

УДК 550.8.053

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЯДОВ ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В РАЗРЕЗАХ, СОДЕРЖАЩИХ ПЕРЕРЫВЫ

*Н.Г. Нургалиева, Д.К. Нургалиев*

### Аннотация

В настоящей работе показана эффективность применения комплекса методов максимальной энтропии (МЭМ) и быстрого преобразования Фурье (БПФ) для характеристики разрезов, насыщенных переходными фациями и, соответственно, содержащих перерывы, на примере опорных обнажений Монастырское, Кзыл Байрак (р. Волга) и Шереметьевка (р. Кама). Рассмотрены особенности применения спектрального анализа с учетом нестационарности рядов данных и характеристик шума. Количественно установлено, что для фаций, переходных от континентальных к морским, для реконструкции цикличности важно строить циклы по песчанности (содержанию песчаной фракции) как ведущему параметру. Тем самым количественно подтверждается известное качественное применение такого подхода, то есть отнесение начала цикла к подошве конгломератов или грубых песчаников, так как это наиболее заметная граница и к тому же несущая генетическую информацию – о максимальной энергии среды в момент отложения грубых кластолитов.

**Ключевые слова:** песчанность, карбонатность, переходные фации, перерывы, цикличность, быстрое преобразование Фурье, метод максимальной энтропии, белый шум, броуновский шум.

---

### Введение

Первые примеры применения спектрального анализа для исследования осадочных разрезов относятся к 60-м годам прошлого века [1]. В последние десятилетия методы спектрального анализа рядов данных пополнились множеством новых методик. В частности, необходимо отметить развитие вэйвлет-анализа [2]. Сегодня, когда развитие методов физико-химического анализа вещества (горных пород) позволяет довольно быстро получать самые разнообразные параметры пород как в лаборатории, так и в полевых условиях, методы спектрального анализа стали неотъемлемой частью исследований разрезов осадочных толщ [3].

Фундаментальной основой использования классического спектрального анализа для исследования природных рядов данных, например стратиграфической записи, являются следующие положения [3]:

- 1) стратиграфическая запись представляет собой сумму регулярного сигнала и шума.
- 2) регулярный сигнал представляет собой сумму гармонических составляющих, имеющих различные периоды, амплитуды и фазы.

В сущности оба этих положения являются следствием линейного взгляда на процесс. Однако необходимо отметить, что, во-первых, реальные процессы очень часто являются нелинейными. Во-вторых, сигналы, записанные в осадках, не являются регулярными. Записывающая система (осадок) очень сложна. В ней могут присутствовать не только пробелы, обусловленные обстановкой осадконакопления (перерывы), но и пробелы, обусловленные стиранием части предыдущей записи (размывы). Более крупные как в пространстве, так и во времени геологические процессы обладают большей энергией и более четко выражены в природе. Энергия низкочастотных гармоник должна превалировать над энергией высокочастотных колебаний. Как эти процессы зарегистрированы в стратиграфической записи – зависит в большей мере от свойств «записывающей системы». Если спектр стратиграфической записи подобен спектру белого шума, это означает, вероятнее всего, что запись осуществлена с большим количеством перерывов и размывов. Можно привести простой пример.

Пусть существует идеальная система осадконакопления, в которой через одинаковые промежутки времени формируется тонкий пласт карбонатных пород. Если бы мы имели полную запись этого сигнала (всю мощность осадков), то мы получили бы на спектре изменчивости карбонатности один пик. Но если система случайным (или очень сложным) образом прерывает осадконакопление и вдобавок ко всему размывает предыдущие осадки, то запись и ее спектр будут иметь совершенно иной вид. С высокой вероятностью будет реализован ряд, в котором расстояние между соседними пластами карбонатных пород будет любое (белый шум).

Разрезы татарских отложений обнажений Монастырское, Кзыл Байрак (р.Волга), верхнеказанских и нижнетатарских отложений обнажения Шереметьевка (р.Кама) содержат перерывы и являются интересными объектами для выявления характеристических особенностей спектров и их информативности для интерпретации седиментационных процессов и их цикличности.

### **Методы спектрального анализа**

В традиционных методах определения плотности энергии используют сглаженную периодограмму, определение которых базируется на так называемом быстром преобразовании Фурье (БПФ). В данной работе также использован один из адаптивных методов спектрального анализа с повышенной разрешенностью – метод максимальной энтропии (МЭМ) [4]. Суть данного метода состоит в следующем. В теории информации считается, что временной ряд содержит тем больше информации, чем он более нерегулярный. Например, если данные состоят из одиночного сигнала – цикла, следовательно, временной ряд содержит меньше информации. Информация на единицу времени называется энтропией. Таким образом, энтропия является мерой нерегулярности (беспорядка). При вычислении спектра используется расчет автоковариации до определенного сдвига. Функция автоковариации для больших сдвигов в МЭМ вычисляется исходя из предположения, что временной ряд становится беспорядочнее, то есть на основе максимизации энтропии [5]. МЭМ эффективен для не очень длинных рядов данных и позволяет определять гармоники (монохроматические колебания), период которых сравним с длиной ряда, в то время как в

обычном спектральном анализе (методе быстрого преобразования Фурье) самая низкочастотная гармоника имеет период не более половины длины ряда. В МЭМ рассчитывается энергетический спектр, вид которого достаточно сильно зависит от длины фильтра предсказания. Длина этого фильтра ( $L$ ) составляет:

$$L \leq N - 1,$$

где  $N$  – длина ряда (число точек во временной последовательности). Уменьшение  $L$  приводит к «загрублению» спектра, и наоборот, при слишком большом  $L$  в спектре появляются гармоники, которых на самом деле не существует. В зависимости от свойств временной последовательности можно подобрать оптимальную величину  $L$ , при которой спектр становится наиболее стабильным, то есть не изменяется при небольшом изменении  $L$ . В большинстве практических случаев оптимальная величина  $L$  остается достаточно большой, что позволяет выделять гармоники, период которых лишь немного меньше длины ряда.

Практически все спектры МЭМ были получены нами с использованием программы, составленной по алгоритму Бурга [5]. Перед проведением спектрального анализа ряды данных интерполировались на равномерную сеть с использованием сплайн-интерполяции. Тренд из рядов не убирался.

Спектры Фурье использовались для оценки фрактальных свойств рядов. Аппроксимация спектров степенной функцией позволяет оценить баланс высокочастотных и низкочастотных колебаний:

$$E(f) = a \cdot f^\beta,$$

где  $f$  – частота колебаний (в данном случае в циклах на дециметр),  $a$  – амплитуда спектра на самой высокой частоте,  $\beta$  – показатель степени, показывающий степень связи между сигналами на низких и высоких частотах. Обычно  $-4 < \beta < 0$  в реальных (природных) системах. Проведя спектральный анализ любого временного ряда методом Фурье, можно определить этот параметр. Такая достаточно простая процедура позволяет получить интересную статистическую информацию о рядах параметров. Например, хорошо известно [6], что при:

$\beta = 0$  запись представляет собой белый шум, спектр которого не зависит от частоты. Это некоторая абстракция, которая, тем не менее, иногда реализуется в природе и технике (электронный и фотонный дробовой шум);

$\beta = -1$  запись представляет собой фликкер-шум, или его еще называют «розовым» шумом. Сигналы такого типа очень широко распространены в природе. Предполагается, что такие процессы являются результатом реализации параллельных релаксационных процессов. Такие процессы действительно могут (и должны) наблюдаться в стратиграфических записях каких-либо параметров. Процессы прекращения седиментации, а также размывы легко могут быть описаны релаксационными процессами;

$\beta = -2$  запись представляет собой броуновский шум, который еще называют «коричневым» шумом; особенностью броуновского процесса является полное отсутствие памяти в движении частицы. Здесь необходимо отметить,

что временной ряд мы получаем, определяя каждый раз координату проекции блуждающей точки на какую-либо ось;

$\beta < -2$  временные ряды называют «черным» шумом, они чрезвычайно широко распространены в природе и описывают макропроцессы.

Таким образом, записи различных параметров в одном и том же разрезе могут характеризоваться различными величинами показателя степени, что позволяет оценить информативность тех или иных параметров для понимания природы стратиграфической записи. И чем сложнее запись, тем достовернее будет информация, получаемая данным методом. С другой стороны, чем длиннее (продолжительнее) исследуемая запись, тем также будет достовернее информация.

По указанным выше разрезам были получены количественные оценки литологических параметров (гранулометрические параметры, карбонатность, магнитная восприимчивость) методами МЭМ и БПФ.

Гранулометрические параметры (содержания песчаной (П), алевритовой (А) и глинистой (Г) фракций) удобны тем, что позволяют судить о проградации или ретроградации, скоростях накопления и перерывах в осадконакоплении.

Карбонатность в породах (массовая доля карбонатов в породе К, %) в целом достаточно закономерно увеличивается в основном профиле седиментации: область сноса – приемный бассейн, что является отражением одного из факторов осадконакопления – повышения концентрации карбонатов в «мористых» обстановках [7]. Соотношение содержаний Са и Mg в карбонатах также отражает седиментационную зональность. Карбонаты, отложившиеся на небольшой глубине, представляют собой изменчивые и сложные фации; они содержат нестабильные минералы (арагонит, кальцит, богатый магнием), которые делают их очень чувствительными к постседиментационным изменениям. В глубоководной среде карбонаты обычно состоят из более стабильных минералов, например из кальцита с малым содержанием магния, и сохраняют более однородные фации.

Вариации магнитной восприимчивости (МВ) обуславливаются главным образом изменениями концентраций аллотигенных парамагнитных и ферримагнитных минералов и отражают колебания интенсивности терригенного сноса в палеобассейн за счет тектонического и/или эвстатического фактора.

### **Характеристика спектров МЭМ и БПФ для литологических параметров по опорным разрезам**

Обнаруженные нами спектры МЭМ (примеры спектров МЭМ показаны на рис. 1) имеют как общие черты, так и некоторые особенности. Общие черты спектров заключаются в следующем.

1. Энергия в спектрах увеличивается с увеличением периода обнаруживаемых гармоник. Это свидетельствует о том, что во всех рядах длиннопериодные колебания имеют большую амплитуду, нежели короткопериодные. Количественные особенности этого свойства, определенные по спектрам Фурье, мы используем ниже.

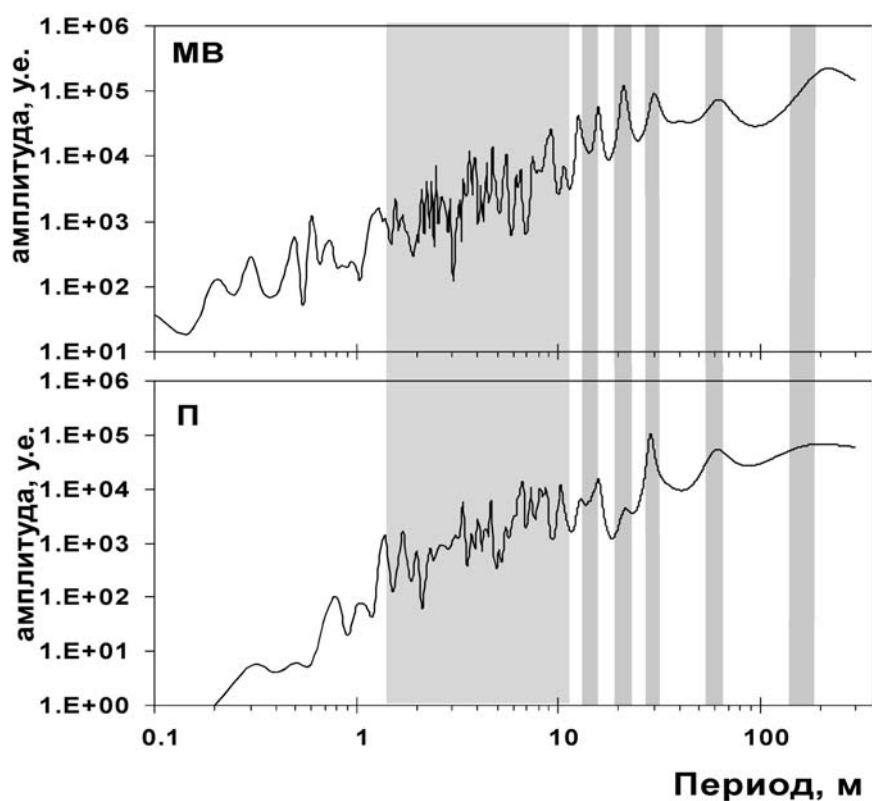


Рис. 1. Примеры спектров МЭМ для параметров магнитной восприимчивости (МВ) и содержания песчаной фракции (П). Полосками показаны периоды различной длительности. Разрез Монастырское

2. В центральной части всех спектров обнаруживается область, в которой количество пиков на единицу логарифма периода достигает максимума. Учитывая способность спектров МЭМ отображать периоды всех регулярных и нерегулярных гармоник (даже одиночных) циклов и всплесков в рядах, можно сказать, что эта область (обычно это длины волн с периодом от 1 до 5 м) отражает наиболее часто встречающиеся мощности достаточно однородных слоев.

3. В низкочастотной части спектров выделяются пики (гармоники), которые в большинстве случаев обнаруживаются визуально на графиках вариаций литологических свойств пород разрезов, однако точность их определения остается очень низкой, что не позволяет их достаточно надежно идентифицировать в различных спектрах. В низкочастотной области выделяются самые длинные периоды, которые больше длины рядов, и наиболее отчетливо они выделяются по вариациям песчаной компоненты осадков и магнитной восприимчивости.

Кроме того, спектры по каждому разрезу обладают целым рядом существенных особенностей (табл. 1).

1. Во всех разрезах выделяется значимый пик (гармоника) в области периодов (мощности) циклов от 10 до 15 м. Однако указанный пик обладает рядом особенностей:

– в разрезе Шереметьевка этот пик находится в области ~12–14.5 м и отражается в спектрах всех исследованных параметров;

– в разрезе Монастырское этот пик находится в области ~11.5–13.8 м и отражается в спектрах всех исследованных параметров; кроме того, в области ~15.5–16.3 м отмечается пик на спектрах магнитной восприимчивости, песчанности и глинистости;

– в разрезе Кзыл Байрак этот пик расщеплен на два, обнаруживаемых при ~10.4–11.1 м (отмечается в спектрах алевритистости, Са/Mg-отношения и глинистости) и при ~13.7–14.8 м (отмечается в спектрах магнитной восприимчивости и песчанности), кроме того, здесь выделяется пик при ~16.1–17.8 м (на спектрах алевритистости, глинистости и карбонатности).

2. Во всех разрезах выделяются значимые гармоники в области периодов циклов от ~20 до ~30 м. Однако указанные гармоники обладают рядом особенностей:

– в разрезе Шереметьевка в указанной области проявляются две группы пиков ~19.0–22.4 м (в спектрах магнитной восприимчивости, песчанности, Са/Mg-отношения и глинистости) и ~29–33 м (в спектрах песчанности и карбонатности);

– в разрезе Монастырское в этой области также обнаруживается два пика: ~20.5–21.1 м (в спектрах магнитной восприимчивости, песчанности, Са/Mg-отношения и глинистости) и ~26–29.7 м (во всех спектрах);

– в разрезе Кзыл Байрак по спектрам всех литологических параметров (кроме алевритистости) наблюдаются пики в области ~25.7–32 м.

3. В области периодов более ~35 м можно отметить наличие следующих устойчивых гармоник:

– в разрезе Шереметьевка (табл. 1) в указанной области проявляется две группы пиков: ~38–45.5 м (в спектрах магнитной восприимчивости, алевритистости, Са/Mg-отношения и глинистости) и ~74–80 м (в спектрах магнитной восприимчивости, песчанности и карбонатности);

– в разрезе Монастырское в этой области также обнаруживается два пика: ~55–58.2 м (в спектрах магнитной восприимчивости, песчанности, алевритистости и карбонатности) и ~178–185 м (в глинистости и песчанности);

– в разрезе Кзыл Байрак в длиннопериодной области наблюдается также два пика: ~58.4–60 м (в спектрах магнитной восприимчивости песчанности и Са/Mg-отношения) и ~68–72.7 м (в глинистости, алевритистости и песчанности).

Обобщение приведенных выше данных позволяет отметить, что наиболее часто в одну группу периодов попадают попарно пики МВ-П, а наименьшее число раз – пики (Са/Mg)-К. К часто встречающимся также относится пара П-Г. Реже встречаются пары с карбонатностью (кроме пары К-П) и пары МВ-А, П-А и (Са/Mg)-А.

Таким образом, можно сказать, что вариации песчанности являются главным циклообразующим фактором. С другой стороны, магнитная восприимчивость содержит информацию о вариациях большинства литологических свойств и является вспомогательным интегральным параметром, который можно

Табл. 1

Периоды основных колебаний литологических параметров

Параметры	$T \leq 11$ м	$11 \text{ м} \leq T \leq 25$ м	$26 \text{ м} \leq T \leq 42$ м	$T \geq 50$ м
<b>Шереметьевка</b>				
МВ	7.2; 10.3	14.5; 20.2	38.0	74.0
П	6.9	9.3–12.2; 19.1	32.5	79.6
А	5.5; 7.6; 9.5	12.8; 16.7; 25.4	45.5	–
Ca/Mg	6.7; 9.1; 10.9	13.3; 15.7; 21.5	41.3	109.5
Г	8.9	13.0; 22.4	38.5	98.3
К	7.0; 10.9	14.2	28.7	75.0
<b>Монастырское</b>				
МВ	9.1	12.4; 15.6; 20.8	29.1	58.2; 206
П	6.6; 8.0; 10.2	12.7; 15.5; 21.1	28.2	58.2; 178
А	6.2; 9.5	11.5; 13.4; 14.9; 20.5	29.7	55.0; 136
Ca-Mg	6.6; 9.2	11.1; 13.8; 18.3	26.0	46; 150
Г	8.5	12.8; 16.3; 20.9	28.0	66.1; 185
К	8.2; 9.1	13.3	29; 39.6	57.2; 169
<b>Кзыл Байрак</b>				
МВ	5.6; 7.0	13.7	25.7	60
П	7.1-8.5	14.8	28.5	72.7
А	4.8; 5.6; 7.3	10.7; 17.8	-	72.7
Ca/Mg	4.5–5.5	10.4–12.4	29	58.4
Г	5.9; 7.4	11.1; 16.6	32	68
К	5.5; 6.8; 8.8	16.1	29.0	85.7

Жирным шрифтом выделены периоды с большими амплитудами.

использовать при обобщенном анализе литологических данных. Аналогичный анализ для отдельных разрезов позволяет выделить в разрезе Шереметьевка пары МВ-П, МВ-Г, МВ-(Ca/Mg), П-К и Г-(Ca/Mg) как наиболее часто встречающиеся, а пары П-А, А-К, Г-К, А-К и (Ca/Mg)-К – как наименее распространенные. Для спектров вариаций литологических свойств разреза Монастырское наиболее характерны связи МВ-П, П-Г, а связи Г-К и (Ca/Mg)-К являются нетипичными. В разрезе Кзыл Байрак наиболее часто близкие периоды наблюдаются для пары А-Г. Пары МВ-А вообще нет, МВ-Г, П-А, П-(Ca/Mg), П-К, А-(Ca/Mg), А-К, К-(Ca/Mg) встречаются крайне редко. Выводы по разрезу Кзыл Байрак являются наименее статистически достоверными из-за малого количества выявленных пиков на спектрах литологических параметров. Тем не менее, можно отметить, что выявленные для обобщенных данных закономерности подтверждаются также по каждому из разрезов.

Анализ спектров Фурье (пример на рис. 2) позволяет отметить следующие закономерности (табл. 2):

– при аппроксимации всех рядов степенной функцией получены величины показателя степени  $\beta < 0$ ;

– наихудшая аппроксимация спектров степенными функциями по методу наименьших квадратов получается для рядов разреза Шереметьевка ( $R^2$  изменяется от 0.42 до 0.62);

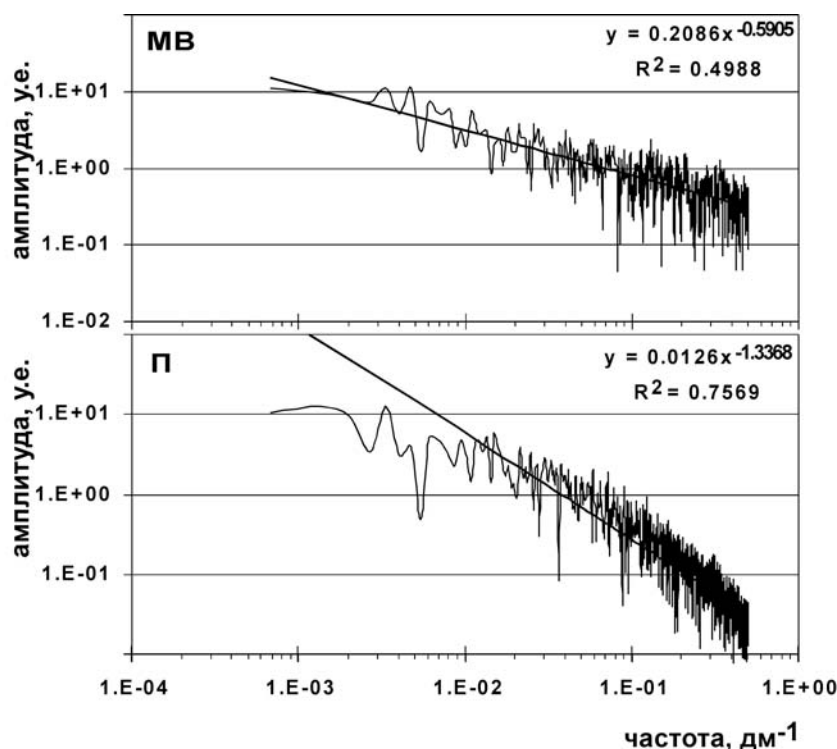


Рис. 2. Примеры спектров Фурье для параметров МВ и П, аппроксимированных степенной функцией. Разрез Монастырское

Табл. 2

Обобщенные параметры спектров Фурье рядов литологических параметров

Разрезы		М	П	А	Г	Ca/Mg	К
Шереметьевка	$a$	0.6563	0.1335	0.1254	0.1494	0.0423	0.1599
	$\beta$	-0.517	-0.8712	-0.7425	-0.7652	-0.6074	-0.7317
	$R^2$	0.42	0.62	0.54	0.59	0.45	0.53
Кзыл Байрак	$a$	0.1454	0.0285	0.0305	0.0581	0.0037	0.067
	$\beta$	-0.7194	-1.0805	-1.097	-1.0192	-1.0541	-0.9972
	$R^2$	0.53	0.70	0.71	0.67	0.69	0.66
Монастырское	$a$	0.02086	0.0126	0.0209	0.0246	0.0058	0.0262
	$\beta$	-0.5905	-1.3368	-1.1317	-1.1877	-1.0958	-1.1868
	$R^2$	0.50	0.76	0.70	0.73	0.75	0.70

– для каждого из разрезов наихудшая аппроксимация получена для ряда магнитной восприимчивости;

– для каждого из разрезов наилучшая аппроксимация получена для ряда вариаций содержания песчаного материала в разрезе;

– качество аппроксимации напрямую связано с показателем степени  $\beta$ , увеличение которого сопровождается увеличением  $R^2$ ;

– наименьшие абсолютные величины показателя степени  $\beta$  получены для разреза Шереметьевка;



- наибольшие абсолютные величины показателя степени  $\beta$  получены для разреза Монастырское;
- для каждого из разрезов наибольшие абсолютные величины показателя степени  $\beta$  получены для ряда вариаций содержания песчаного материала в разрезе;
- для каждого из разрезов наименьшие абсолютные величины показателя степени  $\beta$  получены для ряда магнитной восприимчивости;
- обычно абсолютные величины показателя степени  $\beta$  увеличиваются в ряду МВ-(Са/Mg)-К-Г-П.

Полученные закономерности позволяют сделать следующие выводы относительно природы вариаций показателя степени  $\beta$  в спектрах различных литологических параметров исследованных разрезов:

- наличие существенной изменчивости величины показателя степени  $\beta$  в спектрах различных литологических параметров для отдельно взятого разреза свидетельствует о наличии реальной статистической информации в указанной величине, это подтверждается также тем, что существует некоторое упорядочивание этой величины в зависимости от типа литологического параметра;
- слабое влияние длины ряда на оценки величины показателя степени  $\beta$  демонстрируется отсутствием связи между величиной  $\beta$  и мощностью разреза (Шереметьевка – 82 м, Кзыл Байрак – 64 м, Монастырское – 148 м).

Полученные величины  $\beta$  (табл. 2) свидетельствуют о том, что исследованные нами ряды данных представляют собой нечто среднее между белым шумом ( $\beta = 0$ ) и броуновским шумом ( $\beta = -2$ ). Для того чтобы оценить, что мы имеем на самом деле: броуновский шум с примесями белого шума или же, наоборот, белый шум со следами броуновского сигнала – мы провели элементарную регрессионную оценку из обнаруженной выше закономерной связи между  $|\beta|$  и  $R^2$  и получили величину  $|\beta|$ , близкую к 2, что свидетельствует о том, что наши ряды, вероятнее всего, являются реализациями процессов, изначально достаточно близких к броуновскому шуму.

Суммируя сказанное выше, мы можем предложить следующую схему интерпретации полученных данных.

1. Ряды вариаций магнитной восприимчивости пород в исследованных разрезах чрезвычайно осложнены влияниями различных факторов на эту величину (карбонатность, содержание магнитного и немагнитного песчанистого материала, глинистость как мера содержания парамагнитного материала). В спектрах МВ содержатся разнообразные комбинации этих влияний, что делает их близкими к спектрам белого шума ( $\beta \geq -0.72$ ). Поэтому гармоника, выделенные только по спектрам рядов МВ, не могут быть непосредственно использованы для исследования цикличности разрезов.

2. Спектры рядов вариаций карбонатности, содержания алевритистого материала, Са/Mg-отношения также обладают меньшей абсолютной величиной показателя степени  $\beta$  по сравнению со спектрами песчанистости и глинистости.

3. Спектры рядов вариаций песчаности и глинистости пород разрезов, обладая повышенными абсолютными значениями показателя степени  $\beta$  (в табл. 2 заливкой отмечена песчаность), в большей мере содержат первичную структуру геологических процессов, то есть могут подойти на роль параметров, по которым можно выделить основные цикличности в разрезе.

Среди многих литологических параметров песчаность обладает одним исключительным свойством. Количество этого материала увеличивается в осадках, как правило, когда поверхность седиментации располагается в зоне высокой энергетики (чаще всего – в моменты низкого уровня воды в бассейне седиментации). Обычно присутствие песчаников связано с наличием перерывов. Следовательно, количественно установлено, что для фаций, переходных от континентальных к морским, для реконструкции цикличности важно строить циклы по песчаности как ведущему параметру. Качественно такой подход (то есть отнесение начала цикла к подошве конгломератов или грубых песчаников, если они есть в разрезе) является одним из распространенных в проведении границ циклитов, так как это наиболее заметная граница и к тому же несущая генетическую информацию – о максимальной энергии среды в момент отложения грубых кластолитов [8–11].

Таким образом, результаты спектрального анализа рядов информативных литологических параметров по разрезам Шереметьевка, Монастырское и Кзыл Байрак позволяют нам констатировать, что вариации содержания песчаного материала в осадках являются наиболее важным и достоверным фактором выделения цикличности в разрезе. Спектры других параметров сильнее подвержены влияниям перерывов и размывов, но они могут быть с успехом использованы на участках с незначительным количеством перерывов для выделения циклов. Этот вывод имеет фундаментальное значение для дальнейшего исследования цикличности верхнепермских разрезов. Мы полагаем, что в основе методики анализа цикличности этих разрезов должен лежать предварительный анализ вариаций содержания песчаного материала. На этой основе могут быть выделены крупные седиментационные комплексы, внутри которых необходимо проводить подобный же анализ. Анализ цикличности по другим литологическим свойствам следует проводить при достижении участков разреза, в которых отсутствуют следы крупных перерывов и размывов.

### Summary

*N.G. Nurgalieva, D.K. Nurgaliev. Spectral Analysis of Lithological Parameter Series in the Interruption Containing Sections.*

The paper presents the results of spectral analysis of time-series by methods of maximum entropy and Fourier method. The interrupted stratigraphic Permian records by outcrops Monastyrskoe, Kzyl Bairak (the Volga river bank) and Sheremetevka (the Kama river bank) have been studied. By non-stable and noisy characteristics of different lithological parameter spectra, the significance of sand material content was stated as most informative parameter in recognizing cyclicity of 4–5 orders in the interrupted stratigraphic records.

**Key words:** sandy fraction, carbonate component, transitional facies, interruptions, cyclicity, Fourier transformation, maximum entropy modeling, white noise, brown noise.

## Литература

1. *Duff P.M.D., Walton E.K.* Statistical basis for cyclothemes: a quantitative study of the sedimentary succession in the east Pennine coalfield // *Sedimentology*. – 1962. – V. 1, No 4. – P. 235–255.
2. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физ. наук*. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145–1170.
3. *Weedon G.P.* Time-Series Analysis and Cyclostratigraphy. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2003. – 259 p.
4. *Канасевич Э.Р.* Анализ временных последовательностей в геофизике / Пер. с англ. В.Н. Лисина. – М.: Недра, 1985. – 400 с.
5. *Ulrych T.J., Bishop T.N.* Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition // *Rev. Geophys. Space Phys.* – 1975. – V. 13. – P. 183–200.
6. *Шредер М.* Фракталы, хаос, степенные законы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 528 с.
7. *Страхов Н.М.* Основы теории литогенеза: в 3 т. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – Т. 2. – 74 с.; 1962. – Т. 3. – 550 с.
8. *Головкинский Н.А.* О пермской формации и центральной части Камско-Волжского бассейна // *Материалы для геологии России*. Т. 1. – СПб., 1869. – С. 273–415.
9. *Пустовалов Л.В.* Петрография осадочных пород. – М.-Л.: Гостоптехиздат, 1940. – Ч. 1. – 476 с; Ч. 2. – 319 с.
10. *Сементовский Ю.В.* Условия образования месторождений минерального сырья в позднепермскую эпоху на востоке Русской платформы. – Казань: Таткнигоиздат, 1973. – 255 с.
11. *Фролов В.Т.* Литология. Кн. 3. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. – 352 с.

Поступила в редакцию  
21.01.08

---

**Нургалиева Нурия Гавазовна** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Казанского государственного университета.

E-mail: [nouria.nourgalieva@ksu.ru](mailto:nouria.nourgalieva@ksu.ru)

**Нургалиев Данис Карлович** – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геофизики, заведующий кафедрой геофизики Казанского государственного университета.

E-mail: [danis.nourgaliev@ksu.ru](mailto:danis.nourgaliev@ksu.ru)