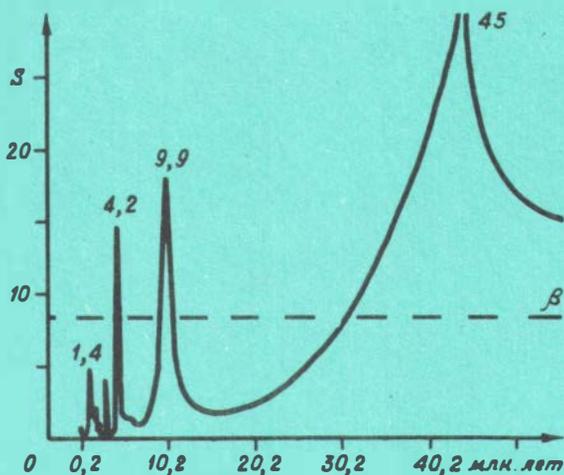


МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕДИМЕНТАЦИОННОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ



НОВОСИБИРСК 1985

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
СЕДИМЕНТАЦИОННОЙ
ЦИКЛИЧНОСТИ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

НОВОСИБИРСК 1985

Математические методы исследования седиментационной цикличности. Методические рекомендации /Составители: Г.Ф.Букреева, Д.Н.Карогодин, М.А.Левчук. Новосибирск, 1985.99 с.

Для выявления цикличности осадконакопления предлагаются четыре математических метода: максимальной энтропии, Блекмана-Тьюки, дисперсионного анализа и обзора числовой совокупности. Установлено, что метод максимальной энтропии выгодно отличается от всех остальных детальностью спектра и большей разрешающей способностью.

Проведен анализ структурных характеристик элементарных циклов для корреляции и расчленения разрезов.

Работа предназначена для геологов, занимающихся изучением седиментационной цикличности, задачами расчленения и корреляции осадочных толщ, выявлением закономерностей размещения и условий формирования полезных ископаемых с привлечением математических методов.

Рецензенты:

канд. геол.-мин. наук В.А.Каштанов (ИГиГ СО АН СССР),
д-р геол.-мин. наук Н.В.Мельников (СНИИГТИМС Мингео СССР)

Материал рассмотрен и одобрен секцией стратиграфии, тектоники, литологии и осадочных полезных ископаемых Ученого совета Института геологии и геофизики СО АН СССР как методические рекомендации

© Институт геологии
и геофизики СО АН СССР,
1985г.

В В Е Д Е Н И Е

В XX веке, и особенно во второй его половине, происходит быстрая смена исследовательских программ, а следовательно, старых и новых идей во всех областях знаний, в том числе и в геологии. Быстрая смена идей и парадигм во всех естественных науках во многом обусловлена стремлением к точности, т.е. к использованию математического аппарата, унификации и автоматизации сбора, хранения и использования данных. Подтверждением этого могут быть и настоящие методические разработки, касающиеся проблемы седиментационной цикличности.

Стремление "равняться" на такую достаточно развитую и "строгую" науку, как физика, способную дать точные и обоснованные количественные характеристики явлений и процессов, имеющих место в современном мире, а также в происходившем далеком прошлом^ж, вполне логично и правомерно. При этом, естественно, следует отдавать себе отчет в том, насколько методы физики применимы в геологии.

Физика изучает в основном процессы, а геология имеет дело главным образом со следствиями процессов. Одна из важнейших целей геологии - изучая "следствия", понять ход процессов (как это происходило?), объяснить их природу (почему это происходило?). Лишь сравнительно небольшой круг явлений и процессов геология может изучать непосредственно, сейчас (вулканизм, землетрясения, современное осадконакопление и т.д.).

Физика и геология в определенном смысле развивались в противоположных направлениях. Физика (а также химия) шла от наиболее "зримых" ("крупных") объектов ко все менее "зримым" (элементарным частицам и аятичастицам) и законы микромира пыталась ис-

^ж Например, состояние Вселенной 20 млрд. лет назад.

пользовать для объяснения устройства и функционирования мегамира*.

В геологии, несмотря на неравномерность развития наук, ее составляющих, явно просматривается тенденция от изучения наиболее "зримых", т.е. "мелких", объектов, какими являются минералы и кристаллы, перейти к познанию все более крупных объектов, вплоть до оболочек, сфер и Земли в целом. Развитие геологии свидетельствует о том, что пока недостаточно созрела наука одного ("низшего") уровня, не начнет развиваться наука и следующего уровня.

Так, только после того как достаточно "созрела" минералогия, утвердилась в качестве самостоятельной интегрирующей науки литология. Ее бурное развитие в течение последних 30-40 лет привело к оформлению ЛИТМОЛОГИИ - науки об объектах следующего, надпородного, уровня организации.

Еще одно из различий физических и геологических методов состоит в том, что в физике вначале открывается и математически описывается теория, закон, а далее начинается использование их в практике. В геологии все наоборот. Вначале в практике теоретических и практических исследований интуитивно используется какая-нибудь гипотеза, закономерность, а затем предпринимаются попытки их логического обоснования. По мнению некоторых исследователей, в геологии, несмотря на ее многовековую историю, есть одна-две теории, логически оформленные, но без математического обоснования, и нет ни одного закона на уровне обоснования законов физики. Причин здесь, вероятно, несколько, но не исключено, что главная - это специфика геологии, ее предметов и объектов исследования. Поэтому мы не склонны гипертрофировать и фетишизировать (измерить - еще не значит познать!) роль математики в геологии, и в частности в литмологии, хотя и не отрицаем значения математических методов для развития нашей науки, в том числе для исследования цикличности. Однако на вопрос о границах применения количественных подходов в литмологии однозначно ответить трудно: литмология как наука делает лишь первые шаги на пути своего становления. И все-таки попытки

* Как известно, были отдельные попытки и обратного характера, например ядро атома представлялось в виде солнечной системы (Ю.Н.Карогодин, далее Ю.К.).

в этом направлении нами уже предпринимались; была предложена "Схема основных задач математизации и их последовательность при решении узловых вопросов седиментационной цикличности" /Карогодин, 1980, рис. 34, с. 99 /. Теперь же имеет смысл акцентировать внимание на другом.

Необходимость широкого использования математических методов в изучении цикличности, как нам представляется, резко возросла в связи со сменой исследовательских программ, т.е. генетический подход сменился системно-структурным. Системно-структурный анализ породно-слоевых ассоциаций (САПА) открывает широкие возможности для эффективного применения самых различных математических методов к решению все новых и новых задач. При структурном подходе, в отличие от генетического, многое можно точно измерить.

Одной из важнейших проблем можно считать количественное выражение степени сложности структуры систем слоевых ассоциаций /Трофимук, 1984 /. Эта проблема непосредственно связана с другой – количественного выражения ранга и масштаба слоевых систем (циклитов) и их соотношения. В свою очередь, обе они входят в состав проблемы выделения иерархической организации слоевых ассоциаций.

Проблема границ в САПА, как и вообще в геологии, стоит очень остро. Важно не только качественно, но и количественно различать внутренние и внешние границы циклитов различного типа и ранга по степени связи между слоями и слоевыми ассоциациями. С этой целью введены такие новые понятия, как "квант седиментации", "коэффициент прогрессивности", "делитность", "коэффициент делитности" и некоторые другие. Все это свидетельствует о том, что мы уже знаем, что необходимо мерить и зачем.

Во многих случаях геолог располагает крайне скудной информацией о вещественном составе разреза, к тому же и комплекс геофизических исследований скважин (ГИС) довольно беден. К тому же часто разрез, на первый взгляд, представляется монотонным, и тогда на помощь приходят математические методы, позволяющие выявить скрытую цикличность и периодичность.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ
В СТРОЕНИИ И ФОРМИРОВАНИИ ОСАДОЧНЫХ ТОЛЩ

I.1. Изученность вопроса и обзор основных методик

Геологический разрез представляет собой суммарный результат взаимодействия колебательных движений разных порядков, которые проявляются одновременно и накладываются друг на друга (циклы коротких периодов на длиннопериодные). Поэтому, когда устанавливает явную цикличность, опираются на конечный суммарный результат действия природного механизма осадконакопления, обусловившего исследуемую осадочную толщу. В случае выявления скрытой периодичности решается как бы обратная задача: суммарный результат этого сложного процесса раскладывается на простые составляющие, каждое из которых представляет собой доминирующее колебательное движение со своими параметрами – периодом, амплитудой и начальной фазой. Можно различить среди колебательных движений их порядки по периодам и амплитудам колебаний и количественно оценить последние, если для этой цели использовать существующие математические методы. Проблема выявления скрытой цикличности, периодичности ("ритмичности")^ж строения и формирования осадочных (и не осадочных тоже) толщ была одной из первых, при решении которой они были применены.

Известно, что большую часть литосферы (осадочной оболочки Земли) составляют толщи, лишенные скелетной фауны. Это и дофанерозойские образования, и континентальные толщи фанерозоя, занимающие не менее 50–60 % общего объема осадочных образований. Расчленение и корреляция разрезов такого типа традиционным биостратиграфическим методом либо существенно затруднены, либо вообще невозможны. Использование других стратиграфических методов часто приводит к субъективным решениям. Одним из методов, с помощью которого можно решить эти вопросы, является циклостратиграфический (САПА) / Карогодин, 1980; Трофимук, Карогодин, 1982 и др. /. Однако и он на своем пути встречает ряд

ж Правильнее было бы говорить о скрытой литмичности (Ю.К.).

трудностей (монотонный тип разреза, значительные перерывы в наблюдении и т. д.). Нередко и макроскопически выделить циклы в ряде разрезов весьма трудно. Именно в таких случаях возникает необходимость использовать математический аппарат как наиболее объективный инструмент для расчленения и корреляции разрезов, выявления периодичности и цикличности формирования осадочных толщ.

Как отмечает А.Б.Вистелиус, "выявление скрытых периодичностей в естественных процессах, всегда было достаточно сложной задачей. Эту задачу математически удалось поставить только после работ Фишера (Fisher, 1929) и Вольда (Wold, 1938)" /Вистелиус, 1975, с. 118./

Толчком к использованию математического аппарата в геологии у нас в стране послужили работы А.Б.Вистелиуса /Вистелиус, 1945, 1961, 1963 /. Он высказал идею, что геологические разрезы – это овеществленное следствие колебательных движений земной коры. Эти движения осуществлялись одновременно в соответствии с несколькими синусоидальными законами. Можно исследовать каждый порядок колебательных движений, выделив из разреза и исследовав отдельные синусоиды, отвечающие этим законам. Эта идея систематически разрабатывалась А.Б.Вистелиусом, и ему первому принадлежит четкая математическая постановка этой задачи и разработка методов ее решения. Им же отмечено, что задача расчленения и корреляции циклически построенных толщ наиболее успешно решается при помощи таких методов случайных функций, как анализ временных рядов, гармонический анализ и некоторых других направленных на выделение скрытых периодичностей.

В работе А.Б.Вистелиуса, на примере анализа пористости карбонатных отложений верхнего палеозоя Волго-Уральской нефтеносной провинции, описывается методика выявления скрытой периодичности осадконакопления. Изначально предполагается, что распределение пористости по разрезу вызывается некоторой динамической силой – процессом. Неизвестен сам процесс, а также характер случайной функции, порождаемой этим процессом, т.е. идеальное распределение пористости. Однако известны величины пористости пород как реализация случайной функции, являющейся итогом действия динамической системы и наложившихся

на него случайных искажений. По этим наблюдениям можно составить суждение о динамической системе и найти метод аппроксимации случайной функции, порождаемой ею.

Исследование скрытой периодичности начиналось с того, что по разрезу строилась кривая пористости, причем значения откладывались в равномерном масштабе мощности. Кривая пористости сглаживалась формулами Шепарда:

$$U = \frac{1}{35} [17U_0 + 12(U_1 + U_{-1}) - 3(U_2 + U_{-2})] \quad (I.1)$$

или

$$U = \frac{1}{429} [179U_0 + 135(U_1 + U_{-1}) + 30(U_2 + U_{-2}) - 55(U_3 + U_{-3}) + 15(U_4 + U_{-4})] , \quad (I.2)$$

где: U - сглаженное значение ординаты, U_0 - ордината сглаживаемой точки, U_n и U_{-n} - ординаты точек, расположенных перед и после сглаживаемой ординаты.

Сглаживание позволяет более контрастно выделить экстремальные значения кривой, а также обнаружить, что кривая изменения пористости имеет несколько волн, наложенных друг на друга. При этом почти всегда выделяется волна, период которой имеет тот же порядок, что и мощность всего разреза, и, кроме того, присутствуют волны с меньшими периодами.

Наиболее низкочастотные, с наиболее длинным периодом волны названы А.Б.Вистелиусом "макроритмами", волны, имеющие средние частоты и соответственно средние длины периодов, - "мезоритмами", а самые высокочастотные, с коротким периодом волны - "микроритмами"* /Вистелиус, 1963 /.

Процедура выявления систематической составляющей была следующей. На самом первом этапе выделялись "макроритмы". Для этого по предварительно сглаженному ряду наблюдений определялось (визуально или с помощью циркуля) примерное положение соседних максимумов волнообразных поднятий наиболее длинной волны (рас-

* Термин "ритм" здесь использован неточно. Правильнее в данном случае говорить о периодах и периодичности: период изменения пористости (Ю.К.).

стояние l между ними). Величина l есть длина периода синусоиды, и тогда частота ее $\omega = \frac{2\pi}{l}$. По величине периода l методом наименьших квадратов подбиралась синусоида

$$y_i = \bar{y} + A \cdot \cos(\omega x_i - \varphi_0), \quad (I.3)$$

где y_i - i -ая величина ряда наблюдений,

\bar{y} - средняя величина ряда наблюдений,

A - амплитуда синусоиды,

ω - частота или коэффициент, указывающий, какую часть круга проходит колебание при переходе на принятый шаг расстояния,

φ_0 - начальная фаза синусоиды,

x_i - расстояние выбранных точек наблюдения от начала разреза.

Определив и подставив значения A и φ_0 в формулу (I.3), находили значения синусоиды, определяющей "макроритм". Определение "мезо-" и "микроритмов" достигалось последовательным вычитанием из ряда наблюдений найденной закономерной составляющей и исследованием остатка на периодичность.

Закономерности поведения "микро-" и "мезоритмов" "сводятся к тому, что ритмы фазовой дифференциации определяются геотектоническим режимом обстановки седиментации, находящей свое выражение в процессе формирования мощностей и структурных форм" /Вистелиус, 1963, с. II6 /.

Каждый из трех параметров синусоиды (ω , φ_0 и A), определяющий "макро-" или "мезоритм", несет определенную смысловую нагрузку. Наиболее важный параметр - величина коэффициента периодичности ω , так как он определяет величину периода "ритма"^ж. По мнению А.Б.Вистелиуса, величины коэффициента ω тесно связаны с региональным геотектоническим режимом. В зонах региональных поднятий величина ω возрастает, а в зонах опусканий - уменьшается.

Величина фазы φ_0 может представлять интерес для геологических реконструкций. Значения φ_0 пересчитанные на подошву какого-либо стратиграфического горизонта, могут быть использованы для количественного картирования объемов размытых толщ при крупных стратиграфических несогласиях. "... Картирование

ж В данном случае по существу, речь идет о цикле (Ю.К.).

объемов выпавших частей стратиграфических единиц представляет очень важную задачу геологического исследования, а потому изучение величин φ_0 , пересчитываемых на различные поверхности, может дать в руки геологов мощный инструмент для изучения трансгрессивно-регрессивных циклов во времени" /Вистелиус, 1963, с. 50/.

Кроме того, коэффициент φ_0 интересен тем, что во многих случаях разрезы могут быть увязаны между собой путем сравнения фаз гармоник. При закономерном изменении мощностей точки циклита, находящиеся в одной фазе, должны располагаться на одном стратиграфическом уровне. Нарушение этого условия влечет за собой нарушение увязки фаз кривой с границами стратиграфических единиц:

Амплитуда A периода несет в себе информацию о размахе колебаний значений исследуемого параметра.

Описанная методика была реализована на большом количестве разрезов карбонатной толщи верхнего палеозоя Волго-Уральской провинции, продуктивных отложений среднего плейстоцена Азербайджана и красноцветных отложений п-ва Челекен /Вистелиус, 1961, 1963/. Предложенный метод, в котором было использовано изменение гранулометрического состава отложений в вертикальном разрезе, позволил во внешне, казалось бы, неупорядоченном чередовании слоев терригенных пород (с различной крупностью зерна) выявить скрытый порядок и использовать это для расчленения и корреляции разрезов.

Дальнейшая разработка идей А.Б.Вистелиуса и применение аналогичной методики в литологических исследованиях связаны с анализом ятулийских (средний протерозой) терригенных образований Карелии /Хейсканен, 1975/. Результаты подтвердили принципиальную возможность и полезность применения вероятностных методов при изучении динамических систем. В этих работах ятулийская (средний протерозой) седиментация изучалась путем моделирования распределений в разрезах осадочных толщ среднего размера зерен и содержаний нерастворимого остатка методами случайных функций. Были рассмотрены четыре типа моделей, соответствующие различным возможным геологическим ситуациям - процессы: "белый шум", скользящих средних, конечной авторегрессии и гармонический. Наиболее подходящей оказалась гармоническая модель, ко-

торая после оценки ее параметров использовалась для сопоставления разрезов, в том числе удаленных и разнофациальных, и картирования последовательности формирования поверхностей раздела. К.И.Хейсканен пришел к выводу, что кривая "мезоритма" (наиболее длинноволновая составляющая модели), по-видимому, отражает колебательные тектонические движения крупных блоков доятулийского основания, а отметки начальной фазы "мезоритма" в подошве ятулия количественно отражают главнейшие особенности рельефа доятулийского основания в последовательные моменты его захоронения.

Во всех рассмотренных выше работах для выделения скрытых периодичностей в качестве характеристик разрезов осадочных толщ были избраны пористость /Вистелиус, 1963/, закодированный литологический состав отложений /Вистелиус, 1961/, средняя зернистость терригенных пород и нерастворимый остаток в карбонатных породах /Хейсканен, 1975/.

В.Н.Деч и Л.Д.Кноринг при решении аналогичных задач помимо пористости, карбонатности, плотности и других свойств пород, определяемых по керну, проанализировали еще и данные геофизических исследований скважин /Деч, Кноринг, 1978/. Для этой цели были использованы предварительно квантованные диаграммы каротажа: бокового каротажного зондирования (БКЗ), нейтронного гамма-метода (НГМ), гамма-метода (ГМ), акустического метода (АМ). Авторы наглядно показали преимущество количественных методов исследования каротажных диаграмм перед традиционным визуальным анализом.

Расчленение и сопоставление разрезов на основе визуального анализа диаграмм сводится к выделению на них характерных импульсов (реперов) и поиску подобных реперов (опорных пластов) в диаграммах других скважин. Традиционно исследователи выделяют и запоминают какую-либо специфическую конфигурацию отрезка диаграммы. Затем подобная конфигурация отыскивается в кривых каротажа соседних скважин. При сложной форме конфигурации диаграммы визуальное наблюдение затруднительно и малоэффективно. В целом результаты визуального анализа диаграмм геофизических методов зависят от опыта и интуиции специалиста, причем зачастую в них привносится немалая доля субъективизма. Поэтому именно здесь давно возникла потребность в разработке объективной процедуры, реализуемой на ЭВМ, как альтернативы рутинному ручному труду.

Авторегрессионный, автокорреляционный и спектральный анализы, использованные указанными авторами, дают возможность достаточно полно исследовать структуру любой исходной регистрограммы и на базе количественных мер вскрыть и описать специфические черты их структуры. Их методика базируется также на идее фоссилизации в геологических разрезах колебательных движений земной коры, и решение задачи определения скрытой периодичности сводится к выделению гармонических составляющих процесса осадконакопления и к оценке параметров модели

$$y_h = \beta_0 + \sum_{j=1}^q \beta_j \cos(\omega_j h - \varphi_j) + e_h, \quad (I.4)$$

где y_h - значение соответствующей характеристики в точке h разреза, β_0 - нулевой член, β_j - амплитуда колебания, ω_j - частота колебания, φ_j - начальная фаза, q - число значимых гармоник, e_h - случайная составляющая.

При этом анализируются как закономерные (нулевой член и значимые гармоники), так и случайные составляющие. Для оценки частот (периодов) и числа периодических компонент здесь используется иной математический аппарат, а именно: элементы статистической теории классификации с обучением и теория выделения полезных сигналов на фоне сильно флуктуирующих помех /Левин, 1969/. Последовательное применение коррелограмм- и периодограмм-анализа составляет часть методики. Если коррелограмма выявляет периодическую динамику исследуемого ряда с ростом сдвига τ и при некоторых сдвигах величина $r(\tau)$ значительна, то исходная эмпирическая переменная содержит периодическую (гармоническую) компоненту. В таком случае исходная информация подвергается преобразованию с целью определения всех параметров модели (I.4). Это достигается применением принципа "обучения с учителем", в результате чего формируются последовательности эталонных гармонических составляющих δ_h с различными (пробными) периодами T_j и нулевыми (пробными) членами β_{0i} , задаваемыми через определенный шаг. Сравнение исходной регистрограммы y_h и эталонной функции $\delta_h(\beta_{0i}, T_j)$ проводится по критерию:

$$S(\beta_{0i}, T_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{h=1}^n [y_h - \delta(\beta_{0i}, T_j)]^2, \quad (I.5)$$

являющемуся функционалом двух параметров – среднего члена и периода. Эта функция есть определенный аналог функции спектральной плотности (значения спектральной плотности отыскиваются в точках, не обязательно кратных величине $2\pi/\lambda$, что лучше согласуется со спецификой решаемой геологической задачи). График функции $S(\beta, T)$ не что иное, как модифицированная периодограмма, где минимальным значениям $S(\beta, T)$ соответствуют искомые периоды составляющих T , сумма которых определяет исследуемую регистрограмму (без ее случайной компоненты ϵ).

Такой подход, по мнению авторов методики, благоприятен для длиннопериодных (низкочастотных) составляющих и позволяет отыскивать периодические компоненты, период которых в 1,5–2 раза превосходит интервал наблюдений.

Используя данную методику, В.Н.Деч и Л.Д.Кноринг проанализировали 19 разрезов разновозрастных карбонатных толщ, вскрытых глубокими скважинами в различных районах СССР, причем выполнялось требование, чтобы в разрезах не было перерывов в осадконакоплении. Исследовались разновозрастные породы: по Прибалтийской синеклизе – отложения ордовика, представленные мергелями, доломитами и известняками, по Усино–Колвинскому валу – отложения карбона, по Ангаро–Ленской синеклизе – карбонатного осинского горизонта нижнего кембрия, по Терскому антиклинорию и западной антиклинальной зоне Южного Дагестана – верхнего мела. Оказалось, что различные геологические и геофизические регистрограммы, характеризующие один и тот же разрез, содержат гармонические компоненты одного периода, а разновозрастные отложения, приуроченные как к платформенному, так и геосинклинальному типу бассейна, – однотипную скрытую периодичность (в масштабе мощности), состоящую из пяти доминирующих периодов (в метрах): 1) 220–300, 2) 100–150, 3) 55–80, 4) 30–70 и 5) 15–25 /Деч, Кноринг, 1978, с. 151/. Очевидно, эти результаты еще нуждаются в подтверждении, однако они, несомненно, представляют определенный интерес, так как опубликованные данные такого рода еще очень малочисленны.

В работе В.М.Лайкама с соавторами /Лайкам и др., 1984/ использовалась схема Балло для разложения кривых геофизических разрезов скважин, представленных диаграммами нейтронного гамма-метода (НГМ) и гамма-метода (ГМ), на несколько элементарных

кривых в виде макро-, мезо- и микроциклитов. Исследовались разрезы карбонатной толщи среднего карбона ряда районов Башкирии. Циклический метод изучения разрезов позволил выявить в турнейском ярусе нижнего карбона пять однотипных циклитов. Изучение мезоцикличности разрезов дало возможность авторам с большей точностью прогнозировать развитие пластов-коллекторов и связанную с ними нефтеносность.

Как известно, скрытую периодичность можно изучать и в пространстве и во времени. В первом случае, применительно к исследованию цикличности осадконакопления, геологический разрез представляется в масштабе мощности и величины "ритмов", "циклов" определяются в метрах, как это имеет место в работах А.Б. Вистелиуса, К.И. Хейсканена и Л.Д. Кноринга. Во втором случае этот же геологический разрез следует рассматривать в масштабе времени.

А.Б. Ронову принадлежат одни из первых работ, в которых геологический разрез представлялся в масштабе абсолютного времени. /Ронов, 1946, 1949/. По его мнению, при количественных методах изучения истории геологического процесса следует опираться на факты, наблюдения и обобщения, накопленные геотектоникой, литологией, стратиграфией, исторической и региональной геологией и рассматривать эти факты "в перспективе абсолютного времени, которое должно лежать в основе геологии как науки исторической" /Ронов, 1949, с. 4/.

Указанное направление исследования периодичности осадконакопления приобретает реальную основу благодаря успехам, достигнутым в последние годы в области совершенствования радиометрических методов измерения геологического времени. Получение новых радиологических данных позволило уточнить геохронологическую шкалу фанерозоя, составленную по реперным точкам.

Использование шкалы абсолютного времени при исследовании геологических разрезов открывает возможность для выявления периодичности осадконакопления. Этот подход был реализован в работах /Одесский, 1968, 1972, 1980/. В качестве предпосылки им тоже принималось, что геологический разрез есть результат колебательных движений земной коры и что эти движения синусоидальны. Выделение отдельных синусоид, соответствующих им, производилось методом обзора числовой совокупности /Ханович, Яновский, Айнемер и Конисская, 1968/, а в качестве анализируемого параметра,

характеризующего процесс осадконакопления, использовались изменения гранулометрического состава отложений по разрезу, представленные кодами пород. Метод обзора числовых совокупностей был предложен для выявления интервалов повторяемости (появления максимума или минимума через одни и те же промежутки) вещественных и мощностных характеристик слоевых ассоциаций по разрезу. Данный метод представляет собой приближенный способ анализа периодичности и сводится к осреднению результатов наблюдений на отдельных интервалах.

Метод обзора числовой совокупности повторяет вычислительную схему Бжи – Балло /Серебренников, Первозванский, 1965/ и отличается от нее тем, что значения разностей ΔS_m в суммарном ряду (формула I.27) нормируются делением на величину $2p$ (p – число строк в таблице), а периодограмма подвергается сглаживанию.

В работе И.А.Одесского приводятся результаты обработки этим методом 49 сводных геологических разрезов и разрезов опорных скважин мезозойско-кайнозойского осадочного чехла Западной Сибири, Казахстана, Средней Азии, Кавказа и Крыма. Повсеместно выделены однотипные геологические циклы с периодами 10,5; 19,5; 31 и 42 млн. лет /Одесский, 1972/.

Итак, использование математических моделей существенно расширяет возможности исследования цикличности и позволяет вскрыть и описать общие и специфические черты процесса осадконакопления.

I.2. Выявление скрытой периодичности осадконакопления математическими методами

Прежде чем перейти к описанию использованных методов, хотелось бы внести некоторую ясность в смысловую нагрузку термина "период". В исследовании геологических разрезов смысл термина "период" может иметь два значения. Числовая совокупность, характеризующая геологический разрез и образованная из количественных (числовых) оценок (характеристик) литологических разностей пород разреза, может рассматриваться во временном масштабе (в масштабе абсолютного времени) или в масштабе мощности. Руководствуясь тем, что периодичность геологических

процессов большинство геологов понимают как периодичность временную, т.е. повторение чего-либо через одинаковые интервалы времени, мы также не хотели бы отступать от этого общего понимания.

В лаборатории геологии нефти и газа ИГиГ СО АН развивается метод системно-структурного анализа породно-слоевых ассоциаций, сущность которого изложена в целом ряде работ А.А.Трофимука, Ю.Н.Карогодина /1974, 1975, 1977, 1982, 1983, 1984/. Наиболее полно он отражен в монографии Ю.Н.Карогодина "Седиментационная цикличность" /Карогодин, 1980/. Этот метод позволяет достаточно объективно и однозначно выделять в разрезах естественных (и искусственных) обнажений по определенным правилам слоевые ассоциации, циклиты (Ц) различного ранга: от элементарных (ЭЦ) до соизмеримых по времени с галактическим годом. Последние названы галоциклитами (ГЛЦ). Иерархическая цепочка циклитов в настоящее время представляется в следующем виде и в следующих терминах (от самых простых до наиболее сложных): элециклиты (ЭЦ) — темциклиты^ж (ТЦ) — региональные, или регоциклиты (РГЦ) и субрегоциклиты (СРГЦ)^{жж} — нексociклиты (НКЦ)^{жжж} — галактические циклиты или галоциклиты (ГЛЦ). По всей вероятности, каждые три ГЛЦ — осадочные чехлы платформ венд-неогенового возраста — можно объединить воедино. Условно такие циклиты можно назвать тригалоциклитами^ж (ТГЛЦ) с продолжительностью формирования примерно 600 млн. лет.

В этой иерархической цепочке практически наиболее важны эле-, рего- и нексociклиты, а из них — регоциклиты. Элементарные циклиты представляют большой интерес, как "ключик" к пониманию структуры более сложных систем и выявлению их иерархии. Это как бы "кирпичики" литосферы. Регоциклиты — это уже блоки, главное, основное "рабочее звено" структуры литосферы того или иного бассейна. Именно эле- и регоциклиты оказались теми "камертонами", по которым определялось "звучание" наших методических разработок.

ж Аналогично циклотом угленосных отложений.

жж Обычно до четырех субрегоциклитов содержится в регоциклите.

жжж Видимо, это девять регоциклитов, связанных во времени.

Процесс осадконакопления с математической точки зрения относится к категории случайных процессов /Вистеллиус, 1961, 1963/. Геологически случайный процесс запечатлен в последовательности породных слоев. Наличие свойств стационарности и эргодичности позволяет изучать структуру процесса по его единственной реализации, применяя методы теории случайных функций, что было доказано работами А.Б.Вистеллиуса и подтверждено последующими исследованиями других авторов (см. раздел I.I), занимавшихся изучением периодичности осадконакопления с использованием математических методов.

В настоящее время существует ряд методов выявления скрытой периодичности. Наиболее полное описание их приводится в работах /Серебренников, Первозванский, 1965; Коняев, 1973/.

Исследование цикличности процесса относится к классу статистических задач, для решения которых разработана спектральная теория стационарных случайных процессов с дискретным временем, позволяющая разложить процесс на элементарные составляющие. Спектральное разложение (разложение Фурье) чрезвычайно широко используется при описании и исследовании случайных процессов самой разнообразной природы. Оно занимает лидирующее положение среди возможных и интегральных преобразований. Спектральный анализ служит мощным орудием исследования физических явлений. Традиционные области применения спектрального анализа включает анализ шумов в радиоприемных устройствах и каналах связи, определение состава вещества по спектру оптического излучения, палеомагнитные исследования и т.д. В последнее время пространственный и временной анализы внедряются в геофизические исследования. Интересно рассмотреть возможность исследования с их помощью цикличности и периодичности осадконакопления.

В данной работе анализируются четыре метода выявления скрытой периодичности применительно к процессу осадконакопления – методы Блекмана–Тьюки, максимальной энтропии, дисперсионного анализа и обзора числовой совокупности. В результате получены оценки спектров и периодограмм. Такая методическая работа была проведена с целью выявления наиболее наглядного и надежного метода решения интересующей нас проблемы.

Первые два относятся к методам спектрального анализа, которые прошли испытания на надежность и с успехом используются в

ряде областей естествознания. Однако в опубликованной литературе отсутствуют сведения о применении этих методов для исследования именно периодичности осадконакопления. Метод дисперсионного анализа был избран нами потому, что этот метод традиционно применялся для расчета и построения периодограмм. И, наконец, метод обзора числовой совокупности, опробован И.А.Одесским на большом количестве разрезов и рекомендован им для использования при решении задач седиментационной цикличности. Перечисленными методами был обработан один и тот же исходный ряд наблюдений /Одесский, 1972/.

Исходный фактический материал

Применение любого математического метода требует преобразования информации в числовую форму, поэтому первым этапом исследования является стандартная послынная запись разреза, позволяющая в дальнейшем осуществить указанное преобразование. Методы математической обработки, которые предлагаются для выявления скрытой периодичности с помощью оценки спектра, предъявляют определенные требования к исходной информации. Основное требование к значениям дискретного ряда – это представление информации с равномерным шагом по времени. Кроме того, исследуемый исходный ряд должен быть полным, т.е. без пропусков в наблюдении и перерывов в осадконакоплении.

Применение методов теории случайных функций к исследованию случайного процесса по одной его реализации требует выполнения условий стационарности и эргодичности.

Стационарность предполагает отсутствие тренда в исследуемом ряду. Приближенный способ проверки стационарности случайной функции состоит в том, что исходная реализация разбивается на несколько частей, а для каждой части рассчитываются математическое ожидание и корреляционная функция. Если расхождения в сравнительных оценках указанных характеристик для этих частей в целом незначительны, то можно в пределах требуемой точности принять, что используемая для дальнейшего исследования последовательность удовлетворяет требованиям стационарности по отноше-

нию к корреляционной функции. Эргодичность же означает, что при достаточно большом интервале осреднения дисперсия среднего стремится к нулю. Для проверки эргодичности случайной функции по отношению к корреляционной и математическому ожиданию используется следующий критерий: при неограниченном увеличении аргумента корреляционная функция должна убывать по модулю.

Поскольку процессы осадконакопления с вероятной точки зрения относятся к категории случайных, они, следовательно, могут быть представлены в виде случайных функций координат точки пространства и времени, описывающих распределение параметров (физических и химических свойств, структур и т.д.) породных слоев по латерали и вертикали (времени). В развитии процессов осадконакопления за достаточно продолжительные периоды истории Земли в основном не обнаруживается систематической поступательно-эволюционирующей компоненты, за исключением некоторых явлений. Поэтому эти процессы можно считать стационарными, тем более что эволюционная составляющая может быть устранена специальными (регрессионными) методами. В пользу их эргодичности свидетельствует ограниченность вариаций в процессах осадконакопления, по крайней мере при постоянных фациальных условиях.

Наличие таких свойств у исходного ряда позволяет изучать структуру процесса по его единственной реализации, иначе говоря, по одной какой-либо характеристике осадка в непрерывных разрезах осадочных пород (см. раздел I.I.).

В качестве исходного ряда наблюдений, который использован для иллюстрации результатов, полученных каждым из перечисленных методов, взята последовательность, состоящая из кодов пород по разрезу верхнетриасовых и юрских отложений района Анабарской губы по результатам полевого описания, которое было проведено Ю.Н.Карогодиным и М.А.Левчуком в 1974 г. При этом породам были присвоены следующие кодовые значения (предложенные И.А.Одесским, 1972).

Известняк	3
Глина	6
Глина алевролитистая	9
Алеврит известковистый	12
Алеврит глинистый	15
Алеврит	18

Алеврит песчанистый	21
Алеврит с галькой	24
Песчаник алевритистый	27
Песчаник мелкозернистый	30
Песчаник среднезернистый	33
Песчаник крупнозернистый	36
Песчаник с галькой	39
Угленосность	42
Конгломераты	45

Общая мощность изучаемого разреза составила 1445 м, время формирования исследуемой толщи (от рэта до келловея) в соответствии с геохронологической шкалой – 43,8 млн. лет /Афанасьев, Зыков, 1975/.

Продолжительность формирования изучаемых осадков принимались следующей: рэт – 10 млн. лет, геттанг – 5, синемюр – 4, плинсбах – 4, тоар – 4, аален – 4, байос – 6, бат – 5 и келловей (представлен частично) – 1,8 млн. лет. Кодовые значения пород выбирались с временным шагом, равным 100 000 лет, поэтому анализируемый ряд содержит 438 точек.

Выбранный нами исходный ряд наблюдений был исследован на выполнение условий стационарности и эргодичности. Для проверки первого условия разрез разбивался на три части, по которым вычислялись средние значения и эмпирические корреляционные функции. Полученные оценки средних значений имеют в целом незначительные расхождения и не противоречат гипотезе о постоянстве математических ожиданий. Корреляционные функции к тому же очень сходны между собой (рис. I, а, б, в). Эти результаты позволяют принять гипотезу о стационарности исследуемого процесса, которая предполагает также отсутствие тренда. В пользу этого условия свидетельствует изменение зернистости пород по разрезу, которая не имеет систематического роста или падения с глубиной, что хорошо видно на фактической кривой.

Видимое стремление к нулю корреляционной функции, построенной для значительного интервала (рис. I, г), указывает на эргодичность процесса, представленного исходным рядом данных.

Приближенность и принятые при проверке стационарности и эргодичности процесса осадконакопления допущения оправдываются тем, что применяемые методы спектрального анализа пригодны и

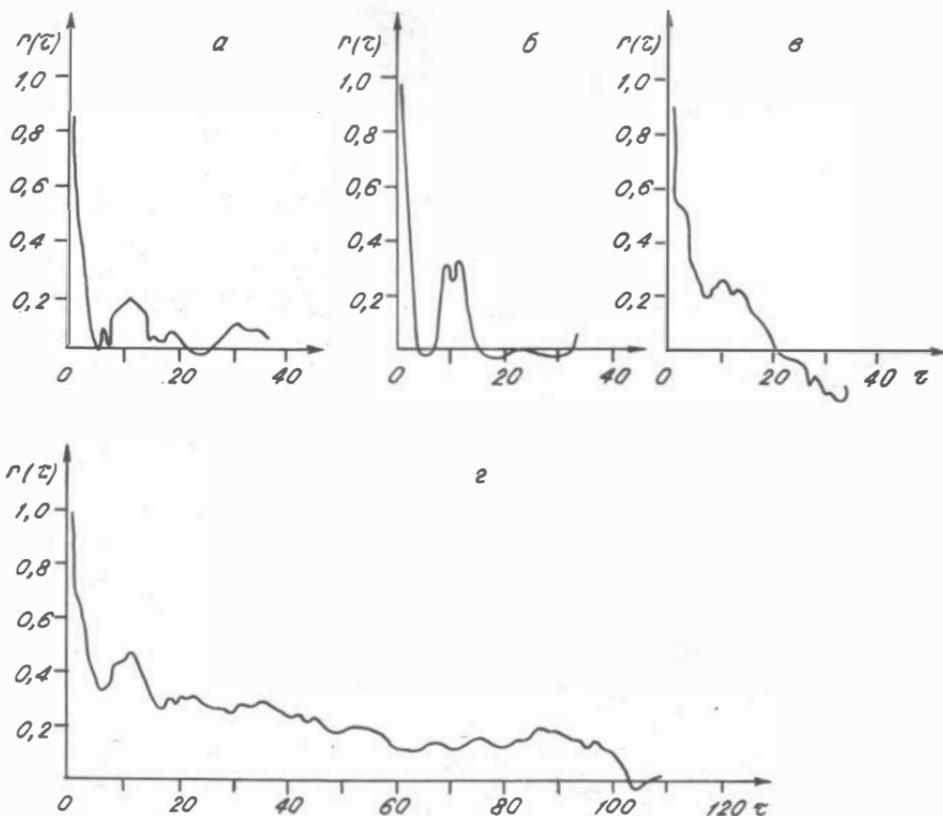


Рис. 1. Корреляционные функции для верхней (а), средней (б), нижней (в) части и всего разреза (г) юрских отложений в районе Анабарской губы

для изучения некоторых нестационарных процессов. В частности, с их помощью возможно изучение процессов, являющихся функционалами от случайных и детерминированных функций вида [Бунимович, 1951]:

$$Y(t) = \Psi [\varepsilon(t), f(t)], \quad (1.6)$$

где Y — некоторая функция; ε — случайный процесс; $f(t)$ — периодическая, или почти периодическая функция.

Приведенный материал показывает, что мы не делаем грубой ошибки, применяя в дальнейшем методы анализа стационарных последовательностей.

Метод максимальной энтропии

Дж.П.Бургом /Burg, 1968/ для спектрального анализа временных рядов был предложен так называемый метод максимальной энтропии (МЭМ), который специалистами считается в настоящее время лучшим методом спектрального анализа временных рядов. Этот метод позволяет подавлять шум, различать тонкости спектрального распределения и применим как для коротких, так и для длинных временных рядов.

Спектральный анализ можно представить в виде серии последовательно выполняемых взвешиваний и сглаживаний. В опубликованной литературе для обозначения весовых функций и соответствующих им частотных сглаживаний функций используют термин "окна" /Коняев, 1973/. Если принять этот термин, то спектральный анализ можно представить как результат последовательного воздействия на процесс временных фильтров (окон).

В МЭМ заранее подобранные весовые функции заменяются оптимальными фильтрами для подавления шума спектра /Печова, 1978/. Параметры этих фильтров выражены с помощью авторегрессионной функции (АР) анализируемой совокупности и формируются по ее свойствам. Поэтому данные фильтры называют также автоадаптивными. Алгоритм метода может быть сведен к следующим процедурам.

Для каждого исходного значения x_t исследуемого ряда $x = f(t)$ процесс авторегрессии M -го порядка можно представить в виде

$$x_t = a_1 x_{t-1} + a_2 x_{t-2} + \dots + a_M x_{t-M} + \alpha_t, \quad (I.7)$$

где $t = 1, 2, \dots, N$, α_t - случайная составляющая с дисперсией σ^2 .

Стационарный случайный процесс $x(t)$ в пределах любого промежутка времени $-T \leq t \leq T$ хорошо аппроксимируется суммой гармонических колебаний с комплексными амплитудами η_n и

циклическими частотами f_n , если неограниченно увеличивать число слагаемых N :

$$x(t) = \sum_{-N}^N \eta_n \exp i2\pi f_n t, \quad f_n = -f_{-n} \\ -T \leq t \leq T \quad (I.8)$$

Представление процесса, состоящего из дискретного набора гармонических составляющих в виде формулы (I.8), называется его спектральным разложением.

Спектральная плотность процесса авторегрессии является Фурье-образом формулы (I.7) и имеет вид /См.: Папаташвили, Ротанова, 1979, с. 545/:

$$S(f) = \frac{\sigma_M^2}{\left| 1 - \sum_{n=1}^M a_{Mn} \cdot e^{-i2\pi f_n} \right|^2}, \quad (I.9)$$

где M - порядок авторегрессии, a_{Mn} - коэффициенты авторегрессии M -го порядка, f_n - частота, σ_M^2 - ошибка прогноза для АР M -го порядка.

Вывод этой формулы, а также методы определения частных коэффициентов корреляции a_{MM} и коэффициентов a_{Mj} M -го порядка приводятся в работах Дж.П.Бурга /1968/. Отметим лишь, что вначале для АР M -го порядка определяется коэффициент частной корреляции a_{MM} , а затем любое значение коэффициентов a_{Mj} определяется из рекурсивного выражения:

$$a_{Mj} = a_{(M-1)j} - a_{MM} \cdot a_{(M-1)(M-j)}, \quad j=1, \dots, M-1,$$

а ошибка прогноза σ_M^2 :

$$\sigma_M^2 = \sigma_{M-1}^2 (1 - |a_{MM}|^2). \quad (I.10)$$

Подставив параметры a_{Mj} и σ_M^2 в выражение (I.9), получим оценки спектральной плотности анализируемого процесса x_t . От порядка АР модели сильно зависит конфигурация спектра $S(f)$. Чем больше порядок M авторегрессионной модели, тем более детальным получается спектр, однако тем больше и вероятность случайных ошибок в вычисляемых значениях спектра. Согласно иссле-

довангям Н.Е.Палиташвили и Н.М.Ротановой, оптимальным порядком АР модели является порядок, равный одной трети исходного ряда ($M = 1/3 N$). При учете этого обстоятельства, в программе, реализующей вычисление спектральной плотности по описанному алгоритму, предусмотрено вычисление спектра для трех случаев порядка М АР модели: $M = 1/3 N$, $M = 1/2 N$, $M = 2/3 N$. Если какой-либо период выделяется в каждом из этих трех случаев, можно говорить об устойчивости этого периода.

Оценка значимости выделенных максимумов $S(T)$ производится по уровню β /Нечаева, Рябушкин, Трубин, 1979/ :

$$\beta = \frac{S(T) \cdot \chi^2_q}{q}, \quad (I.II)$$

где $S(T)$ - среднее значение спектра, $S(T) = \frac{\sum_{i=1}^M S_i(T)}{M}$;

$$q - \text{число степени свободы, } q = \frac{2N - M/2}{M} ;$$

χ^2_q - табличное значение хи-квадрата Пирсона для q степеней свободы.

Максимальные значения спектра $S(T)$, для которых превышен уровень β , считаются значимыми с вероятностью P .

Результаты выявления периодичности. Обработка исходного временного ряда (без предварительного сглаживания) методом максимальной энтропии позволила выделить спектр, на котором отчетливо видно два максимума: $T = 4,2$ млн. лет и $T = 9,9$ млн. лет (рис. 2). Кроме того, судя по поведению кривой спектра, в исследуемом разрезе фиксируется период, по своей продолжительности равный (или больший) 43,8 млн. лет.

И.А.Одесский /1972/ вслед за Н.М.Страховым /1949/ считает, что главенствующую роль в формировании палеогеографических черт регионов сыграла цикличность с периодом 30-45 млн. лет или, точнее, два цикла, попадающие в этот интервал: 29-35 и 39-45 млн. лет; эти циклы контролируют формирование наиболее крупных палеогеографических и структурных элементов, развитых на территории платформ.

Для выделенных периодов нами было рассчитано число степеней свободы $q = 5$ и уровень 95 %-ной значимости $\beta = 8,47$ (по фор-

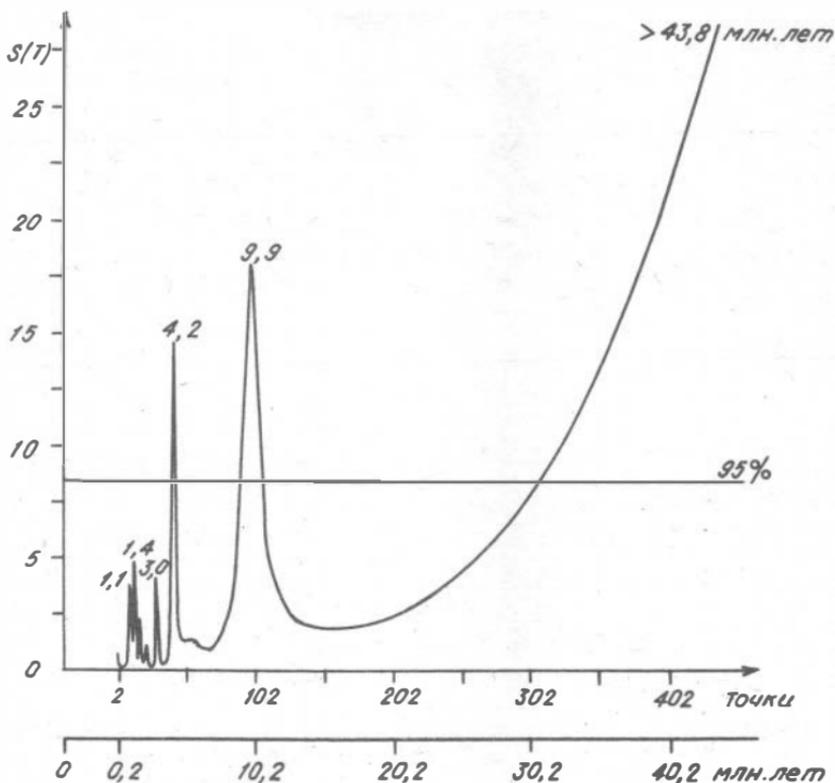


Рис. 2. Спектр, полученный методом максимальной энтропии по ряду кодовых значений вулканических отложений района Анабарской губы

муле I.II). Значения спектра для периодов $T = 4,2$; $9,9$ и $43,8$ млн. лет соответственно составляют $S(T) = 14,75$; $17,93$ и $28,79$. Каждое из них значительно превышает уровень B . Из этого следует, что выделенные периоды не случайны и вероятность их составляет 95 %.

Метод Блекмана - Тьюки

Метод Блекмана - Тьюки /Blackman, Tukey, 1959/ сводится к тому, что процесс изучается в рамках корреляционной теории, и основная задача заключается в нахождении функции корреляции или однозначно связанной с ней спектральной плотности процесса. Оценка спектра по числовым данным строится по оценке функции корреляции. Вычисления ведутся в два этапа.

1. Сначала оценивается функция автокорреляции процесса со сдвигом τ :

$$r(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} (x_i - \bar{x})(x_{i+\tau} - \bar{x})}{(N - \tau) \cdot \sigma_x^2}, \quad (I.12)$$

где N - длина исходного ряда наблюдений,
 τ - сдвиг по оси абсцисс (число сдвигов изменяется от 0 до $T < N$),

x_i - i -ое значение исходного ряда наблюдений,

\bar{x} - среднее значение исходного ряда,

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad \sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2.$$

σ_x^2 - дисперсия,

Ковариация ряда характеризует статистическую связь между членами ряда, отстоящими друг от друга на величину τ . Если в рассматриваемом ряду имеется периодическая составляющая с периодом T , то в точках $\tau = T, 2T, \dots$ будут наблюдаться максимумы автокорреляционной функции. Периодический характер автокорреляционной функции свидетельствует о периодичности исходной кривой.

2. Затем выполняется преобразование Фурье автокорреляционной функции, дающее оценку спектра для периода T :

$$S(T) = \frac{1}{2T} + \frac{1}{T} \sum_{\tau=0}^m (1 - \frac{\tau}{m-1}) \cdot r(\tau) \cdot \cos \frac{2\pi\tau}{T}, \quad (I.13)$$

где m - число сдвигов,

τ - сдвиг по оси абсцисс.

Максимумы на графике спектральной плотности соответствуют определенным периодам вариаций, т.е. если в исходном ряду наблюдений содержится косинусоида, то спектральная кривая будет иметь пик на соответствующей частоте $f = \frac{1}{T}$.

Учитывая, что применение методики Блекмана - Тьюки предусматривает предварительное сглаживание в зависимости от выделения искомого периода T , зачастую исходный ряд предварительно фильтруется (осредняется) одним или двумя радиусами по формуле

$$x_i = \frac{1}{r_1} \sum_{k=i+\frac{r_2-r_1}{2}}^{i+\frac{r_1+r_2}{2}-1} x_k - \frac{1}{r_2} \sum_{k=i}^{i+r_2-1} x_k, \quad (I.14)$$

где r_1 и r_2 - радиусы осреднения, причем $r_1 \leq r_2$ (оба нечетные).

Чтобы выделить в исследуемом ряду период T , равный k равноотстоящим точкам, выбираются соответствующие значения радиусов по формулам:

$$\begin{aligned} r_1 &= T - \left(\frac{T}{4} + 1\right), \\ r_2 &= T + \left(\frac{T}{4} + 1\right). \end{aligned} \quad (I.15)$$

Для оценки значений амплитуды и фазы колебаний находится периодограмма, т.е. вычисляются первые коэффициенты Фурье - разложения для исходных данных:

$$\begin{aligned} a_T &= \frac{2}{T} \sum_{t=0}^T (x_t/m) \cdot \cos \frac{2\pi t}{T}; \\ b_T &= \frac{2}{T} \sum_{t=0}^T (x_t/m) \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}. \end{aligned} \quad (I.16)$$

Этими коэффициентами определяется амплитуда A_T и фаза φ_T для каждого периода T :

$$A_T = \sqrt{a_T^2 + b_T^2}; \quad \varphi_m = \arctg \left(\frac{a_T}{b_T}\right) \quad (I.17)$$

Спектральное разложение исходного ряда методом Блекмана - Тьюки производилось после разделения ряда на закономерную и случайную составляющие. Это было вызвано тем обстоятельством, что периодограмма с использованием этого метода без предварительной фильтрации получается сильно "зашумленной".

Как известно, в литологической характеристике геологического разреза присутствуют две компоненты: систематическая, отражающая цикличность процесса, и случайная, являющаяся следствием воздействия локальных факторов на общий ход процесса осадконакопления. Поэтому изучаемый реальный процесс можно представить в виде

$$y(t) = f(t) + \varepsilon(t), \quad (I.18)$$

где $f(t)$ - неслучайная функция времени, $\varepsilon(t)$ - случайная составляющая.

Для разделения исследуемого ряда на закономерную и случайную составляющие нами был выбран гармонический анализ /Серебренников, 1948/ потому, что ряды Фурье относительно быстро сходятся к исходным функциям, т.е. небольшое число членов ряда Фурье обеспечивает сравнительно точное воспроизведение исходной функции, если последняя не имеет особенностей вроде разрывов, ухода в бесконечность и некоторых других. Пользуясь методом гармонического анализа, неслучайную составляющую эмпирической кривой, заданную частными значениями, представляют рядом Фурье:

$$f(x) \approx \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^n r_k \sin(kx + \varphi_k), \quad (I.19)$$

где $\frac{A_0}{2}$ - постоянный член, значение средней ординаты кривой на протяжении длины волны, r_k - амплитуда k -ой гармоники, φ_k - начальная фаза k -ой гармоники,
 $\operatorname{tg} \varphi_k = A_k/B_k$,

A_k , B_k - косинусный и синусный коэффициенты гармоники k -го порядка ($A_k = r_k \cdot \sin \varphi_k$; $B_k = r_k \cdot \cos \varphi_k$).

Коэффициенты полинома (I.19) находятся по формулам Бесселя (случай для четного числа ординат $p = 2v$):

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{\nu} \sum_{\lambda=1}^{2\nu} y_{\lambda} , \\ A_k &= \frac{1}{\nu} \sum_{\lambda=1}^{2\nu} y_{\lambda} \cos k\lambda \frac{\pi}{\nu} , \\ B_k &= \frac{1}{\nu} \sum_{\lambda=1}^{2\nu} y_{\lambda} \sin k\lambda \frac{\pi}{\nu} , \end{aligned} \right\} (k = 1, 2, \dots, \nu - 1) , \quad (I.20)$$

где $\nu = 2\nu$ - количество равных частей, на которое делится периодическая кривая, y_{λ} - соответствующая ордината, $\lambda \frac{\pi}{\nu}$ - абсцисса точек деления.

Проверка на правильность выделения тренда проводится после определения каждой очередной гармоникки. Для этой цели использовался критерий серий знаков, основанный на медиане выборки /Френкель, 1972/. Сущность его состоит в следующем:

по рассчитанным отклонениям от тренда определяется медиана этого ряда;

образуется последовательность из плюсов и минусов по следующему правилу: на i -м месте ($i = 1, 2, \dots, n$) ставится знак плюс, если i -е наблюдение в исходном ряду превосходит медиану, и знак минус, если оно меньше медианы.

Если отклонения от тренда случайны, то чередование плюсов и минусов тоже должно быть случайным. Выборка признается случайной, если выполняются следующие неравенства (для 5 %-го уровня значимости):

$$K_{\max}(n) < [3,3(\lg n + 1)] ,$$

$$\nu(n) > \left[\frac{1}{2} \cdot (n + 1 - 1,96 \sqrt{n-1}) \right] , \quad (I.21)$$

где $K_{\max}(n)$ - протяженность самой длинной серии (т.е. подряд идущих одинаковых знаков - плюсов или минусов), $\nu(n)$ - общее число серий.

Если хотя бы одно из неравенств нарушается, то предположение о случайном характере отклонений уровней временного ряда от тренда отвергается. Это может означать, что полученное число гармоник недостаточно для выделения закономерной составляющей.

Для выделения закономерной составляющей с помощью рядов Фурье потребовалось 68 гармоник. Правильность выбора тренда проверялась по критерию серий знаков. Спектр закономерной составляющей представлен на рис. 3, а периодограмма - на рис. 4.

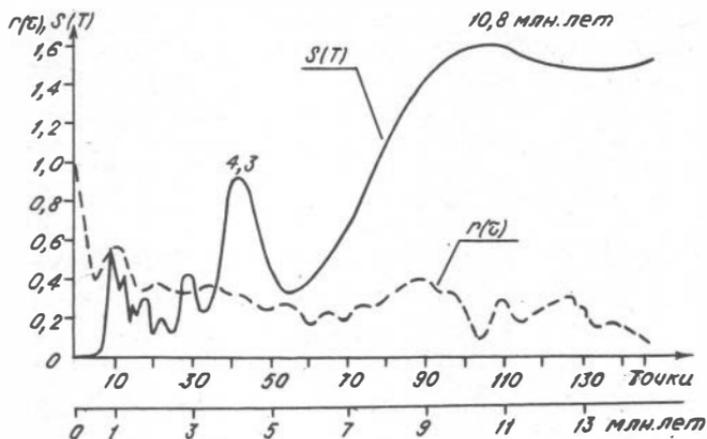


Рис. 3. Спектр $S(T)$, полученный методом Блекмана-Тьюки, и автокорреляционная функция $r(\tau)$ по ряду кодовых значений ирских отложений района Анабарской губы.

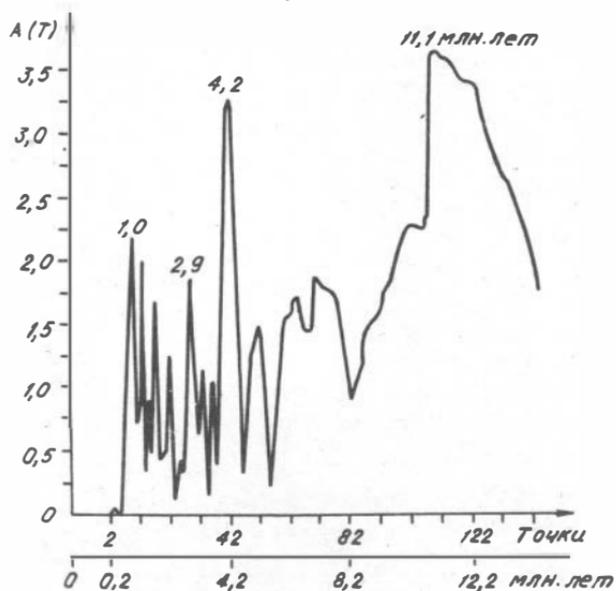


Рис. 4. Периодограмма, полученная методом Блекмана-Тьюки (по закономерной составляющей ряда кодовых значений пород ирских отложений района Анабарской губы)

Несмотря на то, что и в этом случае периодограмма осложнена "белым шумом" (наличием большого количества максимумов приблизительно одинаковой величины), на ней так же, как на спектре, отчетливо выделяются максимумы, соответствующие периодам $T = 4,2$ и $T = 10,8-11,1$ млн. лет. Разрешающая способность метода не позволяет выделять периоды продолжительностью более $1/3$ длины исходного ряда, в нашем случае более 14 млн. лет (43,8 млн. лет : 3). Этим объясняется отсутствие в спектре и периодограмме максимума для периода $T = 43,8$ млн. лет, выявленного методом МЭМ и равного по длительности исходной реализации.

Чтобы убедиться в неслучайности периода в 4,2 млн. лет, исходный ряд был профильтрован двумя радиусами $r_1 = 31$ и $r_2 = 53$. На рис. 5 представлена периодограмма, полученная по методу Блекмана - Тьюки после фильтрации исходного ряда указанными двумя радиусами. Период в 4,2 млн. лет четко фиксируется. Значит, он неслучаен. Проведя аналогичную операцию по установлению периода в 10 млн. лет (в этом случае радиусы фильтрации $r_1 = 75$ и $r_2 = 125$), получили периодограмму, в которой данный период не выявился, но получен максимум спектра на $T = 11,3$ млн. лет, близкий по значению.

Метод дисперсионного анализа

Дисперсионный анализ представляет собой статистический метод анализа результатов наблюдений, зависящих от различных одновременно действующих факторов, выбор наиболее важных факторов и оценку их влияния. Для наших целей такая разрешающая способность метода используется для разложения исследуемого ряда на гармонические составляющие и выявления величины интенсивности на соответствующей частоте, что позволяет определить степень влияния той или иной гармонической составляющей исследуемого ряда. Вычисление периодограммы с помощью этого метода /Бокс, Дженкинс, 1974/ основано на предположении, что временной ряд образован синусоидами и косинусоидами различных частот. Периодограмма вначале использовалась для обнаружения и оценок амплитуды синусои-

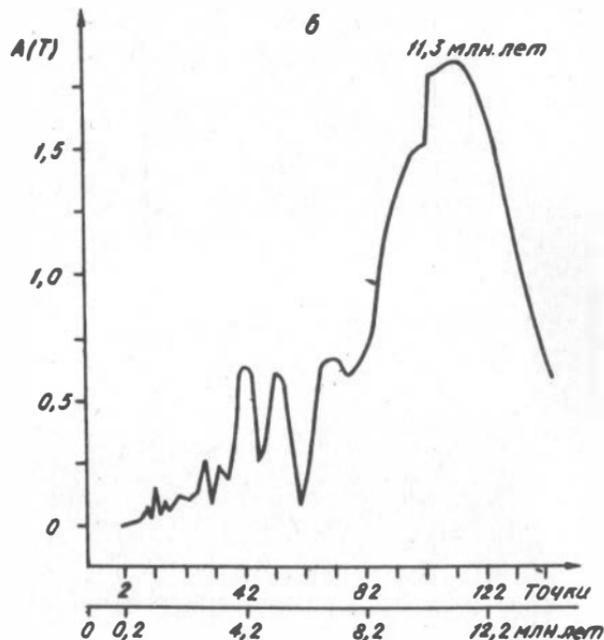
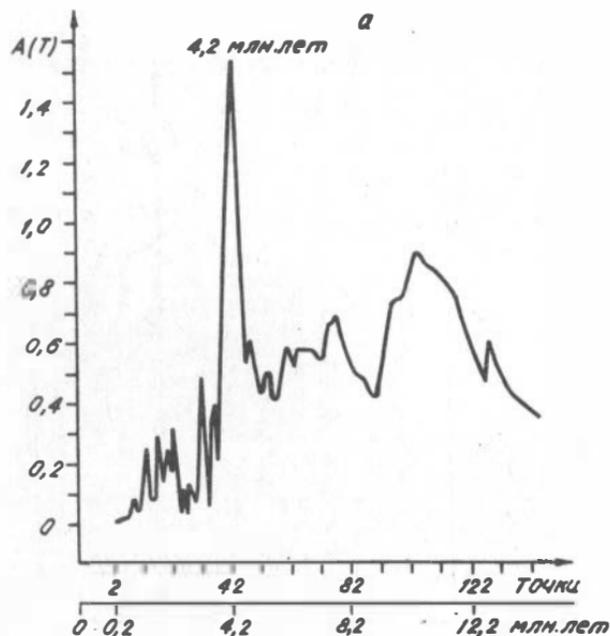


Рис. 5. Периодограммы, полученные методом Блекмана-Тьюки (по ряду кодовых значений пород прских отложений района Анабарской губы) с использованием фильтрации исходного ряда двумя радиусами: а) $r_1 = 31$ и $r_2 = 53$, б) $r_1 = 75$ и $r_2 = 125$

дальной компоненты, скрытой шумом. Дж.Бокс и Г.Дженкинс предлагают пользоваться ею для контроля случайного ряда, состоящего из остаточных ошибок после подгонки какой-либо модели. Предполагается, что для этого случайного ряда периодические компоненты неизвестной частоты еще сохраняются. Нами этот способ расчета периодограммы был использован для анализа исходного ряда наблюдений, в котором присутствуют как закономерная, так и случайная составляющие. Такой подход обоснован тем, что именно в данном виде исходный ряд предполагается использовать при анализе его методами МЭМ, Блекмана - Тьюки и обзора числовой совокупности.

Приводимый ниже алгоритм расчета периодограммы заимствован из названной книги Дж.Бокса и Г.Дженкинса. При построении периодограммы используется обычно большое число наблюдений. Для иллюстрации вычислений периодограммы рассмотрим случай, когда число наблюдений четно: $N = 2q$. Тригонометрический полином, описывающий ряд x_t , при использовании модели ряда Фурье имеет вид:

$$x_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{q-1} (\alpha_i c_{it} + \beta_i s_{it}) + e_t, \quad (I.22)$$

где $c_{it} = \cos 2\pi f_i t$, $s_{it} = \sin 2\pi f_i t$,

$f_i = \frac{i}{N}$ - i -ая гармоника основной частоты $1/N$, q - максимальное число гармоник, e_t - случайная величина.

Оценки (наименьших квадратов) коэффициентов α_0 и α_i , β_i :

$$a_0 = \bar{x},$$

$$a_i = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N x_t c_{it}, \quad i = 1, 2, \dots, q$$

$$b_i = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N x_t s_{it}.$$

Тогда периодограмма будет состоять из $q = N/2$ значений

$$I(f_i) = \frac{N}{2} (a_i^2 + b_i^2), \quad i = 1, 2, \dots, q, \quad (I.24)$$

где $I(f_i)$ названа Дж.Боксом и Г.Дженкинсом интенсивностью на частоте f_i .

Для случая $i = q$ соответствующие коэффициенты и интенсивность будет определяться из выражений:

$$a_q = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (-1)^t x_t, \quad b_q = 0, \quad (I.25)$$

$$I(f_q) = I(0,5) = N a_q^2.$$

Как видно из формулы (I.24), значение периодограммы $I(f_i)$ есть просто "сумма квадратов" пар коэффициентов (a_i, b_i) , а следовательно, оно связано с частотой $f_i = \frac{1}{N}$. Таким образом,

$$\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^q I(f_i). \quad (I.26)$$

Периоды, выделяемые по этому методу, всегда будут кратными периоду основной частоты $f_1 = 1/N$.

На рис. 6 приведена периодограмма, полученная с использованием метода дисперсионного анализа. На ней максимумы приходятся на периоды $T = 4,38$ млн. лет, $10,95$ млн. лет и $43,8$ млн. лет, т.е. результаты сопоставимы с теми, которые были получены методами МЭМ и Блекмана - Тьюки.

Метод простого обзора числовой совокупности

Данный метод, сходный в основных чертах с методом Бюи - Балло, был предложен в 1968 г. /Ханович и др., 1968/. Он позволяет в исследуемом ряду установить периоды повторения однотипной числовой совокупности. Производится это следующим образом.

I. Исходный ряд, состоящий из n наблюдений, делится на отрезки по m величин в каждом, взятых по порядку (остаток отбрасывается). Каждый отрезок записывается в виде строки в таблицу. В итоге формируется таблица из p строк и m столбцов (табл. I);

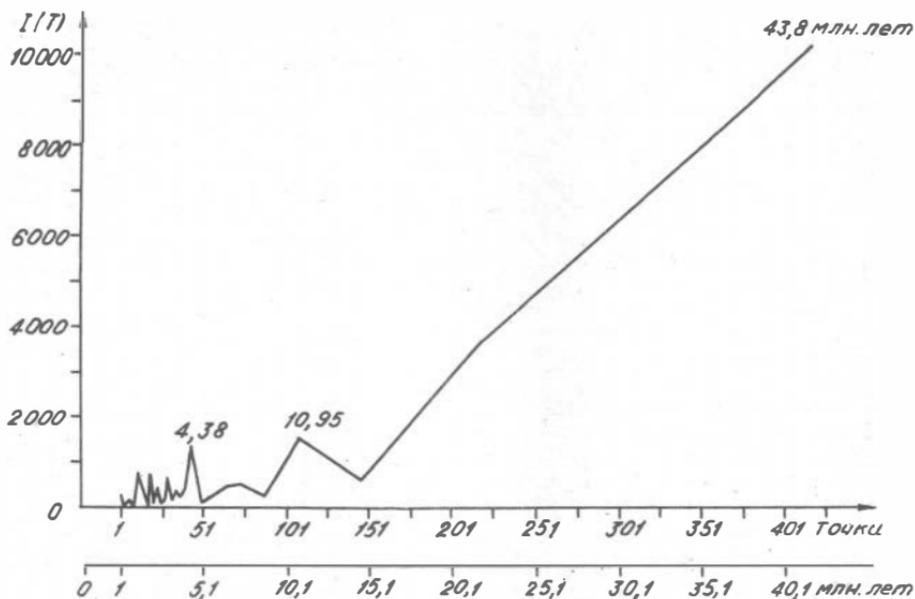


Рис. 6. Периодограмма, полученная методом дисперсионного анализа (по ряду кодовых значений пород юрских отложений района Анабарской губы)

(если последняя строка заполнена не полностью, она в расчете не участвует). Затем производится суммирование первых членов каждого отрезка, вторых членов и т.д. до m -го. Получается новый ряд, состоящий из m сумм. Этот ряд усредняется делением каждого его члена на одно и то же число p — количество отрезков (строк).

2. В усредненном ряду находятся его максимальное S_{\max}^m и минимальное S_{\min}^m значения.

3. По этим значениям рассчитывается полуразмах периодограммы для случая m точек в отрезке:

$$\Delta S_m = \frac{1}{2p} (S_{\max}^m - S_{\min}^m) . \quad (I.27)$$

Таблица I

Пример записи числовой совокупности в таблицу /Одесский, 1972/.

Р	m									Строчные значения
	I	2	3	4	5	6	7	8	9	
I	45	45	45	45	45	39	39	25	25	20
2	25	25	16	16	16	16	16	16	16	9
3	16	16	6	6	15	15	15	15	16	10
4	18	18	18	18	18	18	18	18	18	0
5	18	18	18	18	18	18	18	18	18	0
6	18	18	17	9	9	9	9	10	13	9
7	13	13	13	13	13	13	13	13	10	3
8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0
9	10	3	3	10	10	18	18	18	18	15
10	18	18	18	18	18	18	35	35	35	17
11	35	35	32	29	29	29	29	39	39	10
12	39	22	22	26	36	36	36	36	36	17
13	36	36	36	36	36	36	25	25	25	11
Средние значения	23	21	20	20	21	21	22	22	22	
Сглаженные значения	22,0	21,3	20,3	20,3	20,7	21,3	21,7	22,0	22,3	
Места экстремумов				S_{\min}^9					S_{\max}^9	$\Delta S_9 =$ $\frac{22,3 - 20,3}{2 \cdot 13} =$ $= 0,08$
Частота, %				84					100	

4. График, построенный по всем ΔS_m , называется периодограммой.

При расчете периодограммы должно быть соблюдено условие $2 \leq m \leq n/2$, т.е. количество точек (величин) в отрезке должно быть более (или равно) двум и менее (или равно) 1/2 части всего ряда. В работе И.А.Одесского предлагается максимальное ко-

личество точек m в отрезке ограничить величиной, равной $1/4$ всего ряда /Одесский, 1980/.

Для того, чтобы расшифровать периодограмму, производится ее сглаживание и расчет тренда по ней в виде прямой линии.

Сглаживание выполняется по максимальным и минимальным значениям ординат периодограммы. Однако, предпочтение отдается сглаживанию по минимумам /Ханович и др., 1968/. Процедура сглаживания по минимумам ΔS_m состоит в проведении плавной кривой через точки, соответствующие минимальным значениям ΔS_m , а по максимумам ΔS_m - в проведении кривой, соединяющей между собой максимальные значения ΔS_m . Далее строится кривая, усредняющая эти две кривые. Это и есть усредненная периодограмма. Чтобы выделить на ней значимые периоды, рассчитывается тренд и находится его положение на графике (рис. 7).

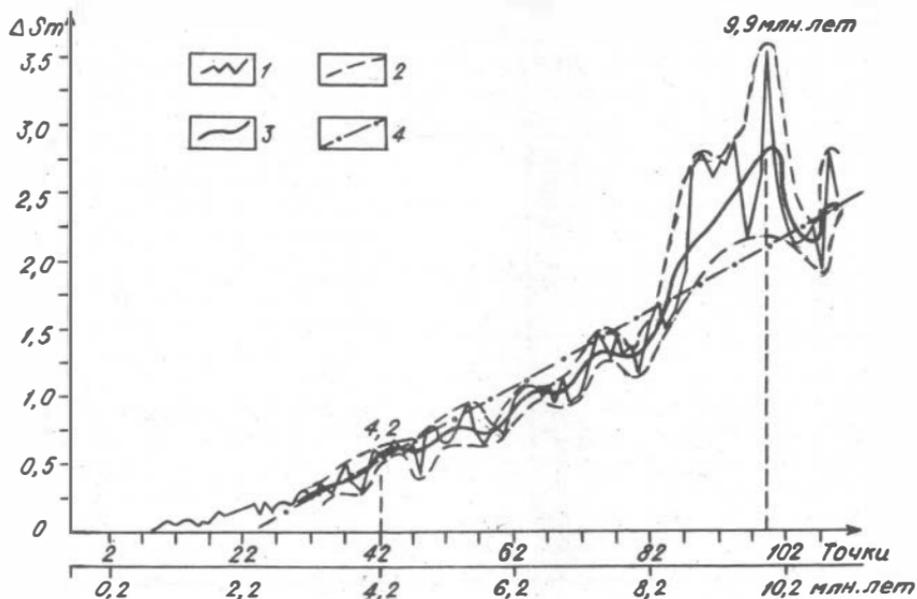


Рис. 7. Периодограмма, полученная методом обзора числовой совокупности (по ряду кодовых значений пород ирских отложений района Анабарской губы)

1 - исходная периодограмма; 2 - сглаженная периодограмма по максимумам и минимумам; 3 - линия средних значений сглаживания периодограммы; 4 - тренд

Положения значимых максимумов на периодограмме устанавливаются относительно тренда. Значимыми считаются те максимумы, которые превышают уровень тренда. Они указывают на наличие в исследуемой совокупности циклов соответствующих периодов T . Информация о возможном присутствии ритмов считается достоверной в том случае, если она подтверждается частотой матричных экстремумов данного ритма. Авторами этого метода /Ханович и др., 1968 / принят 75 %-ный порог критерия надежности. В целях уточнения местоположения суммарных матричных экстремумов производится предварительное сглаживание суммарного ряда с базой сглаживания, равной $\pi/3$. При этом учитываются те экстремумы, которые попадают в принятый интервал сглаживания суммарного ряда.

Из сравнения периодограммы на рис. 9 с ранее приведенными графиками спектров и периодограмм (рис. 3-6, 8) видно, что и на ней, хотя и с малой амплитудой, также выделяются периоды, равные $T = 4,2$ и $9,9$ млн. лет. С учетом того, что разрешающая способность этого метода ограничена выделением периодов не более $1/4$ исходного ряда, т.е. не более Π млн. лет в нашем случае, период в $43,8$ млн. лет этим методом не был зафиксирован.

Анализ результатов

Результаты выявления скрытой периодичности, полученные всеми четырьмя математическими методами, в целом не противоречат друг другу. Сравнительный анализ позволил определить достоинства и недостатки каждого из методов применительно к решаемой задаче. Естественно возникает вопрос, какому из методов отдать предпочтение.

Методом Блекмана - Тьюки, даже по отфильтрованному временному ряду, получается периодограмма, несколько искаженная шумом. Однако она, так же как и спектр, рассчитанный по этому методу, неплохо согласуется с оценками спектра по МЭМ. Этим методом не выявляется длиннопериодная составляющая. Достоверно выделяется длина периода, не превышающая $1/3$ ряда. Применение соответствую-

щего числового фильтра позволяет четко выявить присутствие короткопериодной составляющей в исследуемой реализации.

Периодограмма, полученная с использованием дисперсионного анализа, маловыразительна и имеет тот недостаток, что она позволяет выделять лишь периоды, кратные основной гармонике, т.е. длине исходного ряда. Остальные (промежуточные) периоды не выявляются. Этим объясняется смещение оценок для периодов в 4,2 и 9,9 млн. лет, полученных по методу МЭМ (здесь им соответствуют периоды в 4,38 и 10,95 млн. лет: см. рис. 8).

Периодограмма, полученная методом простого обзора числовой совокупности, невыразительна из-за большого количества малоамплитудных максимумов на монотонно возрастающей кривой. Данный метод исследования цикличности имеет довольно приближенный характер, что обусловлено рядом причин, например несовершенством и неоднозначностью процедур сглаживания периодограммы и выбора наклона тренда, контролирующих и определяющих выделение значимых максимумов. Кроме того, разрешающая способность этого метода ограничена выделением периода продолжительностью, не превышающей $1/4$ ряда исследования.

Спектр, полученный МЭМ, характеризуется наибольшей детальностью. Основные преимущества этого метода заключаются в следующем: а) детальное распределение спектра позволяет точно установить период максимумов, б) спектральная оценка очень выразительна, даже когда период становится сравним с длиной исходной последовательности, в) длиннопериодная составляющая шума полностью устранена, г) при оценке спектра по этому методу можно не производить предварительное сглаживание ряда наблюдений, так как в нем самом предусмотрена сглаживающая функция в виде авторегрессионной модели.

Нам представляется, что МЭМ обладает рядом преимуществ перед другими методами. Применение этого метода позволяет получать более детальные и достоверные результаты и — что немало важно — выделять периоды, длительностью равные длине исходной реализации (в случае выбора метода простого обзора числовых совокупностей возможно выделение периодов длительностью не более $1/4$ части ряда, метода Блекмана — Тьюки — не более $1/3$ ряда).

Сравнительный анализ результатов использования некоторых математических методов выявления скрытых периодичностей полностью подтверждает мнение А.Б.Вистелиуса, что метод обзора числовых совокупностей "не заменяет современных методов спектрального анализа, которыми и следует пользоваться в задачах геологии" /Вистелиус, 1975, с. 118/. Рекомендуется в указанных целях использовать один из методов спектрального анализа, а именно метод максимальной энтропии, имеющий ряд преимуществ перед другими методами и широко применяемый в последнее время в палеомагнитных исследованиях /Папаташвили, Ротанова, 1979; Апарин, Киселев, Гошко, 1984/.

1.3. Установление границ скрытых циклитов (периодолитов) в разрезе

Геологические тела обычно соседствуют, "соприкасаются", залегают друг на друге без какого-либо перерыва в пространстве (но не во времени). Именно поэтому в геологии проблема границ тел стоит очень остро, а понятие границы является одним из важнейших, исходных. Чтобы вычленить геологическое тело различных уровней структуры, необходимо сформулировать принципы, правила и признаки этой процедуры для каждого "объекта" /Трофимук, Карогодин, 1974/.

Наряду с седиментацией, имеющей квантово-волновой характер, выражающийся в циклитах и циклах, действовали другие факторы (химические, физические, биологические и т.д.) и протекали многочисленные процессы. Одни из них носили циклический, периодический характер, другие - квазипериодический, некоторые - случайный и нестационарный. Все процессы реконструируются по свойствам и признакам породных слоев и их ассоциаций. При этом нередко используются признаки тел более "низких" уровней: минералов, химических элементов.

В зависимости от выбранных признаков можно исследовать цикличность и периодичность самой различной природы: радиоактивных и палеомагнитных вариаций, смены биоты, палеоклиматов, тектонической активизации, накопления и минералообразования, разуплотнения и т.д. В представлении подавляющего большинства геологов (а тем более "геологов-математиков") все это - "гео-

логические циклы". Многие пытаются (и, к сожалению, безуспешно) совместить границы этих циклов. Однако в действительности это – проблема связи и соотношения (пересечения) циклов–систем различной природы. И решать ее необходимо исходя из принципа взаимосвязи и пересечения /Трофимук, Карогодин, Мовшович, 1983/. Существует седиментация, носящая, как уже сказано выше, квантово–волновой (циклический) характер. Ее тела–системы – это циклиты различного типа и ранга. Наряду с процессом седиментации происходило множество других, оставивших свои следы в слоях и их ассоциациях. Границы слоевых систем и систем другой природы могут совпадать, так как целостные системы обычно выделяются по многим признакам. Но часто они не совпадают. Несовпадение границ (временных, мощностных) систем различной природы скорее правило, чем исключение. Важно не "совмещать" эти границы, а установить их соотношение, положение одних относительно других. Выявив определенные закономерности и законы этого соотношения, можно, пользуясь принципом соответствия /Карогодин, 1983/, выделять седиментационные циклиты (в случае необходимости) по косвенным признакам.

Еще раз подчеркнем, что целостные системы слоевых ассоциаций – циклиты – выделяются по связи элементов во времени, а опознаваться могут по множеству признаков соответствия. В большинстве (если не во всех) рассмотренных выше методик этот момент, имеющий важное методическое и методологическое значения, опускался. После этого замечания рассмотрим возможность определения границ циклов по разрезу применительно к периодичности осадконакопления, отметив, что этот подход применим при исследовании периодичности различной природы.

Использование синусоид основных периодов для установления местоположения соответствующих периодолитов

Важный момент исследования породно–слоевых ассоциаций и выделения циклитов составляет установление в разрезе границ слоевых ассоциаций разного ранга. И.А.Одесский /1968, 1972,

1980/ для этой цели пользовался методом обзора числовых совокупностей (см. раздел I.2). Положение гармоник соответствующих периодов относительно шкалы геологического времени устанавливалось по матрицам каждого из выделенных "циклов" (см. табл. I). В них по вертикальным графам отыскивалось местоположение экстремумов, которые и определяли положение самой гармоник относительно точки начала отсчета (за начало отсчета принималось устье скважин). В связи с тем, что матричные строчные экстремумы могли иметь случайный разброс, для уточнения местоположения суммарных матричных экстремумов предварительно производилось сглаживание суммарного ряда с базой сглаживания, равной $\pi/3$. Но выделение циклитов, соответствующих периоду T, производится по этой методике довольно условно. Поэтому предлагается следующий способ определения границ циклитов. Он заложен в методике исследования циклически построенных толщ, предложенной А.Б.Вистеллусом (1961, 1963). Имеется в виду идея представления систематической составляющей процесса осадконакопления функцией синусоиды. Если в качестве исходной реализации, характеризующей этот процесс, выбрать изменение зернистости пород по разрезу, то систематическую компоненту, представленную синусоидой, можно интерпретировать для установления по разрезу границ циклитов соответствующего периода.

Метод системно-структурного анализа породно-слоевых ассоциаций базируется на классификации типов циклитов, предложенной А.А.Трофимуком, Ю.Н.Карогодиным /1974/. Из всего многообразия моделей нас интересует динамическая модель седиментационного цикла с прямообратной направленностью: процесс возникает и развивается довольно быстро, активно, а затем постепенно "затухает".

Достигнув фазы "покоя", "равновесия", он начинает развиваться в обратном направлении, вновь активизироваться и, достигнув определенной фазы, довольно резко прерывается. В природе подобные процессы весьма широко распространены, но не менее широко представлены и циклиты, соответствующие данной модели, получившей название "песочные часы". Рассмотренная модель отвечает полному (законченному) циклу осадконакопления.

В нижней части этого типа циклита устанавливается прогрессивная, а в верхней - регрессивная направленность изменения granulometricheskogo состава с постепенной ("плавной") сменой направ-

ленности. В строении соответствующего циклита четко прослеживается "волнообразная" смена грубозернистых пород тонкозернистыми и вновь грубозернистыми. Этот тип циклита, так же как синусоида, состоит из двух полупериодов: нижняя его часть (прогрессивная) сложена в основании самыми грубозернистыми породами, которые вверх по разрезу постепенно сменяются более тонкозернистыми, заканчивается же она наиболее тонкозернистыми породными слоями. Это равновесная точка (или участок) разреза, где происходит знакопеременное изменение в поведении зернистости: процесс изменения зернистости пород повторяется в обратном порядке — тонкозернистые породы сменяются все более грубыми и самые грубозернистые породные слои завершают циклит. Эта часть цикла соответствует регрессивной части циклита.

Такое распределение зернистости в циклите также синусоидально, поэтому напрашивается следующее сопоставление: максимальные значения систематической составляющей, представленной синусоидой, в первом приближении соответствуют наиболее грубозернистым участкам разреза, и поэтому они могут служить указателями границ скрытых циклитов (периодолитов)* соответствующего периода (началом его прогрессивной и финалом регрессивной части), а минимальные значения, которыми отмечены участки с наиболее тонкозернистыми породами, будут соответствовать точке перехода от прогрессивной части этого циклита к регрессивной. Таким образом, тело одного скрытого циклита (периодолита) теоретически выделяется между двумя соседними максимумами синусоиды.

Учитывая, что геологические разрезы представляют собой результат наложения друг на друга циклов разной продолжительности и амплитуд, можно для выделенных периодов установить амплитуды и фазы соответствующих синусоид, а по ним определить местоположение скрытых циклитов (периодолитов) соответствующих периодов по разрезу.

* Термин "скрытый циклит", используемый в данной работе, еще неустоявшийся. В дальнейшем по тексту наряду с ним употребляется термин "периодолит", предложенный М.А. Левчуком и имеющий то же смысловое значение.

Определение амплитуды и начальной фазы
синусоиды доминирующего периода

Функция синусоиды будет определена, если для заданного периода T установить остальные ее два параметра – амплитуду A_T и начальную фазу φ_T . Процедура их определения состоит в том, что ряд наблюдений делится на отрезки по T величин в каждом (остаток отбрасывается). Затем, суммируя первые члены каждого отрезка, вторые члены и т.д. до последнего T -го, получают новый ряд, состоящий из T сумм. Используя значения этого ряда x_t , вычисляют косинусные a_T и синусные b_T коэффициенты гармоники T -го порядка в разложении Фурье:

$$a_T = \frac{2}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \left(\frac{x_t}{m} \right) \cos \frac{2\pi t}{T},$$

$$b_T = \frac{2}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \left(\frac{x_t}{m} \right) \sin \frac{2\pi t}{T},$$
(I.28)

где m – число полученных отрезков в исходном ряду, T – период, $2 \leq T \leq N/3$, N – число наблюдений в исследуемом ряду.

Амплитуда A_T и начальная фаза φ_T для периода T (элементы разложения по синусам) определяются следующими равенствами

$$A_T = \sqrt{a_T^2 + b_T^2}; \quad \text{tg } \varphi_T = \frac{a_T}{b_T}.$$
(I.29)

Начальная фаза рассчитывается следующим образом /Серебрянников, 1948/. Сначала вычисляется угол ψ_T

$$\psi_T = \text{arctg} \left| \frac{a_T}{b_T} \right|,$$
(I.30)

а затем определяется угол φ_T в зависимости от знака a_T и b_T на основе следующей таблички:

a_T	b_T	φ_T
+	+	$\varphi_T = \Psi_T$
+	-	$\varphi_T = 180^\circ - \Psi_T$
-	-	$\varphi_T = 180^\circ + \Psi_T$
-	+	$\varphi_T = 360^\circ - \Psi_T$

Расчет синусоиды с учетом найденных A_T и φ_T производится по выражению:

$$f(y) = \bar{y} + A_T \sin(\omega x_i + \varphi_T), \quad (I.3I)$$

где \bar{y} - среднее значение сглаженного ряда,

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i,$$

y_i - i -ое значение сглаженного ряда, ω - угловая частота, $\omega = 360^\circ/T$, x_i - номерная последовательность точек исходного ряда ($i = 1, 2, \dots, N$).

Пример привязки к геологическому разрезу выявленных временных периодов. С учетом того, что методом максимальной энтропии в исследуемом ряду кодовых значений пород ирских отложений было четко выделено три периода: 4,2; 9,9 и 43,8 млн. лет и это подтверждено другими методами, найдем по разрезу местоположение скрытых циклитов (периодолитов), соответствующих данным периодам. Для этого, следуя предложенной методике, вычислим по формулам (I.29, I.30) амплитуды и начальные фазы указанных периодов. Для периода $T = 43,8$ млн. лет амплитуда составила $A_T = 6,79$ кодовых единиц, начальная фаза $\varphi_T = 347,24^\circ$ и, в соответствии с формулой (I.3I), уравнение синусоиды для этого периода запишется в виде:

$$y_i = 2I,27 + 6,79 \sin(0,82x_i - 347,24);$$

для $T = 9,9$ млн. лет $A_T = 2,1$ и $\varphi_T = 175^\circ$:

$$\Delta_{1i} = 0,00I + 2,1 \cdot \sin(3,6x_i - 175);$$

для $T = 4,2$ млн. лет $A_T = 3,25$ и $\varphi_T = 25,52^\circ$:

$$\Delta_{21} = 0,136 + 3,25 \sin(8,5 x_1 - 25,52'),$$

где Δ_1 и Δ_2 соответственно первые и вторые остаточные разности, получаемые последовательным вычитанием из ряда наблюдений найденной закономерной составляющей и используемые для исследования их на периодичность.

После того как найдено уравнение синусоиды, она отрисовывается по разделу сначала в условном масштабе с равномерным шагом по времени, а затем в масштабе мощности. Процедура перевода из одного масштаба в другой становится понятной из рассмотрения табл. 2, в которой приводится фрагмент исходного ряда, состоящий из 24 точек, приходящихся на отложения рзта, подстилающих кру в изучаемом разрезе. В исходном ряду наблюдений присутствуют 438 точек. Синусоида любого из выявленных периодов описывается тем же количеством дискретных равноотстоящих значений с шагом по времени $\Delta t = 100$ тыс. лет. Мощности же пород между этими равноотстоящими точками различны, так как зависят от скорости осадконакопления. Понятно, что за один и тот же промежуток времени Δt грубозернистых пород отложится гораздо больше, чем тонкозернистых. Рассчитав в каждой дискретной точке исходного ряда накопленные мощности и время, а затем расположив их напротив соответствующего им значения синусоиды, мы определим ее положение по разрезу в том и другом масштабе (табл. 2). Теперь в зависимости от того, в каком масштабе будет строиться синусоида, по вертикальной оси откладываются значения времени (или мощности), а по горизонтальной — соответствующие им значения синусоиды. На рис. 8 для периода $T = 43,8$ млн. лет приведены синусоиды, построенные графопостроителем в разных масштабах. На рис. 9 графики синусоид для периодов $T = 43,8$; $9,9$ и $4,2$ млн. лет скомпонованы в масштабе времени, а на рис. 10 — в масштабе мощности. Хочется обратить внимание на высокую информативность первой гармоники, описывающей период $T = 43,8$ млн. лет. Четко выявилась основная тенденция изменения зернистости в разрезе, и этим доказывается, что самые тонкие породы приходятся на ту часть периода, которая отвечает байосскому времени, выше и ниже отмечается постепенное огрубление обломочного материала. В соответствии с предлагаемой

Таблица 2

Соответствие значений синусоиды для временного
и мощностного масштаба по разрезу

Номер точки	Шаг по мощности Δm , М	Суммарная мощность $\Sigma \Delta m$, М	Шаг по времени Δt , тыс. лет	Суммарное время $\Sigma \Delta t$, тыс. лет	Значение синусоиды для $T = 43,8$ млн. лет.
I	1,5	1,5	100	100	23,11
2	2,0	3,5	"-	200	28,01
3	2,0	5,5	"-	300	31,46
4	2,0	7,5	"-	400	33,03
5	2,0	9,5	"-	500	32,89
6	2,0	11,5	"-	600	31,54
7	2,52	14,02	"-	700	29,45
8	2,52	16,54	"-	800	26,86
9	4,26	20,8	"-	900	23,96
10	5,3	26,1	"-	1000	21,1
11	1,7	27,8	"-	1100	18,84
12	1,7	29,5	"-	1200	17,69
13	1,7	31,2	"-	1300	17,76
14	1,7	32,9	"-	1400	18,57
15	1,7	34,6	"-	1500	19,39
16	1,74	36,34	"-	1600	19,68
17	1,63	37,97	"-	1700	19,4
18	1,63	39,6	"-	1800	18,91
19	1,65	41,25	"-	1900	18,52
20	1,65	42,9	"-	2000	18,16
21	1,65	44,55	"-	2100	17,43
22	1,65	46,2	"-	2200	16,12
23	1,65	47,8	"-	2300	14,62
24	1,65	49,55	"-	2400	13,85

методикой определения границ циклитов по максимальным значениям синусоиды можно прийти к такому выводу: для периода в 43,8 млн. лет по исследуемому разрезу крупного ранга скрытый циклит (периодолит) полностью не фиксируется. Здесь представлена в основ-

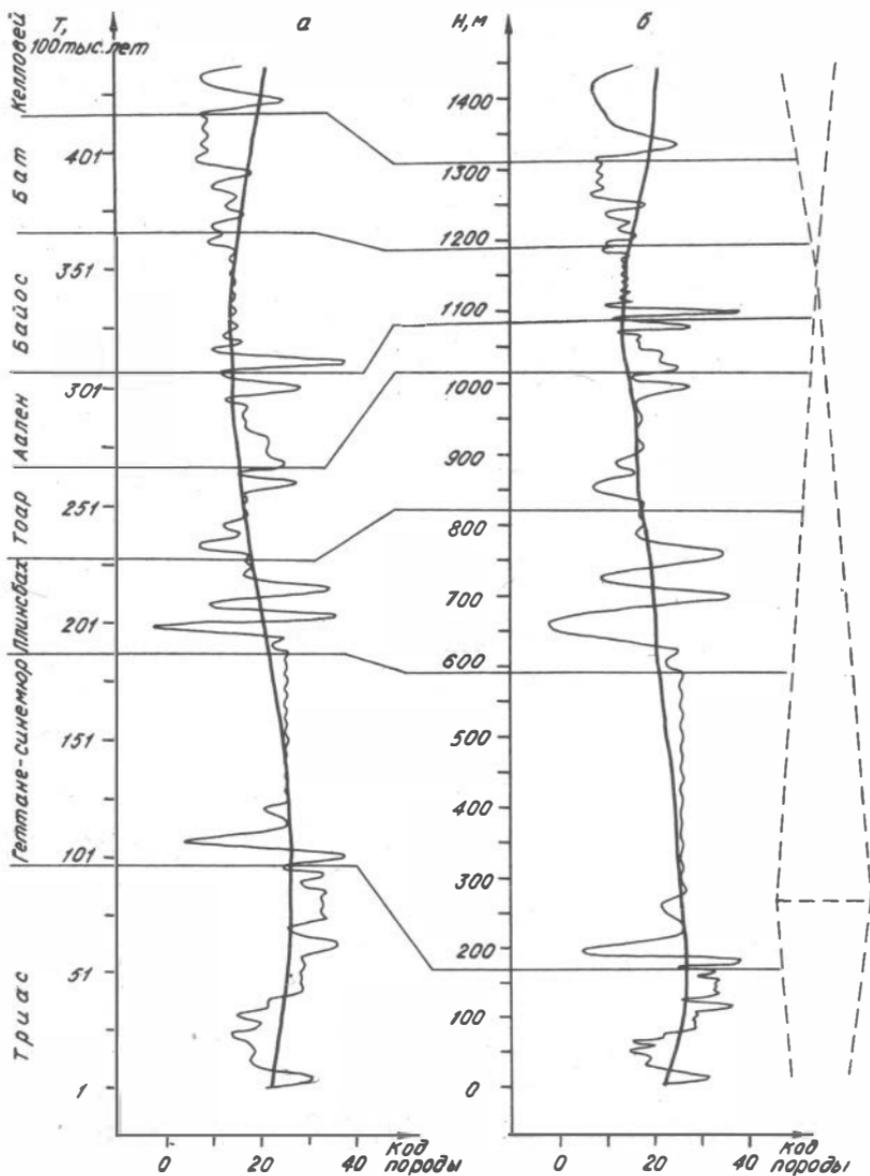


Рис. 8. Выделение по разрезу скрытого цикла, соответствующего периодичности, равной $T = 43,8$ млн. лет

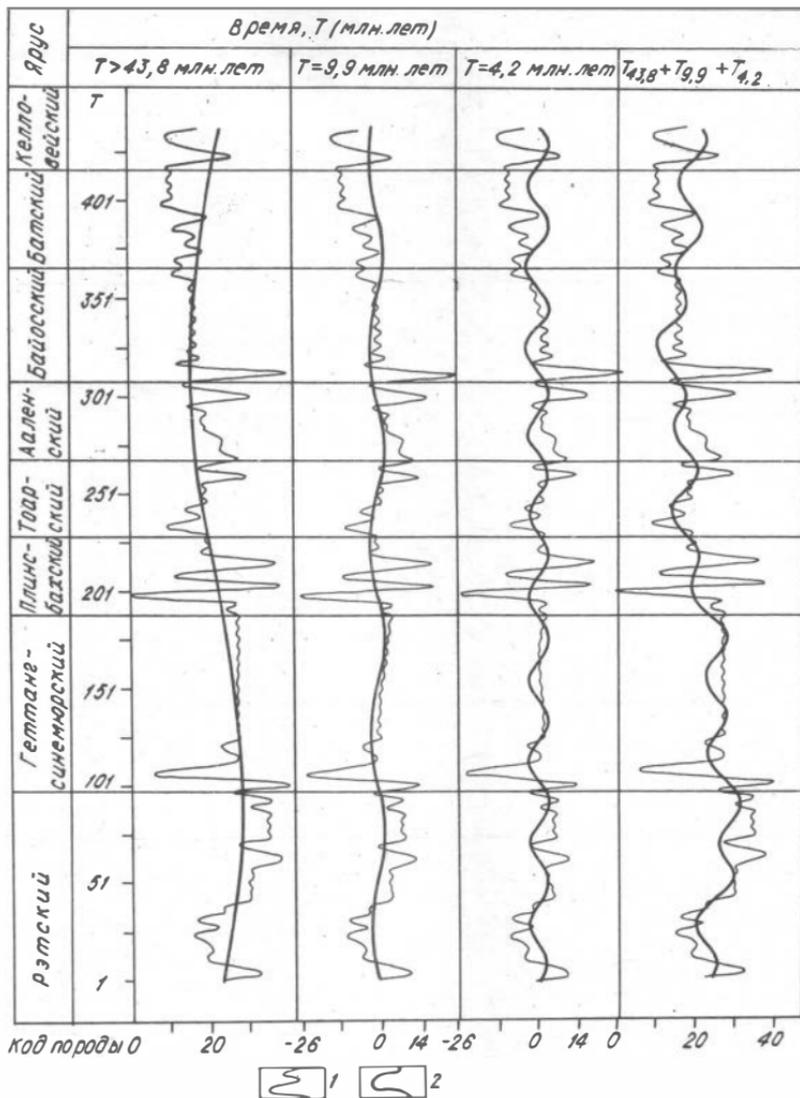
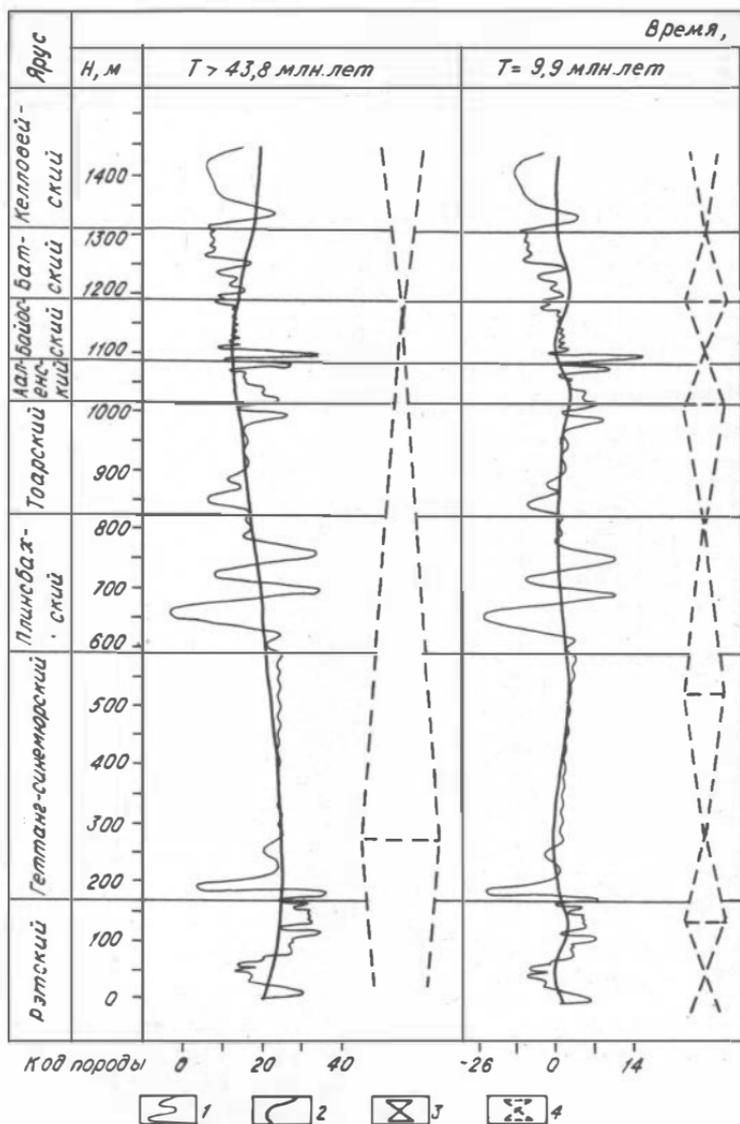


Рис. 9. Гармоники доминирующих периодов, приведенные к масштабу времени
 1 - исходный ряд; 2 - функция синусоиды



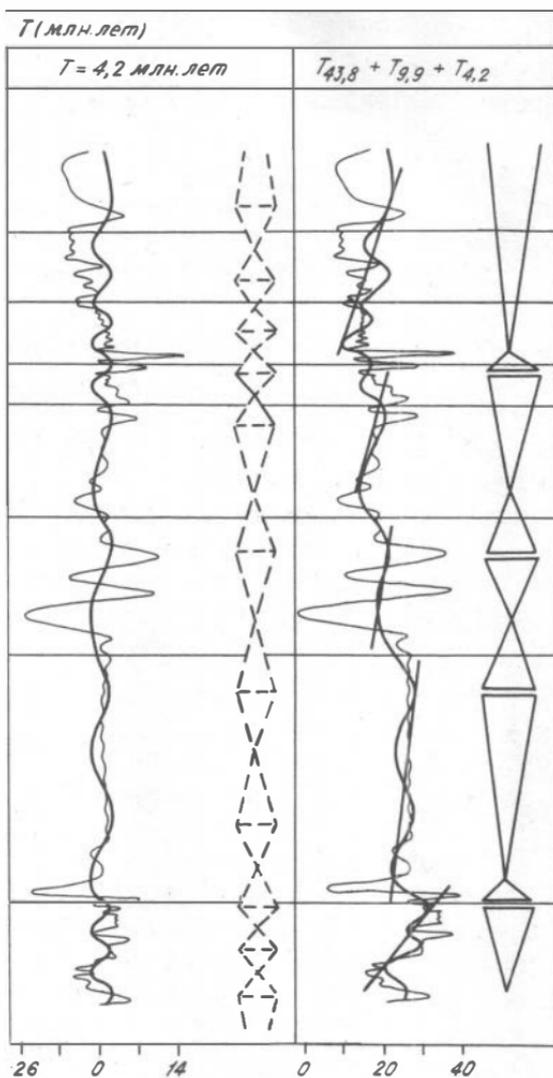


Рис. 10. Гармоники доминирующих периодов, приведенные к масштабу мощности, и определение по ним местоположений в разрезе соответствующих циклов и скрытых циклитов
 1 - исходный ряд, 2 - функция синусоиды,
 3 - регоциклиты, 4 - скрытые циклиты

ном и в значительной мере нижняя, прогрессивная часть проредциклита ("песочные часы"). В его основании лежат нижнеюрские, геттанг-синемюрские образования, а вверху прогрессивной части - байосские.

Следует отметить, что в данном разрезе либо отсутствуют, либо очень фрагментарно представлены оксфорд-кимериджские образования. Поэтому не исключено, что "прогресс" будет наблюдаться и в других разрезах Енисей-Хатанги и Западной Сибири, выше, вплоть до волжских слоев.

Судя по всему, график характеризует большую нижнюю часть (половину) юрско-неокомского нексоциклита.

Периодам осадконакопления в 9,9 млн. лет в разрезе соответствуют пять скрытых циклитов (периодолитов). В отложениях триаса (рэт) намечается один такой циклит (или его часть), а в отложениях юры (до келловоя) - четыре полных циклита: 1) геттанг-синемюрский; 2) синемюр-плинсбах-тоарский; 3) аален-байосский и 4) бат-келловейский (см. рис. 10). При этом необходимо помнить условность возрастных датировок, особенно для нижней юры.

Выделяются и еще более мелкие скрытые циклиты (периодолиты), соответствующие периоду в 4,2 млн. лет.

Рассмотренные периоды были установлены с 95 %-ным уровнем значимости. Более мелкая периодичность (имеются в виду периоды, равные 1,1; 1,4 и 3 млн. лет) хотя и намечается, но здесь не рассматривается, так как имеет невысокую значимость.

Для того чтобы удостовериться в реальности трех систематических составляющих с периодами 43,8 млн. лет, 9,9 млн. лет и 4,2 млн. лет, была предпринята процедура суммирования соответствующих синусоид, обычно завершающая подобные исследования. На рис. 10 приводится суммарная кривая указанных трех синусоид. Она достаточно хорошо повторяет исходный ряд наблюдений. Следовательно, в период формирования юрских отложений воздействие трех факторов обусловило эту периодичность.

Теперь кратко остановимся на возможности интерпретации амплитуды синусоиды. Как известно, амплитуда представляет собой максимальное отклонение колеблющейся величины от ее положения равновесия. Амплитуда каждого периода, как отмечал

А.Б.Вистеллус, несет в себе информацию о "размахе" колебаний в составе слоев, входящих в исследуемый ряд. Очевидно, что для характеристики процесса осадконакопления важно знать, каково разнообразие пород, вызываемое систематической компонентой процесса (например, вызывает ли она колебания состава от песков до алевролитов или от конгломератов до глин). Исходя из величин амплитуд для выделенных периодов, можно сделать следующий вывод: наибольшую амплитуду имеет период в 43,8 млн. лет^ж ($A = 6,79$), т.е. учитывая, что среднее значение сглаженного ряда наблюдений составляет 21,3 кодовых единиц, амплитуда колебаний в составе слоев составила 14,5–28 (от алевролита глинистого до песчаника мелкозернистого). Наименьшую амплитуду имеет период в 9,9 млн. лет ($A = 2,1$, а размах, соответственно, 19–23) и среднее значение амплитуды ($A = 3,35$ и размах 18–24,5) – период в 4,2 млн. лет. Компоненты двух последних периодов вызвали колебания состава пород только внутри алевролитовой фракции. Малые амплитуды, возможно, объясняются тем, что исследуемый разрез представлен в основном осадочным материалом – глинами и алевролитами.

Алгоритм определения границ скрытых циклитов (периодолитов) по разрезу

С учетом сказанного выявление скрытой периодичности и положения в разрезе соответствующих ей циклитов предлагается производить по схеме. Прежде всего, как видно из схемы, составляется исходный ряд наблюдений (блок I). Чтобы связать процесс осадконакопления со временем его образования, данные о вещественном составе пород по геологическому разрезу выбираются с равномерным шагом по времени. Это позволяет определять систематические временные составляющие для изучаемого разреза. Затем

ж Точнее, видимо, говорить полупериод (Ю.К.).

Схема последовательности процедур выявления скрытой периодичности и цикличности осадконакопления

1	2	3	4	5	6	7
Подготовка исходного ряда наблюдений с равномерным шагом по времени (или мощности)	Выявление скрытых периодов T спектральным анализом (МЭМ)	Определение параметров синусоид (амплитуд A_T и начальных фаз φ_T) для доминирующих периодов T (разложение Фурье)	Расчет синусоид по найденным A_T и φ_T для доминирующих периодов T	Аппроксимация фактических данных по разрезу с помощью синусоид с периодами T	Выделение границ скрытых циклитов (периодов), соответствующих периоду T , по максимальным значениям синусоиды	Суммирование доминирующих периодических составляющих по разрезу и выделение циклитов

ряд исследуется на присутствие в нем скрытых периодов. Для их выделения рекомендуется применять метод максимальной энтропии (блок 2). После того как в исследуемой совокупности будут установлены значимые периоды T , можно перейти к определению их амплитуд A_T и начальных фаз φ_T (блок 3). Последующей подстановкой найденных значений A_T и φ_T в уравнение синусоиды вычисляется соответствующая синусоида. Вначале находится ее положение по разрезу в условном (временном) масштабе, а затем для удобства интерпретации — в масштабе мощности (блок 4). Тем самым колебания синусоиды периода T будут привязаны к значениям исследуемого параметра (например, зернистости пород) в соответствии с положением отсчетов по разрезу. После этого производится интерпретация максимумов и минимумов синусоиды (блок 5). Поскольку максимальные ее значения соответствуют наиболее грубозернистым частям разреза, с определенной долей условности можно считать эти участки началом прогрессивной части циклита и одновременно границей между двумя скрытыми циклитами (периодолитами), а минимальные значения, отражающие наиболее тонкие породы в разрезе, — финалом прогрессивной и началом регрессивной частей циклита.

Для каждого из выделенных периодов находится своя, соответствующая ему синусоида, которая интерпретируется вышеуказанным способом. Следует отметить, что синусоида, отражающая максимальный доминирующий период, отрисовывается на фоне кривой исходного ряда наблюдений, а синусоида каждого последующего (по убыванию) доминирующего периода — на фоне соответствующей остаточной кривой. Таким образом, из исходного ряда наблюдений будут последовательно выделены все основные зависимости. Выбранный способ графического представления адекватен вычислительной процедуре гармонического анализа и отличается хорошей наглядностью. Завершающим этапом исследования периодичности и цикличности служит суммирование систематических составляющих. Их сумма представляет собой гармоническую модель процесса осадконакопления (см. схему I).

Предлагаемая методика нахождения в разрезе границ скрытых циклитов (периодолитов) определенного периода базируется на положениях, высказанных А.Б.Вистелиусом, который считал, что процессы осадконакопления можно представить в виде суммы гармонических составляющих и исследовать каждую составляющую отдельно. И.А.Одесский в своих работах также использовал эти идеи. Одна-

ко для выявления скрытой периодичности он применял метод обзора числовой совокупности, а геологический разрез представлял в шкале абсолютного времени. Выделение циклитов, соответствующих периоду T , производилось им довольно приближенно.

В нашей разработке в качестве аппарата, выявляющего скрытую периодичность в процессе осадконакопления, применяется иной математический метод, а именно – метод максимальной энтропии. Кроме того, в нее входит определение амплитуды и начальной фазы синусоиды, с последующей интерпретацией этой функции для определения по разрезу границ скрытых циклитов разных периодов. Учитывая, что геологические разрезы представляют собой результат наложения друг на друга циклов разной продолжительности и амплитуд, можно – после предварительного выделения соответствующих периодов – установить их амплитуды и фазы, а затем, используя в качестве исследуемого параметра зернистость пород по разрезу, – границы скрытых циклитов (периодолитов) разного ранга. При изучении трансгрессивно-регрессивных циклов во времени эта методика позволит существенно дополнить количественными оценками результаты качественного системно-структурного анализа седиментационной цикличности.

Такой подход к изучению периодичности и цикличности заключается в себе большие возможности, однако следует отметить трудности подготовки исходных данных с учетом требований к ним, предъявляемым методами спектрального анализа. На качество спектрального анализа влияет ряд факторов, и в том числе точность регистрации процесса, длительность наблюдения, частота следования дискретных отсчетов, свойства самого процесса и другие. Но главное – то, что эти математические методы анализа временных рядов применимы лишь при наличии наблюдений с равномерным шагом во времени (если анализируется временной ряд). В реальной действительности это условие постоянно нарушается, так как трудно найти разрез без перерывов в осадконакоплении, и те отсчеты времени, которые считаем выдержанными, на самом деле таковыми не являются. Поэтому необходима определенная методика подготовки исходного ряда, которая позволяла бы так учитывать эти перерывы, чтобы получать в итоге достоверные и неискаженные результаты. Кроме того, необходим учет скоростей накопления осадков, так как за один и тот же промежуток времени могут быть сформированы толщи разной мощности в зави-

симости от зернистости пород: скорости осаднения грубых и тонких пород резко отличается между собой. Немаловажен выбор системы кодирования зернистости пород в соответствии с динамической средой седиментации.

Достоверность результатов по предлагаемой методике значительно повысится при учете указанных факторов, поэтому использование математических методов исследования скрытой периодичности и цикличности обязательно должна предшествовать геологическая характеристика изучаемых разрезов.

Использование математических моделей существенно расширяет возможности исследования циклически построенных толщ и позволяет на базе количественных мер вскрыть и описать общие и специфические черты процесса осадконакопления.

Итак, с помощью нашей методики выявления скрытой периодичности и определения границ скрытых циклитов (периодолитов) соответствующего периода достигается следующее:

а) стратиграфическая корреляция геологических разрезов по анализу начальных фаз, восстановление последовательности захоронения той или иной стратиграфической поверхности;

б) выявление закономерностей изменения цикличности различного порядка по простиранию;

в) идентификация циклов одного порядка (системы) и отделение их от цикличности, относящейся к другому периоду (или системе); определение продолжительности циклов;

г) выявление приуроченности залежей полезных ископаемых к определенным частям циклитов высокого ранга;

д) определение местоположения газо- и нефтегенерирующих свит в цикле осадконакопления*;

е) понимание цикличности нефтеобразования.

Исследование периодичности и цикличности с применением рекомендуемых математических методов может проводиться по геологическому разрезу, представленному как в масштабе времени, так и в масштабе мощности; в качестве исходных данных могут использоваться любые параметры осадочной толщи, в том числе и данные геофизических исследований скважин.

* По мнению Ю.Н.Карогодина /1974/, они тяготеют к началу цикла.

Сопоставление выявленной периодичности с данными системно-структурного анализа породно-слоевых ассоциаций

Естественно, что сопоставление явной цикличности, проявляемой в геологическом разрезе, фиксируемой визуально, и элементами выявленной скрытой цикличности того же разреза некорректно: это подобно сравнению суммы (конечного значения) с одним из ее слагаемых (промежуточным значением). Совпадение явной и скрытой периодичности будет иметь место в случае, если исследуемый разрез (или часть его) отражает колебание динамической системы только с одним доминирующим периодом либо если выделенные периоды по своей длительности кратны между собой: каждый следующий по длительности период целое число раз укладывается в предыдущий.

Анализ скрытой периодичности, проведенный на конкретном материале, показал, что геологический разрез имеет сложную периодичность. Ее отражение в распределении вещественного состава пород по разрезу свидетельствует о колебательном характере изменений обстановок седиментации. В нашем случае оказалось, что выявленные временные периоды не кратны друг другу. По мнению многих исследователей /Хайн, 1964; Одесский, 1972 и др./, это, вероятно, связано с тем, что они вызваны разными и самостоятельными по своей природе геологическими факторами. Геологический же разрез является продуктом влияния разных по своей периодичности геологических процессов. Поэтому при установлении границ явных циклитов, должны рассматривать только ту кривую, которая образуется суммой разноранговых синусоид.

Системно-структурным анализом породно-слоевых ассоциаций разреза юрских отложений района Анабарской губы установлено, что регоциклиты имеют прогрессивно-регрессивную структуру изменения литологического состава пород. Таким образом, полученная математическим путем синусоида по своей структуре аналогична структуре регоциклитов. САП установлено также, что границы регоциклитов чаще всего приурочены к максимумам величины зернистости терригенных пород. Эта выявленная закономерность дает возможность устанавливать (определять) границы регоциклитов на суммарной синусоиде, полученной в результате математической обработки геологического разреза.

Сопоставление результатов САПА и математической обработки одного и того же разреза дает возможность оценить, насколько хорошо они коррелируемы. Как показывает анализ, наиболее согласованно коррелируется структура регоциклитов с суммарной синусоидой, на которой хорошо выражены нижнегеттангский, плинсбахский, тоарский и байосский минимумы, которые соответствуют минимумам в модели регоциклитов (см. рис. 10).

В нашу задачу не входила однозначная интерпретация данных, полученных при математической обработке геологических материалов. Это обусловлено тем, что на исследуемом геологическом разрезе (район Анабарской губы) не вполне четко определены границы стратиграфических подразделений (не расчленены геттангский и синемюрский ярусы, условно установлена нижняя граница плинсбахского яруса), не все отложения удалось описать (в плинсбахской, байосской толщах), к тому же не в полном объеме представлен келловейский ярус. Каждый из перечисленных параметров может внести свои коррективы и повлиять на результат математического выявления скрытой периодичности. Для аргументированных геологических выводов необходимо изучение ряда разрезов, на которых должна быть получена достоверная сходимость результатов. Однако полученные предварительные данные обнадеживают нас в том, что, пользуясь математическим аппаратом при расчленении геологического разреза на циклиты, можно решать задачу корреляции отложений как наиболее важную, интересную, необходимую для стратиграфии и, в конечном счете, для прогноза полезных ископаемых.

Сравнивая полученные результаты с данными визуальных, качественных исследований седиментационной цикличности, можно сделать следующие выводы.

Выше уже отмечалась теоретическая и практическая важность выделения регоциклитов, время формирования которых примерно $8 - 10(\pm 2)$ млн. лет. С такой периодичностью (9,9 млн. лет) методом максимальной энтропии достаточно обоснованно выделяются скрытые циклиты. Получаются цифры того же порядка при использовании методов дисперсионного анализа (10,95 млн. лет), Блекмана - Тьжки (10,8 млн. лет) и обзора числовых совокупностей (9,9 млн. лет). Видимо, это не случайное совпадение. Отсюда следует вывод: регоциклиты (и циклы) представляют собой явление, фиксируемое любыми методами (качественно-визуальными и количественными).

Исследователи /Хаин, 1964; Наливкин, 1962 и др./ выделяют циклы в 40–45 млн. лет. В то же время на базе САПА седиментационные циклы (и циклиты) с такой периодичностью не выделяются. Сходная ситуация, как нам представляется, в биостратиграфии (и геологии): крупный биоцикл, биопериод всеми принят за "целое" и назван "геологической системой", "геологическим периодом". Все ныне выделяемые "геологические системы" (кроме меловой), с нашей точки зрения, – это полусистемы, а некоторые (палеогеновая, неогеновая) – четвертая часть системы. Вероятно, недалеко то время, когда этот вопрос будет пересмотрен и наряду с биологическими полусистемами будут выделены целостные системы (литемы).

И в том, и в другом случаях часть (половина) принимается за целое, возможно в связи с достаточно яркой выраженностью частей, противоположностей целого.

Несмотря на отмеченные сложности, результаты выявления скрытых периодов в процессе осадконакопления и определения соответствующих им скрытых циклитов (периодолитов) по разрезу ирских отложений Анабарской губы особенно ценны тем, что они свидетельствуют о применимости предлагаемой методики для исследования монотонных толщ, на которых визуальное выделение циклитов весьма затруднено.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛИЧНОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ
ПО ВЕЩЕСТВЕННЫМ И СТРУКТУРНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЦИКЛИТОВ

Системно-структурный анализ породно-слоевых ассоциаций основывается на выявлении в геологическом разрезе литологических циклокомплексов (сокращенно - циклитов), т.е. систем слоев, связанных между собой во времени и пространстве и соответствующих седиментационному циклу. Выделение циклокомплексов позволяет решать задачу расчленения и корреляции разрезов. Метод полевого выделения циклитов основывается на использовании морфоструктурных признаков и требует исполнения следующих четырех требований /Трофимук, Кародин, 1974, 1977; Кародин, 1976, 1980 / :

- 1) направленность изменения существенного признака;
- 2) непрерывность изменения существенного признака (литолого-гранулометрического и др.), по которому выделяется циклит;
- 3) учет характера границ между слоями;
- 4) обязательность двуединого (и кратного двум) строения.

Характер направленности изменения гранулометрического состава есть признак, который позволяет непосредственно в поле выделить природные естественные слоевые системы различного класса. Разрыв функции изменения литолого-гранулометрического состава рассматривается как граница между системами, между циклитами.

При решении целого ряда теоретических и практических задач более важны циклиты высшего, по сравнению с элементарными, ранга, т.е. регоциклиты и нексоциклиты.

Принципы выделения циклитов, регоциклитов и нексоциклитов одни и те же. Только в первом случае указанные четыре правила рассматриваются по отношению к слоям как элементам циклита, во втором - к самим циклитам, которые на этом уровне сами являются элементами регоциклита, в третьем - к регоциклитам, которые рассматриваются как элементы нексоциклита. Эта методика выделяет циклиты на качественном уровне. Количественные подходы к изучению слоевых ассоциаций, безусловно, должны входить в познавательный цикл. Найти и применить их к вычленению элементарных и других типов циклитов - одна из первоочередных задач исследователя. Поэтому крайне необходимы методы, позволяющие решать задачу вычленения и определения типа циклита. К таким методам можно от-

нести выделение элементарных осадочных комплексов, а также комплексов более высокого ранга, по анализу изменения величины средней зернистости пород (ВЗП), предложенное М.А.Левчуком /Левчук, 1976/.

2.1. Выделение циклитов по величине зернистости пород

Для арифметизации выражения величины зернистости пород М.А.Левчуком /1976/ используются данные гранулометрического состава, преобразованные по формуле:

$$\text{ВЗП} = 100 \sum_{i=1}^n F_i S_i, \quad (2.1)$$

где n - количество выделяемых фракций; F_i - наибольшее предельное значение i -ой фракции, мм; S_i - содержание i -ой фракции, %.

Выбор параметра величины суммарной зернистости пород в качестве главного признака для выделения элементарных циклокомплексов в разрезе логически оправдан, так как цикличность осадконакопления находит свое отражение в изменении литологического состава пород (величине зернистости). Поэтому направленное и непрерывное изменение величины зернистости обломочного материала рассматривается как основной признак, по которому выделяются элементарные циклиты в терригенных отложениях. Предлагаемым методом обработки результатов гранулометрического состава пород резкие литологические границы фиксируются в виде разрывов кривой, а постепенные переходы между ними - плавной кривой. Такой графический способ представления поведения ВЗП по разрезу дает возможность подойти к количественно обоснованному выбору границ вместо существующего качественного подхода, основанного на таких оценках границы, как "постепенная" или "резкая", используемых при выделении циклитов методом САПА. На рис. II (а) приводится пример выделения по ВЗП элементарных циклитов указанным методом. Этот же метод дает возможность выделять в геологических разрезах циклиты более высокого ранга. Это достигается путем сглаживания кривых элементарных циклитов. Метод сглаживания состоит в подсчете площадей под кривой ВЗП по разрезу (рис. II, б), с последовательным укрупнением шага по мощности. Алгоритм сглаживания состоит из следующих процедур.

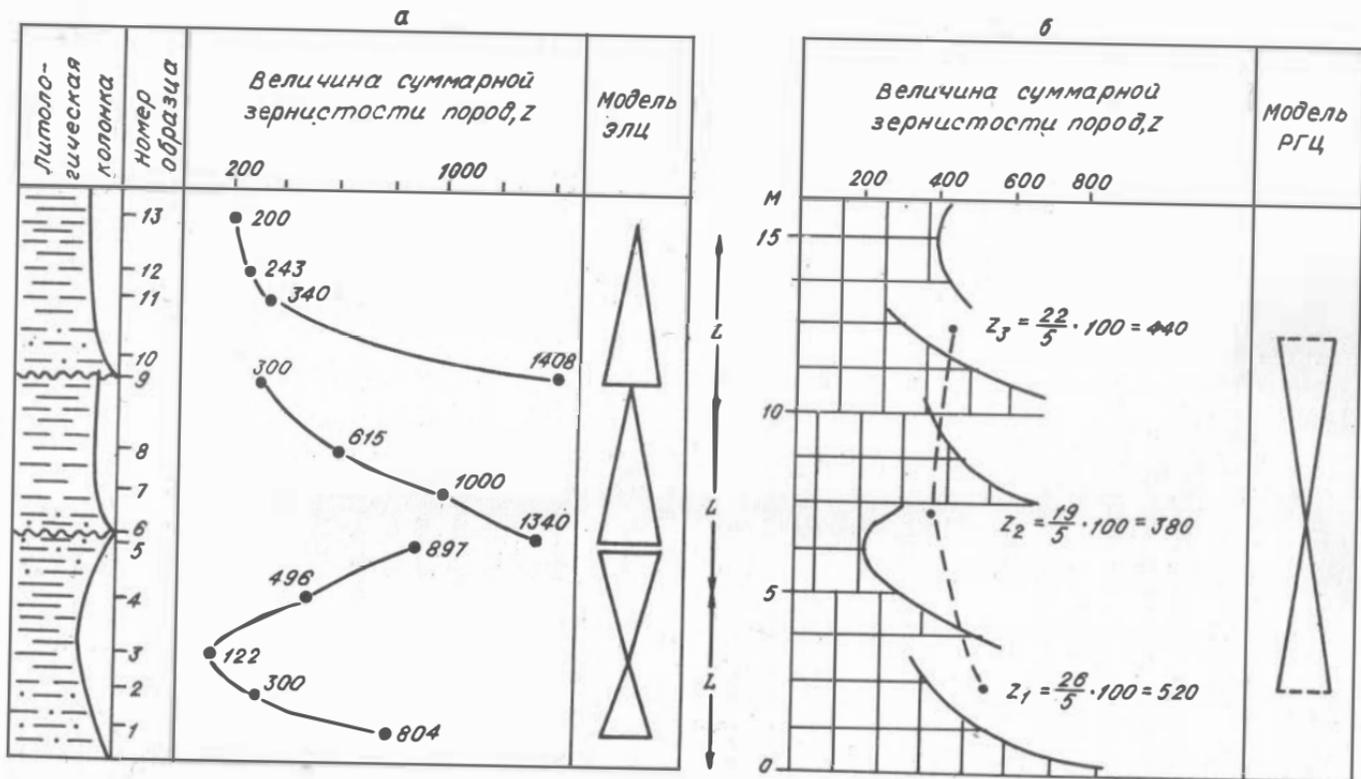


Рис. II. Выделение элементарных циклитов по величине суммарной зернистости пород (а) и схема сглаживания кривых элементарных циклитов (б) / по М.А.Левчуку, 1976, 1977 /

1. Данные гранулометрического анализа по разрезу переводятся в величину зернистости пород по формуле (2.1). При отсутствии данных гранулометрического анализа ВЗП в грубом приближении можно оценить и по шлифам пород.

2. Весь геологический разрез разбивается по мощности отложений на отрезки с равным шагом L (первоначальное значение $L = M_{\min}$, где M_{\min} - минимальная мощность элементарного цикла, во всем разрезе).

3. В соответствии с шагом L по всему разрезу подсчитываются площади S_i под кривой ВЗП:

$$S_i = \sum_{j=1}^m l_j \text{ВЗП}_j, \quad (2.2)$$

где m - количество породных слоев, составляющих шаг $L = \sum_{j=1}^m l_j$,

l_j - мощность j -го слоя, ВЗП_j - величина зернистости пород j -го слоя.

4. Для площадей S_i высчитывается средняя величина суммарной зернистости пород Z_i :

$$Z_i = \frac{S_i}{L}. \quad (2.3)$$

Значение Z_i относится к середине i -го интервала.

5. Шаг увеличивается на величину ΔL и расчет повторяется с новым шагом $L = L + \Delta L$, начиная с пункта 3. Увеличение шага ограничивается величиной, которая определяется решаемой задачей.

6. По полученным значениям Z_i строится кривая, максимумы и минимумы которой отражают более общие изменения грубозернистости пород в разрезе. Выделение регоциклитов проиллюстрировано на примере юрских отложений западного берега Анабарской губы. В этом разрезе отсутствуют или очень слабо проявляются циклиты, так как в нем преобладают глины и алевроиты, т.е. диапазон дифференциации пород невелик. В разрезе ниже-среднеюрских отложений выделяются четыре регоциклита: геттанг-синемур-нижнеплинсбахский, верхнеплинсбахский, тоар-ааленский и байос-батский. Кривые изменения ВЗП подобны друг другу во всех четырех регоциклитах: начально-регрессивные фазы не имеют существенных колебаний по ВЗП (более однородные и монотонные отложения), а финально-регрессивные фазы чаще представлены "пилообразным" изменением зернистости пород (широкий

породный диапазон и частое переслаивание). По соотношению мощностей составных частей регочиклиты асимметричны: отношение нижних частей к верхним составляет $1/9 - 1/10$.

2.2. Статистическая обработка данных гранулометрического состава пород

Корреляционный анализ коэффициентов, усредняющих гранулометрический состав и сортированность пород

Данные гранулометрического состава терригенных пород представляют собой тот исходный материал, по которому определяются различные коэффициенты, используемые при изучении процесса осадконакопления. Наиболее широко при анализе цикличности применяются коэффициенты, отражающие сортированность осадка и медианный размер зерна. Изменение величины зернистости и сортированности осадка по разрезу позволяет выделять циклиты разного ранга. Анализ этих показателей помогает установить начальные и завершающие фазы седиментационных циклов. Величина же корреляционной взаимосвязи параметров, вероятнее всего, может рассматриваться как количественная характеристика циклитов того или иного возраста или бассейна.

Учитывая важность перечисленных коэффициентов и широкое использование их в геологических исследованиях, мы провели статистическую обработку большого числа (более пятисот) анализов гранулометрического состава пород юрского возраста Енисей-Хатангского района для выявления корреляционных связей между различными коэффициентами. Основные результаты были опубликованы /Левчук, Букреева, 1984/. Здесь же будут рассмотрены корреляционные связи между следующими коэффициентами: медианным размером зерна M_d , величиной зернистости пород (ВЗП), коэффициентом сортированности, по Траску, S_0 и мерой сортированности осадка, определяемой нормированной энтропией H_r^* /Миллер и Кан, 1965; Романовский, 1968/. Дополнительно исследуется еще один параметр - мак-

* Понятие относительной энтропии, представляющее собой отношение наблюдаемого значения энтропии к максимальному, которое можно получить для данного числа компонент, ввел в 1952 г. Ч.Р.Пелто.

симальное процентное содержание какой-либо фракции M_f по данным конкретного анализа. В качестве исходных данных для расчета перечисленных коэффициентов использовались результаты гранулометрического анализа, разделяющего осадок на шесть фракций: F_1 (0,5–1,0 мм), F_2 (0,25–0,5 мм), F_3 (0,1–0,25 мм), F_4 (0,05–0,1 мм), F_5 (0,01–0,05 мм), F_6 ($< 0,01$ мм).

Расчет коэффициентов производился по формулам, общепринятым в повседневной практике геологов. Так, медианный размер зерна M_d и коэффициент Траска определялись по значениям кумуляты. При этом за M_d принималась величина на шкале фракционного состава, соответствующая 50 %-му содержанию фракций на кумуляте, что соответствует усредненному размеру зерен исследуемого осадка. Коэффициент Траска S_0 определялся по соотношению 75 %-ого (Q_3) и 25 %-го (Q_1) уровней той же кумуляты:

$$S_0 = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}}. \quad (2.4)$$

Величина зернистости пород находилась по формуле (2.1).

Мера сортированности породы по величине нормированной энтропии H_r вычислялась по выражению /Романовский, 1968/

$$H_r = \frac{-\sum_{j=1}^k p_j \ln p_j}{\ln k}, \quad (2.5)$$

где k - количество фракций, p_j - вероятность присутствия в анализе частицы размером, попадающим в j -ую фракцию, $\ln k$ - максимально возможная энтропия.

Энтропия отражает неоднородность состава пород по размерам составляющих их частиц. С.И.Романовский считает, что именно энтропия может рассматриваться в качестве прямой меры неоднородности геологического тела, а другие, обычно используемые числовые характеристики, по отношению к системе в целом являются опосредованными мерами неоднородности, характеризуют ее интенсивность. В качестве преимущества энтропии перед другими статистическими мерами неоднородности геологических систем называется возможность оценить одним числом неоднородность породы по совокупности признаков. Принимая за меру сортированности пород функцию нормированной энтропии, предлагается удобная классификация пород по степени сортированности частиц (табл. 3).

Таблица 3

Классификация осадков по степени сортированности частиц
с учетом параметров N_T и M_F

Степень сортировки породы	N_T	M_F , %
Идеальная	0-0,1	100-95
Хорошая	0,1-0,25	95-85
Умеренная	0,25-0,5	85-60
Плохая	0,5-0,75	60-30
Несортированная порода	0,75-0,9	45-25
Абсолютно несортированная порода	0,9-1,0	25-0

Выделение крайних членов в классификации стало возможным благодаря тому, что нормированная энтропия позволяет количественно оценить два крайних случая - идеально сортированная порода ($N_T = 0$) и абсолютно несортированная ($N_T = 1$). Для остальных подразделений принята равномерная шкала.

По общему числу анализов из трех разрезов (Анабарская губа, р. Анабар, мыс Цветкова) были получены парные коэффициенты корреляции между параметрами M_d , ВЗП, S_0 , N_T и M_F . Результаты сведены в табл. 4. Среди всех значений выделяются два, равные величине $|r| = 0,93$; для некоторых участков разрезов этот коэффициент достигает значения $|r| = 0,97$. Одним из них подчеркивается высокая прямая корреляционная зависимость между величиной зернистости пород (ВЗП) и медианным размером зерна M_d ($r = 0,93$) (рис. I2). Это хорошо видно и по соответствующим кривым, полученным для юрских отложений района р. Анабар (рис. I3, б). Таким образом, указанные параметры аналогичны друг другу и взаимозаменяемы при оценке усреднения гранулометрического состава пород.

Такое же соотношение корреляционной связи, но с обратным знаком ($r = -0,93$) существует между сортированностью пород, выраженной нормированной энтропией N_T , и максимальным процентным содержанием какой-либо фракции M_F (рис. I3, а; I4). Эти параметры также аналогичны и взаимозаменяемы при оценке сортированности пород, поэтому степень сортированности можно определять по величине M_F , пользуясь классификацией, составленной с исполь-

Таблица парных коэффициентов корреляции, оценивающих силу связи между параметрами, усредняющими гранулометрический состав и отражающими сортированность пород

Коэффициенты		Усредняющие Грансостав		Определяющие меру сортированности пород		
		Ma	ВЗП	S_o	H_r	M_f
Определяющие меру сортированности пород	M_f	-0,5	-0,56	0,27	0,93	
	H_r	0,58	0,7	-0,24		
	S_o	-0,73	-0,54			
Усредняющие Грансостав	ВЗП	0,93				
	Ma					

Примечание. $n = 567$. 95 %-ная зона значимости при $|r| \geq 0,088$

званием подразделений, установленных для H_r и приведенных в табл. 3. Существование столь высокой взаимной корреляции между H_r и M_f дает основание предложить довольно простое выражение для экспресс-определения сортированности H_r по известному максимальному значению фракции M_f :

$$H_r = 1,053 - 0,0088 M_f .$$

Из анализа табл. 4 напрашивается еще один вывод, который ранее был получен С.И.Романовским /1968/: коэффициент Траска S_o , широко используемый геологами, не отражает сортированность поро-

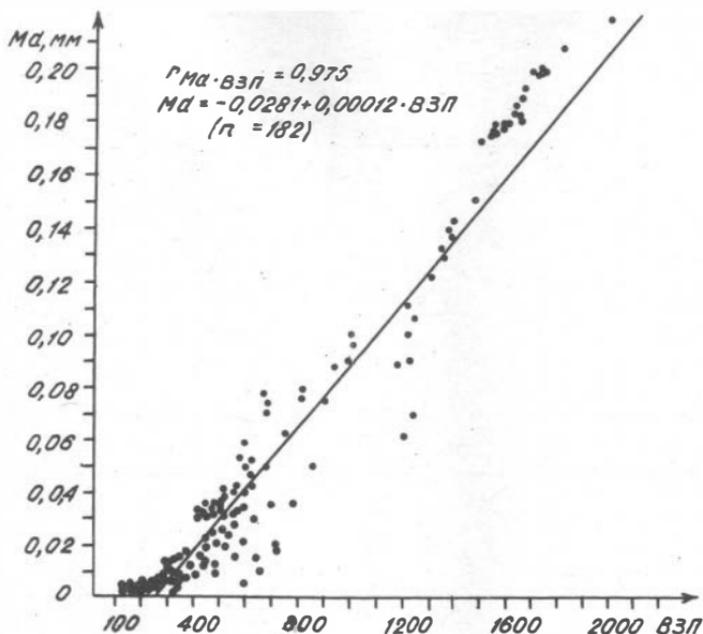


Рис. 12. Корреляционная связь ВЗП с M_d (юрские отложения Восточного Таймыра)

ды. На это указывает отсутствие его корреляционной связи с параметрами H_T ($r = -0,24$) (рис. 15,а) и M_T ($r = 0,27$), которые действительно характеризуют это свойство.

Коэффициент Траска оказался ближе к параметрам, усредняющим гранулометрический состав (M_d и ВЗП), с которыми имеет сравнительно высокую обратную взаимосвязь (соответственно $r = -0,73$ и $r = -0,54$) (см. рис. 15).

Таким образом, статистическая обработка величин коэффициентов, получаемых по данным гранулометрического состава, показала, что для характеристики сортированности породы по разрезу правильнее пользоваться не коэффициентом Траска, а величиной нормированной энтропии H_T .

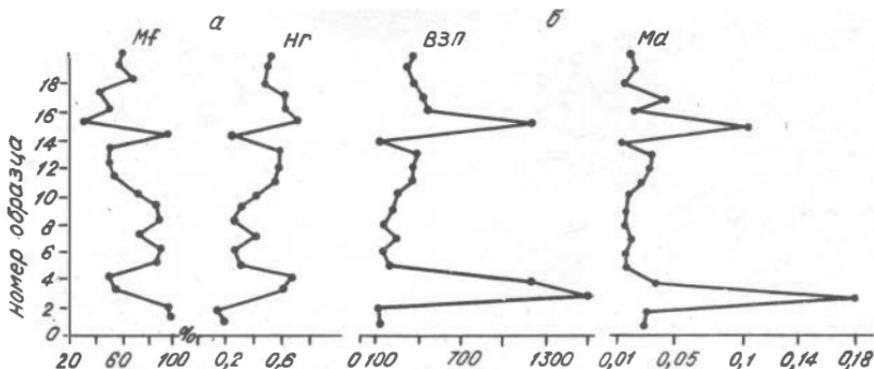


Рис. 13. Графики, отражающие сходство в поведении кривых изменения максимального процентного содержания фракции и нормированной энтропии ($r = -0,97$); и величины зернистости пород и медианного размера зерен ($r = 0,9$) для тоарских отложений р. Анабар

Анализ кривой сортированности пород

Для исследования цикличности осадконакопления и динамики этого процесса может быть привлечен показатель сортированности пород. По мнению многих исследователей, коэффициент сортировки должен реагировать на фациальные условия осадконакопления.

На рис. 16 приведена кривая сортированности пород H_r по разрезу юрских отложений района Анабарской губы. Общее количество гранулометрических анализов, которые послужили исходным материалом для вычисления указанного коэффициента, составило 245.

Анализируя поведение этого параметра по разрезу и сопоставляя его со структурой регоциклитов, выделенных системно-структурным анализом, можно отметить следующее.

I. Коэффициент сортированности пород (H_r) очень хорошо сопоставляется и коррелируется со структурой регоциклитов. Начально-прогрессивные части регоциклитов характеризуются малой степенью сортированности пород. Породы финально-прогрессивной и начально-регрессивной части регоциклитов отсортированы очень хоро-

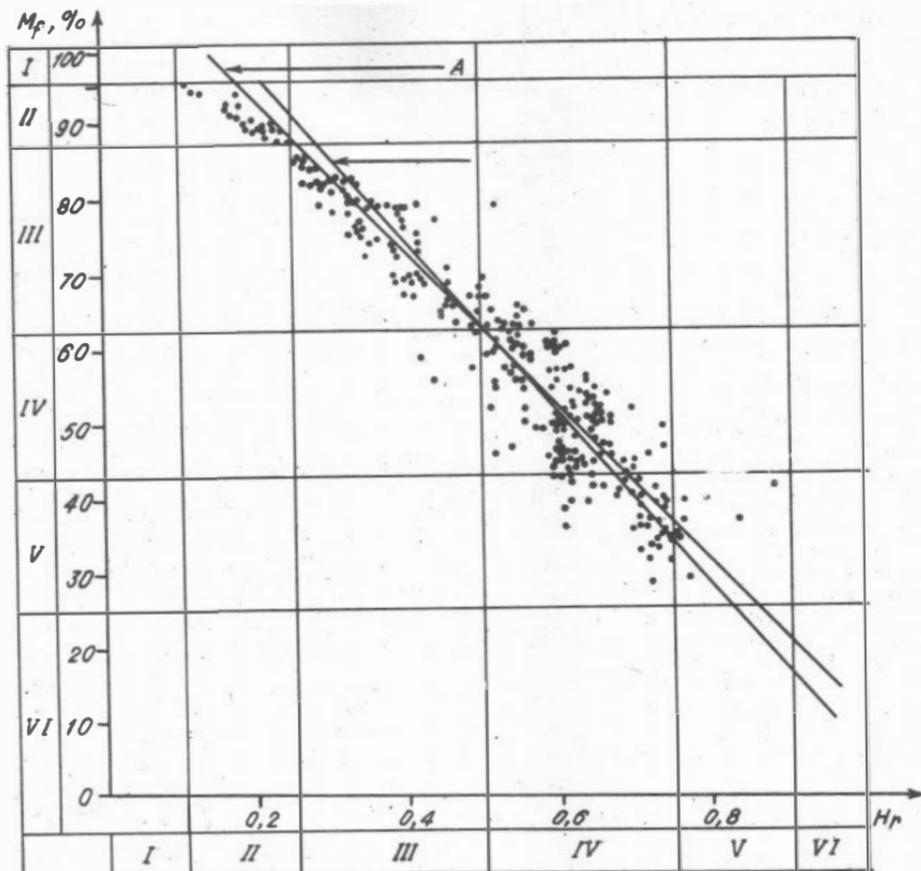


Рис. 14. Связь нормированной энтропии с максимальным содержанием фракции

А - мыс Цветкова: $n = 182$, $r = -0,96$, $H_r = 1,11257 - 0,00973 M_f$; Б - р. Анабар: $n = 140$, $r = -0,94$, $H_r = 1,05598 - 0,00875 M_f$; степень сортированности осадка : I - идеально сортированный, II - хорошо сортированный, III - умеренно сортированный, IV - плохо сортированный, V - несортированный, VI - абсолютно несортированный

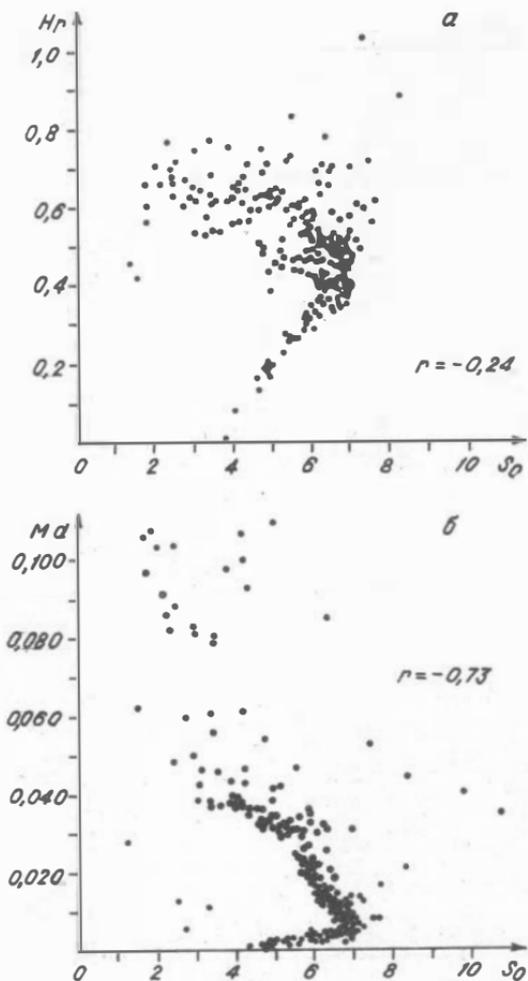


Рис. 15. Корреляционная связь коэффициента Траска, S_0 , а - с нормированной энтропией, H_T ; б - с медианным размером зерна, Md

нии регоциклитов, выделяемых системно-структурным анализом породно-слоевых ассоциаций.

3. Степень сортированности пород довольно хорошо отражает фациальные условия осадконакопления. Минимальные значения N_T характерны для пород начально-прогрессивной части регоциклитов, сформировавшихся в условиях верхней сублиторали и вблизи от источников сноса. Неустойчивыми значениями N_T характеризуются породы финально-регрессивной части регоциклитов, сформировавшихся в условиях активной гидродинамики верхней сублиторали. Породы же финально-прогрессивной и начально-регрессивной части регоциклитов, сформировавшихся в условиях нижней и средней сублиторали и вдали от источников сноса, характеризуются высокой степенью сортировки пород.

Ниже рассматриваются методы обработки данных, которые базируются на самом первичном исходном материале – полевых описаниях элементарных циклитов, слагающих разрез. Используя эти данные, можно уже на начальном этапе исследования выявить закономерности или особенности изучаемого разреза.

2.3. Коэффициенты прогрессивности и делитности (алитности) в системном анализе слоевых ассоциаций

Коэффициент прогрессивности. В связи с поисками количественного выражения характера структуры локальных циклитов, был предложен коэффициент прогрессивности K_{Π} , определяемый как отношение прогрессивной части Π циклита к его общей мощности M , выраженное в процентах /Трофимук, Карогодин, 1982; Карогодин, 1983/ :

$$K_{\Pi} = \frac{\Pi}{M} \cdot 100 \% . \quad (2.6)$$

За нулевую линию при графическом изображении принимается линия 50 %. Определить прогрессивную часть на практике, как правило, не представляет труда. Использование K_{Π} позволяет объективно выделить слоевую систему (циклит) следующего ранга, т.е. этот коэффициент оказывается критерием количественного определения иерархической организации слоевых ассоциаций. Тип циклита следующего ранга и его границы определяются по направленности и непрерывности изменения значений K_{Π} /Трофимук, Карогодин, 1982/. Для выявления циклитов следующего ранга применяется подобная же процеду-

ра, но в этом случае K_{II} определяется не для локальных циклитов, а для более сложных (региональных или субрегиональных) (рис. 17).

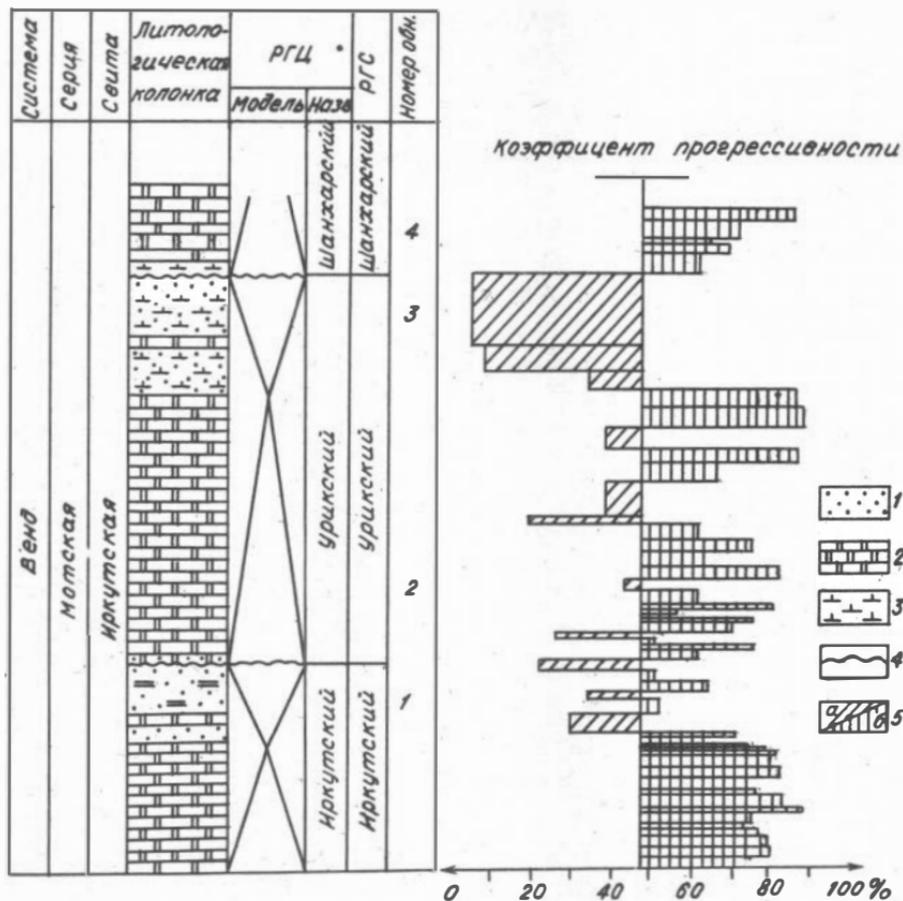


Рис. 17. Регостратомы, выделенные с помощью коэффициента прогрессивности в разрезе карбонатной части мотской серии обнажения горы Серой на р. Урик (близ пос. Шанхар Иркутской области). I - песчаники, 2 - доломиты, 3 - карбонатность, 4 - граница перерыва, 5 - значение коэффициента прогрессивности менее 50 % (а) и более 50 % (б)

Коэффициент делитности (алитности). При системном анализе породно-слоевых ассоциаций чрезвычайно важно оценить степень дискретности и непрерывности изменения существенного свойства системы. Дискретность, прерванность чаще всего определяется качественно: больше-меньше. Однако давно назрела необходимость отразить в терминах и понятиях отсутствие геологических тел. Для обозначения отсутствия породного слоя или слоев были предложены термин "антилит" /Карогодин, 1983/ и такое его определение: "антилит – это отсутствие, выпадение одной или нескольких литологических разностей (независимо от причин и масштаба) в виде слоев (или их последовательностей) в общем литологическом ряду". В качестве единицы измерения этого явления были предложены термин "алит" ("делит") и производный от него – "алитность" ("делитность") /там же, с. 169/.

Учитывая, что приставка "де-" соответствует "анти-" (против), в то время как "а-" означает "не-", правильнее антилит называть делитом, а не алитом и, соответственно, алитность – делитностью. Количественное выражение этого явления будем называть коэффициентом делитности.

Для выражения величины делитности в том или ином случае был предложен следующий вариант определения коэффициента делитности / там же, с. 169/ :

$$K_{д} = \frac{M}{N} \cdot 100 \% , \quad (2.7)$$

где M – число отсутствующих литологических разностей (ЛР), N – общее число литологических разностей в общем литологическом ряду.

Возможны и другие варианты подсчета коэффициента делитности. Например, N может быть выражено суммой общего числа присутствующих литологических разностей (слоев) в циклите и числа отсутствующих разностей M.

Для количественной характеристики делитности между двумя соседними проциклитами предлагается использовать коэффициент, отражающий превышение отсутствующих литологических разностей при завершении верхнего циклита по сравнению с нижележащим. Он определяется через отношение количеств отсутствующих кодов тонкозернистых разностей пород, завершающих формирование выше- и нижележащего ЭЦ:

$$K_{\text{Д}}^{\text{ГР}} = \frac{A1}{A2}, \quad \frac{1}{N-1} \leq K_{\text{Д}}^{\text{ГР}} \leq (N-1), \quad (2.8)$$

где N – общее число кодов пород по градационной таблице, $A1$ и $A2$ – порядковые номера кода породы (по градационной таблице) вершины, соответственно вышележащего (ЭЛЦ1) и нижележащего (ЭЛЦ2) циклитов.

$K_{\text{Д}}^{\text{ГР}} = 1$ в том случае, если в вершинах двух смежных циклитов "выпало" одинаковое количество литологических разностей, т.е. циклиты завершает одна и та же ЛР.

$K_{\text{Д}}^{\text{ГР}} > 1$ в том случае, если в вышележащем ЭЛЦ имеется только два слоя, сложенных грубой породой (тогда $A1 = N - 1$), а нижележащий ЭЛЦ завершился самой тонкой литологической разностью с кодом ($A2 = 1$). При $K_{\text{Д}}^{\text{ГР}} = 1/(N - 1)$, наоборот, вышележащий ЭЛЦ завершается самой толкозернистой породой ($A1 = 1$), а нижележащий имеет в своем составе всего два слоя, представленных самыми грубозернистыми разностями ($A2 = N - 1$).

Естественно, что делитность можно определять только после литолого-фациального районирования территории, при котором будут определены наборы обязательных для данной территории горных пород.

Представляется, что применение на практике коэффициента делитности открывает реальную возможность, как и в случае использования коэффициента прогрессивности, разработать иерархическую классификацию границ слоевых систем на количественной основе и достоверно выделять циклиты разного ранга.

2.4. Статистический метод расчленения и корреляции разрезов

Анализ типов циклитов позволил Ю.Н.Карогодину вывести правило рядов, которое формулируется следующим образом: "Циклиты различного типа встречаются в реальных разрезах не в одиночку, не вразнобой, а рядами, сериями, закономерно сменяя друг друга по разрезу (и, вероятно, в плане)". Это эмпирически выведенное правило существенно облегчает определение типов циклитов в разрезах с фрагментарной обнаженностью. Данное правило можно рассматривать как еще одно частное выражение и проявление фундаментального принципа природы – принципа "массового производства" /Трофимук, Карогодин, 1977, с. 37/.

Такие системы простых литологических тел ("природные конструкции") отыскиваются в разрезах; их распространение прослеживается в исследуемом бассейне и смежных бассейнах, несмотря на литологическую фациальную и прочую изменчивость.

Нами была предпринята попытка выделить в разрезах цепочки (или серии) однотипных циклитов, а затем вычислить для каждой такой цепочки (серии) общие количественные показатели, которые могут быть использованы для корреляции и выделения циклитов крупного ранга.

Задача расчленения разреза на однородные участки по типу элементарных циклитов, входящих в них в качестве "кирпичиков", решается статистическим методом А.Д.Родионова. Данный метод позволяет расчленить разрезы на участки, однородные по комплексу признаков, и количественно оценивать полученные границы в соответствии с использованными признаками. Нами этот метод опробован для случая, когда в качестве исходных признаков использовались мощность и литологическая характеристика слоев, слагающих элементарные циклиты. Табл. 5 иллюстрирует форму представления исходных данных. По каждому ЭЛЦ, для которого отводится одна строчка, в графе соответствующей породы проставляется мощность этого породного слоя, входящего в состав ЭЛЦ. Такая форма записи весьма удобна для выявления цепочек ЭЛЦ, сложенных однотипными породными слоями.

После заполнения всей таблицы данными о последовательно расположенных ЭЛЦ получается матрица размером $n \times m$, где n - число ЭЛЦ, m - число литологических разностей (признаков). Этот комплекс признаков позволяет расчленить разрез на участки, сложенные ЭЛЦ, однотипными по мощности и литологическим характеристикам слоев. Обработав затем каждый из полученных участков ритмоматематическим методом, предложенным Г.Ф.Моором /Севостьянов, 1981/, получим общие и частные показатели по структурным данным ЭЛЦ, слагающим эти участки. Эти показатели можно использовать и для взаимной корреляции разрезов, а также для выделения рего- и нексциклитов.

Для нахождения границ между однородными участками применяется так называемый критерий однородности V_k /Родионов, 1981/:

Форма представления мощностного и вещественного состава
элементарных циклитов

№ ЭЛЦ	П о р о д а														Конгломерат
	Глина			Алевролит				Песчаник				Гравелит			
	Тлина	алевро- тистая	песча- нистая	мелко- зернистый	средне- зернистый	крупно- зернистый	глинистый	алевро- тистый	мелко- зернистый	средне- зернистый	крупно- зернистый	мелко- зернистый	средне- обломочный	крупно- обломочный	
К о д п о р о д н ы															
	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I	0,45							0,4							
2	0,4							0,25				0,3			
3	0,25									0,4		0,55			
4	0,55							0,5				0,85			
5	0,8							0,95							
6	0,15							0,2							
7	0,35							0,15				0,9			
8	0,8			0,5									0,4		
9				0,1				0,15					0,8		
10				0,3				0,25							
11				0,15				0,1							
12				0,25				0,25							
13				1,6				0,15				0,15			
14				1,2				0,3							
15				0,9				0,5				0,25			
16					0,05							1,0			
17					0,17							0,45			
18					0,1							0,4			
19					0,15			0,7				0,35			0,7
20					0,25			0,3				0,6			1,4

$$V_k = \frac{n-1}{kn(n-k)} \sum_{j=1}^m \frac{\left[(n-k) \sum_{t=1}^k x_{tj} - k \sum_{t=k+1}^n x_{tj} \right]^2}{\sum_{t=1}^n x_{tj}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{t=1}^n x_{tj} \right)^2}, \quad (2.9)$$

где n - количество наблюдений; m - число признаков; k - номер наблюдения, после которого проводится граница, делящая совокупность на две части, $k = 1, 2, \dots, n-1$; x_{tj} - элементы матрицы наблюдений.

Набор наблюдений считается линейно упорядоченным, если

$$\max V_k < \chi_{q,m}^2, \quad (2.10)$$

где $\chi_{q,m}^2$ - критерий Пирсона для m степеней свободы и значимости q .

Сущность этого критерия состоит в нахождении границ между двумя совокупностями объектов по результатам измерений одного или нескольких признаков объектов.

На первом этапе обработки данных этим методом определяются количественные значения критерия V_k для всех $(n-1)$ границ ($k = 1, 2, \dots, n-1$), делящих совокупность на две части. Выбрав из общего количества вычисленных V_k максимальное V_{\max} и сравнив его с табличными значениями критерия Пирсона, можно либо принять, либо отвергнуть гипотезу об однородности участков. Если V_{\max} больше χ^2 при заданном уровне значимости, то предположение об однородности участков отвергается и, следовательно, граница неоднородности скорее всего соответствует V_{\max} . Подгруппы подвергаются дроблению аналогичным образом до тех пор, пока все они выделенные по V_{\max} не окажутся однородными.

Дальнейшая обработка заключается в устранении ложных границ. Это достигается попарным сравнением смежных участков по тому же критерию однородности.

В программе описанный алгоритм реализуется следующим образом. Величина V_{\max} делит совокупность на две части, для каждой из которых снова находится V_k и максимальное из них разбивает эти совокупности снова на две части. Таким образом, алгоритм состоит в дихотомическом разделении и анализе исследуемой совокупности по критерию Пирсона.

Критерий однородности численно оценивает значение выявленных границ, деля их на главные и второстепенные.

Для корреляции двух разрезов может быть использован тот же критерий однородности. Методика корреляции при этом состоит из следующих процедур. Берутся данные о двух разрезах, каждый из которых охарактеризован одним и тем же комплексом признаков, например структурными параметрами по ЭЛЦ. Каждый из этих разрезов расчленяется на однородные участки по критерию однородности, как это было описано выше. Затем, последовательно сравнивая участки первого разреза с каждым из однородных участков второго разреза, находят участки, наиболее сходные между собой. Участки считаются сходными, если минимальная величина критерия однородности будет меньше допустимого значения критерия хи-квадрат, соответствующего q степеням свободы.

Таким образом, если для разделения участков используется максимальное значение критерия V_{\max} , то определение сходства участков, естественно, производится по его минимальной величине.

Последовательность операций представляется в общем виде следующей. На первом этапе анализируются данные по первому разрезу и с помощью критерия V_k определяются значения V_k для каждой границы, причем фиксируется количество наблюдений в каждом из однородных участков. Аналогичная процедура производится в отношении второго разреза. Затем каждый участок первого разреза последовательно сравнивается по критерию V_k с каждым участком второго разреза. Из общего числа вновь полученных величин V_k выбирается минимальная V_{\min} и сравнивается с критерием Пирсона для q числа степеней свободы, равным числу исследуемых признаков. Если

$$\min V_k < \chi^2_q,$$

то те два участка, один из которых относится к первому разрезу, а второй — ко второму разрезу, однородны по исследуемому комплексу признаков. Дальнейший поиск однородных стратиграфических подразделений производится аналогичным образом, но этой процедурой охватывают только те участки, которые расположены ниже установленных однотипных стратиграфических участков разреза.

2.5. Выявление общих и частных показателей циклитов разного ранга

Общие и частные показатели циклитов рассчитываются методом Г.Ф.Моора. В качестве исходных данных используются только мощности ЭЛЦ – его общей, нижней и верхней частей. Рассчитываемые показатели являются информативными для определения сходства или различия структурной обстановки осадконакопления и могут быть использованы как для корреляции, так и для количественной характеристики циклитов крупного ранга разного возраста и региона. Так, Г.Ф.Моор применил этот метод для корреляции миоценовых отложений нефтегазоносных бассейнов залива Кука, Индокитая и Таранаки (о. Ниас Малайского архипелага и о. Северный в Новой Зеландии). Все три бассейна входят в Западно-Тихоокеанский нефтегазоносный складчатый мегалояс. Во всех рассматриваемых районах в миоценовых отложениях широко развиты макроритмы (их мощность более 75 м) с двухчленным строением: в нижней части преимущественно грубообломочные, а в верхней – тонкообломочные. Изучив перечисленные толщи указанным методом, Г.Ф.Моор сделал вывод, что в нефтегазоносном бассейне Таранаки происходило направленное изменение эпейрогенетических движений в кайнозойскую эру с уменьшением общей амплитуды движений к современной эпохе.

Ниже приводятся формулы для расчета ритмоматематическим методом частных и общих показателей циклитов. Частные показатели рассчитываются для каждого ЭЛЦ. Они представляют собой отношения структурных показателей ЭЛЦ, взятых в разной комбинации:

$$\frac{R_V}{R_O}, \frac{R_H}{R_O}, \frac{R_H}{R_V}, \frac{R_V}{R_H}, \frac{R_O}{R_V}, \frac{R_O}{R_H},$$

где R_V , R_H , R_O – мощности ЭЛЦ, соответственно верхней, нижней части и общей мощности.

Первый из перечисленных показателей был предложен Ю.Н.Каргодиным /1983/, давшим ему название коэффициента прогрессивности. Этот коэффициент апробируется на разных типах отложений при изучении породно-слоевых ассоциаций.

Общие показатели представляют собой усредненные характеристики по всем ЭЛЦ, входящим в исследуемую часть разреза (участка, состоящего из однотипных ЭЛЦ):

N_R - число ЭЛЦ на 100 м; \bar{R}_O , \bar{R}_H , \bar{R}_B - средняя мощность ЭЛЦ и соответственно его нижней и верхней части;

$\frac{R_B}{R_O}$, $\frac{R_H}{R_O}$, $\frac{R_H}{R_B}$, $\frac{R_B}{R_H}$ (среднее) - среднее значение отношений по составным частям ЭЛЦ;

$\frac{\Sigma R_O}{\Sigma R_B}$, $\frac{\Sigma R_O}{\Sigma R_H}$, $\frac{\Sigma R_B}{\Sigma R_H}$, $\frac{\Sigma R_H}{\Sigma R_B}$ - отношения общей мощности участка к суммарной мощности верхних частей ЭЛЦ, его составляющих; то же к суммарной мощности нижних частей ЭЛЦ и отношения этих суммарных мощностей между собой;

Q_R - отсутствие верхних частей ЭЛЦ;

$\frac{\bar{R}_O}{\Sigma R_O}$, % - отношение средней мощности ЭЛЦ к общей мощности участка.

Вычислением этих показателей исчерпывается ритмоматематический метод.

В качестве дальнейшей обработки исходных структурных показателей ЭЛЦ мы предлагаем применить корреляционный анализ. В этом случае для анализа используется три числовых ряда, состоящих из следующих величин: 1) общие мощности ЭЛЦ, 2) мощности нижних частей ЭЛЦ, 3) мощности верхних частей ЭЛЦ. Для указанных рядов вычисляются парные коэффициенты корреляции, уравнения линейной регрессии, а также основные моменты нормального распределения (среднее значение, стандартное отклонение, асимметрия, эксцесс) и производится проверка предположения о возможности принять или отвергнуть закон нормального распределения. Все эти величины также могут служить характеристиками макроритмов определенного возраста и региона.

Для указанных временных рядов следует производить расчет автокорреляционных и взаимокорреляционных функций. Это тот же корреляционный анализ, только в первом случае исследуется взаимосвязь величин, принадлежащих одному и тому же ряду, между собой (авто), а во втором - величин, принадлежащих двум разным рядам (взаимно).

Автокорреляция позволяет установить существование значимой корреляционной связи, например между мощностями ЭЛЦ, слагающими разрез, и если она существует, то определить, через какое количество ЭЛЦ, т.е. с каким сдвигом. Эта функция рассчитывается с заданным лагом (запаздыванием) $L = 0, 1, 2, \dots, N/4$ (рекомендуется максимальный сдвиг делать не более чем на 1/4 часть исследуемого ряда).

Взаимнокорреляционная функция определяется для каждой пары рядов: R_0 и R_B , R_0 и R_H , R_B и R_H с лагом $L = 0, 1, 2, \dots, N/4$ для двух случаев - запаздывания или опережения одного ряда другим. Этот показатель позволяет установить по разрезу взаимосвязь разнородных величин (R_0 , R_H , R_B) и сдвиг, при котором такая взаимосвязь имеет место.

Автокорреляционная и взаимнокорреляционная функции имеют оценки от -1 до $+1$. Если между членами одного и того же ряда при каком-либо сдвиге существует взаимосвязь, то соответствующее значение автокорреляционной функции будет иметь значение, близкое $|r| = 1$, а отсутствие корреляции характеризуется величиной, близкой к нулю. Таким же образом оценивается и взаимнокорреляционная функция. Последняя зачастую применяется для корреляции двух разрезов между собой по какому-либо параметру.

В качестве примера, который позволяет проиллюстрировать применение статистического метода расчленения разреза на однородные участки, а затем обработку каждого из них ритмоматематическим методом, нами выбраны данные по неогеновому разрезу немых красноцветных толщ, расположенному в Ферганской впадине (пос. Таш-Кумыр). Мощность описанных отложений по 18 обнажениям составила 1486 м. Они представлены породами массагетского (кирпично-красная и бледно-розовая свиты) и бактрийского ярусов (тагапская и андижанская свиты), залегающими на палеогеновых отложениях с несогласием. Границы между крупными геологическими подразделениями (ярусами, свитами) устанавливались с помощью системно-структурного анализа породно-слоевых ассоциаций. Математическая обработка позволила не только подтвердить выделенные границы, но и получить более детальное расчленение разреза, анализ которого помогает выявить динамику цикличности осадконакопления как в укрупненном виде, так и более детально, внутри условно однородных участков. Общее число ЭЦ, выделенных методом САПА, составило 458. На первом этапе применена методика статистического расчленения разреза. Так как в качестве признаков, по которым предполагается расчленить исследуемый разрез, используются породы в количестве 20 литологических разностей, свойственные данному бассейну осадконакопления, то исходная матрица для обработки имеет размерность 458×20 .

В данном методе число степеней свободы определяется по количеству используемых признаков, следовательно, в нашем случае оно

составит 20. Для указанного числа степеней свободы и 95 %-го уровня значимости табличное значение хи-квадрата равно 31,4. Это есть та величина, выше которой все значения критерия однородности, а следовательно и границы, считаются значимыми. Результаты расчленения сводного разреза на однородные участки по признакам ЭЛЦ с учетом полученных максимальных значений критерия V_k приведены в табл. 6.

Таблица 6

Расчленение разреза статистическим методом по мощностным и вещественным признакам ЭЛЦ

Номер границы	Номер границ-частей ЭЛЦ	V_k	χ^2	Огрубление результатов измерения					
				1	2	3	4	5	
1	2I-22	32,55	31,4	1,98					
2	53-54	33,87	"	2,19					
3	80-8I	63,8	"	6,93	6,93	6,93	6,93	6,93	6,93
4	99-100	50,94	"	4,89	4,89	4,89			
5	II7-II8	51,9	"	5,04	5,04	5,04	5,04		
6	I34-I35	44,2	"	3,83	3,83				
7	I64-I65	36,06	"	2,54					
8	3I3-3I4	35,15	"	2,4					
9	34I-342	32,2	"	1,93					
10	358-359	32,4	"	1,96					
11	400-40I	36,56	"	2,62					
12	4I8-4I9	46,76	"	4,23	4,23	4,23			

Изучаемая толща оказалась разделенной на 13 однородных участков. На рис. 18 видно, что отложения массагетского яруса состоят из восьми участков общей мощностью 906 м, а бактрийского - из пяти общей мощностью 585 м. Породы трех участков массагетского яруса составляют кирпично-красную (246 м) и пяти - бледно-розовую свиту (660 м).

Расчет ритмоматематическим методом рассмотрим на одном из выделенных участков, например на восьмом (см. рис. 18). Он состоит из 17 ЭЛЦ. В табл. 7 приведены структурные данные по ним в том виде, в котором требуется их представлять для обработки этим методом.

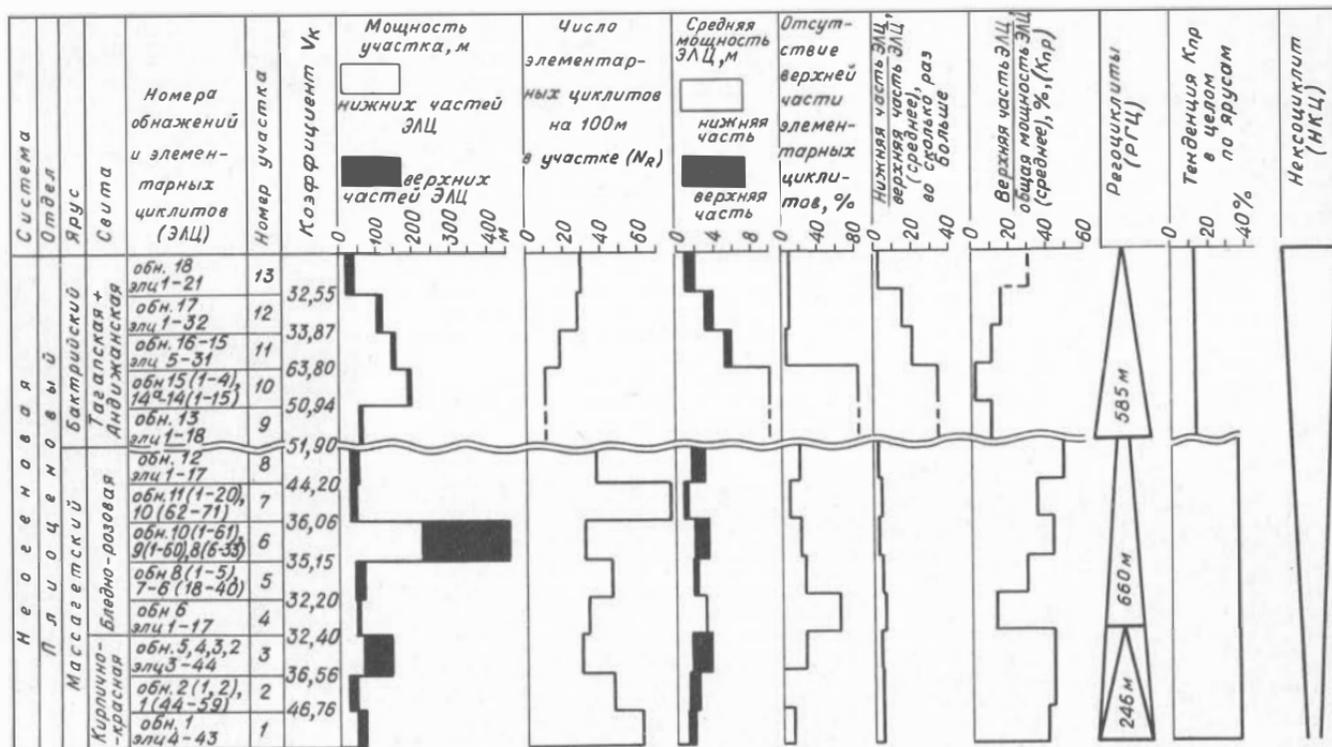


Рис. 18. Графики различных структурных показателей ЭЛЦ и РГЦ неогеновых моласс

Таблица 7

Структурные данные по элементарным циклитам участка 8
геологического разреза

№ ЭЛЦ	Мощность ЭЛЦ, м			№ ЭЛЦ	Мощность ЭЛЦ, м		
	Верхняя часть	Нижняя часть	Общая		Верхняя часть	Нижняя часть	Общая
1	1,9	1,8	3,7	10	1,5	2,2	3,7
2	3,1	3,0	6,1	11	-	2,6	2,6
3	1,1	0,5	1,6	12	-	2,2	2,2
4	1,1	0,5	1,6	13	3,0	0,2	3,2
5	1,1	0,9	2,0	14	1,5	3,0	4,5
6	0,9	0,2	1,1	15	0,4	1,6	2,0
7	2,4	0,9	3,3	16	-	1,3	1,3
8	1,5	2,0	3,5	17	1,5	0,2	1,7
9	0,9	1,1	2,0				

Ниже приводятся значения показателей, полученные по этим данным.

Общие показатели

1. Количество ЭЛЦ в изучаемой толще 17
2. Общая мощность изучаемой толщи 46,1 м
3. Суммарная мощность верхних частей ЭЛЦ 21,9 м
4. Суммарная мощность нижних частей ЭЛЦ 24,2 м
5. Отношение общей мощности изученной толщи к суммарной мощности верхних частей ЭЛЦ 2,1
6. Отношение общей мощности изучаемой толщи к суммарной мощности нижних частей ЭЛЦ 1,9
7. Отношение суммарной мощности верхних частей ЭЛЦ к суммарной мощности нижних частей ЭЛЦ 0,9
8. Отношение суммарной мощности нижних частей ЭЛЦ к суммарной мощности верхних частей ЭЛЦ 1,1
9. Число ЭЛЦ на 100 м 36,9
10. Средняя мощность ЭЛЦ 2,7 м
11. Отношение средней мощности ЭЛЦ к мощности изучаемой толщи, % 5,9 %

12. Отношение верхней части к общей в ЭЛЦ, среднее по толще	0,48
13. Отношение нижней части к общей в ЭЛЦ, среднее по толще	0,52
14. Отношение нижней части к верхней в ЭЛЦ, среднее по толще	1,033
15. Отношение верхней части к нижней в ЭЛЦ, среднее по толще	2,375

Частные показатели

№ ЭЛЦ	$\frac{R_O}{\Sigma R_O}, \%$	$\frac{R_O}{R_{Cp}}$	$\frac{R_B}{R_O}$	$\frac{R_H}{R_O}$	$\frac{R_B}{R_H}$	$\frac{R_H}{R_B}$
	I	8,03	0,22	0,51	0,49	1,06
2	13,23	0,4	0,51	0,49	1,03	0,97
3	3,47	0,09	0,69	0,31	2,2	0,46
4	3,47	0,09	0,69	0,31	2,2	0,46
5	4,34	0,12	0,55	0,45	1,22	0,82
6	2,39	0,07	0,82	0,18	4,5	0,22
7	7,16	0,19	0,73	0,27	2,67	0,38
8	7,59	0,21	0,43	0,57	0,57	1,33
9	4,34	0,12	0,45	0,55	0,82	1,22
10	8,03	0,22	0,41	0,6	0,68	1,47
11	5,64	0,15	0	1	0	-
12	4,77	0,13	0	1	0	-
13	6,94	0,19	0,94	0,06	15,0	0,07
14	9,76	0,27	0,33	0,67	0,5	2,0
15	4,34	0,12	0,2	0,8	0,25	4,0
16	2,82	0,08	0	1	0	-
17	3,7	0,1	0,88	0,12	7,5	0,13

Вычисление автокорреляционной функции производится по каждому ряду значений мощностей ЭЛЦ: нижней и верхней части и общей мощности. По значениям автокорреляционной функции (табл. 8) можно судить, что мощности составных частей ЭЛЦ мало коррелируют между собой. Наибольшее значение ($r = -0,37$) наблюдается при

сдвиге $\tau = 2$, т.е. мощности верхних частей ЭЛЦ взаимосвязаны через два циклита обратной корреляционной зависимости: если мощность верхней части какого-либо ЭЛЦ увеличивается, то можно ожидать, что у ЭЛЦ, находящегося через два циклита, мощность его верхней части должна уменьшиться, и наоборот. Максимально допустимый сдвиг при 17 значениях ряда составляет $\tau = 4$ (1/4 ряда),

поэтому в данном случае выводы о значении автокорреляционной функции для величины сдвига $\tau > 4$ рассматривать не имеет смысла.

Анализ взаимокорреляционных функций (табл. 9) показывает, что значимая прямая корреляция ($r = 0,64-0,66$) имеет место между общей мощностью какого-либо ЭЛЦ с мощностями верхней и нижней частей того же ЭЛЦ (сдвиг $\tau = 0$). Мощности верхней и нижней частей в этом случае, не имеют корреляционной зависимости.

Остальные коэффициенты при столь малой выборке ($n = 17$) практически незначимы. Намечается лишь слабая корреляция мощностей верхней части нижележащего ЭЛЦ и его общей мощности ($r = 0,31$), а также нижней части вышележащего ЭЛЦ ($r = 0,38$ при $\tau = 1$), обратная корреляционная взаимосвязь ($r = -0,37$) отмечается между верхней частью какого-либо ЭЛЦ с общей мощностью ЭЛЦ, находящегося от него на два ЭЛЦ выше ($\tau = 2$).

Аналогичная обработка каждого из 13 участков ритмоматематическим методом позволила определить для них общие показатели, которые приведены в табл. 10 и графически изображены на рис. 18. Эти данные свидетельствуют о том, что отложения массагетского и бактрийского ярусов довольно хорошо различаются между собой по общим показателям. В отложениях бактрия число ЭЛЦ на каждые

Таблица 8
Значения автокорреляционной функции для мощностей составных частей ЭЛЦ по участку 8 геологического разреза

Сдвиг τ	Мощность ЭЛЦ		
	Верхняя часть	Нижняя часть	Общая
0	I	I	I
1	0,06	0,03	0,1
2	-0,37	-0,04	-0,26
3	-0,07	-0,01	-0,1

100 м в 2,5–3 раза меньше, чем в массагетских (рис. 18). Мощности ЭЛЦ здесь возрастают почти в три раза (средняя мощность ЭЛЦ составляет 3,2–9,8 м, а в массагетских ЭЛЦ – 1,3–3,4 м). Характерно резкое увеличение мощности нижней ("грубой") части ЭЛЦ с одновременным уменьшением мощности его верхней ("мягкой") части – иногда более чем в 30 раз. В отложениях массагета нижняя часть ЭЛЦ чаще всего в 2–3 раза больше верхней. Вычисленные значения парной корреляции между мощностью нижней части ЭЛЦ и его общей мощностью для бактрийских отложений практически всегда близки к единице. Это объясняется тем, что общая мощность ЭЛЦ здесь определяется мощностью его нижней части, верхняя же в среднем составляет всего 0,8–16 % от нее. Для массагета этот коэффициент принимает значения начиная от 0,3 и редко превышает 0,9. Здесь верхняя часть ЭЛЦ в среднем составляет 13–48 % и нижняя часть ЭЛЦ уже не имеет такого доминирующего значения.

Показательна динамика от участка к участку такого признака, как отсутствие верхней части в ЭЛЦ. Максимальные значения его в изученном разрезе приурочены к подошве бледно-розовой свиты и подошве бактрийских отложений. Этот факт свидетельствует о сильных размывах, имевших место в эти периоды.

Таблица 9

Коэффициенты взаимнокорреляционной функции для рядов, представленных мощностями составных частей ЭЛЦ (участок 8)

Сдвиг τ	Запаздывание			Опережение		
	$R_B/R_{\text{общ}}$	$R_H/R_{\text{общ}}$	R_H/R_B	$R_B/R_{\text{общ}}$	$R_H/R_{\text{общ}}$	R_H/R_B
0	0,64	0,66	-0,05	0,64	0,66	-0,05
1	0,31	-0,17	-0,27	-0,16	0,29	0,38
2	-0,37	-	0,025	-0,26	-0,12	-0,12
3	-0,24	0,08	0,13	0,04	-0,02	-0,26

Последний график (K_{Π}) на рис. 18 представляет собой динамику коэффициента прогрессивности, вычисленного в среднем для каждого участка. Анализ его совместно с первым графиком этого же рисунка

Таблица 10

Значения общих показателей по элементарным циклитам
для однородных участков неогеновых моласс

Показатель	Массагетский ярус	Бактрийский ярус	
N_R	30-76	10-30	
\bar{R}_O , м	1,3-3,4	3,2-9,8	
\bar{R}_H , м	0,9-2,7	2,8-9,7	
\bar{R}_B , м	0,25-1,8	0,1-0,5	
$\frac{R_B}{R_O}$ (среднее), %	13-48	0,8-16,3	
$\frac{R_H}{R_O}$ (среднее), %	57-87	84-99,2	
$\frac{R_H}{R_B}$ (среднее)	1-5	15-34	
$\frac{\bar{R}_O}{\Sigma R_O}$, %	0,7-5,9	3,1-5,6	
$\frac{\Sigma R_O}{\Sigma R_B}$	1,9-II,7	8,1-II2,4	
$\frac{\Sigma R_O}{\Sigma R_H}$	1,1-2,1	1-1,1	
$\frac{\Sigma R_B}{\Sigma R_H}$	0,09-1,1	0,009-0,14	
$\frac{\Sigma R_H}{\Sigma R_B}$	0,9-10,8	7,1-III,4	
Коэффициент корреляции r	$r_{O.B.}$	0,28-0,89	-0,07-0,21
	$r_{O.H.}$	0,31-0,98	0,97-0,999
	$r_{B.H.}$	-0,16-0,11	-0,3-0,18

позволяет сделать вывод, что исследуемая толща укладывается в два регоциклита (РГЦ) с прогрессивной направленностью. РГЦ, приходящийся на отложения массагетского яруса, состоит из двух подчиненных (субрего-) циклитов: нижнего, мощностью 246 м, характеризующего период формирования пород кирпично-красной свиты, и верхнего, мощностью 600 м, — бледно-розовой свиты. Финальная часть его не показана, так как отложения бледно-розовой свиты, соответствующие этому отрезку времени, не были описаны. Отложения бактрийского яруса соответствуют верхнему РГЦ мощностью 585 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время математические методы и ЭВМ становятся необходимым инструментом геологических исследований, в том числе и в области цикличности процессов осадконакопления. Поэтому сейчас уже идет речь не вообще о применении математики в геологии, а о расширении арсенала математических методов и круга задач, для решения которых можно применить тот или иной математический метод. Методы математики, нашедшие применение в геологии, часто настолько сложны, что получение численного результата вообще возможно только с помощью современных ЭВМ. Эта область геологии довольно хорошо развита сейчас и продолжает развиваться дальше.

Необходимость широкого использования математических методов резко возросла, в связи с переходом в последние годы к системно-структурным исследованиям в области седиментационной цикличности. Системно-структурный анализ породно-слоевых ассоциаций открывает широкие возможности для эффективного применения различных математических методов в решении все новых и новых задач.

ЛИТЕРАТУРА

АЙНЕМЕР А.И., ОДЕССКИЙ И.А. Условия применения и возможности математических методов при анализе периодичности геологических процессов. - В кн.: Цикличность осадконакопления и закономерности размещения горючих полезных ископаемых. Новосибирск: Изд. ИГиГ СО АН СССР, 1975, с. 45-47.

АПАРИН В.П., КИСЕЛЕВ В.М., ГОШКО Е.Ю. Выделение мегациклитов с помощью спектрального анализа. - В кн.: Математические методы анализа цикличности в геологии. М.: Наука, 1984, с. 57-63.

АФАНАСЬЕВ Г.Д., ЗЫКОВ С.И. Геохронологическая шкала фанерозоя в свете новых значений постоянных распада. М.: Наука, 1975, 98 с.

БОКС Дж., ДЖЕНКИНС Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление. М.: Мир, 1974. 406 с.

БУНИМОВИЧ В.И. Фликтуационные процессы в радиоприемных устройствах. М.: Сов. радио, 1951. 360 с.

ВИСТЕЛИУС А.Б. О выражении результатов фоссилизации колебательных движений земной коры с помощью ряда. - Докл. АН СССР 1945, т. 49, № 7, с. 531-535.

ВИСТЕЛИУС А.Б. Материалы к литостратиграфии продуктивной толщи Азербайджана. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1961. 157 с.

ВИСТЕЛИУС А.Б. Фазовая дифференциация палеозойских отложений Среднего Поволжья. Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 202 с.

ВИСТЕЛИУС А.Б. О методе обзора числовых совокупностей, спектрально-тектоническом анализе и характеристике волновых движений земной коры по И.А.Одесскому. - Геотектоника, 1975, № 1, с. 117-123.

ДЕМЕНТЬЕВ Л.Д. Математические методы и ЭВМ в нефтегазовой геологии. М.: Недра, 1983. 189 с.

ДЕЧ В.Н., КНОРИНГ Л.Д. Нетрадиционные методы комплексной обработки и интерпретации геолого-геофизических наблюдений в разрезах скважин. Л.: Недра, 1978. 192 с.

ДЖЕНКИНС Г., ВАТТС Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1972. Вып. 1. 316 с.; вып. 2. 287 с.

КАРОГОДИН Ю.Н. Элементы теории и методика изучения седиментационной цикличности. Новосибирск, 1976. 24 с. (Препринт ИГиГ СО АН СССР).

КАРОГОДИН Ю.Н. Седиментационная цикличность. М.: Недра, 1980. 242 с.

КАРОГОДИН Ю.Н. Коэффициенты прогрессивности и алитности (делитности) в системном анализе слоевых ассоциаций нефтегазосносных толщ. - В кн.: Геология и нефтегазосносность мезозойских седиментационных бассейнов Сибири. Новосибирск: Наука, 1983, с. 166-169.

КАРОГОДИН Ю.Н. Системно-структурный анализ слоевых ассоциаций в решении задач нефтяной геологии. - В кн.: Проблемы нефтегазосносности Сибири в свете учения академика И.М.Губкина. Новосибирск: Наука, 1984, с. 17-37.

КОНЯЕВ К.В. Спектральный анализ случайных процессов и полей. М.: Наука, 1973. 168 с.

ЛАЙКАМ В.М., ВАЛИТОВ М.Э., ПАВЛОВ В.П. Цикличность осадконакопления в карбонатном разрезе Башкирии и ее влияние на формирование продуктивных отложений. - В кн.: Математические методы анализа цикличности в геологии. М.: Наука, 1984, с. 63-70.

ЛЕВИН Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1969. - 507 с.

ЛЕВЧУК М.А. О количественной характеристике гранулометрического состава обломочных пород циклокомплексов. - В кн.: Геоцикличность. Новосибирск: Изд. ИГиГ СО АН СССР, 1976, с. 90-99.

ЛЕВЧУК М.А. Использование количественного метода для выделения мезоциклитов в терригенных отложениях. - В кн.: Теоретические и методические вопросы седиментационной цикличности. Новосибирск: Изд. ИГиГ СО АН СССР, 1977, с. 136-141.

ЛЕВЧУК М.А., БУКРЕЕВА Г.Ф. О сортированности терригенных осадков и величинах, усредняющих гранулометрический состав. - Геол. и геофиз., 1984, № 9, с. 34-41.

МИЛЛЕР Р., КАН Дж. Статистический анализ в геологических науках. М.: Мир, 1965. 481 с.

НАЛИВКИН В.Д. О цикличности геологической истории. - Геогр. сб., 15, Астрогеология. М.-Л., 1962.

НЕЧАЕВА Т.Б., РЯБУШКИН П.К., ТРУБИХИН В.М. Изучение длиннопериодных палеовариаций в верхнем плиоцене (Западная Туркмения). - В кн.: Проблемы изучения палеовековых вариаций магнитного поля Земли. Владивосток: Изд. ДВНЦ АН СССР, 1979, с. 99-107.

ОДЕССКИЙ И.А. Применение метода обзора числовых совокупностей для выявления крупных циклов осадконакопления. - В кн.: Математические методы в геологии. Л., 1968, с. 133-138 (Тр. ВСЕГЕИ, нов. сер., т. 150, вып. 1).

ОДЕССКИЙ И.А. Волновые движения земной коры. Л.: Недра, 1972. 207 с.

ОДЕССКИЙ И.А. О математическом методе выявления скрытой ритмичности в строении геологических разрезов. - В кн.: Проблемные вопросы литостратиграфии. Новосибирск: Наука, 1980, с. 144-149.

ПАЛИТАШВИЛИ Н.Е., РОТАНОВА Н.М. Метод максимальной энтропии и его применение к анализу временных рядов геомагнитного поля. - Геомагнетизм и аэрономия, 1979, т. XIX, № 3, с. 543-550.

ПЕЧОВА Я. Спектры длиннопериодических вариаций геомагнитного поля. - В кн.: Геофизические методы интерпретации. Братислава, 1978.

РОДИОНОВ Д.А. Статистические решения в геологии. М.: Недра, 1981. 231 с.

РОМАНОВСКИЙ С.И. Применение теории информации для решения некоторых задач литологии. - В кн.: Математические методы в геологии. Л., 1968, с. 75-92 (Тр. ВСЕГЕИ, нов. серия, т. 150, вып. 1).

РОНОВ А.Б. К количественному изучению истории колебательных движений Русской платформы. - Докл. АН СССР, 1946, т. 54, № 2, с. 161-164.

РОНОВ А.Б. История осадконакопления и колебательных движений Европейской части СССР (по данным объемного метода). М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1949. 390 с.

СЕВОСТЬЯНОВ К.М. Опыт корреляции олигоценых отложений ритмоматематическим методом. - Экспресс-информация ВНИИОЭНГ. Сер. Нефтегазовая геол. и геофиз., 1981, вып. 23, с. 7-10.

СЕРЕБРЕННИКОВ М.Г. Гармонический анализ. М.—Л.: Гостехиздат, 1948. 504 с.

СЕРЕБРЕННИКОВ М.Г., ПЕРВОЗВАНСКИЙ А.А. Выявление скрытых периодичностей. М.: Наука, 1965. 244 с.

СТРАХОВ Н.М. О периодичности и необратимости эволюции осадкообразования в истории Земли. — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1949. № 6.

ТРОФИМУК А.А. Некоторые итоги и значение системно-структурных исследований слоевых ассоциаций в нефтяной геологии. — В кн.: Системные исследования в геологии каустобиолитов. М.: Наука, 1984, с. 3–5.

ТРОФИМУК А.А., КАРОГОДИН Ю.Н. Принципы районирования нефтегазоносных бассейнов в аспекте цикличности седиментогенеза. — Геол. и геофиз., 1974, № 3, с. 12–19.

ТРОФИМУК А.А., КАРОГОДИН Ю.Н. Теоретические и прикладные вопросы цикличности. — В кн.: Цикличность осадконакопления и закономерности размещения горючих полезных ископаемых. Новосибирск, 1975, с. 3–6.

ТРОФИМУК А.А., КАРОГОДИН Ю.Н. Место слоевых ассоциаций (циклитов) среди природных тел геологического уровня организации материи и принципы их выделения. — В кн.: Теоретические и методические вопросы седиментационной цикличности. Новосибирск: Изд. ИГиГ СО АН СССР, 1977, с. 3–47.

ТРОФИМУК А.А., КАРОГОДИН Ю.Н. Проблемные и методологические вопросы региональной стратиграфии нефтегазоносных бассейнов. — Геол. и геофиз., 1982, № 6, с. 3–14.

ТРОФИМУК А.А., КАРОГОДИН Ю.Н., МОВШОВИЧ Э.Б. Методологические вопросы геологии нефти и газа. Новосибирск: Изд. ИГиГ СО АН СССР, 1983. 123 с.

ТРОФИМУК А.А., КАРОГОДИН Ю.Н. Проблемы расчленения и корреляции докембрийских нефтегазоносных толщ Сибирской платформы. — В кн.: Системные исследования в геологии каустобиолитов. М.: Наука, 1984, с. 144–161.

ФРЕНКЕЛЬ А.А. Математические методы анализа динамики и производительности труда. М.: Экономика, 1972. 190 с.

ХАИН В.Е. Направленность, цикличность и неравномерность развития земной коры. — В кн.: Строение и развитие земной коры. М.: Наука, 1964.

ХАНОВИЧ И.Г., ЯНОВСКИЙ Г.Г. Выделение скрытых закономерностей.-В кн.:Тр.21 Всесоюз. научн. сессии НТОРИЭ им. А.С.Попова, 1965.

ХАНОВИЧ И.Г., ЯНОВСКИЙ Г.Г., АЙНЕМЕР А.И., КОНИССКАЯ Н.А. Метод обзора числовых совокупностей для изучения строения разрезов осадочных толщ. - В кн.: Математические методы в геологии. Л., 1968, с. 123-132.

ХЕЙСКАНЕН К.И. Динамическая система осадконакопления ятулия Центральной Карелии. Л.: Наука, 1975. 103 с.

ХЕННАН Э. Анализ временных рядов. М.: Наука, 1964. 215 с.

BLACKMAN R.B., TUKEY J.W. The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering. N.Y.: Douer Publ. Inc., 1959.

BURG J.P. A new analysis technique for time series data.-In.: Paper presented at NATO Advanced Study Institute on Signal Processing, August 1968, Euschede, Netherlands.

О Г Л А В Л Е Н И Е

В В Е Д Е Н И Е	3
Глава I. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ В СТРОЕНИИ И ФОРМИРОВАНИИ ОСАДОЧНЫХ ТОЛЩ	
I.1. Изученность вопроса и обзор основных методик	6
I.2. Выявление скрытой периодичности осадконакопления математическими методами	15
Исходный фактический материал	18
Метод максимальной энтропии	22
Метод Блекмана - Тьрки	26
Метод дисперсионного анализа	31
Метод простого обзора числовой совокупности	34
Анализ результатов	38
I.3. Установление границ скрытых циклитов (периодолитов) в разрезе	40
Использование синусоид основных периодов для установления местоположения соответствующих периодолитов	41
Определение амплитуды и начальной фазы синусоиды доминирующего периода	44
Алгоритм определения границ скрытых циклитов (периодолитов) по разрезу	53
Сопоставление выявленной периодичности с данными системно-структурного анализа породно-слоевых ассоциаций	58
Глава II. ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛИЧНОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ ПО ВЕЩЕСТВЕННЫМ И СТРУКТУРНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЦИКЛИТОВ	61
2.1. Выделение циклитов по величине зернистости пород	62
2.2. Статистическая обработка данных гранулометрического состава пород	65
Корреляционный анализ коэффициентов, усредняющих гранулометрический состав и сортированность пород	65
Анализ кривой сортированности пород	70
2.3. Коэффициенты прогрессивности и делитности (алитности) в системном анализе слоевых ассоциаций	74

2.4. Статистический метод расчленения и корреляции разрезов	77
2.5. Выявление общих и частных показателей циклитов разного ранга	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	92
ЛИТЕРАТУРА	93

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
СЕДИМЕНТАЦИОННОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ

Методические рекомендации

С о с т а в и т е л и

Галина Федоровна Букреева,

Дрий Николаевич Карогодин,

Михаил Антонович Левчук

Редактор Р.Н. Ильина

Технический редактор Н.Н. Александрова

Подписано к печати 7. 03. 85. МН 05079.
Бумага 60x84/16. Печ. л. 6,25. Уч.-изд. л. 5,7.
Тираж 500. Заказ 86. Цена 40 коп.

Институт геологии и геофизики СО АН СССР
Новосибирск, 90. Ротапринт.