

ФРАКТАЛЬНАЯ ПРИРОДА СТРАТИГРАФИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ: ПЕРМСКИЕ ОСАДОЧНЫЕ РАЗРЕЗЫ СТРАТОТИПИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

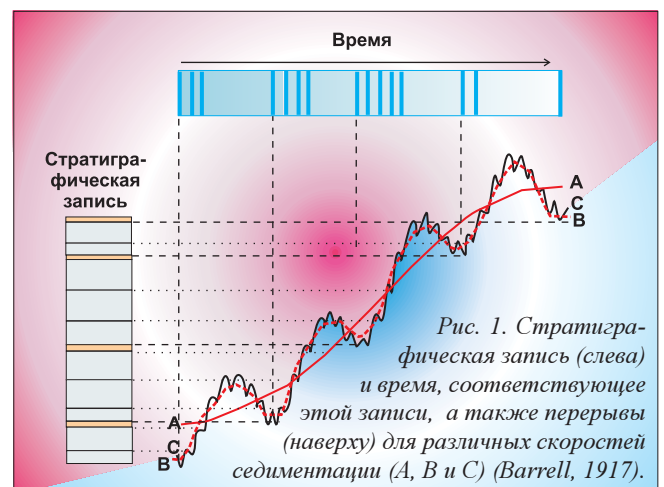
В работе рассмотрены и развиты представления о фрактальной структуре стратиграфической записи. Приведен краткий обзор основной опубликованной в этом направлении литературы (в основном – зарубежной), такой обзор в отечественной литературе дается впервые. Показано, что во многих случаях, а тем более – при накоплении осадков в континентальных условиях, перерывы составляют большую часть геологического времени, не зафиксированную в стратиграфической записи. На примере пермских отложений Мелекесской впадины показано, что длительность перерывов охватывает около 95.4 % всей длительности геологического времени. Эти перерывы осадконакопления, как правило, приходятся на границы стратиграфических подразделений, чем крупнее подразделения, тем крупнее перерыв. В классически “непрерывно отлагающихся” морских отложениях перерывы также занимают значительную часть геологического времени, но большинство из них являются достаточно короткими, хотя вероятность реализации длительных перерывов тоже велика. Поэтому можно говорить, что реальная стратиграфия – это не стратиграфия осадков, а стратиграфия перерывов осадконакопления.

Введение

Разрезы осадочных пород имеют характерную слоистость, мы можем видеть эти слои, потому что они имеют разные свойства (цвет, текстуру, структуру). При рассмотрении пород под микроскопом или измерении их физических или химических характеристик, мы также можем увидеть, что свойства пород в слоях отличаются. Это означает, что осадки образовались в различной окружающей обстановке. Под окружающей обстановкой или средой необходимо понимать все, что в конечном счете приводит к изменениям свойств осадков (климат – температура, влажность, контрастность этих параметров в течение суток, года или другого интервала времени, тектоника – характер и скорость движений земной коры, формирующих окружающий и подводный рельеф и его эрозию; уровень воды в бассейне осадконакопления или ее отсутствие; химизм и физические свойства воды; биофизические и биохимические факторы и др.). Почти все из этих факторов взаимосвязаны и взаимообусловлены.

В крупных бассейнах, обладающих большой инерционностью, окружающая среда меняется достаточно медленно, и скорость изменения характера осадков зависит, в основном, от близости к береговой линии и рельефа дна. Здесь, наряду с “непрерывным осадконакоплением”, наблюдается и “событийное” накопление осадков. Эти события, наблюдаемые в осадках как слои, могут быть достаточно регулярными (сезонная слоистость, некоторые турбидиты), так и случайными. “Событийная седиментация” ведет к формированию слоистости. С другой стороны, слоистость образуется и в системах с плавным изменением окружающей среды. Таких механизмов много, они могут быть связаны, например, с био- и химическими факторами. Наиболее существенным фактором формирования слоистости является эрозия уже накопившихся осадков. Размывы осадков происходят не только при отступлении моря, но и непосредственно в бассейне за счет существования придонных течений и вертикальных перемещений масс воды при изменениях окружающей среды, например, климата (апвеллинг в крупных бассейнах, сезонное перемешивание воды в малых бассейнах).

Таким образом, самое очевидное свойство осадочных толщ – слоистость – свидетельствует о квантовом характере стратиграфической записи. Вопрос о том, какая часть геологического времени представлена осадками, является фундаментальным и, по-видимому, неразрешимым в классических категориях “время”, “временной интервал” и др. Простой пример убеждает в этом. Предположим, в части некоторого разреза осадочных пород мы видим, что каждая $\delta T_i = 1000$ лет представлена осадком мощностью dH_i , для этого масштаба времени – это “непрерывно” накопленный разрез. Если рассмотреть кусочек разреза dH_i , то мы увидим, что в это (i-ое) тысячелетие осадком представлены только 3 года, например, 149-ый, 374-ый и 563-ий годы. В остальные годы осадконакопления либо не было, либо осадок размывает. Отсюда видно, что только 0.3 % времени представлены осадком. Если теперь рассмотрим 563-ий год этого (i-го) тысячелетия, то увидим, что осадком представлены только две недели весной и одна – осенью, т.е. 6% геологического времени. И так далее, до абсурда, если рассматривать каждую секунду геологического времени. Можно изменить масштаб рассматриваемых явлений и взять $dT_i = 1$ млн лет, картина останется такой же сложной, т.е. “скорость осадконакопления” становится неопределенной величиной, она хаотически зависит от длительности



ти конкретного “временного интервала”, для которого оценивается. Это совершенно очевидно для так называемых недифференцируемых функций, к которым и относится стратиграфическая запись (определим понятие “стратиграфическая запись” как проекцию 4-х мерного геологического континуума на ось времени). Теперь можно представить себе, на что похожа эта проекция – стратиграфическая запись! (Один из аналогов – это числовая ось, на которой оставлены только действительные числа). Если бы накопление осадков действительно было непрерывным, это была бы непрерывная линия с топологической размерностью 1. В данном случае – это нечто, состоящее из кусочков линий и точек, кусочки линий в свою очередь тоже не являются непрерывными. Тем не менее, мы определяем скорости осадконакопления, работаем с ними, как, впрочем, без проблем дифференцируем на числовой оси, насыщенной “черными дырами”, где должны бы находиться иррациональные числа. Подобные объекты имеют дробную размерность (D), в данном случае где-то между 0 и 1. Такие множества могут быть описаны в терминах фрактальной геометрии (Mandelbrot, 1967), если они обладают самоподобием в различных масштабах. Эта новая геометрия объектов с дробной размерностью, хотя и имеет много ограничений (как, впрочем, и Евклидова геометрия, которой мы пользуемся), позволяет очень компактно и красиво описать такие сложные объекты как стратиграфическая запись. Например, если для такого множества строгое определение скорости осадконакопления невозможно, то описывая такие объекты в рамках фрактальной геометрии, можно определить строгое понятие размерности множества и вычислить его величину, которая наиболее полно характеризует многие свойства такого, странного на первый взгляд, множества.

В этой статье мы даем краткое введение в суть этого вопроса, представляем новый подход к определению полноты стратиграфической записи на примере пермских разрезов Мелекесской впадины.

Фрактальность стратиграфической записи: история вопроса

В работе (Ager, 1981) стратиграфическая запись сравнивается с сетью - множеством дыр, связанных между собой осадками. Трудно сказать, кто на самом деле сказал об этом впервые. Наверное, многие геологи-стратиграфы говорили об этом, но прямое сравнение стратиграфической записи с фракталом произошло достаточно поздно, уже после выхода в 1967 г. знаменитой сейчас книги Бенуа Мандельброта (Mandelbrot, 1967). Хотя еще в 1917 г. Barrell опубликовал свою известную диаграмму (Рис. 1), которая прекрасно отражает фрактальную природу стратиграфической записи. Эта картина привлекала многих ощущением некоего глубокого смысла, заключенного в ней. Она воспроизведена в десятках известных работ по стратиграфии, из нее, очевидно, следовала “дырявость” геологического времени. Большинство понимало, что стратиграфическая запись в основном состоит из перерывов. Исследования (Sadler, 1980, 1981; Schindel, 1980; Dingus & Sadler, 1982; Plotnick, 1986) показали, что даже такое сравнение стратиграфической записи с сетью (Ager, 1981) является слишком щедрым. Перерывы, несогласия, диастемы доминируют на протяжении всего геологического времени, а эпохи седиментации составляют лишь его малую часть – фрак-

тальную пыль с размерностью меньше 1 (Plotnick, 1986).

К сожалению, очень мало известно о распределении временных интервалов, соответствующих перерывам, в основном, из-за технических трудностей по измерению их абсолютной продолжительности. Тем не менее, сделано много оценок скоростей седиментации (Schwab, 1976; Sadler, 1980, 1981; Schindel, 1980; Dingus & Sadler, 1982), которые позволяют косвенным образом представить масштабы и распределение стратиграфических перерывов. Согласно этим исследованиям, билогарифмический график зависимости скорости осадконакопления (R) от длительности интервала (T), по которому определяется R, показывает, что чем больше временной интервал, тем меньше R:

$$R(T) \propto T^A \quad (1)$$

где A (A < 0) зависит от обстановки осадконакопления.

Это эмпирическое правило было ясно продемонстрировано в (Sadler, 1981) на основе более чем 25000 оценок скоростей седиментации, собранных из более 700 литературных источников (Рис. 2). Sadler нашел, что наклон прямой в поле $\log R(T) - \log T$ (экспонента A) зависит от обстановки осадконакопления (реки, озера, карбонатные платформы и рифы, терригенные шельфы, мелкое море и абиссальное океаническое дно; см. также (Schwab, 1976)).

Согласно (Sadler, 1981), уменьшение скорости седиментации с увеличением временного отрезка может быть связано с систематической ошибкой измерений, постседиментационным уплотнением, долговременной эволюцией геологических систем или эпизодической седиментацией. Sadler (1981) исследовал связь между продолжительностью и скоростью осадконакопления для эр, периодов и эпох с протерозоя до четвертичного времени (Рис. 3) и заключил, что перерывы существуют в пределах всей геологической шкалы во всех разрезах. Чем больше временной интервал, тем больше в нем перерывов, и тем они продолжительнее. Несмотря на то, что в статье 1981 г. Sadler ссылается на аналогии с фракталами (феномен Херста), первая фрактальная модель была предложена лишь спустя пять лет в работе (Plotnick, 1986).

До обсуждения этой модели вспомним знаменитую конструкцию с нецелой размерностью: множество Кантора (или канторову пыль) ($0 < D < 1$). Позднее появились ковер Серпинского ($1 < D < 2$) и губка Менге ($2 < D < 3$) (например, Korvin, 1992). Небольшое обобщение множества Кантора приводит к барам Кантора и к “чертовой лестнице” (Korvin, 1992). Впервые конструкция Георга Кантора появилась в работе “Основы общей теории множеств” (1883), как пример совершенного множества нулевой меры (нулевой “длины”) с несчетно бесконечным числом членов. Свой пример Кантор строил следующим образом. Он начал с замкнутого единичного интервала [0, 1], то есть с прямолинейного отрезка (бара) длиной 1, содержащего обе конечные точки. Затем Кантор “стер” открытую среднюю треть и повторил ту же операцию над каждым из двух оставшихся отрезков длиной 1/3 (Рис. 4). Если повторять снова и снова процесс стирания средней трети, не остается ни одного связного прямолинейного отрезка. Общая длина, или мера оставшегося множества равна нулю. Тем не менее, оставшаяся “пыль” все же содержит бесконечно много, в действительности несчетно много, “точек”.

Канторово множество самоподобно и конструируется итеративным методом. Как охарактеризовать это мно-

жество? После n -кратного стирания средних третей у нас останется $N = 2^n$ прямолинейных отрезков, каждый из которых имеет длину $r = (1/3)^n$. Таким образом, фрактальная размерность канторова множества составит:

$$D = -\log N / \log R = -\log 2 / \log (1/3) = 0.6309 \quad (2)$$

В 1986 г. Plotnick предложил, что фрактальная модель канторовых баров может описать статистическое распределение стратиграфических перерывов (Рис. 4).

В простейшем случае предполагается толщина в 1000 м, отложенная в течение 1 млн лет. Скорость непрерывного осадконакопления (R) составит тогда 1м/1000лет (Рис. 5, случай А). Затем предполагается существование перерыва продолжительностью в 333333 лет в середине разреза (В). Легко заметить, что R ниже и выше перерыва составит 1.5 м/1000 лет. Если повторять процесс (С) и ввести перерывы продолжительностью 111111 лет каждый в субподразделениях, то R в наименьших стратиграфических отрезках составит 2.25м/1000 лет. Итерируя этот процесс бесконечно, получаются фрагменты, представляющие стремительно сокращающиеся периоды времени с увеличивающимися скоростями осадконакопления. Очевидно, что данная седиментационная модель соответствует модели канторова множества. Разумеется, что перерывы характеризуются разной продолжительностью, а относительный размер перерыва колеблется от 0 до 1.

Plotnick (1986) показал, что данная фрактальная модель отвечает эмпирическому правилу $R(T) \propto T^A$, связывающему скорость осадконакопления и временной интервал и подтверждает, что коэффициент A относится к относительному размеру перерыва G как (Рис. 6):

$$A = -\log(1-G) / \log((1-G)/2) \quad (3)$$

Для доказательства этого выражения предполагается, что на n -ом шаге время осадконакопления T_n , а мощность осадков – S_n , тогда скорость осадконакопления составит

$$R_n = S_n / T_n \quad (4)$$

Если $0 < G < 1$, тогда на $(n+1)$ -ом шаге

$$T_{n+1} = T_n(1-G)/2 \quad \text{и} \quad S_{n+1} = S_n/2 \quad (5-6)$$

Наклон прямой в билогарифмическом масштабе:

$$A = \frac{\log R_{n+1} - \log R_n}{\log T_{n+1} - \log T_n} = \frac{\log[(S_n/2)/(T_n(1-G)/2)] - \log(S_n/T_n)}{\log(T_n(1-G)/2) - \log T_n} \quad (7)$$

откуда следует и соотношение (3). Из него также можно выразить относительный размер перерыва G через A :

$$\log(1-G) = \left[\frac{A}{(A+1)} \right] \log 2 \quad (8)$$

Для нахождения физического смысла выражения (8) определяется фрактальная размерность:

$$D = -\frac{\log N}{\log r} = -\frac{\log 2}{\log[(1-G)/2]}, \quad \text{тогда } A=D-1 \quad (9)$$

Общую мощность сохраненных осадков можно описать “чертовой лестницей” (Рис. 7). Мощность увеличивается за счет коротких кластерных эпизодов осадконакопле-

ния, а горизонтальные участки отвечают отсутствию отложений в данной точке наблюдения.

Взаимоотношения между наблюдаемыми скоростями осадконакопления во временных интервалах разной продолжительности могут быть использованы для оценки полноты данного стратиграфического разреза (Schindel, 1982; Dingus and Sadler, 1982; Sadler and Dingus, 1982). Стратиграфическая полнота определяется как доля времени с данным уровнем разрешения, представленная породами и может быть выражена (Plotnik, 1986; по Mandelbrot, 1967):

$$\text{полнота} = \left(\frac{t}{T}\right)^{-A} \quad (10)$$

где t – время разрешения, T – временной интервал разреза, A – наклон прямой в билогарифмическом масштабе (Dingus and Sadler, 1982; Sadler and Dingus, 1982).

Итак, главная закономерность (Sadler, 1981; Sadler and Strauss, 1990) указывает на билогарифмическую зависимость скорости седиментации от времени седиментации. Это означает, что для коротких временных интервалов скорости высокие, а для длительных – низкие. Увеличение наклона прямой указывает на увеличение относительной продолжительности стратиграфических перерывов (G).

Это основные результаты попытки использования фрактальной геометрии для анализа стратиграфической записи. К сожалению, в последние годы интерес к этому вопросу несколько ослаб, что связано со многими причинами. Главное то, что в этом направлении не получено практически значимых результатов. Идея казалась очень красивой, но приложить ее к такому сложному явлению, как стратиграфическая запись, оказалось не просто. Простые (детерминистические) фракталы, которые пытались использовать для описания стратиграфической записи, оказались слишком простыми и непохожими на реальные данные. Некоторые теоретические результаты, полученные с их помощью 10-15 лет назад, казались многообещающими, но не получили развития. Это связано еще и с тем, что реальные фракталы не только стохастические и неоднородные, но и конечны. Детерминистические фракталы, описанные выше, являются бесконечными, в этом их действительная красота. Во многих публикациях последних лет, посвященных фрактальному описанию явлений в физике, химии и технике, появилось множество новых типов фракталов, которые, оставаясь истинными фракталами и позволяющими компактно

описывать чрезвычайно сложные явления, в то же время являются конечными. Конечность реальных фракталов заключается в том, что самоподобие описываемых структур наблюдается лишь в узком интервале линейных размеров (времени, частот и т.д.). И это очевидно, так как мы не имеем измерений в бесконечности и в нулевой точке.

Рассмотрим на примере отложений поздней перми Мелекесской впадины перспективы применения элементов фрактальной геометрии в стратиграфии.

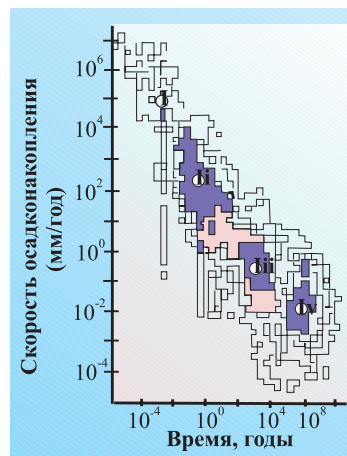


Рис. 2. Зависимость скорости осадконакопления от времени, обобщенная Sadler (1981).

О фрактальной природе стратиграфической записи в позднепермских осадках востока Русской плиты

Верхнепермские отложения (P_2) характеризуются наличием циклов разного порядка: от микроцикличности (0.1 – 3 мм) до макроцикличности (несколько сотен метров). В континентальных и морских отложениях циклы выделяются по изменениям литологического состава, цвета пород, геохимических компонентов и т.п. Все региональные стратиграфические схемы верхнепермских отложений на востоке Русской плиты отражают их циклическое строение. Например, казанские, преимущественно морские отложения, состоят из семи циклов. Аналоги их обнаруживаются в восточных континентальных типах разрезов, где цикличность выражается ярче. О циклическом (ритмичном) строении верхнепермских отложений геологам известно давно (Головкинский, 1868; Нечаев, 1915; Ноинский, 1924; Игнатьев, 1976; Стратотипы..., 1996; 1998).

В общем случае, в цикле снизу вверх наблюдается закономерное изменение состава от песчаников до известняков. Мощности циклов в разных типах разрезов меняются от 5 до 80 м, они выявлены по всему разрезу P_2 на востоке Русской плиты. Оценка длительности этих циклов, выявление их связи с квазипериодическими вариациями орбитальных параметров позволяют подойти к характеристикам фрактальной природы строения верхнепермского разреза.

Циклическое строение разного масштаба ясно выявляется по литологическому составу, который хорошо отражается на кривых геофизических исследований скважин, в частности, на кривых естественной радиоактивности пород – гамма-каротажа (ГК). Кривые ГК являются наиболее простыми и информативными в фациальном отношении. В ГК измеряется естественное гамма-излучение пород, указывающее на концентрацию калия, а местами урана и тория. Обычно данные ГК принимаются как показатели гранулометрического состава пород, поскольку высокие значения соответствуют глинам. Записи гамма-излучения можно использовать для выявления взаимоотношений фаций и эволюционирующих обстановок осадконакопления. В любом цикле в центральной части обнаруживается повышенная, а на краях – пониженная радиоактивность. Это обуславливает процедуру достаточно простого анализа таких циклов, сводящегося к спектральному анализу кривых ГК в каждой скважине.

Нами проведено обобщение кривых ГК по 64 структурным скважинам в пределах Мелекесской впадины (Nourgaliev & Nourgalieva, 1999; Нурғалиев, Нурғалиева, 2000). Предварительно все кривые были нормированы относительно кривой, представляющей наиболее полный разрез. Были составлены суммоспектры (аналоги гистограмм), позволяющие выявлять наиболее часто встречающиеся циклы. На полученных спектрах можно видеть все возможные вариации значений ГК с различной длиной (мощностью в разрезах) и амплитудами (относительными изменениями амплитуд). По суммоспектрам кривых ГК (Рис. 8) было выявлено пять групп циклов: 12.5 – 13.5 м, 16.5 – 19 м, 26 – 28 м, 47 – 49 м, 73 – 90 м. Геологам, занимающимся изучением пермских разрезов, многие из этих циклов хорошо известны (Стратотипы..., 1996). Оценка их длительности ранее не проводилась, хотя даже грубая оценка могла бы дать, как мы увидим ниже, вполне приемли-

мые масштабы. Например, отложения казанского яруса подразделяются на 7 циклов (ритмов) с мощностью в пределах одного порядка (20 – 50 м) (Стратотипы..., 1996). Тогда, учитывая, что длительность казанского века составляет 5 – 10 млн лет (Harland et al., 1990; Menning, 1995), можно, считая подъярусы приблизительно равными по длительности, получить длительность этого цикла около 600 – 1200 тыс лет и среднюю скорость накопления осадков порядка 0.05 – 0.1 мм/год. Другая грубая оценка скорости осадконакопления может быть сделана из еще более простых соображений. Длительность казанского века составляет те же самые 5 – 10 млн лет (Harland et al., 1990; Menning, 1995), а мощность казанских отложений в наиболее “полных” разрезах достигает 200 м, отсюда среднее значение R составляет 0.02 – 0.04 мм/год. Скорость осадконакопления, оцененная за больший интервал, оказывается меньше за счет большей вероятности наличия перерывов и размывов (см. предыдущий раздел). Какой геологический смысл имеет средняя скорость осадконакопления, оцененная за интервал длительностью несколько миллионов лет? Очевидно, что это величина средней скорости прогибания территории, на которой происходило накопление осадков. Поэтому, эта величина будет более-менее постоянной для различных “однообразных” разрезов территории. Вот почему геологам очень нравится именно эта величина скорости накопления осадков. Для того, чтобы начать обсуждение вопроса о длительности различных стратиграфических единиц или циклов, необходимо установить две фундаментальные величины: реальные скорости “мгновенной седиментации” основных типов пород и временное разрешение, с которым мы будем работать.

Наиболее надежный путь оценки скорости седиментации основных типов пород – это выявление сезонной слоистости (микрослоистости). Ранее проведенные оценки скоростей накопления глинистых отложений P_2 востока Русской плиты по анализу микрослоистости осадков и спектрам палеогеомагнитных вариаций, записанных в этих породах (Нурғалиев, Хасанов, 1992; Nourgaliev et al., 1998), дают величины $R \sim 0.2 - 2.5$ мм/год (при среднем значении 1.5 мм/год). Оценка R по микрослоистости предполагает доказательство сезонной природы микрослоистости, и в каждом случае эта задача должна решаться в рамках оригинального подхода. Поэтому, обнаружив в породах микрослоистость, нельзя полагать, что она имеет, несомненно, сезонную природу. Тем более, пермские отложения востока Русской плиты отлагались в низких широтах, где контрастность сезонного накопления осадков не очевидна (Нурғалиева, в печати).

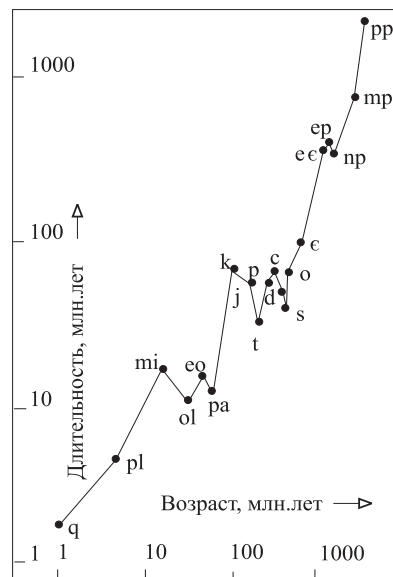


Рис. 3. Взаимосвязь продолжительности и возраста в миллионах лет эр, периодов и эпох (по Sadler, 1981).

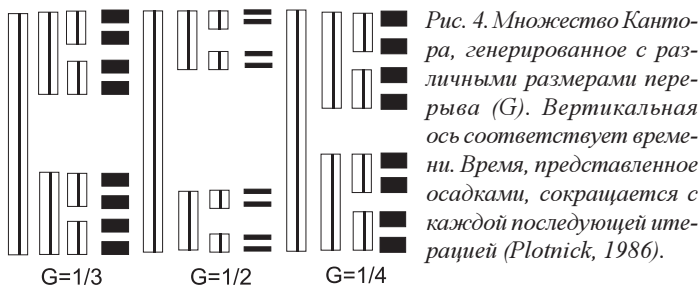


Рис. 4. Множество Кантора, генерированное с различными размерами перерыва (G). Вертикальная ось соответствует времени. Время, представленное осадками, сокращается с каждой последующей итерацией (Plotnick, 1986).

Вернемся к обнаруженным нами циклам: 12.5 – 13.5 м, 16.5 – 19, 26 – 28, 47 – 49, 73 – 90 м. Базируясь на оценках масштабов накопления глин и глинистых пород за год, можно определить нижнюю границу длительности циклов первой группы ~18.000 лет, а второй группы ~24.000 лет. Отклонения от этих значений возрастают в случаях значительных отличий в скоростях накопления песков, карбонатов и глин, отличий в скоростях осадконакопления в разных частях бассейна, а также большого количества перерывов в процессе осадконакопления. Первые отклонения, возможно, не имеют большого значения, так как повышенные скорости накопления песков компенсируются пониженными скоростями накопления карбонатов при статистической обработке большого числа циклов разной мощности. Влияние второго типа отклонений можно ограничить, если рассматривать не абсолютные, а относительные мощности циклов. Влияние перерывов выражается в уменьшении длительности цикла осадконакопления. Чем мощнее цикл, тем больше в нем перерывов, а значит, больше ошибка определения его длительности.

Полученные длительности циклов близки к циклам Миланковича, обусловленным вариациями орбитальных параметров Земли, определяющих изменения глобального климата, уровня океана и процессов седиментации. Детально циклы Миланковича исследованы за последние несколько миллионов лет (Miall, 1996). Аналогичные циклы обнаружены для позднего триаса (Olsen, 1986). Известны данные, подтверждающие устойчивый характер этих циклов и в палеозое (Berger et al., 1992). Исходя из этого, можно полагать, что циклы длительностью $\sim 10^4 - 10^5$ лет обусловлены астрономическими причинами. Средняя длительность циклов Миланковича для поздней перми может быть (Berger et al., 1986): 17.7 – 21.2 тыс. лет (прецессия), 35.6 – 45.0 тыс. лет (наклон оси вращения), 100, 130 – 140 и 400 тыс. лет (все – эксцентриситет). Обнаруженные циклы в кривых ГК верхней перми могут быть связаны с относительными колебаниями уровня моря в палеобассейнах осадконакопления, связанными с изменениями климата под влиянием орбитальных параметров Земли.

Здесь мы не обсуждаем природу трансформации орбитальных вариаций в вариации условий окружающей среды седиментации. Существует множество обзоров на эту тему (Miall, 1996 и др.). Однако, необходимо отметить, что наиболее непротиворечивые механизмы нуждаются в наличии оледенения. Если оледенение отсутствует в это время, механизм становится очень сложным и не всегда понятным. Тем не менее, существует много примеров, когда в отсутствии ледниковых шапок на полюсах орбитальные вариации отчетливо отображались в стратиграфической записи (Fisher, 1986; Elder et al, 1994). Решение этого вопроса для позднепермского времени требует глубокого понимания характера и факторов формирования климата, обеспечивающих ту или иную реакцию на изменения инсоляции

(орбитальных параметров) (Нурғалиева, в печати). Природа отражений орбитальных вариаций в седиментационных циклах в позднепермскую эпоху – это вопрос специальной статьи. Здесь мы полагаем, исходя из известных примеров для триаса (Olsen, 1986) и палеозоя (Berger et al., 1992), что основные цикличности в интервале периодов от 10^4 до 10^6 лет обусловлены вариациями климата под влиянием астрономических параметров (Miall, 1996).

Таким образом, будем полагать, что наиболее короткие циклы (12.5 – 13.5 м) соответствуют периодам прецессии (17.7 – 21.2 тыс. лет), циклы 16.5 – 19 м коррелируют с периодами наклона орбиты (35.6 – 45 тыс. лет), следующие группы циклов коррелируют с периодами эксцентриситета, соответственно: 26 – 28 м – 100 и 130 – 140 тыс. лет; 47 – 49 м – 400 тыс. лет (Рис. 8). Средние скорости накопления осадков при этом изменяются от 0.7 мм/год для коротких циклов до 0.12 мм/год для длинных циклов.

Вернемся к вопросу о временном разрешении стратиграфической записи. Казалось бы, мы должны взять разрешение 1 год, так как имеем достаточно хорошо обоснованные данные на этот счет (Нурғалиев, Хасанов, 1992; Nourgaliev et al., 1998), однако, необходимо помнить, что эти оценки сделаны только для глин и глинистых пород. Другие типы пород в этом временном масштабе седиментации могут иметь существенно отличающиеся скорости седиментации. Хотя, как отмечено ранее, большая скорость седиментации песчаников может компенсироваться за счет меньшей скорости отложения известковых пород. Для того, чтобы быть уверенными в правильности величины средней скорости осадконакопления, необходимо в качестве оценки временного разрешения стратиграфической записи взять минимальный по длительности седиментационный цикл (песчаник-глина-известняк-песчаник), в котором это предполагаемое осреднение скорости осадконакопления уже реализовано. Таким циклом является прецессионный цикл с мощностью $\sim 12.5 - 13.5$ м и длительностью (периодом) $\sim 17.7 - 21.2$ тыс. лет.

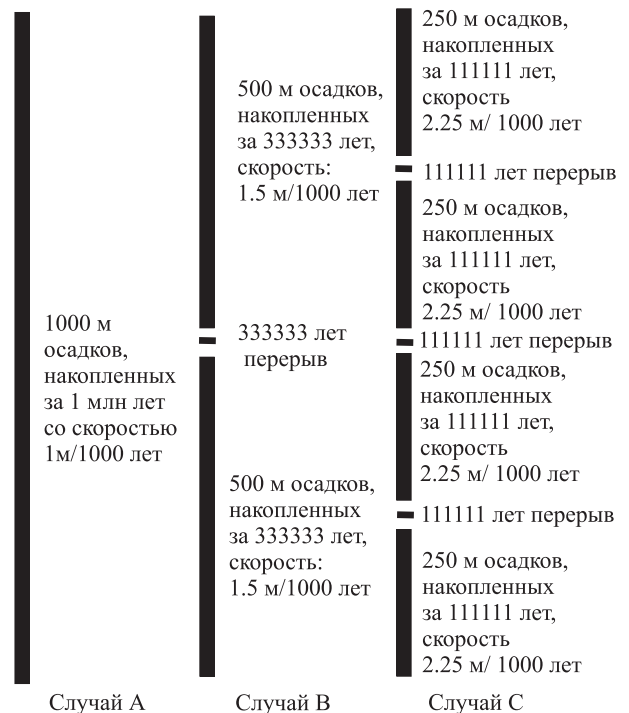


Рис. 5. Приложение канторовой модели к стратиграфической записи (по Korvin, 1992).

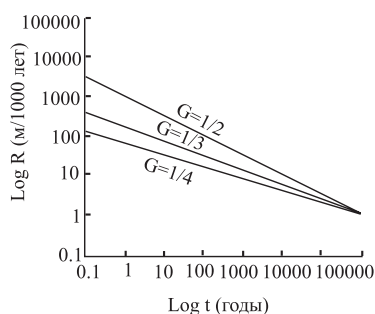


Рис. 6. Билогарифмический график зависимости скорости осадконакопления (R) от времени (t) (Plotnick, 1986).

Таким образом, мы имеем все данные для конструирования фрактальной модели стратиграфической записи в отложениях казанского яруса поздней перми: оценки R для различных интервалов осреднения (циклов), величину временного разрешения стратиграфической записи. Фрактальную размерность стратиграфической записи в отложениях казанского яруса можно оценить без дополнительных предположений. Для этого надо построить зависимость средних скоростей осадконакопления от длительности временных интервалов, для которых эти осреднения произведены. В нашем случае мы обоснованно полагаем, что наиболее устойчивые средние скорости осадконакопления оцениваются в пределах наиболее полных циклов различной природы. При этом наиболее короткий цикл (прецессии) оказывается наиболее полным. Так как мы считаем длительность этого цикла границей временного разрешения стратиграфической записи, автоматически эта оценка является границей фрактала. Таким образом, на масштабы времени менее чем $\sim 17.7 - 21.2$ тыс лет искомая фрактальная структура не распространяется. Естественно, что внутри этого минимального цикла тоже есть перерывы и размывы, наличие которых обнаруживается многочисленными циклами меньшей длительности. Причем длительность этих неполных циклов распределена хаотически. Это не значит, что мы не принимаем во внимание все перерывы (размывы) внутри этого самого короткого цикла. Часть перерывов, обусловленных собственными колебаниями внутри бассейна, действительно оказываются за пределами нашего внимания, но основная часть перерывов, обусловленная колебаниями астрономических параметров, несомненно, вовлечена в модель. Верхняя граница нашей фрактальной модели ограничивается самым длительным циклом мощностью $\sim 47 - 49$ м и длительностью ~ 400 тыс лет (Рис. 8).

Построенная зависимость средней скорости осадконакопления от интервалов осреднения имеет достаточно устойчивый вид. Обнаруженные для различных циклов значения R в билогарифмическом масштабе ложатся на одну прямую линию (Рис. 9). Это служит веским доводом того, что стратиграфическая запись в казанских отложениях поздней перми востока Русской плиты может являться фракталом. По графику хорошо видно, что длительность казанского яруса ~ 6 млн лет (как и средняя мощность и скорость накопления отложений) без отклонений ложится на эту прямую. Поэтому, мы можем уверенно считать, что структура стратиграфической записи описывается одним фракталом в пределах всей длительности казанского яруса.

Показатель степени (экспонента), вычисленный по графику, составляет $A = -0.54$, следовательно, фрактальная размерность стратиграфической записи $D = 0.46$. Что означает эта цифра, что мы можем вычислить по ее оценке, какие приложения могут быть получены на этой основе?

Для самой простой фрактальной структуры, множества Кантора, фрактальная размерность $D = 0.6309$, т.е. она

значительно больше размерности стратиграфической записи казанского века. Т.е., наша запись еще более “рапыленная” (пористая), нежели простое множество Кантора. Очевидно, что множество Кантора не подходит для описания нашей записи. Во-первых, трудно представить себе, чтобы наше множество было столь регулярным. Причины перерывов стратиграфической записи очень многочисленны, их реализация совершенно случайна. Хотя можно предположить моменты, когда перерыв наиболее вероятен. Например, в случае совпадения нескольких причин, перерыв будет реализован с существенно большей вероятностью. Во-вторых, во множестве Кантора наиболее длительный перерыв возникает в середине интервала. В стратиграфической записи не обязательно самый длинный перерыв будет в середине интервала. Хотя, например, если стратиграфическая единица (такая как казанский ярус) содержит два подразделения, очень может быть, что самый длинный перерыв будет где-то в середине интервала. Но пока мы не можем судить о сравнительной длительности раннеказанского и позднеказанского интервалов времени. Поэтому, исходя из самых общих соображений, мы отвергаем модель простого множества Кантора как модель нашей стратиграфической записи. Единственное, что можно вычислить, это – полнота записи, под которой понимается следующая величина:

Полнота стратиграфической записи: $1 - \text{“пористость”}$ проекции 4-х мерного геологического континуума на ось физического времени.

“Пористость” фрактального множества вычисляется достаточно просто (Mandelbrot, 1967; Plotnik, 1986):

$$\text{“пористость”} = 1 - (T_1/T_2)^{D-1} \quad (11)$$

где T_1 и T_2 – верхняя и нижняя границы реализации фрактала, D – фрактальная размерность множества. Величины T_1 и T_2 известны. T_1 совпадает с длительностью наиболее полных циклов и равна ~ 20000 лет ($\sim 17.7 - 21.2$ тыс лет). T_2 , как показано выше, совпадает с длительностью казанского яруса ~ 6 млн лет. Тогда “пористость” стратиграфической записи составит 0.954 , т.е. из ~ 6 млн лет, только 276 тыс лет зафиксированы в осадках! Это кажется абсурдом, но легко проверяется другими вычислениями. Если мощность казанского яруса составляет ~ 200 м, а скорость накопления, как мгновенная (сезонная) для глинистых пород, так и осредненная для циклов прецессии ($\sim 17.7 - 21.2$ тыс лет), около 1 мм/год, то число зафиксированных в осадках лет также составляет ~ 200 тысяч. Это не значит, что остальные 95.4% времени осадконакопления не было. По-видимому, оно длилось существенно большее время, но осадки были размывы во время длительных перерывов.

Что можно сказать о количестве и распределении длительности наиболее крупных перерывов? Не прибегая к модели фрактала, например, можно сказать, что перерывы распределены более-менее равномерно по всему временному интервалу.



Рис. 7. Чертова лестница (по Korvin, 1992).

Это следует из того, что нам удалось выделить циклы длительностью до 400 тыс лет, при этом суммарная длительность стратиграфической записи составила всего 200 – 300 тыс. лет. Кроме того, обнаружена цикличность с мощностью ~73 – 90 м (Рис. 8), что по оценкам средней скорости осадконакопления из условия фрактального характера стратиграфической записи (Рис. 9) составляет ~ 830 – 1280 тыс. лет. Таким образом, только при наличии не очень длительных перерывов возможно наблюдение столь длительных циклов. Можно оценить длительность перерывов, например, если мы наблюдаем несколько (от 1 до 3) циклов наибольшей длительности в разрезе, то это значит, что в стратиграфической записи существует несколько (от 1 до 3) интервалов, каждый длительностью 830 – 1280 лет, внутри которых перерывы составляют также более 90% времени, но нет ни одного длиннее этого интервала (очевидный вывод). Вероятная длительность самого большого перерыва определяется количеством этих самых длинных циклов в разрезе. Если мы наблюдаем 3 подобных цикла (полагая, что общее количество их достигает 5), мы можем предположить вероятность самого длительного перерыва, равного 2 таким циклам. При меньшем количестве таких циклов в разрезе вероятная максимальная длительность перерыва становится существенно больше. Распределения длительности перерывов могут быть вычислены, здесь приведены только качественные рассуждения. Естественно, что для столь странного “дырявого” (пористого) разреза мы должны численно оценивать вероятность проявлений различных циклов и перерывов.

Для ответов на все дальнейшие вопросы необходима модель. В данной работе мы ограничимся моделями однородных детерминированных фракталов и продемонстрируем возможность использования априорной геологической информации для оценки некоторых особенностей фрактальной стратиграфической записи. Рассмотрим некоторые другие виды множеств Кантора. В принципе, генерация множеств Кантора может быть очень многообразной. Например, замкнутый единичный интервал [0, 1] можно делить не на 3 части, как в классическом случае, а на N частей, длительность каждого непрерывного отрезка можно брать не 1/3, а как 1/M. Такой способ генерации фрактала можно продолжить, и тогда фрактальная размерность полученного множества составит:

$$D = - (\log ((N + 1) / 2)) / \log M \quad (12)$$

Для случая самого простого однородного фрактала (когда $M = 1/N$), фрактальная размерность составит:

$$D = (\log (N + 1) - \log 2) / \log N \quad (13)$$

Из этого выражения следует очень интересный вывод. Если мы знаем количество наиболее крупных перерывов в разрезе, и, соответственно, количество крупных стратиграфических единиц, то можно сравнить вероятную длительность перерывов и стратиграфических подразделений.

Наиболее общим является случай, когда длительности стратиграфического подразделения и перерыва между ними существенно различаются. Используя формулу:

$$D = - (\log ((N + 1) / 2)) / \log M \quad (14)$$

и зная количество подразделений в разрезе $(N + 1)/2$, можно по известному значению фрактальной размернос-

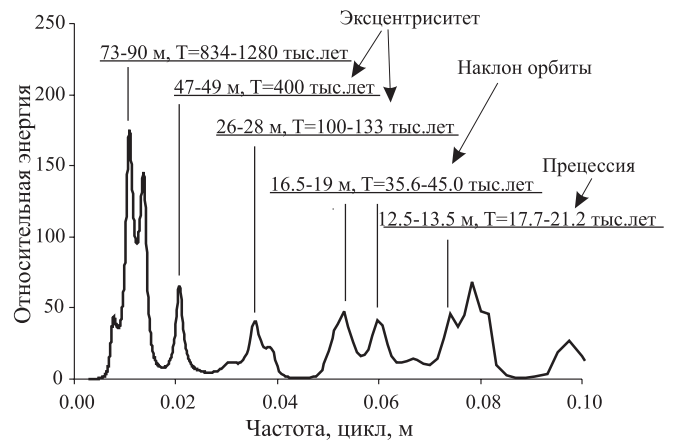


Рис. 8. Суммарный спектр для всех разрезов.

ти стратиграфической записи оценить относительную длительность этих подразделений из выражения:

$$\log M = (1/D) \log ((N + 1) / 2) \quad (15)$$

Например, для казанского яруса востока Русской плиты, согласно наиболее распространенной стратиграфической схеме выделяется 7 подразделений (Стратотипы..., 1996), следовательно, $N = 13$. Тогда мы получаем из значения фрактальной размерности $D = 0.46$, что $M = 68$. Т.е. длительность стратиграфической записи в (равных по длительности) подразделениях составляет порядка ~ 88 тыс. лет, в то время когда длительность крупнейших перерывов (также равных по длительности) составляет ~ 900 тыс. лет.

Рассмотрим кратко другую модель однородного фрактала, которая работает в том случае, если самым длительным является перерыв между подъярусами. Тогда $N = 3$, и M вычисляем из формулы:

$$\log M = (1/D) \log ((N + 1) / 2) \quad (16)$$

При $D = 0.46$, $M = 4.5$. Это означает, что длительность перерыва между подъярусами составляет около 3.3 млн лет, а длительность подъярусов только по 1.33 млн лет.

Это две наиболее различные модели, построены на основе простейших однородных фракталов. К сожалению, мы не имеем дополнительных данных о продолжительности стратиграфических подразделений казанского яруса и оценках длительности (хотя бы косвенных) перерывов, чтобы оценить правильность той или иной модели. Получение этих сведений позволило бы качественные данные перевести в разряд количественных и показать процессы изменений окружающей среды в реальном временном масштабе.

Заключение и выводы

Стратиграфическая запись казанского века на востоке Русской плиты имеет фрактальный характер с размерностью множества $D = 0.46$. Эта достаточно низкая размерность свидетельствует о значительной роли перерывов и размывов в стратиграфической записи. Например, данное значение размерности означает, что в пределах временных масштабов от ~ 20000 лет (~17.7 – 21.2 тыс. лет) вплоть до длительности казанского яруса (~ 6 млн. лет) длительности перерывов охватывает около 95.4 % всей длительности геологического времени.

Полученное громадное значение “пористости” геологического времени требует совершенно иного взгляда на стратиграфическую запись. В связи с этим возникает новое представление корреляции разрезов на основе



Дорогая газета «Казанский университет»!

Примите искренние поздравления с 75-летним юбилеем! На протяжении этих лет в Вашей газете отражалась

жизнь всего Казанского университета: его радости и заботы. Мы желаем продолжать открывать для Ваших многочисленных читателей и поклонников все новые грани университетской жизни и освещать ее события.

Ваши коллеги – редакция журнала «Георесурсы»

существующих схем корреляции. Возникает множество вопросов, связанных с интерпретацией этой записи, в частности, вопрос о реальности выделяемой цикличности, о влиянии характера распределения перерывов на проявления циклов.

Перспективы фрактального описания стратиграфической записи заключаются в использовании более сложных моделей фракталов (неоднородные детерминированные фракталы, случайные фракталы и т.д.).

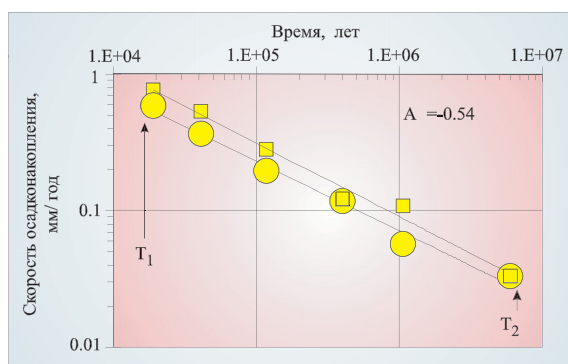


Рис. 9. Фрактальная размерность геологического времени и полноты стратиграфической записи. Полнота = пористость записи (геологического времени) = $(T_1 / T_2)^{1-D} = 4\%$

Работа выполнена при поддержке грантов Минобразования РФ (Е02-9.0-41) и Швейцарского научного фонда (No. 7SUPJ062095).

Литература

Головкинский Н.А. О пермской формации в центральной части Камско-Волжского бассейна. *Материалы по геологии России*. Т.1. Казань. 1868.

Игнатьев В.И. *Формирование Волго-Уральской антеклизы в пермский период*. Казань. Изд-во КГУ. 1976.

Нечаев А.В. Казанский и уфимский ярусы пермской системы. *Геол. Вестник*, Т. 1. Вып. 1. С-Пб. 1915. 20-31.

Ноинский М.Э. Некоторые данные относительно строения и фациального характера казанского яруса в Приказанском районе. *Известия Геологического Комитета*. Т.13. № 6. 1924. 565-632.

Нурғалиев Д.К., Хасанов Д.И. Запись солнечных циклов в позднепермских осадочных породах. *Солнечные данные*. № 8. 1992. 82-85.

Нурғалиев Д.К., Нурғалиева Н.Г. Проявление вариаций астрономических параметров в пермских отложениях востока Русской плиты: стратиграфические приложения. *Тез. докл. Всеросс. съезда геологов «Геологическая служба и минерально-сырьевая база России на пороге XXI века»*. С-Пб. 2000. 183.

Нурғалиева Н.Г. Климат Пангеи в пермский период 1: глобальные геологические данные и модели. *Георесурсы*. 2003 (в печати)

Стратотипы и опорные разрезы верхней перми Поволжья и Прикамья. Отв. ред. Н.К. Есаулова, В.Р. Лозовский. Казань. Экоцентр. 1996.

Стратотипы и опорные разрезы верхней перми Приказанского района. *Мат-лы к Межд. симп. «Верхнепермские стратотипы Поволжья»*. Москва. Геос. 1998. 104.

Ager D.V. *The Nature of the Stratigraphical Record* (2nd ed.): New York. Halsted Press. 1981. 122.

Barrel N.J. Rhythms and measurements of geologic time. *Geological Society of America Bulletin*. 28. 1917. 745-904.

Berger A., Loutre M.F., Laskar J. Stability of the astronomical frequencies over the Earth's History for paleoclimate studies. *Science*, vol. 255. 1992. 560-566.

Dingus L., Sadler P.M. The effects of stratigraphic completeness on estimates of evolutionary rates. *Systematic Zoology*. 31. 1982. 400-412.

Fischer A.G. Climatic Rhythms recorded in strata. *Ann.Rev.Earth Planet Sci.*, v. 14. 1986. 351-376.

Harland W.B., Armstrong R.L., Cox A.V., Craig L.E., Smith A.G. and Smith D.G. *A geologic time scale, Cambridge Earth Science Series*. 1990.

Korvin G. *Fractal Models in Earth Sciences*. 1992. 87-113.

Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. New York. 1967.

Menning, M. A numerical time scale for the Permian and Trassic Periods: An Integrated time analysis. *The Permian of the Northern Pangea*. Vol.1. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 1995. 77-97.

Miall, A.D. *The geology of stratigraphic sequences*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 1996.

Nourgaliev D., Nourgalieva N. Astronomical calibration of the East-Russian Plate Upper Permian sediments cycles: preliminary data about Kazanian stage duration. *Permophiles*. vol. 34. 1999. 15-19.

Nourgaliev D.K., Khassanov D.I., Borisov A.S., Yasonov P.G. Periods of paleosecular geomagnetic variations in the Late Paleozoic. *Stratotypes and Referens Sections of the Upper Permian in the Regions of the Volga and Kama Rivers*. Moscow. Geos. 1998. 263-271.

Olsen, P.E. A 40-million year lake record of early Mesozoic orbital climatic forcing. *Science*. 234. 1986. 842-848.

Plotnick, R.E. A fractal model for the distribution of stratigraphic hiatuses. *Journal of Geology*. 94. 1986. 885-890.

Sadler P.M. Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections. *J.Geology*. 1981. vol.89, 569-584

Sadler P.M. The significance of time scale for the rate of accretion of marine manganese nodules and crusts: *Marine Geology*. vol.35. 1980. M27-M3.

Sadler P.M., Strauss D.J. Estimation of completeness of stratigraphic sections using empirical data and theoretical models. *Journal of the Geologic Society of London*. 147. 1990. 471-485.

Schindel D.E. Microstratigraphic sampling and the limits of paleontologic resolution: *Paleobiology*. vol.6. 1980. 408-426

Schwab F.L. Modern and ancient sedimentary basins: comparative accumulation rates: *Geology*. vol. 4. 1976. 723-727.

Нурия Гавазовна Нурғалиева

к. г.-м. н., доцент каф. геологии нефти и газа КГУ. Область научных интересов: литология и стратиграфия пермских отложений, коллекторские свойства резервуаров углеводородов, математические методы в геологии. Имеет более 40 научных публикаций.

