и газа обсуждается среди специалистов до сих пор и, несмотря на всю свою значимость для человечества, все еще не имеет однозначного решения. Высказываются разные мнения по поводу органической и неорганической природы месторождений нефти и газа, выдвигаются и обсуждаются те или иные способы синтеза углеводородов в земных недрах, определяется роль водорода и тепла в этом процессе.

Рассмотрим задачу, которая возможно имеет отношение к проблеме образования углеводородов. Представим себе, что имеется некая газопроницаемая осадочная толща, в которой произвольным образом распределен углерод. Это может быть неорганический графит, или остатки органической жизни. Не будем делать различий, важно, что углерод, либо его соединения, нелетучи. “Продуем” эту среду водородом с одновременным её нагревом тепловым фронтом. Как следует из книг и статей по происхождению нефти и газа и формированию их месторождений, в таком случае могут образовываться углеводороды. Они, в отличие от первичного углерода, в достаточной степени летучи и способны диффундировать вдоль направления продувки и направления теплового фронта. Если на их пути встречается преграда, механическая либо термодинамическая (как в случае облаков) непроницаемая для продолжения диффузии углеводородов, здесь формируется месторождение. Легко убедиться, что в этой модели присутствуют два взаимозависимых процесса: диффузия (перколяция) и дрейф (массоперенос). Свойство диффундировать углеводороды приобретают при водородной “продувке”, т.е. при массопереносе - дрейфе, в свою очередь, заметная прибавка подвижных частиц углеводородов к массе “продуваемого” водорода, меняют параметры массопереноса. Иначе, образование углеводородных кластеров-фракталов приводит к прекращению процесса переноса.

3. Как известно, структура, включающая два взаимосвязанных механизма: дрейф и перколяцию, обладает способностью к самоорганизации (Хакен, 1980). Самоорганизующиеся системы описываются уравнением Фоккера-Планка:

$$\partial f(q, t)/\partial t = - \partial j/\partial q,\ j = d(\gamma q f)/dq + 1/2\ Q\ d^2(f)/dq^2,$$

где $K = \gamma q$ - коэффициент дрейфа, а Q - коэффициент диффузии.

При решении уравнения Фоккера-Планка (ФП) находятся как стационарные решения, когда аргумент не зависит от времени, так и решения, зависящие от времени, но не зависящие от координаты. Приведем результат решения линеаризованного уравнения ФП, типа:

$$dq/dt = - \alpha q + \gamma \Delta q + F.$$

Здесь $\alpha$ - внешний параметр (имеет физический смысл плотности потока), $\gamma$ - скорость затухания потока (имеет смысл диффузии) в системе. Корреляционная функция: $\langle q(x', t')\ q(x, t)\rangle$ для одномерного случая при совпадающих моментах времени $t' = t$ равна:

$$\langle q(x', t)\ q(x, t)\rangle = Q/(\alpha\gamma)^{1/2} \times \exp[-(\alpha/\gamma)^{1/2} \,|\, x' - x \,|\,].$$

Множитель при $|\, x' - x \,|$ в показателе экспоненты имеет размерность обратной длины $l_k$ (корреляционная длина). Очевидно, что $l_k \to \infty$ при $\alpha \to 0$ и, наоборот, при увеличении плотности потока, длина корреляции уменьшается. Параметр $D = (\alpha/\gamma)^{1/2} l$ - выражает фрактальную размерность кластера. Обратим внимание на эту формулу, связывающую плотность потока $\alpha$ (1/с), диффузионный параметр $\gamma$ (см$^2$/с) и характерный размер $l$. Полагая, что первый параметр ($\alpha$), есть ни что иное, как N/S (плотность потока), второй, - показывает скорость диффузионного переноса на характерном размере $l$, то сама длина $l$, определяет размер (периметр) кластера. Таким образом, можно показать, что наша оценка D близка по смыслу к размерности D для облаков: D = 2lgP/lgS. С другой стороны, можно показать, что в нашем случае: $N \sim S^{-D}$, что напоминает закон Гутенберга-Рихтера (“1/f” фликкер-шум). Кроме этого, эта формула показывает, что в некотором интервале значений, интенсивность потока линейно связана с характерным размером (масштабом) образующихся кластеров, тогда это скейлинговое (scaling) отношение.

4. Физический смысл решения уравнения ФП можно представить как зависимость вероятности появления функции с определенным потенциалом от величины этого потенциала. Чем выше потенциал (энергия, площадь поверхности и т.п.), тем меньше вероятность появления этого решения (“1/f” фликкер-шум). В нашей задаче это означает, что должна наблюдаться линейная зависимость (в логарифмических координатах) между энергетическим параметром, характеризующим нефтяное или газовое месторождение и частотой встречаемости месторождений подобного типа. В принципе, если формирование месторождений углеводородов (УВ) происходит как процесс самоорганизации (а именно так реализуется превалирующее большинство процессов в Природе), то должна наблюдаться аналогичная зависимость. Показатель угла наклона такой прямой характеризует величину фрактальной размерности. Рядом авторов, в том числе и нами, было показано, что по мере того, как система самоорганизуется все в большей и большей степени, величина фрактальной размерности убывает.

Проиллюстрируем сказанное на таком примере. В начале процесса мы имели некий объем, занятый углеродом. Топологическая размерность объема - тройка. По мере того, как происходила “прокачка” водородом, образование УВ и их диффузия в направлении “продувки”, топологическая размерность области УВ убывала, стремясь к двойке и меньше. В этом случае толщина обогащенного УВ слоя стремится к минимуму, структура становится двумерной и меньше, напоминая известный «ковер Серпинского». Таким образом, оценивая степень фрактальности ряда месторождений, можно сказать, насколько успешной была самоорганизация в процессе их образования.

Решение нестационарного (зависящего от времени) уравнения ФП имеет вид:

$$f(q, t) = (\pi a(t))^{-1/2} \exp\{- (q - b/t))^2/a(t),$$

здесь:

$$a(t) = Q/\alpha(1 - \exp(-2\alpha t)) + a_o \exp(- 2\alpha t), \; b(t) = b_o \exp(- \alpha t).$$

При $a \to 0$ ($a_o = 0$), решение сводится к $\delta$-функции. Это решение показывает, что при выполнении определенных условий, в диссипативной самоорганизующейся системе может возникнуть нестационарное решение, например (при соответствующем физическом смысле входящих в уравнение ФП параметрах), в виде “отдельной волны” или $\delta$-функции. В рассматриваемом нам случае, это означает, что процесс образования месторождения конечен и занимал, в свое время, некий промежуток времени.

По-видимому, имеет смысл рассмотреть решение, связанное с пространственным распределением зон повышенной концентрации УВ, т.е. с пространственным распределением месторождений. Примем, что месторождения УВ возникли в процессе самоорганизации некой геологической структуры, тогда они фрактальны. Воспользуемся параметром фрактальности, аналогичным тому, что используется для облаков, т.е. отношению площади поверхности месторождений S к их периметру P: $P = S^{D/2}$. (Для месторождений УВ это может быть совсем другой параметр, его ещё необходимо найти, но, в любом случае, будет выполняться общее для таких структур правило: больших месторождений - мало, меньших, - больше, ещё меньших, - ещё больше и т.д.). Показатель наклона прямой в координатах log-log определяет величину фрактальной размерности, величина которой, в свою очередь, показывает степень самоорганизации. По-видимому, для геологов-нефтяников особый интерес приобретает проблема cutoff, т.е. проблема ограничения величины и числа крупных месторождений. В последнее время эти проблемы оказались в сфере интересов новой области физики, занимающейся проблемой самоорганизованной критичности.

5. Как было показано в работе (Bak et al., 1987) и серии последующих работ различных авторов, системы с большим количеством взаимодействующих элементов естественным образом эволюционируют к критическому состоянию, в котором любое малое событие может привести к катастрофе или резкой смене состояния. Это состояние системы было названо авторами состоянием самоогранизованной критичности.

Согласно этой теории, составные части системы никогда не достигают равновесия, а эволюционируют от одного метастабильного состояния к другому. Авторы демонстрируют основную идею своей теории на примере с кучей песка. Песчинки сыпятся медленно и равномерно и всегда из одного и того же места. Песчинки образуют кучу, склон которой становится все круче, до тех пор, пока песчинки не образуют лавины. Считается, что система (куча песка) перед тем, как на неё упала последняя песчинка, находится в критическом состоянии. Песок сыплется с постоянной скоростью, а его количество меняется со временем и график этой величины представляет собой набор случайных хаотических чисел различной длительности, это фликкер-шум или шум мерцания. От белого шума он отличается тем, что система “помнит” все предыдущие сигналы.

Баком и др. (1987) было получено наиболее убедительное доказательство генерации фликкер-шума и образование самоорганизованной критичности двумерной структурой, включающей 100×100 маятников, связанных между собой торсионными пружинами. Начальное условие состоит в том, что маятники нестабильны. Затем система почти уравновешивается и достигает т.н. локально минимально стабильного (т.е. максимально чувствительного) состояния. Предположим, что мы толкнем один маятник, ослабляя силу, удерживающую его в квазистабильном состоянии. Это вызовет колебания соседних маятников и возмущение (шум), будет передаваться посредством эффекта домино. Если в конце процесса все маятники вернутся в исходное состояние, то система стабильна к малым возмущениям. Ситуация существенно отличается, если возмущение будет усиливаться при его распространении, эта конфигурация уже нестабильна к малым возмущениям. Такая система эволюционирует и в ней образуется всё больше и больше минимально стабильных состояний, которые начнут задерживать распространение шума. Система придет в стабильное состояние в том случае, когда шум не сможет распространяться сколь угодно далеко. В этой ситуации можно ожидать возникновение пространственно-инвариантной структуры минимально стабильных состояний, т.е. образования самоподобных фрактальных структур.

Алгоритм Бака и др. представляет собой ячеистый автомат (cellular automaton), описывающий взаимодействие некоторой целой переменной z с его ближайшими соседями. В двумерном случае, если z превышает критическое значение k, то z изменяется следующим образом:

$$z(x, y) \to z(x, y) - 4,$$
$$z(x \pm 1, y) \to z(x \pm 1, y) + 1,$$
$$z(x, y \pm 1) \to z(x, y \pm 1) + 1.$$

В системе нет других, кроме z, параметров, т.к. изменение k приводит к изменению z. Используется граничное условие z = 0 на границе. Начальное состояние системы z >> k. После этого она развивается до тех пор, пока все z не станут меньше k. Затем динамика развития исследуется посредством измерения отклика системы (количества и размера фракталов) на случайные локальные возмущения. Под переменной z можно, согласно (Bak et al., 1987), подразумевать любой динамический параметр системы. В рассматриваемом нами случае, это может быть, например, масса капли, площадь кластера S и т.п.

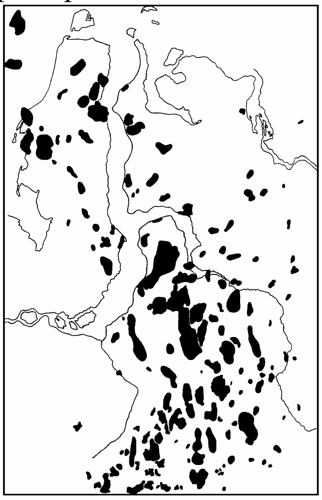

Рис. 1. Обзорная карта газовых и нефтяных месторождений севера Тюменской области.

Компьютерное моделирование с использованием алгоритма Бака показало, что P и S образующихся кластеров соответствуют полученным из наблюдений для облаков: D ≈ 1.33. Этот факт подтверждает, что двумерная структура будет самоорганизующаяся, если она образует кластеры, периметр которых P пропорционален их площади S: $P = \sqrt{S^D}$. Т.о., если реальная структура, содержащая месторождения УВ, обладает аналогичными свойствами, то это может открыть новый подход к проблеме образования УВ, как к открытой структуре, способной к самоорганизации.

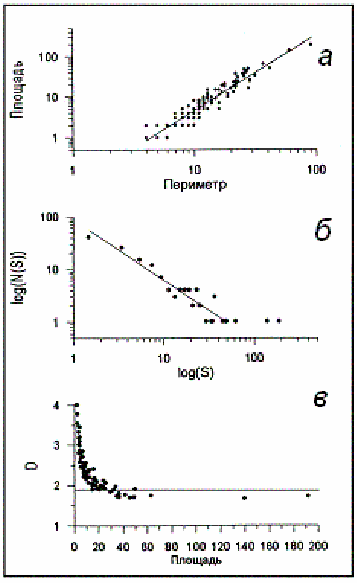


Рис. 2. а) периметр P-площадь S в log-log масштабе; б) число месторождений N - площадь S; в) фрактальная размерность: D = 2lgP/lgS как функция S.

6. Воспользуемся картой месторождений УВ расположенных на севере Тюменской области (см. рис. 1). В поле нашего зрения попали 150 месторождений, в основном небольших, однако, здесь представлены и такие гиганты как Уренгой. Подсчет периметров и площадей месторождений УВ показал, что в масштабе logP-logS все данные располагаются около общей прямой (рис. 2-а). Число месторождений от их величины в log-log масштабе представлено на рис. 2-б (tg угла наклона прямой = -1.15), а на рис. 2-в изображена зависимость фрактальной размерности D = 2lgP/lgS от площади S (D = 1.85).

Анализируя рис. 2, можно отметить, что полученный результат по выявлению фрактальности структур залежей углеводородов идентичен результатам численного моделирования с алгоритмом Бака и др. по самоорганизованной критичности на двумерных решетках. По-видимому, идею аналогии между месторождениями УВ и облаками можно признать удачной. Для того, чтобы оценить область «обрезания» (cutoff) по всей видимости, мала статистика, это может означать, что либо в этой области не выявлены более мелкие месторождения, либо крупные представляют собой не самостоятельные образования, а сумму более мелких. Получившаяся у нас фрактальная размерность D для залежей УВ больше, чем для облаков. Это может означать, что самоорганизация облаков происходит более эффективно, чем УВ. Однако это может означать и то, что на карте не нанесены более подробные детали строения УВ структур.

Предлагаемый подход имеет смысл применить для других нефтяных и газовых регионов и даже внутри них. Возможно, это окажется полезным для понимания природы образования нефтяных и газовых месторождений и для более эффективного их использования.

Список литературы

Рис Ф., Вальдфогель А. Анализ фрактальной размерности облаков с мощными конвективными токами. В кн. Фракталы в физике М. Мир. 1988. (670 с) С. 644-649.

Федер Г. Фракталы М. Мир. 1991.

Хакен Г. Синергетика. М.: Мир. 1980. 404 с.

Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise. Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. P. 381-384.