

УДК 550.8.05:550.4.01:519.233.5:303.732.4
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5111
Шифр специальности ВАК 1.6.4, 1.6.9
Научная статья



Полиmodalность распределения интенсивности минералообразования – признак реализации различных вторичных процессов

И.А. Мельник✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ melnik@tpu.ru

Аннотация. Проведенные исследования статистических распределений содержаний вторичных минералов в песчаной породе выявили следующую закономерность – формы распределения данных содержаний полиmodalны. **Целью** представленной работы является доказательство следующей гипотезы – при унификации полиmodalного статистического распределения интенсивности установленного геохимического процесса каждая выборка значений интенсивности, в рамках отдельной моды, будет характеризоваться предсказуемым принципом реализации, интерпретируемым определенной химической реакцией. **Методы.** Интенсивности геохимических реакций, обусловленных наложенным эпигенезом, определялись с помощью метода статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин. Статистические интенсивности вторичных процессов каолинизации, карбонатизации и пелитизации полевых шпатов в песчаных отложениях вычислялись на основании закономерностей геохимического доминирования ковариационного влияния на регистрируемые параметры геофизических исследований скважин. В результате получали зависимость интенсивности процесса преобразования породы от произведения статистических корреляционных параметров геофизических данных: коэффициента корреляции и интервального параметра. Используя универсальное уравнение мод *унифицированных* полиmodalных распределений плотности вероятностей для процессов преобразования любых открытых систем, была проведена унификация мод интенсивностей вторичных процессов и определены принципы состояний процессов преобразования в рамках каждой вычисленной моды. Изучались вторичные преобразования песчаных отложений Тамбейских нефтегазовых месторождений. Были исследованы корреляционные связи между выборками интенсивностей рассматриваемых процессов в рамках каждой проявленной моды. **Выводы.** Подтверждено, что каждая мода интенсивности рассматриваемого геохимического процесса обусловлена проявлением определенной геохимической реакции. Проведенные сопоставления описаний принципов состояния процессов с исследуемыми состояниями преобразования доказывают тождественность их динамических режимов трансформации. Зная интенсивность вторичного процесса в качестве атрибута вычисленной моды, можно определить режим геохимического состояния открытой системы коллектора.

Ключевые слова: полиmodalные распределения, интенсивности вторичных процессов, синергетика, геохимия, геофизические исследования скважин, статистическая корреляция

Для цитирования: Мельник И.А. Полиmodalность распределения интенсивности минералообразования – признак реализации различных вторичных процессов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 10. – С. 67–80. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5111

UDC 550.8.05:550.4.01:519.233.5:303.732.4
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5111
Scientific paper



Polymodality of mineral formation intensity distribution is a sign of the implementation of various secondary processes

I.A. Melnik✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ melnik@tpu.ru

Abstract. The conducted studies of statistical distribution of secondary mineral contents in sandy rock have revealed the following regularity – the forms of distribution of these contents are polymodal. **Aim.** To prove the following hypothesis – at unification of polymodal statistical distribution of intensity of the established geochemical process, each sample of intensity values, within a separate mode, will be characterized by a predictable principle of realization, interpreted by a certain chemical reaction. **Methods.** Intensities of geochemical reactions caused by superimposed epigenesis were determined using the method of statistical-correlation interpretation of the materials of geophysical studies of wells. Statistical intensities of secondary processes of kaolinitization, carbonatization and pelitization of sandy sediments were calculated on the basis of regularities of geochemical dominance of covariance influence on the registered parameters of geophysical well surveys. As a result, we obtained the dependence of the intensity of rock transformation on the product of statistical correlation parameters of geophysical data: correlation coefficient and interval parameter. Using the universal equation of modes of unified polymodal probability density distributions for transformation of any open systems, the author unified the modes of intensities of secondary processes and determined the principles of states of transformation processes within each calculated mode. The author studied the secondary transformations of sandy sediments of the Tambay oil and gas fields and investigated the correlations between the sampled intensities of the considered processes within each manifested mode. **Conclusions.** It was confirmed that each mode of intensity of the considered geochemical process is caused by the manifestation of a certain geochemical reaction. The carried out comparison of the descriptions of the principles of the state of processes with the studied states of geochemical transformations prove the identity of their dynamic modes of transformation. Knowing the intensity of the secondary process as an attribute of the calculated mode, it is possible to determine the mode of the geochemical state of the open reservoir system.

Keywords: polymodal distributions, intensities of secondary processes, synergetics, geochemistry, geophysical well surveys, statistical correlation

For citation: Melnik I.A. Polymodality of mineral formation intensity distribution is a sign of the implementation of various secondary processes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 10, pp. 67–80. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5111

Введение

Песчаный коллектор можно рассматривать как открытую динамическую систему, где в результате процессов диагенеза, катагенеза, стадийного эпигенеза трансформированные структурные элементы породы пласта (по всей площади) будут являться фоном относительно её локальных структурных изменений в процессе наложенного эпигенеза. Под процессом наложенного эпигенеза понимаются геохимические преобразования элементов породы коллектора, реализуемые в результате поступления глубинных флюидов по разломам растяжения, трещинам и ослабленным зонам [1, 2].

Интенсивность преобразования элементов породы (минералов матрицы и цемента, емкости пор и трещин) зависит от различия рН поступающих флюидов относительно присутствующих в коллекторе фоновых флюидов, от скорости поступления внешних флюидов (проницаемости среды) и расстояния до зон глубинной фильтрации, от групп аллотигенных минералов и их содержаний, от скорости химических реакций и времени их преобразований [3, 4].

В традиционном представлении гистограммы выборок интенсивностей преобразования пород, как и содержаний вторичных минералов, должны подчиняться нормальному либо логнормальному распределению. Однако при более тщательном изучении закономерностей образования статистических распределений интенсивностей вторичных процессов и содержаний соответствующих минералов, обусловленных процессами наложенного

эпигенеза, было обнаружено, что плотности распределения их содержаний чаще всего приобретают полимодальную форму [1, 5–7].

Проявление данной формы распределения исследуемых характеристик в природе не является уникальным. Например, в работе [8] вероятностные графики *распределения зерен осадочной породы* в системе река–озеро по размерам показали, что большинство выборок являются полимодальными, с тремя модами. Полимодальное распределение размеров зерен в черноземах Северо-Восточного Китая в большей степени обусловлено ветровой эрозией почв и в меньшей степени – процессами замерзания–испарения и антропогенным влиянием [9].

При созревании многокомпонентных дисперсных систем с испарениями (фазовыми превращениями) статистическое распределение размеров частиц приобретает полимодальную форму [10]. Полимодальные распределения размеров зерен песка в изученных образцах донных отложений озера Китаура в большей степени обусловлены интенсивностью воздействия внешних сил, определяемых глубиной воды и волновыми характеристиками данного озера [11]. Как правило, гранулометрический анализ породы песчаных пластов проводится с целью определения условий осадконакопления, для выявления интервалов с наилучшими коллекторскими свойствами. Образование полимодальных гистограмм распределений размеров зерен песка связывают с изменением кинетической энергии воды и процессов осадконакопления [12, 13].

Представленным примерам можно дать общую характеристику – статистическое распределение измеряемых параметров трансформирующихся элементов любой открытой динамической системы, находящейся под внешним воздействием, приобретает полиmodalную форму.

Разработанная универсальная кинематическая теория процессов преобразования открытых систем обосновывает то, что каждая мода интенсивности, являясь константой в статистическом полиmodalном распределении интенсивности трансформации, связана с «золотой» пропорцией и формируется определенным принципом преобразования [7]. Для различных классов открытых систем и процессов преобразований интерпретация принципов реорганизаций соответственно будет различной, но для одного класса системы и типа процесса каждая мода распределения несет в себе информацию о характере и механизме взаимодействия.

Образования одних и тех же вторичных минералов в песчаных породах при различных химических и гидродинамических условиях наложенного эпигенеза могут различаться прохождением химических реакций с формированием соответствующих модальных интенсивностей [1, 6, 7]. На основании результатов проведенных исследований выдвигается следующая гипотеза – при унификации полиmodalного статистического распределения интенсивности установленного геохимического процесса каждая выборка значений интенсивности, в рамках отдельной моды, будет характеризоваться предсказуемым принципом реализации, интерпретируемым определенной химической реакцией.

Целью данной работы является иллюстрация подтверждения вышесказанной гипотезы в рамках кинематической теории преобразования систем на основании результатов статистических исследований выборок в пределах мод при полиmodalном распределении интенсивностей эпигенетических процессов вторичной каолинизации, карбонатизации и пелитизации. Причем интенсивности вторичных процессов в песчаных интервалах вычислялись по технологии статистически-корреляционной интерпретации (СКИ) материалов геофизических исследований скважин (ГИС) [14].

Материалы и методы

Метод СКИ материалов ГИС при определении интенсивностей вторичных каолинизации, пелитизации и карбонатизации основан на явлении доминирования перечисленных геохимических процессов наложенного эпигенеза в песчаных интервалах. Причем определенные корреляции между выборками петрофизических, геохимических и геофизических параметров обусловлены данными процессами [1, 4, 14]:

- Положительная регрессия глинистости с пористостью породы в исследуемом песчаном интервале связана с интенсивностью вторичной каолинизации (при наложенном эпигенезе). И наоборот, при седиментационно-диагенетическом процессе с увеличением содержания глинистого цемента пористость песчаной породы уменьшается.
- Отрицательная регрессия содержания калия с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) песчаной породы исследуемого интервала связана с интенсивностью вторичной пелитизации. При пелитизации калиевых полевых шпатов в результате углекислотного метасоматоза образующие свободные катионы калия диффундируют к отрицательно заряженной поверхности глинистой фракции, тем самым повышают поверхностную электропроводимость пористой породы.
- Положительная корреляция содержания карбонатной доли песчаника с величиной макроскопического сечением поглощения тепловых нейтронов породы при увеличении карбонатизации песчаника обусловлена процессом вторичной карбонатизации. Данное явление связано с тем, что в процессе щелочного метасоматоза перешедшие в раствор катионы гадолиния и самария (с аномально высоким микроскопическим сечением поглощения тепловых нейтронов) изоморфно (вместо кальция) входят в структуру карбонатов [15].

Кратко рассмотрим формальную логику метода СКИ. Пусть измеряемые характеристики (A) и (B), зависящие от интенсивности преобразований (I) первичных элементов системы (например, содержания аллотигенных минералов и петрофизических параметров горной породы), будут менять свои величины с различными вероятностями: $P(A)$ и $P(B)$. Данные вероятности условны: $P(A/I)$, $P(B/I)$, где априори $P(I)=1$. В итоге получаем двумерную вероятность [11]:

$$\begin{aligned}P(A;I) &= P(A/I)P(I) = P(A), \\P(B;I) &= P(B/I)P(I) = P(B), \\P(A;B) &= P(A)P(B)\end{aligned}\quad (1)$$

при $\alpha = A + \gamma_A$; $\beta = B + \gamma_B$, где γ – доля величин регистрируемых характеристик, не связанных с влиянием исследуемых процессов, где вероятности (1) измеряемых параметров определяются как:

$$P(A) = \frac{dA}{d\alpha}; \quad P(B) = \frac{dB}{d\beta}.$$

Введем постулат: *статистическая интенсивность (i) процессов преобразования элементов открытой системы эквивалентна двумерной веро-*

ятности регистрируемых характеристик данных элементов [6, 7]:

$$I = \text{const} \times i(A; B) \sim P(A; B). \quad (2)$$

Интенсивность доминирующего процесса преобразования вещества вдоль разреза скважины приводит к ковариационному изменению величин измеряемых параметров: \mathbf{dA} , $\mathbf{d\alpha}$ и \mathbf{dB} , $\mathbf{d\beta}$. Величины интенсивностей процессов по всему исследуемому массиву данных (в интервале) усредняются. В таком случае двумерная статистическая интенсивность Q -выборочных параметров ($Q > 30$), в соответствии с зависимостями (1) и (2) при $|\mathbf{d\gamma}_A| < |\mathbf{dA}|$; $|\mathbf{d\gamma}_B| < |\mathbf{dB}|$, будет представлять собой следующую эквивалентную ковариацию [6, 7]:

$$i(A; B) \sim \left\langle \frac{dAdB}{dad\beta} \right\rangle \sim \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^{q=Q} \frac{(A_q - \bar{A})(B_q - \bar{B})}{\Delta\alpha_q \Delta\beta_q} \sim |R|. \quad (3)$$

Здесь мы видим, что статистическая интенсивность, эквивалентная произведению вероятностей, эквивалентна и коэффициенту корреляции между двумя ковариационными выборками. Коэффициент корреляции в зависимости (3) взят по модулю, потому что статистическая интенсивность может быть только положительной. Очевидно, что коэффициент корреляции отражает качественную характеристику интенсивности. Для определения количественной доли интервала исследуемой выборки при граничном условии $|R_h| > 0,6$ необходимо суммировать такие доли выборок интервалов в пределах всего массива данных, в которых наблюдаются корреляционные зависимости [6, 7]:

$$Y = \frac{1}{Q} \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H N_h^j,$$

где N – количество всех выборочных значений при $|R_h| > 0,6$; H – количество «интервальных» выборочных значений; J – количество «интервалов», причем $J < H \leq Q$, а если $H = Q$, то $J = 1$. Статистический параметр Y показывает количественную долю песчаного интервала исследуемой системы, т. е. является интервальным параметром. Данный параметр характеризует количество выборочных значений, подчиняющихся заданной парадигме и, следовательно, зависит от интенсивности преобразования открытой системы.

Таким образом, чем выше интенсивность и продолжительность времени преобразования элементов систем, тем значительней величины качественных и количественных статистических параметров, характеризующих ковариацию двух выборок, определяющую процесс преобразования элементов данной системы в новые элементы. Очевидно, что параметр статистической интенсивности по своей сути мультипликативный.

Статистическая интенсивность процессов преобразования песчаного интервала – это экстенсивно-интенсивная характеристика, равная произведению статистических параметров [3, 6, 7]:

$$i = i(A; B) = YR^2.$$

Валидность параметра статистической интенсивности в песчаных пластах была подтверждена при сопоставлении показаний данных параметров, вычисленных по материалам ГИС, с результатами выборки петрографических исследований шлифов керн на предмет содержания вторичных минералов с коэффициентами корреляции 0,63–0,97 [14].

В рассматриваемой технологии интерпретации материалов ГИС песчаные пласты в скважине разбиваются на исследуемые интервалы. Затем в каждом из этих интервалов (50–80 значений), являющихся генеральной выборкой, выделяются диапазоны «подынтервальных» выборочных значений (7–11 значений), по которым вычисляются коэффициенты корреляции, и при условии $|R| > 0,6$ в «плавающем» режиме определяется среднее значение параметра R по всем «подынтервалам» с данным условием. Таким образом вычисляем долю исследуемого интервала генеральной выборки, которая подчиняется условию $|R| > 0,6$. Эта доля и будет представлять собой «интервальный параметр», эквивалентный количественной величине геохимически измененной породы.

При использовании метода СКИ по материалам ГИС были получены выборки параметров статистической интенсивности в песчаных пластах различных нефтегазовых месторождений полуострова Ямал. Затем на базе построенной кинематической теории преобразования открытых систем были проведены исследования выборок полимодальных распределений интенсивностей вторичных процессов каолинизации, карбонатизации и пелитизации песчаных пород для каждого месторождения.

В основе кинематической теории преобразования лежат вычисленные константы мод, связанные с иррациональным числом «золотой» пропорции (табл. 1) и уравнение унификации полимодального распределения (4). Универсальное унифицирующее уравнение мод полимодальных распределений плотности вероятностей для процессов преобразования любых открытых систем [3, 7, 14]:

$$\mu_{\text{mod}} = \exp \left[\frac{U_{\text{mod}} - C}{\chi} \right] - 1, \quad (4)$$

где $U_{\text{mod}} = \frac{i_{\text{mod}}}{\langle i \rangle}$, т. е. относительная величина измеряемых выборочных значений, соответствующих i_{mod} – моде интенсивности процесса преобразования; $\langle i \rangle$ – средневзвешенная величина исследуемой выборки.

Согласно универсальной кинематической теории формирования полиmodalного распределения первый modalный параметр относительной величины $U(1)_{\text{mod}}$ должен располагаться в пределах нижней и верхней границ [3]: $0,3819 \div 1$, т. е. $U(1)_{\text{mod}} = j \div 1$. Это условие унификации полиmodalного распределения, где каждая мода представляет собой нормальное распределение, а аргумент функции мод для совершенно различных процессов также должен иметь нормальное распределение в этих граничных значениях. Нижняя граница связана с φ – постоянной золотой «пропорции», равной $\varphi = 0,618...$, т. е. $j = \varphi^2 = 0,3819...$

В прошлых работах эмпирическим путем были определены константы: $C = -3,5$ и унифицирующий параметр χ в интервале $12 \div 14$ [6]. Для каждой генеральной выборки систем различной природы преобразования среды в гистограмме распределения вычисляемого (измеряемого) значения $i \chi$ – унифици-

рующая константа в уравнении (4) – определяется в случае соответствия математического ожидания моды $j = \mu_{\text{ПС}} = 0,3819$ минимальной (первой) моде. В этом случае формула вычисления χ выглядит так:

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

На основании граничных значений аргумента мы можем определить граничные величины унифицирующего параметра. Они будут соответствовать интервалу $\chi = 12 \div 13,9$. Верхняя граница немного отличается от ранее принятой. С целью проверки точности данной величины введем D – параметр неопределенности, соответствующий дисперсии относительной унифицирующей константы $\xi = \chi / \chi_{\text{min}}$. Дифференциал неопределенности будет равен $dD = d\xi / \xi$, а определенный интеграл этой функции от 1 до ξ_{max} равен натуральному логарифму $\text{Ln}(\xi_{\text{max}})$.

Таблица 1. Математические ожидания и углы унифицированных дискретных состояний статистических распределений интенсивностей процессов преобразования систем [7]

Table 1. Mathematical expectations and angles of unified discrete states of statistical distributions of intensities of transformation processes of systems [7]

Состояния States	Угол, (λ) рад. Angle, (λ) rad.	Математические ожидания, (μ) усл. ед. Mathematical expectations, (μ) 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 process state
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*/DS*	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 impact 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/DS	0,887	0,43	Уменьшение времени воздействия внешнего фактора и пропорциональное увеличение времени преобразования внутренней системы включительно под действием доминирующего и альтернативных источников влияния относительно равновесного состояния процесса Reducing of time of impact 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 effect relative to the equilibrium state of the process
ПС(2) <i>a</i> PS(2) <i>a</i>	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) <i>d</i> PS(2) <i>d</i>	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

Примечание. ПС – пропорционально-стабильное состояние; ПМ – пропорционально-мобильное состояние; НС – непропорционально-стабильное состояние.

Note: PS – proportional stable state; PM – proportional mobile state; DS – disproportionately stable state.

Если подставим граничные величины: $\xi_{\max}=13,9/12=1,158\dots$, то получим $Ln(\xi_{\max})=0,1466\dots$, корень от которого, соответствующий стандартному отклонению, приблизительно равен величине j . Данный факт подтверждает валидность величин выявленных констант для их использования при унификации полимодального статистического распределения интенсивностей различных процессов.

Кинематическая теория преобразования открытых систем подробно изложена в работе [7]. Здесь мы обозначим только её основные принципы. Внутренние преобразования любой открытой динамической системы (химической, гидродинамической, геологической, географической, биологической и т. д.) происходят при поступлении внешних источников влияний, меняющих состояние системы. Рассмотрим элементарную структуру системы в единичном объеме, состоящую из единообразных элементов. Внутренние элементы преобразуются за определенное время (τ), являющееся имманентной характеристикой системы, равное отношению среднего количества трансформировавшихся элементов к средней скорости трансформации состояний этих элементов. Вероятность трансформации внутренних элементов характеризуется средним эффективным сечением взаимодействия (πr^2), энергией внешнего воздействия и внутренней энергией системы. Внешние элементы, пересекая с определенной средней скоростью и внешним временем воздействия (t) элементарный объем системы в пределах сферы радиуса r , вступают во взаимодействие с внутренними элементами системы.

Основным (первым) необходимым условием преобразования системы является соблюдение следующего отношения [7] $\tau/t \leq 1$. В этом случае элементы открытой системы успевают вступить во взаимодействие с внешними элементами. Данное условие соответствует принципу локального равновесия, введенного Д.С. Коржинским [16] $v/v < 1$, где v – скорость внешних факторов влияния; v – внутренняя скорость установления равновесия процессов преобразования систем.

На основании реорганизации закона сохранения энергии и постулата (2) было получено уравнение интенсивности процесса преобразования [7]:

$$I = q \frac{t_0}{\tau_0} \frac{\Delta \tau}{\Delta t},$$

где q – коэффициент пропорциональности, а интенсивность процесса зависит от отношений временных параметров t_0/τ_0 – предыдущего (прошлого) преобразования элементов системы и периодов в настоящем времени: $\Delta \tau = (\tau - \tau_0)$ и $\Delta t = (t - t_0)$.

Преобразующаяся система должна быть устойчива к переменам, т. е. иметь свойство инвариантности временных (независимых переменных) пара-

метров в результате процесса трансформации, что предполагает наличие *второго условия преобразования* при накоплении вторичных элементов [7] $\Delta \tau \Delta t = t_0 \tau_0$.

В пространстве временных координат t и τ произведения этих независимых величин будут представлять собой четырёхугольники с одинаковой площадью, равной единице, при условии равенства сторон φ^n и $1/\varphi^n$, где $n=0; 1; 2; \dots; N$. В этом случае гипотенуза четырёхугольника есть вектор состояния *стабильного* процесса, где его квадрат имеет целочисленное значение и в пределе $n \rightarrow N$ отношение величин предыдущего к последующему значению стремится к величине φ .

Согласно И. Пригожину, устойчивость стационарного состояния открытых систем в условиях эволюции определяется минимумом производства энтропии, т. е. при фиксированных физико-химических условиях – минимальной степенью диссипации энергии [17]. Следовательно, произведения переменных параметров, характеризующих динамическое состояние и определяющих энергию системы до её взаимодействия и после, должны быть приблизительно равны, либо отношения их произведений равны постоянному значению. Структурирование системы возможно только при взаимосогласованном взаимодействии всех элементов системы [17], а также необходимо чтобы система была открытая, нелинейная и диссипативная [18].

Внутреннее, имманентное время преобразования, обусловленное внутренними, химическими характеристиками трансформации элементов геологических систем (песчаного пласта), не зависит от внешнего времени воздействия поступающего в систему флюида. Поэтому, исследуя ортогональную временную систему координат τ и t , при соответствующем произведении временных периодов $\Delta \tau \Delta t = 1$ мы получаем квадратное уравнение состояния процесса преобразования элементов системы, единственным положительным решением которого является значение иррационального числа равного «золотой» пропорции $\Phi = (1 + \varphi) = 1,618\dots$ [7, 19]. Чтобы реализовалась трансформация системы, необходимо согласование временных характеристик внешней и внутренней энергий. На основании закона сохранения энергии, закона Винера–Шеннона–Эшби и условия асимптотической устойчивости по Ляпунову определены условия стабилизации преобразования элементов систем [7]. Далее при использовании правил скалярного произведения векторов на основе условий стабилизации определены константы их λ -углов (связанных с «золотой» пропорцией) и вычислены математические ожидания состояний процессов трансформации, соответствующие унифицированным модам в

полиmodalном распределении (табл. 1). Математические ожидания состояний процессов преобразования вычислялись по формуле $\mu=j/\lambda$. Вычисленные константы математических ожиданий являются аттракторами и векторами состояний в фазовом пространстве временных координат [7].

В рамках кинематической теории под *состоянием процессов преобразования систем* понимаются устойчивые и стабильные значения относительных переменных временных параметров (периодов) преобразования системы и воздействий внешних компонентов на элементы системы.

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

Пропорциональное состояние процесса – это такое устойчивое состояние, когда в двухпараметрической системе только один параметр может быть переменным (например, Δt – период воздействия внешнего фактора), а изменение интенсивности преобразования ($i(\Delta t)$) пропорционально изменению соответствующего параметра ($\Delta\tau/\Delta t-i(\Delta t)$), причем второй параметр ($\Delta\tau$ – внутренний период преобразования элементов) остается постоянным (либо наоборот Δt – постоянный, а $\Delta\tau$ – переменный).

Непропорциональное состояние процесса – это такое *неустойчивое* стационарное состояние, когда в двухпараметрической функции преобразования одновременно переменными являются два параметра. Осуществляется только при условии *стабилизации* состояния процесса преобразования.

Стабильным состоянием преобразования называют процесс, при котором сохраняются постоянными произведения внутреннего и внешнего временных периодов преобразования системы относительно произведения начальных временных параметров, т. е. выполняется условие стабилизации:

$$\frac{\Delta t \Delta \tau}{t_0 \tau_0} = \text{const.}$$

Величина постоянной меняется в зависимости от типа преобразования.

В открытой системе реализуется наиболее вероятное, *стабильное* состояние с минимумом свободной энергии. Это происходит при сохранении постоянства динамических характеристик [20].

Мобильное состояние процесса преобразования – это такое состояние, когда не выполняются условия стабилизации, но в пропорциональном состоянии устойчивость системы в результате преобразования не нарушается.

В гетерогенных нелинейных системах зарождения новых состояний проявляются при неустойчивости систем, и за счет протекающих в них процес-

сах происходят переходы в иные устойчивые состояния [20]. Неустойчивая система – это многовариантная иерархическая система образования вторичных элементов.

В геологической среде проницаемый песчаный пласт представляет собой открытую нелинейную диссипативно-гетерогенную систему при внешнем флюидо-динамическом воздействии. В результате взаимодействия флюидов с породой происходят вторичные изменения геохимических и петрофизических характеристик пласта, являющихся элементами системы.

Мигрирующие снизу вверх по разломам растяжения и трещинам флюиды будут источником преобразования элементов песчаного коллектора при фильтрации по латеральным проницаемым зонам. Следовательно, воздействие внешних «вертикальных» флюидов будет *доминирующим* (d) фактором процесса преобразования элементов системы, а латеральное влияние флюидов – альтернативным воздействием (a). В этом случае необходимо ввести еще одну независимую альтернативную переменную Δt_a – период времени внешних альтернативных элементов влияния. Следовательно, после введения еще одной ортогональной временной координаты t_a получаем трехмерную систему координат t, t_a, τ . Если внешнее воздействие ограничивается только доминирующим, то состояние процесса называется одномерным и в табл. 1 обозначается «звездочкой».

В работе [20] даны классификации стационарных состояний реакций преобразующейся системы, предложенные В. Эбелингом: *равновесие* – устойчивые стационарные реакции с нулевым производством энтропии; *текущее равновесие* – устойчивые стационарные реакции за счет обмена со средой, с минимальным производством энтропии; *неустойчивое стационарное состояние* – стационарные процессы при малых возмущениях, переходящих в иное состояние. В этом случае состояние равновесия эквивалентно состоянию ПС, а текущее равновесие ассоциируется с остальными проявленными «разрешенными» состояниями: ПМ; НС; ПС(2) a и ПС(2) d . Неустойчивое стационарное состояние соотносится с перечисленными, но в данном случае «запрещенными» состояниями, которые не проявились в исследуемом полиmodalном распределении.

Материалом исследований являются полиmodalные распределения статистических интенсивностей вторичных процессов каолинизации, карбонатизации и пелитизации песчаных пород на Северо-Тамбейском и Западно-Тамбейском участках Тамбейского нефтегазового месторождения полуострова Ямал.

Результаты исследования и обсуждение

Содержания глинистых минералов в песчаниках контролируются процессами седиментации и вторичными эпигенетическими преобразованиями породы, обусловленными наложенным эпигенезом. Наложённый эпигенез принципиально отличается от седиментации пространственной зональностью вторичных глин с обратной зависимостью их содержания от расстояния до вертикальных каналов фильтрации [3, 16, 21]. В этом случае при наложенном эпигенезе статистические распределения интенсивностей вторичной каолинитизации при вертикальном и латеральном выборках будут различаться. Вторичная каолинитизация, как правило, реализуется во флюидопроницаемых пластах песчаной породы в результате углекислотного метасоматоза при геохимическом процессе наложенного эпигенеза.

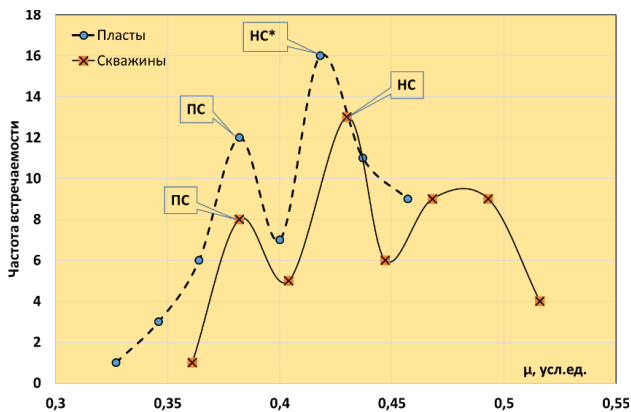


Рис. 1. Гистограммы мод, усредненных по пластам (пунктирная линия) и по скважинам унифицированных интенсивностей вторичной каолинитизации в песчаных интервалах нефтегазовых месторождений полуострова Ямал

Fig. 1. Histograms of modes averaged over formations (dashed line) and over wells of unified intensities of secondary kaolinitization in sandy intervals of oil and gas fields of the Yamal Peninsula

На рис. 1 показаны две гистограммы усредненных данных интенсивности процесса вторичной каолинитизации в песчаных пластах на территории двух Тамбейских участков полуострова Ямал. Эмпирические данные интенсивностей процессов каолинитизации 70-ти пластов в 55-ти скважинах усреднялись по пластам (пунктирная кривая) и по скважинам. Моды вычислялись согласно уравнению (4).

Построены две гистограммы, подтверждающие, что вторая мода «по пластам» ($\mu_n=0,418$, состояние НС*) отличается от второй двумерной моды «по скважинам» ($\mu_c=0,43$, состояние НС). Перечислен-

ные отличия объясняются тем, что, усредняя интенсивности вторичных процессов по пластам (а в каждой скважине около 20 исследуемых песчаных интервалов), мы получаем вертикальное распределение усредненных значений интенсивностей, изменения величин которых в большей степени зависят от вертикальной (доминантной) фильтрации. При усреднении интенсивности по скважинам к доминантной фильтрации флюидов прибавляется влияние альтернативы – латерального поступления смеси с различным её химическим потенциалом в зависимости от расстояния до вертикального разлома. Это полностью соответствует принципам состояния процессов, описанных в табл. 1.

Для изучения корреляционных зависимостей между массивами интенсивностей заявленных процессов в рамках исследуемых мод в первую очередь необходимо отсортировать полимодальную выборку «по возрастанию». Причем остальные массивы интенсивностей различных процессов должны быть «привязаны» к сортирующимся выборочным значениям, т. е. быть в соответствии глубинам исследуемых интервалов. В границах изучаемой моды интенсивности полимодальной выборки анализируются корреляционные связи с заявленными массивами «привязанных» интенсивностей.

Рассмотрим отличительные геохимические признаки мод в полимодальных распределениях статистических интенсивностей исследуемых процессов в коллекторах водонасыщенной и газоконденсатной систем (ГКС). На Северо-Тамбейском участке были изучены распределения выборок интенсивностей ГКС из 74 интервалов и 43 водоносных песчаников.

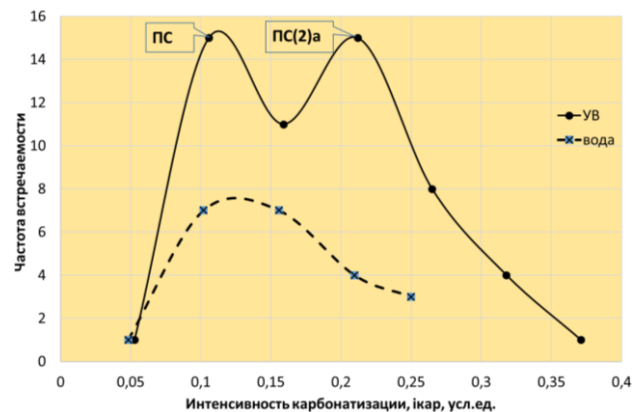


Рис. 2. Гистограммы интенсивностей вторичной карбонатизации для водонасыщенных и УВ-насыщенных песчаных интервалов Северо-Тамбейского участка

Fig. 2. Histograms of secondary carbonation intensities for water-saturated and hydrocarbon-saturated sandy intervals of the North-Tambeysky site

На рис. 2, 3 представлены гистограммы интенсивностей вторичной карбонатизации и пелитизации в ГКС и водоносных пластах. Первое, что обнаруживается, – это полиmodalность интенсивностей в ГКС интервалах и одноmodalность водоносных песчаников. Очевидно, что образование двух основных мод в распределениях интенсивностей преобразования минералов в породах ГКС обусловлено различием геохимических процессов. Первая мода (состояние ПС) связана с закономерностью Чепикова – при быстром заполнении углеводородами порового пространства с дальнейшей консервацией всех процессов преобразования [1, 6, 22]. Отличие в определении величины состояния процесса второй моды в статье [6] от состояния (ПС(2)а) в настоящей работе объясняется различием исследовательского массива. Здесь при вычислении двух средневзвешенных величин интенсивности в математическом ожидании (4) генеральная выборка делится на две части: углеводородонасыщенная и водоносная. В статье [6] средневзвешенное значение вычислялось для общей выборки, что и привело к ошибочной величине математического ожидания. Появление второй моды (состояние ПС(2)а) может быть обусловлено реакцией в системе воды–углеводороды в процессе латеральной миграции смеси флюидов [1]:

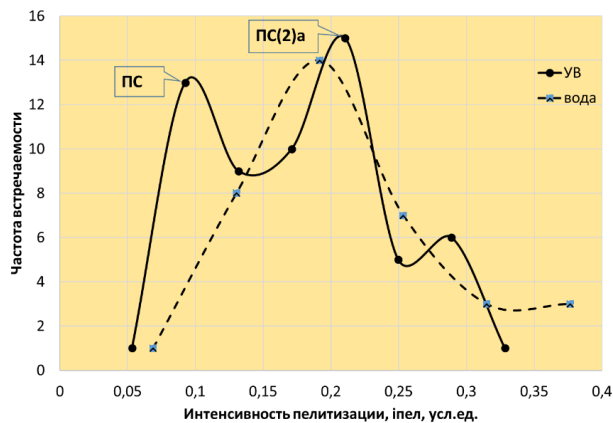
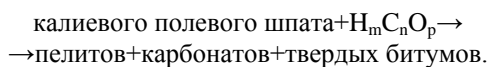


Рис. 3. Гистограммы интенсивностей вторичной пелитизации для водонасыщенных и УВ-насыщенных песчаных интервалов Северо-Тамбейского участка

Fig. 3. Histograms of secondary pelitization intensities for water-saturated and hydrocarbon-saturated sandy intervals of the North-Tambeysky site

На водонефтяном контакте (ВНК) образуются органические кислоты, которые вступают в химическое взаимодействие с породой, причем компоненты разлагающейся нефти фиксируются в карбо-

натах и глинистых минералах. В отличие от первой моды, здесь процесс консервирующей фильтрации проходил медленно и в данных песчаных интервалах должен проявиться парагенез карбонатов и пелитов. Причиной гидротермального парагенеза в породах может явиться рифтогенез осадочного бассейна [23]. Проявленные положительные корреляции между выборками интенсивностей карбонатизации с пелитизацией (и наоборот), значения которых лежат только в пределах второй моды (ПС(2)а), подтверждают наличие парагенеза (рис. 4, 5). Корреляция между исследуемыми процессами реализовалась как относительно пелитизации, так и относительно карбонатизации, с коэффициентами $R_{п-к}=+0,72$; $R_{к-п}=+0,63$. За пределами второй моды явление парагенеза пропадает.

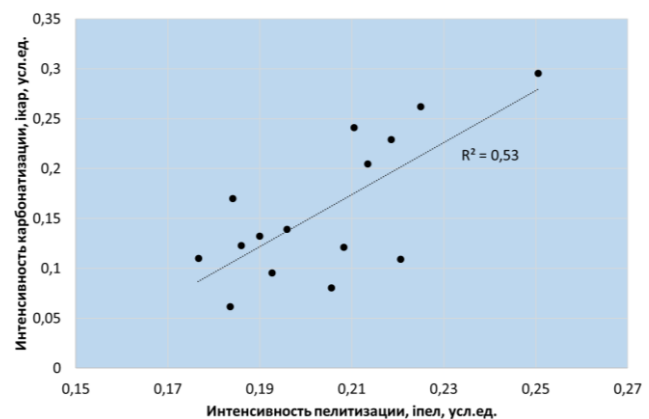


Рис. 4. Сопоставление интенсивностей вторичной карбонатизации с пелитизацией при состоянии процесса преобразования ПС(2)а (пелитизации) в УВ-насыщенных пластах Северо-Тамбейского участка

Fig. 4. Comparison of intensities of secondary carbonatization with pelitization, at the state of the conversion PS(2)a (pelitization) in HC saturated formations of the North-Tambeysky site

Пример петрографического описания шлифа зерна (песчаника с ГКС) скважины 202 с величиной интенсивности пелитизации в рамках второй моды подтверждает заявленную концепцию. Породообразующие компоненты: кварц бесцветный, часто с редкими пылеватыми включениями, со следами растворения. Полевые шпаты представлены плагиоклазами и калишпатами, в основном измененными процессами пелитизации, серицитизации в разной степени. Обломки пород эффузивные, кремнистые, слюдисто-кремнистые, гранитоиды, осадочные. Слюда – биотит, мусковит со следами вторичных изменений. Постседиментационные изменения: регенерация отдельных зерен кварца, пелитизация, серицитизация, иногда растворение полевых шпатов, гидратизация, пластиче-

ская деформация слюды, хлоритизация биотита, слабая сидеритизация биотита, частичная карбонатизация обломочного материала. В цементе в слабой степени присутствует раскристаллизованный каолинит – 7–8 %; пленочный хлорит – до 1–2 % и хлорит-гидрослюдистый – 3–4 %.

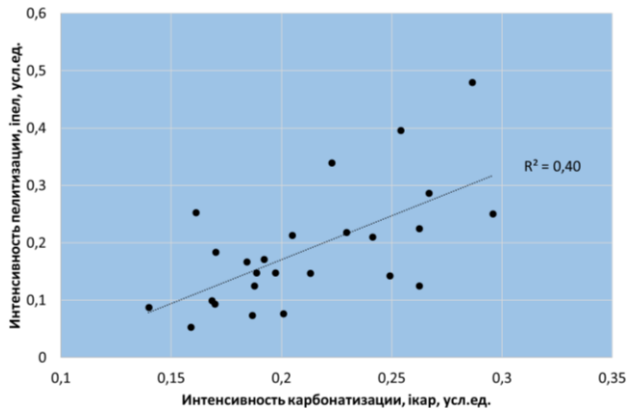
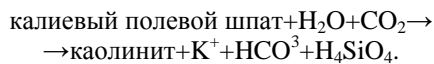


Рис. 5. Сопоставление интенсивностей вторичной пелитизации с карбонатизацией при состоянии процесса преобразования ПС(2)а (карбонатизации) в УВ-насыщенных пластах Северо-Тамбейского участка

Fig. 5. Comparison of intensities of secondary pelitization with carbonatization, at the state of PS(2)a (carbonatization) conversion in HC saturated formations of the North-Tambeysky site

В зоне ВНК часто в условиях слабощелочной среды в результате пелитизации образуются трехслойные глинистые минералы (монтмориллониты, гидрослюды) [4]. В этом случае в пределах второй моды (ПС(2)а) между выборками интенсивностей пелитизации и каолинизации корреляция должна быть отрицательная ($R_{п-каоил} = -0,47$; рис. 6). Очевидно, что вторичные каолиниты образуются в результате поступления кислых глубинных вод с растворенной углекислотой, при котором углекислотный метасоматоз протекает следующим образом [1]:



В результате повышенной кислотности растворяется не только заполняющий поры цемент, но и матричный алюмосиликат. Емкость коллектора повышается на 2–3 %, а проницаемость – в несколько раз. Затем при поступлении УВ происходит ощелачивание среды с прекращением кристаллизации каолинита при формировании хлорита и мусковита. Далее с повышением $\text{pH} > 7,5$ образуются карбонаты, причем в этом случае обратная регрессия карбонатов с каолинитами отсутствует, потому что при данном режиме трансформации

вещества содержания каолинитов остаются неизменными.

Однако если скорость заполнения УВ пористой среды будет достаточно велика (в пределах первой моды – состояния ПС) при фазовом разделении смеси вода–УВ и резком ощелачивании раствора, наблюдается обратная регрессия выборок карбонатизации с каолинитизацией ($R_{к-каоил} = -0,6$; рис. 6).

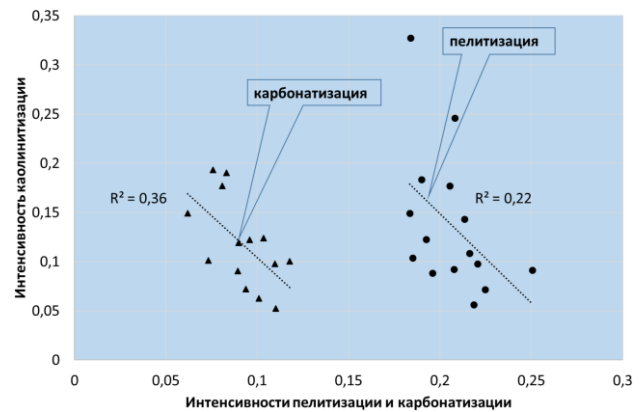


Рис. 6. Сопоставления интенсивностей вторичных процессов каолинитизации с карбонатизацией (состояние процесса ПС) и пелитизацией (состояние ПС(2)а) в песчаных пластах Северо-Тамбейского участка

Fig. 6. Comparison of the intensities of secondary kaolinitization with carbonatization (state of the PS process) and pelitization (state of PS(2)a) in the sandy strata of the North-Tambeysky site

В системе «воды–углеводороды» в состоянии процесса преобразования ПС(2)а процесс вторичной каолинитизации играет подчиненную, вторичную роль в зависимости от процессов образования пелитов и карбонатов. В состоянии ПС при быстрым заполнении УВ-коллектора с предшествующим углекислотным метасоматозом при трансформации калиевых шпатов и альбитов вторичными пелитами являются каолиниты. В этом случае должна наблюдаться положительная корреляция между выборками интенсивностей вторичных пелитизации и каолинитизации. Тогда в этом же песчаном интервале при ощелачивании среды с последующей карбонатизацией породы интенсивность карбонатизации будет обратно пропорциональна интенсивности каолинитизации, а с пелитизацией регрессия будет менее значима.

Например, в статье [5] показана бимодальная гистограмма интенсивности вторичной пелитизации УВ-насыщенных меловых и юрских пластов Западно-Тамбейского участка (рис. 7). Выборка состоит из 36 значений. Приблизительно 60 % данной выборки относится к первой моде – состоянию ПС. Интенсивности вторичных пелитизации и кар-

бонатизации, относящиеся к состоянию ПС, коррелируют с выборочными значениями интенсивности вторичной каолинитизации (рис. 8). Причем регрессионная зависимость пелитизации прямо пропорциональна каолинитизации ($R_{п-каол} = +0,8$), а карбонатизация обратно пропорциональна каолинитизации ($R_{к-каол} = -0,87$). В свою очередь наблюдается отсутствие корреляции между выборками пелитизации с карбонатизацией (при пелитизации в рамках моды ПС), а также незначительная корреляция карбонатизации (в состоянии ПС) с пелитизацией: $R_{к-п} = -0,65$.

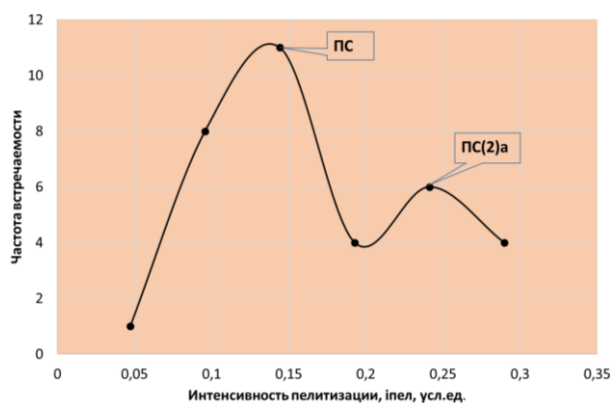


Рис. 7. Гистограмма интенсивности вторичной пелитизации в УВ-насыщенных песчаных интервалах мезозоя Западно-Тамбейского участка

Fig. 7. Histogram of the intensity of secondary pelitization in the hydrocarbon-saturated sandy intervals of the Mesozoic of the West-Tambeysky site

Петрографическое описание шлифа зерна, расположенного в интервале пласта, относящегося к состоянию ПС, подтверждает вышесказанную гипотезу. Породообразующие компоненты: полевые шпаты представлены плагиоклазами и калишпатами, в основном измененными в разной степени. Обломки пород: кремнистые, слюдинокремнистые, встречаются осадочные и эффузивные гранитоиды. Постседиментационные изменения: слабая регенерация отдельных зерен кварца; пелитизация, серицитизация, в разной степени растворение полевых шпатов; гидратизация, пластическая деформация слюды; хлоритизация биотита. В цементе хлорит – 2–3 %; хлорит-гидрослюда – 1–3 %; каолинит – 8–10 %; сидерита доли процента.

Судя по описанию шлифа, одним из породообразующих компонентов является плагиоклаз, группа Na-Ca полевых шпатов изоморфного ряда: альбит, анортит. В результате углекислотного метасоматоза они также преобразуются в каолиниты. Это отразилось в их высоком содержании в шлифах. В свою очередь, интенсивность пелитизации метода СКИ отображает только пелитизацию калиевых

полевых шпатов, поэтому между карбонатами (в состоянии ПС) и однокомпонентными пелитами корреляция менее значима, чем с каолинитами.

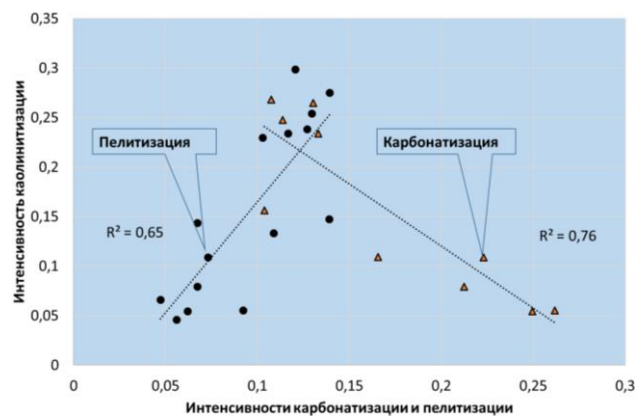


Рис. 8. Сопоставления интенсивностей вторичных процессов каолинитизации с карбонатизацией (состояние ПС) и пелитизацией (состояние ПС) в УВ-насыщенных песчаных интервалах Западно-Тамбейского участка

Fig. 8. Comparison of the intensities of secondary kaolinitization processes with carbonatization (PS state) and pelitization (PS state) in the hydrocarbon-saturated sandy intervals of the West-Tambeysky site

Заключение и выводы

Итак, осуществив сопоставления между выборками различных интенсивностей процессов преобразования породы с УВ-насыщением, но в рамках определенной моды в полиmodalном распределении интенсивностей, были подтверждены следующие концепции:

1. Каждая мода интенсивности рассматриваемого эпигенетического процесса обусловлена проявлением различных геохимических реакций, соответствующих принципам состояния процессов данной моды.
2. Плотность вероятности проявления моды зависит от динамики процессов преобразования.
3. Сравнительные результаты анализа табл. 2 указывают на то, что корреляционные зависимости интенсивностей процессов преобразования для состояний ПС и ПС(2)а противоположны. Это обусловлено следующими закономерностями. В состоянии ПС заполняющий поры УВ прерывают ранее реализованные процессы преобразования породы, обусловленные углекислотным метасоматозом. Состояние ПС(2)а реализуется вследствие медленной латеральной миграции флюидов, в процессе которой появляется возможность парагенетических реакций пелитизации с карбонатизацией в системе вода-углеводороды из-за присутствия в смеси органических кислот.

Таблица 2. Сравнительные результаты анализа двух состояний процессов геохимического преобразования песчаной породы с УВ-насыщением

Table 2. Comparative results of analyzing two states of geochemical transformation of sandy rock with HC saturation

Состояние моды Mode state	Корреляция/Correlation			Описание исследуемого состояния процесса Description of the process state under investigation	Описание принципа состояния процесса Description of the process state principle
	пелиты-карбонаты pelite-carbonate	каолиниты-карбонаты kaolinite-carbonate	каолиниты-пелиты kaolinite-pelite		
ПС	$R_{к-п} = -0,65$	$R_{к-као} = -0,6$; $R_{п-као} = -0,87$	$R_{п-као} = +0,8$	Быстрое заполнение УВ поровой ёмкости, приводящее к консервации всех геохимических процессов преобразования породы Rapid filling of pore capacity with HC leading to conservation of all geochemical processes of rock transformation	Начальное равновесное состояние процесса Initial equilibrium state of the process
ПС(2) <i>a</i>	$R_{п-к} = +0,72$; $R_{к-п} = +0,63$	–	$R_{п-као} = -0,47$	Система вода–УВ, при которой в результате медленного латерального течения смеси и вследствие присутствия органических кислот в смеси проходят парагенетические химические реакции Water-hydrocarbon system, in which paragenetic chemical reactions take place as a result of slow lateral flow of the mixture and due to the presence of organic acids in the mixture	Равновесное состояние процесса в альтернативном внешнем потоке относительно начального равновесного состояния процесса Equilibrium state of the process in the alternative external flow with respect to the initial equilibrium state of the process

В работе [22] рассматриваются две основных причины инверсии флюидного режима при метасоматозе, приводящие к формированию парагенеза. Во-первых, при углекислотном метасоматозе вследствие растворения щелочных компонентов следует связывание их в минералы в поздней щелочной стадии. Во-вторых, после вхождения в минералы гидроксильных групп (ОН⁻) флюида увеличивается концентрация ионов водорода (протонов) в воде и на завершающей стадии процесса преобразования твердая фаза породы переходит из окислительного этапа реакций в восстановительный (например, процесс хлоритизации биотита). В-третьих, проведенные сопоставления описаний принципов состояния процессов с исследуемыми состояниями геохимических трансформаций доказывают тождественность их динамических режи-

мов преобразования, что подтверждает валидность разработанных теоретических принципов.

Таким образом, унификация (по первой моде) полимодальных статистических распределений интенсивностей вторичных минералообразующих процессов позволяет привести остальные моды интенсивностей процессов в соответствие с величинами математических ожиданий (табл. 1) и заявленными принципами состояний с их последующим сопоставлением с реакциями наложенного эпигенеза. Проще говоря, зная интенсивность вторичного процесса в качестве атрибута вычисленной моды, можно определить режим геохимического состояния открытой системы коллектора. При отсутствии каменного материала применение описанной методики позволит проводить районирование режимов геохимических состояний исследуемой территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Л.: Недра, 1992. – 239 с.
2. Предтеченская Е.А. Минералогические аномалии как индикаторы процессов флюидомиграции в юрских нефтегазоносных отложениях Западно-Сибирской плиты // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: VII Всероссийское литологическое совещание. – Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2013. – С. 400–405.
3. Мельник И.А. Определение интенсивности геохимических процессов по материалам геофизических исследований скважин. – Новосибирск: СНИИГиМС, 2016. – 146 с.
4. Сахибгареев Р.С. Вторичные изменения коллекторов в процессе формирования и разрушения нефтяных залежей. – Л.: Недра, 1989. – 260 с.
5. Мельник И.А., Родивилов Д.Б., Никитин И.А. Вторичные геохимические процессы в качестве атрибута нефтегазонасыщенности песчаных коллекторов Тамбейского месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 120–129. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/5/3191>
6. Мельник И.А. Полимодальность гистограмм геологических характеристик как критерий флюидодинамики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 66–74. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/9/3717>
7. Melnik I.A. Polymodality of secondary kaolinite distribution in open sandy reservoir systems // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. Published. – 2024. – Vol. 58. – № 3. – P. 787–797. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040579524601456https://rdu.be/d84nd>

8. Ashley G.M. Interpretation of polymodal sediments // *The Journal of Geology*. – 1978. – Vol. 86. – № 4. – P. 411–421. DOI: <https://doi.org/10.1086/649710>
9. 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. – Vol. 13. – № 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13073706>
10. Fedoseev V.B., Fedoseeva E.N. Formation of BI- and polymodal distributions and the non-Ostwald behavior of disperse systems // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2019. – Vol. 92. – № 5. – P. 1191–1200.
11. Logratio analysis of components separated from grain-size distributions and implications for sedimentary processes: an example of bottom surface sediments in a shallow lake / Naofumi Yamaguchi, Tsuyoshi Ando, Hirotaka Enokida, Natsumi Nakada, Syota Yamaki, Tohru Ohta // *Sedimentology*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/sed.13174>
12. Textural characteristics and depositional environment of Ngrayong sandstone (Middle Miocene) from Rembang Area, Northeast Java, Indonesia / Khaing San Yee, Sugai Yuichi, Tun Myo Min, Surjono Sugeng Supto, Setyowiyoto Jarot // *Open Journal of Geology*. – December 2022. – Vol. 12. – № 12. – P. 1102–1119. DOI: [10.4236/ojg.2022.1212052](https://doi.org/10.4236/ojg.2022.1212052)
13. Htun Myo Min, Surjono Sugeng Supto, Setyowiyoto Jarot. Granulometry analysis of Ngrayong sandstone, Tempuran Area, Rembang Zone, North East Java Basin // *Conference Series Earth and Environmental Science*. – 2020. – 451(1):012082. DOI: [10.1088/1755-1315/451/1/012082](https://doi.org/10.1088/1755-1315/451/1/012082)
14. Мельник И.А. Основы статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин: учебник. – М.: РУСАЙНС, 2022. – 76 с. URL: <https://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2022/m10.pdf> (дата обращения: 21.03.2025).
15. Карнюшина Е.Е. Основные причины возникновения зон карбонатной цементации в толщах нефтегазоносных бассейнов // *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. – 2012. – № 5. – С. 47–49.
16. Коржинский Д.С. Физико-химические основы анализа парагенезиса минералов. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 184 с.
17. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
18. Cuffaro M.E., Hartmann S. The open systems view // *Philosophy of Physics*. – 2024. – Vol. 2. – № 1. – P. 1–27.
19. Wikipedia. Golden ratio. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Golden_ratio (дата обращения: 21.03.2025).
20. Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. – Новосибирск: Наука, 1992. – 230 с.
21. Предтеченская Е.А., Шиганова О.В., Фомичев А.С. Катагенетические и гидрхимические аномалии в нижнесреднеюрских нефтегазоносных отложениях Западной Сибири как индикаторы флюидодинамических процессов в зонах дизъюнктивных нарушений // *Литосфера*. – 2009. – № 6. – С. 54–65.
22. Чепиков К.Р., Ермолова Е.П., Орлова Н.А. Эпигенетические минералы как показатели времени прихода нефти в песчаные промышленные коллекторы // *Доклады АН СССР*. – 1959. – № 5. – С. 1097–1099.
23. Парагенезисы и история формирования глинистых и титанистых минералов терригенных коллекторов Западной Сибири – основа прогноза зон нефтегазоаккумуляции / А.Д. Коробов, Л.А. Коробова, А.Т. Колотухин, В.М. Мухин, Л.В. Елисеева // *Известия Саратовского университета. Серия Наука о Земле*. – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 69–78.

Информация об авторах

Игорь Анатольевич Мельник, доктор геолого-минералогических наук, профессор, отделение нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30: melnik@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2198-0370>

Поступила в редакцию: 16.04.2025

Поступила после рецензирования: 26.05.2025

Принята к публикации: 04.08.2025

References

1. Lebedev V.A. *Geochemistry of epigenetic processes in sedimentary basins*. Leningrad, Nedra Publ., 1992. 239 p. (In Russ.)
2. Predtechenskaya E.A. Mineralogical anomalies as indicators of fluid migration processes in Jurassic oil and gas deposits of the West Siberian Plate. *Sedimentary basins, sedimentation and postsedimentation processes in geological history. VII All-Russian Lithological Conference*. Novosibirsk, INGG SO RAN Publ., 2013. pp. 400–405. (In Russ.)
3. Melnik I.A. *Determination of the intensity of geochemical processes based on geophysical well survey data*. Novosibirsk, SNIIGGIMS Publ., 2016. 146 p. (In Russ.)
4. Sahibgarayev R.S. *Secondary changes in reservoirs during the formation and destruction of oil deposits*. Leningrad, Nedra Publ., 1989. 260 p. (In Russ.)
5. Melnik I.A., Rodivilov D.B., Nikitin I.A. Secondary geochemical processes as an attribute of oil and gas saturation of sand reservoirs of the Tambey field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 120–129. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/5/3191>
6. 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 Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/9/3717>
7. Melnik I.A. Polymodality of Secondary Kaolinite Distribution in Open Sandy Reservoir Systems. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering. Published*, 2024, vol. 58, no. 3, pp. 787–797. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040579524601456> <https://rscu.be/d84nd>
8. Ashley G.M. Interpretation of polymodal sediments. *The Journal of Geology*, 1978, vol. 86, no. 4, pp. 411–421. DOI: <https://doi.org/10.1086/649710>
9. Binghe Yan, Yulan Zhang, Shuying Zang, Qiang Chen and Li Sun. Distributions of particle sizes in black soil and their environmental significance in Northeast China. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13073706>

10. Fedoseev V.B., Fedoseeva E.N. Formation of BI- and polymodal distributions and the non-Ostwald behavior of disperse systems. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 5, pp. 1191–1200.
11. Naofumi Yamaguchi, Tsuyoshi Ando, Hirotaka Enokida, Natsumi Nakada, Syota Yamaki, Tohru Ohta. Logratio analysis of components separated from grain-size distributions and implications for sedimentary processes: An example of bottom surface sediments in a shallow lake. *Sedimentology*, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1111/sed.13174> (accessed 10 April 2025).
12. Khaing San Yee, Sugai Yuichi, Tun Myo Min, Surjono Sugeng Saptio, Setyowiyoto Jarot. Textural characteristics and depositional environment of Ngrayong Sandstone (Middle Miocene) from Rembang Area, Northeast Java, Indonesia. *Open Journal of Geology*, 2022, vol. 12, no. 12, pp. 1102–1119. DOI: 10.4236/ojg.2022.1212052.
13. Htun Myo Min, Surjono Sugeng Saptio, Setyowiyoto Jarot. Granulometry analysis of Ngrayong sandstone, Tempuran Area, Rembang Zone, North East Java Basin. *Conference Series Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 451(1):012082. DOI: 10.1088/1755-1315/451/1/012082
14. Melnik I.A. *Fundamentals of statistical-correlation interpretation of geophysical well survey data*. Moscow, RUSAJNS Publ., 2022. 76 p. Available at: <https://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2022/m10.pdf> (accessed 21 March 2025).
15. Karnyushina E.E. Main causes of carbonate cementation zones in oil and gas bearing basin strata. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya*, 2012, no. 5, pp. 47–49.
16. Korzhinskiy D. S. *Physico-chemical bases of mineral paragenesis analysis*. Moscow, AN SSSR Publ., 1957. 184 p. (In Russ.)
17. Nikolis G., Prigozhin I. *Self-organization in non-equilibrium systems*. Moscow, Mir Publ., 1979. 512 p. (In Russ.)
18. Cuffaro M.E., Hartmann St. The Open Systems View. *Philosophy of Physics*, 2024, vol. 2, no. 1, pp. 1–27.
19. *Wikipedia. Golden ratio*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Golden_ratio (accessed 21 March 2025).
20. Letnikov F.A. *Synergetics of geological systems*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. 230 p. (In Russ.)
21. Predtechenskaya E.A., Shiganova O.V., Fomichev A.S. Catagenetic and hydrochemical anomalies in Lower Middle Jurassic oil and gas bearing sediments of Western Siberia as indicators of fluid dynamic processes in zones of disjunctive disturbances. *Litosfera*, 2009, no. 6, pp. 54–65.
22. Chepikov K.R., Ermolova E.P., Orlova N.A. Epigenetic minerals as indicators of oil arrival time in sandy industrial reservoirs. *Doklady AN SSSR*, 1959, no. 5, pp. 1097–1099.
23. Korobov A.D., Korobova L.A., Kolotuhin A.T., Muhin V.M., Eliseeva L.V. Paragenesis and formation history of clay and titanite minerals of terrigenous reservoirs of Western Siberia – the basis for prediction of oil and gas accumulation zones. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Seriya Nauka o Zemle*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 69–78.

Information about the author

Igor A. Melnik, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. melnik@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2198-0370>

Received: 16.04.2025

Revised: 26.05.2025

Accepted: 04.08.2025