

УДК 552.4; 549.905.1; 549.905.3+ 519.254; 519.257

## ПОЛИМОДАЛЬНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ КАОЛИНИТОВ В ОТКРЫТЫХ СИСТЕМАХ ПЕСЧАНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Мельник Игорь Анатольевич<sup>1</sup>,  
melnik@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** Многочисленные исследования форм распределений регистрируемых характеристик исследуемой среды по результатам преобразования открытых систем показали, что интенсивности и содержания преобразованных элементов имеют полиmodalную форму статистического распределения в случае внешнего воздействия на систему. По всей видимости, явление статистической полиmodalности преобразования систем носит универсальный характер. Поэтому универсальную теорию образования полиmodalного распределения можно использовать для анализа выборок содержаний вторичных минералов в проницаемых песчаных коллекторах, являющихся открытыми системами. Очевидно, что каждая мода полиmodalного статистического распределения преобразованных элементов будет представлять собой результат проявления некоего аттрактора.

**Целью** настоящей работы является представление универсальной кинематической теории формирования полиmodalного статистического распределения количества преобразованных элементов открытой системы, где в качестве сформированных элементов рассматриваются вторичные глинистые минералы – каолиниты, образованные в процессе наложенного эпигенеза в песчаном коллекторе.

**Объектами** исследования являются выборки величин интенсивности вторичной каолинитизации в песчаных интервалах нефтегазовых месторождений полуострова Ямал и содержаний вторичных каолинитов (определенных по керну) в верхнеюрских песчаных пластах Столбового нефтегазового месторождения. Процесс вторичной каолинитизации обусловлен влиянием глубинных флюидов.

**Метод** исследования был определен на основании полученного уравнения унифицированных мод полиmodalного распределения количества трансформирующих элементов (в процессе преобразования систем). Количество (интенсивность) преобразованных элементов пропорционально отношению времени преобразования системы к времени течения внешнего воздействия на элементы данной системы. Теоретически вычислены семь основных констант (аттракторов), связанных с «золотой» пропорцией, приведенных в соответствие с универсальными принципами состояний процессов преобразования систем.

**Результаты.** Сопоставив константы, полученные теоретическим путем, с вычисленными унифицированными величинами мод эмпирических данных, были определены состояния процессов преобразования системы относительно каждой моды. На основании анализа вычисляемых мод в полиmodalном распределении интенсивностей вторичной каолинитизации и содержаний каолинитов, а также при сопоставлении величины мод (с соответствующим принципом преобразования) с эмпирическими данными процессов преобразования, были получены подтверждения валидности универсальной кинематической теории.

**Выводы.** Таким образом, используя универсальные принципы преобразования, на основании определяемых содержаний вторичных каолинитов в исследуемых интервалах проницаемых пластов, можно выделять зоны с интересующими химическими и гидродинамическими свойствами и характеристиками.

### Ключевые слова:

Полиmodalные статистические распределения, вторичные геохимические процессы, процессы наложенного эпигенеза, вторичная каолинитизация, аттрактор, геохимия, открытые системы, «золотая» пропорция.

### Введение

Песчаный коллектор в литосфере Земли представляет собой открытую динамическую систему, элементы которой преобразуются вследствие внешнего воздействия поступающих глубинных флюидов. Под элементами рассматриваемой системы понимаются минералы, поры, трещины, флюиды и т. д. Преобразования аллотигенных минералов могут быть обусловлены процессом наложенного эпигенеза, приводящим к формированию таких вторичных минералов, как каолиниты, пириты и т. д. Причем статистические распределения интенсивностей данных процессов всегда полиmodalные [1]. Modalность распределения интенсивностей процессов преобразования породы-коллектора зависит от динамического режима (скорости) и от характера насыщения поступающего флюида, т. е. времени преобразования элементов системы [2].

Свойство полиmodalности интенсивностей количества преобразования проявляется во многих открытых системах. Например, авторы статьи [3] исследовали распределения биомассы и размеры биообъектов из экосистем разного масштаба: фитопланктона в озере, метазоев в ручье, членистоногих в лесах. Полиmodalное распределение размера биоты нескольких видов, конкурирующих за одну и ту же нишу, обусловлено компромиссом между воспроизводством и использованием ресурсов, являющемся причиной внутреннего резонанса, который может породить несколько мод. Когда конкуренция становится стохастической, и при уменьшении силы отбора ниже определенного порога, стационарное распределение становится полиmodalным. Сочетание местной конкуренции с глобальной миграцией занимает центральное место во многих экологических процессах. Стохастичность в конкуренции внешней биоты с внутренней в локальной экосистеме в определенных условиях (резонанса) приводит к обра-

зованию полиmodalного распределения размеров и масс биообъектов. В статье [4] приведены примеры полиmodalного распределения размеров улитки *Heleobia*, причиной данной формы статистического распределения является негативное влияние внешних паразитов на их репродукцию.

В работе [5] вероятностные графики распределения зерен осадочной породы в системе река–озеро по размерам показали, что большинство выборок являются полиmodalными, с тремя модами. Полиmodalное распределение размеров зерен в черноземах Северо-Восточного Китая в большей степени обусловлено ветровой эрозией почв и в меньшей степени – процессами заморозания-испарения и антропогенным влиянием [6]. В статье [7] проведенные экспериментальные исследования динамических характеристик оборудования грануляции микрокристаллической целлюлозы и моногидрата  $\alpha$ -лактозы показали, что степень грануляции и размеры гранул сильно зависят от отношения скорости подачи порошка (сырья) к скорости крутящего момента шнека. Увеличение мод в распределении размеров гранул происходит при уменьшении скорости подачи порошка.

Полиmodalное распределение размеров частиц обусловлено созреванием многокомпонентных дисперсных систем с испарениями (фазовыми превращениями) внутри частиц [8]. Если внешнее давление сопоставимо (или несколько выше) с внутренним давлением насыщенного пара, то для малорастворимых нелетучих веществ образуются сложные статистические распределения.

Форма статистического распределения размеров частиц измельченной инструментальной стали становится более полиmodalной с увеличением времени измельчения и добавления в порошок карбида ванадия [9]. Увеличение разнообразия размеров частиц обусловлено увеличением количества частиц с меньшим диаметром. В работе [10] исследование гранулометрического состава песка (на острове Фишер) показало бимodalное статистическое распределение размеров, а именно песчинок крупного и среднего диаметра. Диаметры песчинок определяются фациальными условиями осадконакопления.

В статьях [11, 12] приводятся доказательства того, что мембранный холестерин модулирует полиmodalную трансдукцию агонистов, отек и температурные стимулы в радиальной глии сетчатки глаза. Подтверждается, что внешние манипуляции с липидным микроокружением являются причиной модуляции восприятия химических, осмотических и температурных стимулов, приводящих к полиmodalности.

В перечисленных работах в динамическом режиме исследуются открытые системы совершенно различной природы (физико-механические, биологические, физиологические, фациально-геологические и геохимические). Динамику всех систем можно охарактеризовать одним параметром – интенсивностью процесса преобразования среды. При этом регистрируемые количественные характеристики преобразованных элементов линейно связаны с параметром интенсивности исследуемого процесса. А формирование каждой мо-

ды в полиmodalном статистическом распределении интенсивности преобразования может характеризоваться универсальным режимом воздействия.

Поэтому целью настоящей работы является представление универсальной кинематической теории формирования полиmodalного статистического распределения количества преобразованных элементов открытой системы с её эмпирическим приложением при статистическом анализе вторичных минералов, обусловленных процессом наложенного эпигенеза в геологической системе. В рамках данной универсальной теории в качестве объектов исследования анализируются статистические распределения содержания каолинитов в образцах песчаных и алевролитистых пород юрского возраста Столбового нефтегазосного месторождения, а также интенсивность процесса вторичной каолинитизации в песчаных коллекторах нефтегазовых месторождений полуострова Ямал.

#### Методы исследования

Внутренние преобразования любой открытой равновесной системы (химической, гидродинамической, геологической, географической, биологической и т. д.) происходят при поступлении внешних источников влияния, меняющих состояние системы. Рассмотрим элементарную структуру системы в единичном объеме (площади, отрезке), состоящую из единообразных элементов. Внутренние элементы преобразуются за определенное время ( $\tau$ ), равное отношению количества трансформировавшихся элементов к средней скорости трансформации состояний этих элементов. На рис. 1 показана принципиальная схема взаимодействия внешних элементов (2) с внутренними элементами (1) системы. Вероятность трансформации внутренних элементов характеризуется средним эффективным сечением взаимодействия ( $\pi^2$ ), энергией внешнего воздействия и внутренней энергией системы. Внешние элементы, пересекая пространство потенциального воздействия с определенной средней скоростью:  $\langle L/\Delta t \rangle$  объем воздействия в пределах сферы радиуса  $r$ , вступают во взаимодействие с внутренними элементами системы.

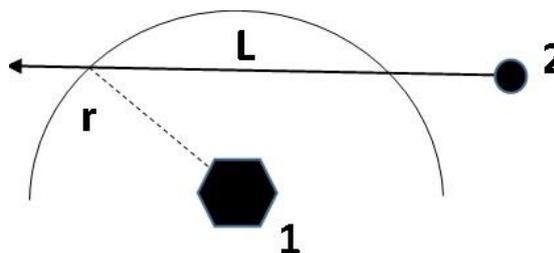


Рис. 1. Схема взаимодействия элементарной структуры системы (1) и внешнего источника (2), где  $r$  – радиус взаимодействия,  $L$  – длина пролета внешнего элемента

Fig. 1. Scheme of interaction between the elementary structure of the system (1) and the external source (2), where  $r$  is the interaction radius,  $L$  is the span length of the external element

Время пролета внешних элементов воздействия ( $t$ ) отражает период воздействия внешней среды, а время

процесса взаимодействия с последующим преобразованием количественных *характеристик* элементов системы – внутреннее время трансформации ( $\tau$ ). Внутреннее время трансформации системы равно усреднённому времени изменения состояний всех взаимодействующих единообразных элементов системы. А время преобразования внутреннего элемента (соответственно и радиус взаимодействия) зависит от термодинамических, энергетических либо структурно-информационных характеристик системы и внутренних индивидуальных атрибутов преобразующихся элементов относительно характеристик внешних элементов влияния. В этом случае, если период времени пролета внешних элементов влияния окажется меньше периода времени взаимодействия с преобразованием внутренних элементов, вероятность трансформации элементов системы близится к нулю. Внутренние элементы не успевают контактировать необходимым образом с внешними элементами. Но, когда за время движения внешних элементов внутри пространства воздействия внешние элементы, взаимодействуя с внутренними компонентами системы, успевают осуществлять преобразование, т. е. представляют собой временную составную подсистему (с возможным дальнейшим процессом релаксации преобразования), вероятность процесса случайной трансформации самой системы стремится к единице. Это условие назовем *первым условием преобразования*:

$$\Delta\tau \leq \Delta t. \quad (1)$$

При внешнем воздействии на систему часть внешней энергии идет на структуризацию элементов системы (полезную работу), а часть – на повышение энтропии (тепло) и на вывод сопутствующих элементов из системы во внешнюю среду. Чтобы реализовалась трансформация системы, необходимо согласование определенных характеристик внешней и внутренней энергий. Вероятность ( $P$ ) преобразования систем будет пропорциональна отношению усреднённой энергии внешнего воздействия ( $\Delta E_t$ ), совершающего работу структуризации, к внутренней энергии ( $E_\tau$ ) систем, резонирующей (участвующей) в структурном формировании.

Для различных классов систем типы энергий и формы воздействий на систему будут различаться. Например, в термодинамической системе под  $\Delta E_t$  понимается разность энергии (на входе и выходе), зависимость от внешнего давления и температуры, а под внутренней энергией – энтальпия. В свою очередь, энергия перехода (преобразования) квантовомеханической системы из одного энергетического состояния в другое пропорциональна  $\nu$  – частоте поглощения, излучения квантов ( $E = \hbar\nu$ , где  $\hbar$  – постоянная Планка), т. е. обратно пропорциональна его периоду. Вероятность перехода элементов квантового ансамбля зависит от совокупности спонтанного влияния между собой внутренних элементов на собственные квантовые состояния и от характеристик внешних элементов. Однако вне зависимости от классов систем кинематические принципы их преобразования должны быть универсальны.

Эквивалентную вероятность преобразования систем (в случае её трансформации) можно записать в виде пропорции:

$$P \sim \frac{\langle \Delta E_t \rangle}{\langle E_t \rangle} \sim \frac{\langle \nu_t \rangle}{\langle \nu_\tau \rangle} \sim \frac{\langle \tau \rangle}{\langle t \rangle} \sim \frac{\Delta \tau}{\Delta t}.$$

Согласно закону Винера–Шеннона–Эшби управляющая (внешняя) система должна превосходить по сложности и мощности управляемую (внутреннюю) систему [13]. Если мощность внешнего фактора больше мощности внутреннего:  $dE_t/dt > dE_\tau/dt$ , то решением данного неравенства будет условие (1).

На основании закона сохранения полная сумма энергий до взаимодействия ( $E_0$ ) равна сумме энергий после преобразования:

$$E_{t_0} + E_{\tau_0} = E_t + E_\tau.$$

При  $\nu_t = 1/t$  и  $\nu_\tau = 1/\tau$  перепишем закон сохранения как:

$$\frac{1}{t_0} + \frac{1}{\tau_0} = \frac{1}{t} + \frac{1}{\tau}.$$

Преобразуя полученное равенство (при условии  $t_0 > t$ ), получим следующую формулу:

$$P \sim \frac{\tau}{t} = \frac{t_0}{\tau_0} \frac{\Delta \tau}{\Delta t}. \quad (2)$$

Открытая система с определенными характеристиками трансформируется в результате поступления внешних элементов, тем самым элементы системы приобретают новые качества характеристик, зависящих от начальных значений ( $A_0$ ), т. е. последующий процесс обусловлен предыдущим состоянием преобразования системы. В этом случае интенсивность процесса преобразования открытых систем будет соответствовать условной, двумерной вероятности трансформации системы – элементы системы преобразуются в последующие при условии существования внутренних элементов с характеристиками, соответствующим характеристикам внешних элементов. Согласно равенству (2) вероятность процесса ( $A$ ) преобразования открытых систем (либо случайных квантовых событий) эквивалентна вероятности образования новых элементов и, соответственно, её условной интенсивности ( $i$ ), равной отношению внутреннего периода преобразования системы к периоду времени течения внешнего воздействия. Отношение времен преобразования и течения характеризует вероятность трансформации систем.

Получается, что  $I$  – относительная интенсивность процесса преобразования открытых систем как на макро, так и на микроуровне, пропорциональна двумерной вероятности ( $P(A; A_0)$ ) и подобна условной вероятности ( $P(A|A_0) = P(A; A_0)/P(A_0)$ ), соответственно, отношению разниц временных параметров:

$$I \sim P(A; A_0) \sim P(A|A_0) \sim i \equiv \frac{\Delta \tau}{\Delta t} \leq 1.$$

До настоящего преобразования в реальном времени существующие элементы открытой системы трансформировались из начальных элементов с начальными входными временными параметрами:  $\tau_0$

и  $t_0$ . Поэтому разница временных параметров будет определяться как:

$$\Delta\tau = \pm(\tau - t_0) \text{ и } \Delta t = \pm(t_0 - t), \text{ где } \tau_0 \leq t_0; \tau \leq t. \quad (3)$$

Определим интенсивность предыдущего преобразования начальных элементов:

$$i_0 = \frac{\tau_0}{t_0} \leq 1. \quad (4)$$

Интенсивность процесса преобразования системы в реальном времени необходимо определять относительно  $i_0$ , потому что интенсивность настоящего преобразования системы условна и зависит от начальных временных параметров предыдущей трансформации элементов системы:

$$I = q \frac{t_0}{\tau_0} \frac{\Delta\tau}{\Delta t}, \quad (5)$$

где  $q$  – коэффициент пропорциональности.

Устойчивость либо динамическое равновесие процесса преобразования системы (5) при определенных (1), (3), (4) допустимы на основании *второго условия трансформации*:

$$\Delta t \Delta \tau = t_0 \tau_0. \quad (6)$$

Преобразуя равенство (6), можно получить следующую зависимость:

$$\frac{t_0}{\tau_0} = \frac{t}{\tau_0} - \frac{t}{\tau}.$$

Далее, подставив данную зависимость в уравнение (5) и определив производную функции  $dI(\tau)/d\tau \sim 1/\tau^2$ , мы получили отношение, согласно которому выполняется условие устойчивости по Ляпунову:

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} I(\tau) = 0.$$

*Устойчивостью процесса* преобразования систем называют его свойство инвариантности параметров, характеризующих тип трансформации.

Соотношения временных параметров двухпараметрической системы могут различаться с точки зрения существования одного либо двух переменных. В этом случае и состояния процессов реорганизации систем будут различаться. Поэтому возникает необходимость во введении понятия «*состояние процесса*» преобразования элементов и характеристик системы.

Под *состоянием процесса* (не объекта) преобразования системы понимаются устойчивые значения относительных переменных временных параметров (периодов) преобразования элементов системы и пролета внешних компонентов воздействия на данные элементы. Состояние процесса определяется в векторном пространстве независимых временных координат.

При одной переменной градиент интенсивности процесса преобразования системы может быть *пропорционален* только градиенту времени потока внешних элементов либо градиенту времени внутреннего преобразования системы. Причиной преобразования является внешнее воздействие, обладающее определенным пространственным направлением. Все про-

странственные структурные изменения системы направлены данному внешнему потоку.

*Пропорциональное состояние процесса* – это такое состояние, когда в двухпараметрической системе только один параметр может быть переменным (например,  $\Delta t$ ), а изменение интенсивности преобразования ( $I(\Delta t)$ ) пропорционально изменению соответствующего параметра ( $\Delta\tau/\Delta t \sim I(\Delta t)$ ), причем второй параметр ( $\Delta\tau$ ) остается постоянным (либо наоборот:  $\Delta t$  – постоянный, а  $\Delta\tau$  – переменный).

Для пропорционального состояния частные производные интенсивности (5) по времени будут соответствовать следующим значениям:

$$\frac{\partial I(\Delta t)}{\partial(\Delta t)} = - \frac{Q \Delta \tau}{\Delta t^2}, \quad (7)$$

либо

$$\frac{\partial I(\Delta \tau)}{\partial(\Delta \tau)} = \frac{Q}{\Delta t} = const. \quad (8)$$

Параметр  $Q = qt_0/\tau_0$ . Согласно полученным зависимостям пропорционального состояния (7), (8), изменение интенсивности процесса преобразования системы связано только с квадратом переменного параметра ( $\Delta t$ ) внешнего воздействия.

*Непропорциональное состояние процесса* – это такое состояние, когда в двухпараметрической системе переменными являются одновременно два параметра. Для того чтобы соблюдалось условие (6) при изменении периода  $\Delta t$ , необходимо либо обратно-пропорциональное изменение периода  $\Delta\tau$  относительно  $\Delta t$ , либо прямо-пропорциональное изменение произведения времен  $t_0$  и  $\tau_0$  относительно левой части равенства.

Первый случай соответствует непропорциональному состоянию процесса, а второй – пропорциональному изменению интенсивности только в пространстве, потому что начальные временные параметры относятся к прошлым событиям и их производные по реальному времени равны нулю. Для того чтобы реализовались как пропорциональные, так и непропорциональные состояния процессов на основании равенства (6), необходимо ввести их в условие стабилизации:

$$\frac{\Delta t \Delta \tau}{t_0 \tau_0} = const. \quad (9)$$

*Стабильным состоянием преобразования* называют процесс, при котором сохраняются постоянными во времени либо по пространству характеристики и законы распределения погрешностей параметров данного процесса. Величина постоянной меняется в зависимости от типа преобразования. Если в природе проявляются стабильные состояния, то должны реализовываться и мобильные.

*Мобильное состояние процесса преобразования* – это такое состояние, когда не выполняются условия стабилизации, т. е. левая часть равенства (9) не является постоянной величиной. В этом случае устойчивость преобразования (6) система приобретает только при пропорциональном состоянии процесса.

Итак, мы получаем три устойчивых базовых типа состояний процессов внутреннего преобразования открытых систем: пропорционально-стабильное (ПС); пропорционально-мобильное (ПМ) и непропорционально-стабильное (НС), что позволяет провести аналогию с диалектическими категориями Гегеля – триадой: тезис–антитезис–синтез. В состояниях процессов данные категории будут звучать как ПМ–НС–ПС. Здесь явные противоположные понятия (ПМ и НС) объединяются в процессе ПС.

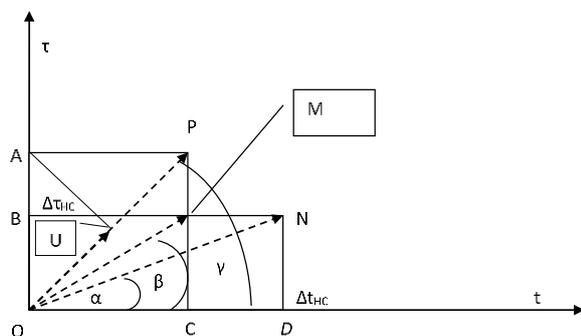


Рис. 2. Устойчивые состояния процессов преобразования в системе координат времени преобразования элементов структуры ( $\tau$ ) и времени потока внешних элементов влияния ( $t$ ) в определенном объеме систем

Fig. 2. Stable states of the transformation processes in the coordinate system of the time of transformation of the structure elements ( $\tau$ ) and the time of the flow of external influence elements ( $t$ ) in a certain volume of systems

Исследуем ортогональную временную систему координат  $\tau$  и  $t$ , когда произведения равенства (6) равны единице (рис. 2). При данном условии площади квадрата и четырехугольника будут равны единице, т. е.:  $\Delta\tau_{ПС} = \Delta t_{ПС} = 1$  и  $\Delta\tau\Delta t_{ПС} = \Delta\tau\Delta t_{НС} = 1$ . Стороны двух фигур определяются на основании решения квадратного уравнения:

$$\Delta\tau_{ПС}^2 = \Delta\tau_{НС}^2 + \Delta\tau_{ПС}\Delta\tau_{НС}. \quad (10)$$

Единственным решением уравнения (10) для положительного значения будет число «золотой» пропорции [14]:

$$\Phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1,618\dots$$

Это число обладает уникальным свойством:  $1/\Phi = (\Phi - 1) = \varphi$ , а их произведение  $\Phi\varphi = 1$ . Поэтому

$$\Delta\tau_{НС} = \varphi, \Delta t_{НС} = \Phi \text{ и } \Delta\tau_{НС}/\Delta t_{НС} = \varphi^2. \quad (11)$$

Используя временную диаграмму (рис. 2), где  $|OA| = |OC| = 1$ ,  $|OD| = \Phi$ ,  $|OB| = \varphi$ , и (11), определяем угловые координаты базовых состояний процессов преобразования систем:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \Phi / \sqrt{\Phi^2 + \varphi^2} = 0,9342\dots \text{ (НС}_\delta\text{);} \\ \cos \beta &= 1 / \sqrt{\varphi^2 + 1} = 0,8506\dots \text{ (ПМ}_\delta\text{);} \\ \cos \gamma &= 1 / \sqrt{2} = 0,707\dots \text{ (ПС}_\delta\text{).} \end{aligned} \quad (12)$$

На основании определенных состояний процессов преобразования систем каждый базовый угол соответствует введенным начальным состояниям процессов, а поворотом вектора состояния процесса в системе временных координат, характеризующимся косинусом разности углов, определяется переход в другое состояние процесса. ПС-состояние является аналогом равновесного состояния систем, при котором изменение во времени интенсивности процесса не происходит. Очевидно, что все изменения состояний определяются относительно ПС.

Согласно условию устойчивости (6),  $S$ -площади четырехугольников  $OAPC$  и  $OBND$  равны между собой (равны единице). Причем при условии сохранения базовых углов величины площадей данных четырехугольников могут иметь ещё и второе, минимальное значение –  $S(OAPC) = \varphi^2$ , где  $|OA| = |OC| = \varphi$  и  $S(OBND) = \varphi^2$ , где  $|OB| = \varphi^2$ , а  $|OD| = 1$ .

При вычислении моды-интенсивности процессов преобразования крайне важно определить нижнее граничное значение ( $j$ ) унифицированной интенсивности начального состояния ПС. Относительно этого параметра и будут определяться последующие моды. Унификацию значений мод в статистическом распределении интенсивностей процессов различной природы необходимо проводить с целью приведения вычисляемых математических ожиданий (мод) в соответствие процессам преобразования систем.

Используя правила скалярных произведений векторов, по рис. 2 вычислим нижнее граничное значение:

$$j = |\vec{OA}| |\vec{OP}| \cos \gamma.$$

Величина нижнего граничного значения унифицированной интенсивности равна  $|OU| = |OB| = j = \varphi^2 = 0,3819\dots$ . Математическое ожидание состояния ПС определяется следующим образом:

$$\mu_{ПС} = \frac{j}{\cos(\gamma - \gamma)}.$$

Далее можно определить вектор состояния ПМ\* при одномерном направлении воздействия:

$$|\vec{r}_{ПМ*}| = |\vec{r}_{НС}| |\vec{r}_1| \cos(\gamma - \beta) = j,$$

где  $|\vec{r}_1| = \sqrt{|OC|^2 + |CM|^2} = \sqrt{\varphi^2 + \varphi^4}$ , математическое ожидание (мода) промежуточного состояния одномерного воздействия ПМ\* будет вычисляться как:

$$\mu_{ПМ*} = \frac{|\vec{r}_{ПМ*}|}{\cos(\gamma - \beta)}. \quad (13)$$

Вектор одномерного состояния преобразования НС\* формируется через скалярное произведение векторов:  $|\vec{r}_{НС*}| = |\vec{r}_{НС}| |\vec{r}_2| \cos \gamma = j$ , где  $|\vec{r}_2| = |\vec{OD}| = 1$ ; мода одномерного состояния НС\* равна:

$$\mu_{НС*} = \frac{|\vec{r}_{НС*}|}{\cos(\gamma - \alpha)}. \quad (14)$$

На основании базовых углов определим ещё три угла, являющих собой состояния одномерного воздействия:

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{ПС}} &= \cos(\gamma - \gamma) = 1,0; \\ \lambda_{\text{ПМ}^*} &= \cos(\gamma - \beta) = 0,973\dots; \\ \lambda_{\text{НС}^*} &= \cos(\gamma - \alpha) = 0,912\dots\end{aligned}\quad (15)$$

Если постоянное либо цикличное воздействие внешнего доминирующего ( $d$ ) фактора на процесс преобразования элементов системы имеет некое пространственное анизотропное направление и в тоже время может возникать некое переменное влияние на систему от другого источника, необходимо ввести ещё одну независимую альтернативную переменную  $\Delta t_a$  – период времени внешних альтернативных элементов влияния. Следовательно, после введения ещё одной ортогональной временной координаты  $t_a$  получаем трехмерную систему координат  $t_d t_a$ . Поворот плоскости  $t_d t_a$  в конечную фазу ПМ или НС увеличивает величину вектора состояния и интенсивность рассматриваемого процесса (15). В итоге получаем следующие угловые координаты, отражающие двухмерное воздействие:

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{ПМ}} &= \cos(\gamma - \beta) \cos(\gamma - \beta) = 0,947\dots; \\ \lambda_{\text{НС}} &= \cos(\gamma - \beta) \cos(\gamma - \alpha) = 0,887\dots\end{aligned}\quad (16)$$

Каждая мода соотносится с нормальным статистическим распределением которое характеризуется его стандартным отклонением ( $\sigma \approx 2-3\%$  от  $\mu$ ). Математическое ожидание нижнего граничного значения, т. е. состояния ПС, будет равно:

$$\mu_{\text{ПС}} = j \pm \sigma. \quad (17)$$

На основании (16) два состояния (двухмерные) интенсивностей процессов (как и два предыдущих, одномерных) соответствуют следующим зависимостям:

$$\begin{aligned}\mu_{\text{ПМ}} &= \mu_{\text{ПС}} / \lambda_{\text{ПМ}}, \\ \mu_{\text{НС}} &= \mu_{\text{ПС}} / \lambda_{\text{НС}}.\end{aligned}\quad (18)$$

В итоге, используя следующие зависимости (13), (14), (17), (18), получили статистический комплекс мод, соответствующий интенсивностям процессов пяти состояний преобразования систем, связанных в единое целое. В свою очередь, следующий комплекс мод будет соотноситься с другим нижним значением. Первоначальное состояние ( $k$ ) преобразуется в последующее ПС-состояние по закону:

$$\mu_{\text{ПС}}^{k+1} = \mu_{\text{ПС}}^k / \Psi. \quad (19)$$

Величины постоянной преобразования базовых состояний  $\Psi$  будут различны для доминирующего ( $d$ ) и альтернативного ( $a$ ) внешнего потока. Доминирующий поток – это внешний поток, который действует постоянно либо циклично (во всей системе), а альтернативный поток – это локальный поток воздействия, который проявляется не всегда и не везде. В системе временных координат вектор состояния ПС преобразуется в промежуточное состояние ПС\* с последующим поворотом плоскости на косинус углов НС<sub>6</sub> или ПМ<sub>6</sub>. В итоге получаем константы отношений косинусов базовых углов:

$$\begin{aligned}\Psi_d &= \cos \gamma / \cos \alpha = 0,757\dots; \\ \Psi_a &= \cos \gamma / \cos \beta = 0,831\dots\end{aligned}\quad (20)$$

Таким образом, разрешенные состояния процессов, их дискретность обусловлены угловыми координатами устойчивых (базовых) состояний процессов преобразования в системе временных координат, а инвариантность мод распределения интенсивности процессов – числами «золотой» пропорции при вычислении углов устойчивых состояний процессов преобразования. Очевидно, что дискретные состояния процессов при структуризации систем представляют собой аттрактор. Математические ожидания мод в распределении первого блока интенсивностей устойчивых процессов и их углы дискретных состояний, вычисленных по формулам (12)–(20), приведены в табл. 1.

Следующие моды второго блока определяются относительно одной из мод: ПС(2) ( $d$ , либо  $a$ ).

Моды в полиmodalном статистическом распределении интенсивностей представляют собой экстремумы с величинами унифицированных интенсивностей, приведенных в табл. 1.

Для вычисления величин математических ожиданий (мод) в статистической гистограмме плотности вероятности исследуемой выборки количественных значений было определено универсальное уравнение унифицированных мод для процессов преобразования открытых систем [15]:

$$\mu_{\text{mod}} = \exp \left[ \frac{G_{\text{mod}} - C}{\chi} \right] - 1, \quad (21)$$

где  $G_{\text{mod}} = \frac{n_{\text{mod}}}{\langle n \rangle}; \frac{I_{\text{mod}}}{\langle I \rangle}$ , т. е. относительные величины

любых измеряемых выборочных значений, соответствующих положению мод:  $n_{\text{mod}}$  – содержанию преобразованных элементов,  $I_{\text{mod}}$  – интенсивностям процессов преобразования элементов, измеряемых характеристик элементов системы на уровне мод;  $\langle n \rangle$  и  $\langle I \rangle$  – средневзвешенные значения соответствующих величин;  $C = -3,5$ , а  $\chi$  лежит в пределах 12–14. Для каждой генеральной выборки систем различной природы преобразования среды в гистограмме распределения измеряемого значения константа  $\chi$  в уравнении (21) определяется в случае соответствия математического ожидания моды  $j = \mu_{\text{ПС}} = 0,3819$  минимальной (первой либо в редком случае второй) моде. В этом случае формула вычисления  $\chi$  выглядит так:

$$\chi = \frac{G_{\text{mod}}(1) + 3,5}{0,3235}.$$

Интенсивность процесса вторичной каолинитизации в песчаных породах определялась по методу статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин [16]. В результате процесса вторичной каолинитизации песчаных интервалов между выборками пористости и глинистости наблюдается положительная корреляция. На основании разработанного метода интенсивность процесса преобразования равна произведению коэффициента аппроксимации (между двумя выборками)

и интервального параметра выборочных значений материалов геофизических исследований скважин.

Содержание каолинитов устанавливалось по методу О.А. Черникова с применением микроскопического анализа шлифов песчано-алевролитовых пород

[17], где определение количества минералов на единице площади поверхности шлифа в интервале [0–0,99 %] проводилось с погрешностью  $\pm 0,06$  %, а в интервале [1–10 %] –  $\pm 0,09$  %.

**Таблица 1.** Математические ожидания и углы унифицированных дискретных состояний статистических распределений интенсивностей процессов преобразования систем

**Table 1.** Mathematical expectations and angles of unified discrete state statistical distributions of intensities of transformation processes of systems

Состояния States	Угол, ( $\lambda$ ) рад. Angle, ( $\lambda$ ) rad.	Математические ожидания, ( $\mu$ ) усл. ед. Mathematical expectations, ( $\mu$ ) conditional units	Описание принципа состояния процесса Description of the principle of the process state
ПС/PS	1	0,382	Начальное равновесное состояние процесса Initial equilibrium state of the process
ПМ*/PM*	0,973	0,392	Уменьшение времени воздействия внешнего доминирующего фактора либо увеличение времени преобразования внутренней системы относительно равновесного состояния процесса Reducing the exposure time of the external dominant factor, or increasing the transformation time of the internal system relative to the equilibrium state of the process
ПМ/PM	0,947	0,403	Уменьшение времени течения внешнего фактора либо увеличение времени преобразования внутренней системы под действием доминирующего и альтернативных источников влияния относительно равновесного состояния процесса Reducing the flow time of an external factor, or increasing the transformation time of the internal system under the action of the dominant and alternative sources of influence, relative to the equilibrium state of the process
НС*/NS*	0,912	0,418	Уменьшение времени воздействия внешнего доминирующего фактора и пропорциональное увеличение времени преобразования внутренней системы относительно равновесного состояния процесса Reducing the time of influence of the external dominant factor and a proportional increase in the transformation time of the internal system relative to the equilibrium state of the process
НС/NS	0,887	0,43	Уменьшение времени воздействия внешнего фактора и пропорциональное увеличение времени преобразования внутренней системы включительно под действием доминирующего и альтернативного источников влияния относительно равновесного состояния процесса Reduction of time of influence of an external factor and a proportional increase of time of transformation of the internal system inclusive under the action of dominant and alternative sources of influence relative to the equilibrium state of the process
ПС(2)a/PS(2)a	0,831	0,459	Равновесное состояние процесса в альтернативном внешнем потоке относительно начального равновесного состояния процесса Equilibrium state of the process in the alternative external flow relative to the initial equilibrium state of the process
ПС(2)d/PS(2)d	0,757	0,504	Равновесное состояние процесса в доминирующем внешнем потоке относительно начального равновесного состояния процесса Equilibrium state of the process in the dominant external flow relative to the initial equilibrium state of the process

### Результаты исследования

Содержания глинистых минералов в песчаной породе контролируются реакциями стадийного и наложенного эпигенезов. Принципиальным отличием процесса наложенного эпигенеза от стадийного является пространственная зональность вторичной каолинитизации в результате углекислотного метасоматоза алюмосиликатных компонентов, обусловленного поступлением в коллектор кислых глубинных флюидов с pH=4–5 [18]. В этом случае, в отличие от стадийного эпигенеза, при наложенном эпигенезе статистические распределения интенсивностей вторичных процессов при вертикальном и латеральном исполнении будут различаться.

На рис. 3 показаны две гистограммы усредненных данных интенсивностей процесса вторичной каолинитизации в песчаных пластах мезозоя на территории двух нефтегазовых месторождений полуострова Ямал. Вторичная каолинитизация, как правило, реализуется в флюидопроницаемых пластах песчаной породы в результате углекислотного метасоматоза при геохимическом процессе наложенного эпигенеза. Эмпирические данные интенсивностей процессов каолинитизации 70-ти пластов в 55-ти скважинах усреднялись по пластам (пунктирная кривая) и по скважинам. Моды вычислялись согласно уравнению (21). Построены две гистограммы, подтверждающие, во-первых, что вторая мода «по пластам» ( $\mu_n=0,418$ , состояние НС\*) отличается от второй, двумерной моды «по скважинам» ( $\mu_c=0,43$ , состояние НС), во-

вторых, присутствие моды ПС(2)d ( $\mu_{п}=0,493$ ) в «скважинной» гистограмме и её отсутствие в «пластовой», но присутствие двух близкорасположенных данных ПС(2)a ( $\mu_{п}=0,457$ ;  $\mu_{с}=0,468$ ). Перечисленные различия объясняются тем, что, усредняя интенсивности вторичных процессов по пластам, мы получаем наиболее вероятную связь интенсивности только с латеральным (альтернативным) влиянием флюида (доминантное влияние нивелируется), в отличие от «скважинной» гистограммы, где присутствуют два источника воздействия. Это связано с тем, что вертикальная скважина всегда находится на каком-либо латеральном расстоянии от вертикального канала фильтрации.

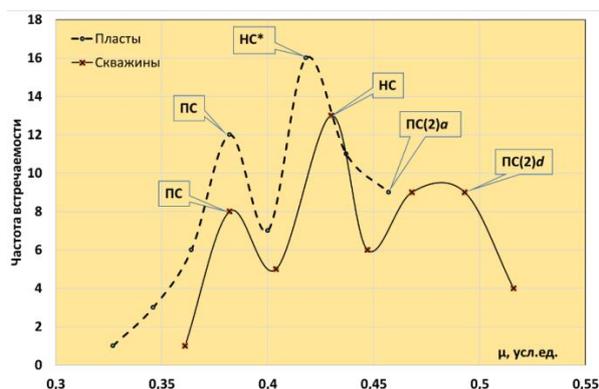


Рис. 3. Гистограммы мод, усредненных по пластам (пунктирная линия) и по скважинам унифицированных интенсивностей вторичной каолинитизации в песчаных интервалах нефтегазовых месторождений полуострова Ямал

Fig. 3. Histograms of modes averaged by strata (dashed line) and by wells of unified secondary kaolinitization intensities in sandy intervals of oil and gas fields of the Yamal Peninsula

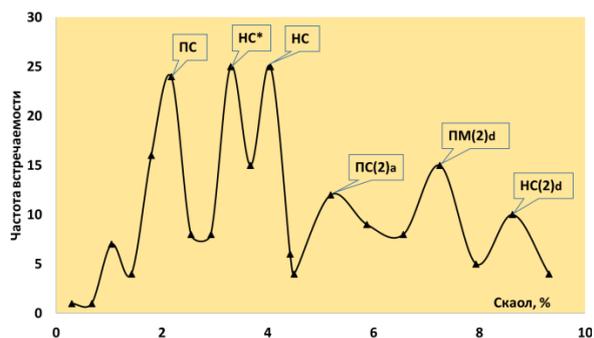


Рис. 4. Гистограмма полиmodalного статистического распределения содержания каолинитов в песчаных и алевролитистых породах верхнеюрских отложений Столбовой площади

Fig. 4. Histogram of the polymodal statistical distribution of kaolinite content in sandy and siltstone rocks of the Upper Jurassic deposits of the Stolbovaya area

В свою очередь, с целью эмпирического подтверждения полиmodalности статистического распределения содержания каолинитов и соответствия их мод вычисленным константам (табл. 1) был проведен статистический анализ выборки данных содержания ка-

олинитов ( $S_{каоил}$ ) для 210 образцов керна песчаных пород верхнеюрского горизонта Столбового нефтегазового месторождения. Чтобы получить гистограмму с ярко выраженными модами, генеральную выборку содержания каолинитов разделили на две группы – 0,3–4,4 и 4,5–10 %. Две гистограммы объединили в одну – шестимодальную (рис. 4). Далее, используя уравнение (21) относительно моды содержания каолинитов в нижнем граничном значении ПС – 2,175 %, вычислили остальные пять мод при средневзвешенном  $\langle n_{каоил} \rangle = 4$  % и  $\chi = 12,49$  (табл. 2). Образцы керна в десяти скважинах отбирались с одного горизонта ( $Ю_1$ ).

На рис. 4 моды группы состояний процессов ПМ отсутствуют. Очевидно, это связано с тем, что при поступлении глубинных гидротерм в ПС-интервал резко меняется кислотно-щелочной баланс среды данного интервала в коллекторе, а это возможно только в состоянии ПС.

Анализ результатов, занесенных в табл. 2, показал, что величины мод прямо пропорциональны усредненной песчаности с коэффициентом корреляции +0,99. К тому же величины мод нелинейно зависят от усредненной глубины залегания образцов керна, при обратном линейном тренде коэффициент корреляции равен –0,62. Глубины залегания образцов определялись только в тех интервалах скважин, которые встречаются во всех состояниях мод. Корреляционные зависимости содержания каолинитов с пиритами выявили положительную регрессию только для состояний процессов ПС(2)a и ПМ(2)d (рис. 5). В свою очередь, определились регрессии между выборками содержаний каолинитов с биотитами для состояний ПС\*, ПС(2)a и ПМ(2)d (табл. 2).

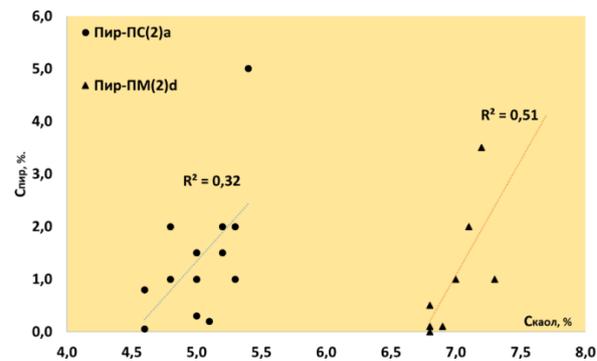


Рис. 5. Сопоставления содержаний пиритов ( $S_{пир}$ ) с каолинитами ( $S_{каоил}$ ) для состояний процессов ПС(2)a и ПМ(2)d

Fig. 5. Comparisons of the pyrite ( $S_{pir}$ ) and kaolinite ( $S_{caoil}$ ) contents for the states of the PS(2)a and PM(2)d processes

В табл. 2 коэффициенты корреляции (R) между выборками определялись по совокупности содержаний каолинитов в рамках интервалов каждой моды. Например, для состояний ПС –  $S_{каоил} = [3,8–4,2]$  % и ПС\* –  $S_{каоил} = [3,0–3,5]$  %.

**Таблица 2.** Эмпирические данные состояния процесса каолинитизации на основании петрографического исследования ядра Столбового месторождения

**Table 2.** Empirical data on the state of the kaolinization process based on petrographic study of core from the Stolbovoe deposit

Состояние States	Скаоил, % Kaolinite content, %	μ, усл. ед. Moda, conditional units	R(каоил/пирит) Correlation coefficient between kaolinite and pyrite	R(каоил/биотит) Correlation coefficient between kaolinite and biotite	Песчанность, д. ед. Sandiness, e. g.	Усредненная глубина залегания, м Average depth of occurrence, m
ПС	2,17	0,382	нет/но	нет/но	0,45	2625,0
НС*	3,30	0,414	нет/но	+0,6	0,53	2621,5
НС	4,05	0,430	нет/но	нет/но	–	2615,0
ПС(2)а	5,18	0,468	+0,57	+0,78	0,60	2627,0
ПМ(2)d	7,25	0,530	+0,71	–0,84	0,70	2609,0
НС(2)d	8,63	0,570	–	–	–	–

### Обсуждение результатов

При исследовании интенсивностей вторичных преобразований песчаных пластов в разрезах скважин, определив интенсивности в 10–30 глубинных пластах и в десятках скважинах на изучаемой площади, можно построить два типа гистограмм в зависимости от латеральной либо вертикальной миграции флюидов. Для этого, усредняя данные интенсивности исследуемых горизонтов (пластов) по скважине, мы получаем выборку (по количеству скважин) закономерности латерального распределения флюида и, наоборот, усредняя скважинные данные интенсивностей по пластам, мы получаем закономерности вертикального распределения (по количеству исследуемых пластов) всего разреза (рис. 3). В этом случае источником и причиной миграции флюидов являются глубинные вертикальные каналы фильтрации, а латеральное течение по сути вторично. Поэтому вертикальное распределение будет отражать доминирующий поток, а латеральная гистограмма – альтернативный внешний фактор. В первом случае в распределении интенсивностей кроме моды № 6 появится мода № 7 (табл. 1), а во втором случае – только мода № 6, относительно которых определяются последующие моды данных гистограмм.

Содержания каолинитов в песчаной породе прямо пропорциональны интенсивностям процесса вторичной каолинитизации [15, 16]. Полиmodalная форма распределения содержания каолинитов доказывает их вторичность – образованы в результате процесса наложенного эпигенеза (рис. 4). Каждая мода будет соответствовать состояниям процессов, описанных в табл. 1.

Высокая положительная корреляция песчаности с величинами мод каолинитизации (табл. 2) подтверждает то, что с увеличением проницаемости с соответствующей скоростью фильтрации потока флюида (уменьшается  $\Delta t$ ) увеличивается интенсивность процесса преобразования породы, соответственно, и содержание вторичных минералов.

Интересны зависимости величин мод от усреднённых глубин залегания образцов ядра. Состояния ПС и ПС(2)а расположены в нижней части исследуемых интервалов (до глубины 2625 м), причем ПС – в низкопроницаемой зоне, а ПС(2)а – в нижней зоне, с относительно высокой проницаемостью породы, что и соответствует теоретическим данным табл. 1. Остальные динамические состояния НС\*, НС и ПМ(2)d расположились сверху, в зависимости от степени проницаемости песчаной породы, с соответствующим влиянием динамики внешнего флюида на интенсивность преобразования среды.

При изучении корреляционных связей (парагенез) содержания каолинитов с пиритами, были обнаружены положительные регрессии только для двух состояний: ПС(2)а и ПМ(2)d. Согласно монографии Б.А. Лебедева, благодаря растворению  $\text{CO}_2$  в воде при поступлении глубинной гидротермальной смеси в коллекторе образуется кислая среда с  $\text{pH}=4-5$  [18]. В этом случае алюмосиликаты (мусковит, калиевый полевой шпат, слюда и т. д.) преобразуются в каолинит с углекислотой и катионами в растворе. Пириты при этой же кислотности (и температуре ниже 100 °С) в растворе среды непосредственно образуются в смеси из раствора (через стадию гидротроилитизации) с высокой скоростью [19]. Получается, что условиями парагенеза рассматриваемых минералов являются соответствующая постоянная кислотность раствора и присутствие потока внешнего флюида с относительно высокой скоростью. Причем скорость потока может быть как переменная, так и постоянная, что полностью соответствует данным состояниям (пропорциональным: ПС(2), ПМ(2)) процессов, рассмотренных в табл. 2 (рис. 5).

Биотиты, в отличие от сульфидов, в большей степени являются не столько метаморфическими, сколько магматическими минералами, т. е. могут входить в матрицу песчаника [20]. В результате поступления внешних кислых флюидов (с постоянной  $\text{pH}=4-5$ ) матрица песчаника растворяется, аллотигенные биотиты преобразуются во вторичные каолиниты, а часть компонентов матрицы выносится, следовательно, содержания биотитов будут обратно пропорциональны содержанию каолинитов. Данные преобразования возможны при состоянии процесса ПМ(2)d, так как в этом случае при постоянной кислотности переменная повышенная скорость фильтрации позволяет выносить из системы растворенные компоненты матрицы с различной скоростью, что соответствует условию изменяемой интенсивности преобразования породы.

Положительные регрессии выборочных данных содержания каолинитов с биотитами, осуществляемые только в состояниях ПС(2)а и НС\*, объясняются следующим образом: во-первых, данные состояния тождественны условию стабилизации (9); во-вторых, при  $\Delta t/\Delta t = \text{const}$  изменение содержания вторичных, аутигенных каолинитов должно быть прямо пропорционально изменению содержания аллотигенных биотитов в пространстве (по глубине:  $dI \sim dQ$ ); в-третьих, рассматриваемые состояния характеризуются

ются постоянной скоростью потока флюида, в отличие от состояний ПС, НС и ПМ.

При состояниях процессов преобразования ПС и НС исследуемые корреляции не проявили себя вследствие того, что ПС – состояние застойной водной среды либо движущего флюида со сверхнизкой скоростью, а НС и ПМ – состояния с переменным альтернативным внешним влиянием. Отсутствие эмпирических данных состояния НС(2) объясняется малой выборкой.

#### Заключение

Согласно представленной универсальной кинематической теории преобразования открытых систем были вычислены константы, связанные с «золотой» пропорцией, соответствующие величинам мод в унифицированных полиmodalных статистических распределениях количества преобразованных элементов. Каждая из семи универсальных мод соотносится с определенным уникальным принципом состояния процесса преобразования элементов систем. Интенсивность трансформации элементов открытой системы подчиняется закону отношения двух периодов: времени преобразования системы к времени течения (воздействия) на элементы данной системы. В настоящей работе в качестве открытой системы рассмотрен песчаный коллектор верхнеюрского возраста Столбового нефтегазового месторождения. Преобразованными элементами системы явились содержания таких вторичных аутигенных минералов, как каолиниты, пириты и группы аллотигенных филлосиликатных минералов – биотитов, определенных по керну. Проводились исследования распределения интенсивностей процесса каолинитизации в песчаных пластах мезозоя различных нефтегазовых месторождений полуострова Ямал. Источником процессов преобразова-

ния породы коллектора являются глубинные флюиды, поступающие по проницаемым зонам литосферы.

Итак, на основании результатов проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Статистические распределения интенсивностей (содержаний) преобразованных элементов открытой системы песчаного коллектора в процессе наложенного эпигенеза всегда будут иметь полиmodalную форму.
2. Вычисленные величины мод полиmodalного распределения интенсивностей и содержаний вторичных каолинитов (в песчаной породе коллектора), после унификации распределения относительно первой моды, полностью соответствуют теоретически определенным константам (аттракторам), являющимся показателем состояний процессов преобразования.
3. Modalности состояний процессов каолинитизации в песчаных коллекторах вдоль скважин и по латерали отличаются в соответствие с законами гидродинамического распределения потока глубинных флюидов – мода «скважинной» интенсивности соотносится с двумя потоками: вертикальным (доминирующим) и латеральным (альтернативным); а мода интенсивности «по латерали» – только с альтернативным потоком.
4. Получив совокупность интенсивностей процессов либо содержаний вторичных элементов (минералов) некой открытой геологической системы и вычислив моды в полиmodalном распределении данной выборки, можно привести в соответствие содержания минералов с процессами их образования и, таким образом, на их основании в исследуемых интервалах пласта выделить зоны с интересующими свойствами и характеристиками.
7. Mendez Torrecillasa C., Halberta G.W., Lamprou D.A. A novel methodology to study polymodal particle size distributions produced during continuous wet granulation // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2017. – V. 519. – P. 230–239. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378517317300248?via%3Dihub> (дата обращения 30.03.2023).
8. Fedoseev V.B., Fedoseeva E.N. Formation of Bi-and Polimodal distributions and the Nonostwald behavior of Disperse System // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2019. – V. 92. – № 5. – P. 1191–1200.
9. Analysis of milling efficiency of the Vanadis 8 tool steel with additions of vanadium and molybdenum carbides / E.L. Barbedoa, P.H. Gonçalves, M.S. Lamoglia, A.M.P. Pontesa, B.H.B. Kuffnera, G.F. Gomesa, G. Silvae // *Materials Research*. – 2021. – V. 24. – № 5. URL: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0054> (дата обращения 31.03.2023).
10. Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments on Fisher Island and Broknes Peninsula, East Antarctica / Rajesh Asthana, Prakash Kumar Shrivastava, Hari Bahadur Srivastava, Mirza Javed Beg, Pradeep Kumar // *Advances in Polar Science*. – 2013. – V. 4. – № 24. – P. 281–295. URL: <http://journal.polar.org.cn/EN/10.3724/SP.J.1085.2013.00281> (дата обращения 31.03.2023).
11. Cholesterol regulates polymodal sensory transduction in Müller glia / Lakk M., Yarishkin O., Baumann J.M., Iuso A., Križaj D. // *Glia*. – 2017. – V. 65. – P. 2038–2050. DOI: 10.1002/glia.23213
12. Polymodal TRPV1 and TRPV4 sensors colocalize but do not functionally interact in a subpopulation of mouse retinal ganglion cells / M. Lakk, D. Young, J.M. Baumann, A.O. Jo, H. Hu,

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельник И.А. Соотношение временных параметров геохимического процесса наложенного эпигенеза и «золотое сечение» // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. – 2015. – № 5. – С. 30–39.
2. Мельник И.А. Полиmodalность гистограмм геологических характеристик как критерий флюидодинамики // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 66–74.
3. Lamperta A., Tlustý T. Resonance-induced multimodal body-size distributions in ecosystems. – 2013. – V. 110. – № 1. – P. 205–209. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1211761110> (дата обращения 30.03.2023).
4. Merlo M.J., Parietti M., Etchegoin J.A. Long-term study of the life cycle of the freshwater snail *Heleobia parchappii* (Mollusca: Cochliopidae) in a lentic environment in Argentina. – 2016. – V. 35 (1). – P. 49–60. DOI: 10.23818/limn.35.04 URL: <https://www.limnetica.com/es/long-term-study-life-cycle-freshwater-snail-heleobia-parchappii-mollusca-cochliopidae-lentic> (дата обращения 30.03.2023).
5. Ashley G.M. Interpretation of polymodal sediments // *The Journal of Geology*. – 1978. – V. 86. – № 4. – P. 411–421. URL: <https://doi.org/10.1086/649710> (дата обращения 30.03.2023).
6. Distributions of particle sizes in black soil and their environmental significance in Northeast China / Binghe Yan, Yulan Zhang, Shuying Zang, Qiang Chen, Li Sun // *Sustainability*. – 2021. – V. 13. – № 7. URL: <https://doi.org/10.3390/su13073706> (дата обращения 30.03.2023).

- D. Križaj // *Frontiers*. – 2018. – V. 12. DOI: 10.3389/fncel.2018.00353 URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fncel.2018.00353/full> (дата обращения 31.03.2023).
13. Tabilo Alvarez J., Ramirez-Correa P. A brief review of systems, cybernetics, and complexity // *Complexity*. – 2023. – V. 2023. URL: <https://doi.org/10.1155/2023/8205320> (дата обращения 30.03.2023).
  14. Stakhov A. Numeral systems with irrational bases for mission-critical applications. – December 2017. – P. 284. URL: <https://doi.org/10.1142/10671> (дата обращения 31.03.2023).
  15. Мельник И.А. Основы статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин. – М.: РУСАЙНС, 2022. – 76 с.
  16. Мельник И.А. Статистическая интенсивность процессов преобразования открытых геологических систем на основе геофизических данных // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2022. – № 4. – С. 22–27.
  17. Черников О.А. Литологические исследования в нефтепромысловой геологии. – М.: Недра, 1981. – 236 с.
  18. Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Л.: Недра, 1992. – 239 с.
  19. Исследование механизма образования пирита в водных растворах при низких температурах и давлениях / С.В. Козеренко, Д.А. Храмов, В.В. Фадеев, А.М. Калинин, И.Н. Маров, Г.А. Евтикова, В.С. Русаков // *Геохимия*. – 1995. – № 9. – С. 1553–1565.
  20. Mineral chemistry of Ti-rich biotite from pegmatite and metapelitic granulites of the Kerala Khondalite Belt (southeast India): Petrology and further insight into titanium substitutions / B. Cesare, M. Satish-Kumar, G. Cruciani, Sh. Pocker, L. Nodari // *American Mineralogist*. – 2008. – V. 93. – P. 327–338. DOI:10.2138/am.2008.2579

*Поступила: 05.04.2023 г.*

*Прошла рецензирование: 20.06.2023 г.*

#### **Информация об авторах**

**Мельник И.А.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 552.4; 549.905.1; 549.905.3+ 519.254; 519.257

## POLYMODALITY OF SECONDARY KAOLINITE DISTRIBUTION IN OPEN SANDY RESERVOIR SYSTEMS

Igor A. Melnik<sup>1</sup>,  
melnik@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance.** Numerous studies of the forms of distributions of the registered characteristics of the investigated environment according to the results of transformation of open systems have shown that the intensities and contents of transformed elements have a polymodal form of statistical distribution in the case of external impact on the system. Apparently, the essence of the phenomenon of statistical polymodality of transformation of systems is universal. Therefore, the universal theory of polymodal distribution formation can be used to analyze samples of secondary mineral contents in permeable sand reservoirs, which are open systems. Obviously, each mode of the polymodal statistical distribution of the transformed elements will be the result of the manifestation of some attractor.

**The purpose** of this paper is to present a universal kinematic theory of the formation of a polymodal statistical distribution of the number of transformed elements of an open system, where secondary clay minerals – kaolinites, due to superimposed epigenesis in a sandy reservoir are considered as the formed elements.

**The objects** of the study are samples of secondary kaolinitization intensity values in sand intervals of oil and gas fields of the Yamal Peninsula and the contents of secondary kaolinite (determined from the core) in Upper Jurassic sand strata of the Stolbovov oil and gas field. Secondary kaoliniteization is caused by the influence of deep fluids.

**The research method** was determined on the basis of the obtained equation of unified modes of polymodal distribution of the number of transforming elements (in transformation of systems). The number (intensity) of transformed elements is proportional to the ratio of the system transformation time to the flow time of the external influence on the elements of this system. Seven basic constants (attractors) related to the «golden» proportion were theoretically calculated, bringing them into conformity with universal principles of system transformation processes states.

**Results.** Having compared constants obtained theoretically with calculated unified values of modes of empirical data, the states of system transformation processes with respect to each mode have been determined. Analysis of modes calculated in a polymodal distribution of secondary kaolinite intensities and kaolinite content, as well as comparing mode values (with corresponding transformation principle) with empirical data on transformation processes gave evidence for the validity of the universal kinematic theory.

**Conclusions.** Thus, using universal principles of transformation, on the basis of the determined contents of secondary kaolinite in the studied intervals of permeable strata, it is possible to allocate zones with the chemical and hydrodynamic properties and characteristics of interest.

### Key words:

Polymodal statistical distributions, secondary geochemical processes, superimposed epigenesis processes, secondary kaoliniteization, attractor, geochemistry, open systems, «golden» proportion.

### REFERENCES

- Melnik I.A. The ratio of time parameters of the geochemical process of superimposed epigenesis and the «golden section». *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2015, no. 5, pp. 30–39. In Rus.
- Melnik I.A. Polymodality of histograms of geological characteristics as a criterion of fluid dynamics. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 66–74. In Rus.
- Lamperta A., Tlustý T. Resonance-induced multimodal body-size distributions in ecosystems, *PNAS*, 2013, vol. 110, no. 1, pp. 205–209. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1211761110> (accessed 30 March 2023).
- Merlo M.J., Parietti M., Etchegoin J.A. Long-term study of the life cycle of the freshwater snail *Heleobia parchappii* (Mollusca: Cochliopidae) in a lentic environment in Argentina, 2016, vol. 35, no. 1, pp. 49–60. DOI: 10.23818/limn.35.04 Available at: <https://www.limnetica.com/es/long-term-study-life-cycle-freshwater-snail-heleobia-parchappii-mollusca-cochliopidae-lentic> (accessed 30 March 2023).
- Ashley G.M. Interpretation of polymodal sediments. *The Journal of Geology*, 1978, vol. 86, no. 4, pp. 411–421. Available at: <https://doi.org/10.1086/649710> (accessed 30 March 2023).
- Binghe Yan, Yulan Zhang, Shuying Zang, Qiang Chen, Li Sun. Distributions of particle sizes in black soil and their environmental significance in Northeast China. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 7. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13073706> (accessed 30 March 2023).
- Mendez Torrecillas C.a, Halberta G.W., Lamprou D.A. A novel methodology to study polymodal particle size distributions produced during continuous wet granulation. *International Journal of Pharmaceutics*, 2017, vol. 519, pp. 230–239. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378517317300248?via%3Dihub> (accessed 30 March 2023).
- Fedoseev V.B., Fedoseeva E.N. Formation of Bi-and Polimodal distributions and the Nonostwald behavior of Disperse System. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 5, pp. 1191–1200.
- Barbedoa E.L., Gonçalves P.H., Lamoglia M.S., Pontesa A.M.P., Bastos Kuffner B.H., Gomesa G.F., Silvae G. Analysis of milling efficiency of the Vanadis 8 tool steel with additions of vanadium and molybdenum carbides. *Materials Research*, 2021, vol. 24, no. 5. Available at: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0054> (accessed 31 March 2023).
- Rajesh Asthana, Prakash Kumar Shrivastava, Hari Bahadur Srivastava, Mirza Javed Beg, Pradeep Kumar. Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments on Fisher Island and Broknes Peninsula, East Antarctica. *Advances in Polar Science*, 2013, vol. 4, no. 24, pp. 281–295. Available at: <http://journal.polar.org.cn/EN/10.3724/SP.J.1085.2013.00281> (accessed 31 March 2023).
- Lakk M., Yarishkin O., Baumann J. M., Iuso A., Križaj D. Cholesterol regulates polymodal sensory transduction in Müller glia. *Glia*, 2017, vol. 65, pp. 2038–2050. DOI: 10.1002/glia.23213
- Lakk M., Young D., Baumann J.M., Jo A.O., Hu H., Križaj D. Polymodal TRPV1 and TRPV4 sensors colocalize but do not functionally interact in a subpopulation of mouse retinal ganglion cells.

- Frontiers*, 2018, vol. 12. DOI: 10.3389/fncel.2018.00353 Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fncel.2018.00353/full> (accessed 31 March 2023).
13. Tabilo Alvarez J., Ramirez-Correa P. A brief review of systems, cybernetics, and complexity. *Complexity*, 2023, vol. 2023. Available at: <https://doi.org/10.1155/2023/8205320> (accessed 31 March 2023).
  14. Stakhov A. *Numerical systems with irrational bases for mission-critical applications*. December 2017. 284 p. Available at: <https://doi.org/10.1142/10671> (accessed 31 March 2023).
  15. Melnik I.A. *Osnovy statisticheskoi-korrelyatsionnoi interpretatsii materialov geofizicheskikh issledovaniy skvazhin* [Fundamentals of statistical and correlation interpretation of geophysical well survey data]. Moscow, RUSAJNS Publ., 2022. 76 p.
  16. Melnik I.A. Statistical intensity of transformation processes of open geological systems based on geophysical data. *Geologiya i mineralno-syrevye resursy Sibiri*, 2022, no. 4, pp. 22–27. In. Rus.
  17. Chernikov O.A. *Litologicheskie issledovaniya v neftepromyslovoy geologii* [Lithologic studies in oilfield geology]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 236 p.
  18. Lebedev B.A. *Geokhimiya epigeneticheskikh protsessov v osadochnykh basseynakh* [Geochemistry of epigenetic processes in sedimentary basins]. Leningrad, Nedra Publ., 1992. 239 p.
  19. Kozerenko S.V., Khramov D.A., Fadeev V.V., Kalinichenko A.M., Marov I.N., Evtikova G.A., Rusakov V.S. Issledovanie mekhanizma obrazovaniya pirita v vodnykh rastvorakh pri nizkikh temperaturakh i davleniyakh [Study of the mechanism of pyrite formation in aqueous solutions at low temperatures and pressures]. *Geokhimiya*, 1995, no. 9, pp. 1553–1565.
  20. Cesare B., Satish-Kumar M., Cruciani G., Pocker Sh., Nodari L. Mineral chemistry of Ti-rich biotite from pegmatite and metapelitic granulites of the Kerala Khondalite Belt (southeast India): petrology and further insight into titanium substitutions. *American Mineralogist*, 2008, vol. 93, pp. 327–338. DOI: 10.2138/am.2008.2579

Received: 5 April 2023.  
Reviewed: 20 June 2023.

#### Information about the author

**Igor A. Melnik**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.