

УДК 53.081; 550.83+ 552.5 +553.98

ПОЛИМОДАЛЬНОСТЬ ГИСТОГРАММ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАК КРИТЕРИЙ ФЛЮИДОДИНАМИКИ

Мельник Игорь Анатольевич,
melnik@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена необходимостью выявления полиmodalности в распределениях интенсивностей процессов различной природы. Причем причина полиmodalности гистограмм несет в себе универсальный характер, а их моды могут служить поисковым критерием нефтегазовых залежей.

Цель: определение величин мод в полиmodalных распределениях интенсивностей вторичных процессов, которые отражают динамический режим внешнего влияния и характер насыщения песчаного коллектора, а также являются «ярлыком» условий проявления полиmodalности в распределениях величин раскрытости трещин песчаной породы.

Методы. На основе ранее разработанной методологии и теории унификации статистической интенсивности процессов преобразования вещества в полиmodalном распределении данных интенсивностей каждая мода соотносится с определенной динамикой воздействия внешнего потока. Согласно ранее разработанной кинематической теории преобразования систем сам процесс преобразования приобретает устойчивость, только когда вектор состояния процесса трансформации в векторном пространстве временных координат (время внутреннего преобразования элементов системы и время течения внешнего воздействия в пределах радиуса влияния на внутренние элементы) определяется угловыми константами, связанными с «золотой» пропорцией. Устойчивые состояния процессов являются причиной формирования полиmodalного статистического распределения.

Результаты. Исследования, проведенные на основе эмпирических данных, показали, что распределения выборок интенсивностей вторичных процессов в нефтегазонасыщенных песчаных породах всегда бимодальны. Меньшая величина моды бимодального распределения обусловлена закономерностью консервации углеводородами всех вторичных преобразований вещества. Центр тяжести моно- либо полиmodalного распределения интенсивностей в водонасыщенных пластах сдвинут в сторону большей величины. Интенсивность преобразования породы зависит от раскрытости её трещин, а распределение выборки величин раскрытости трещин также может быть полиmodalным при условии приблизительного равенства расстояния от скважин (место взятия образца керна) до тектонических разломов.

Ключевые слова:

Интенсивность вторичных процессов, раскрытость трещин, полиmodalное распределение, углеводороды, «золотая» пропорция, геофизические исследования скважин, состояние процесса преобразования.

Введение

В настоящей работе представлены результаты исследований статистических распределений выборок определенных геологических характеристик. Под геологическими характеристиками понимаются интенсивности вторичных геохимических процессов и раскрытость трещин в песчаных коллекторах. Взаимосвязи данных параметров давно известны, но малоизучены. В свою очередь? причина возникновения полиmodalности в статистических распределениях представленных параметров почти не изучалась, т. к. априори считается, что их форма распределения должна быть непрерывно нормальная либо логнормальная (т. е. мономодальная). Например, ряд авторов в качестве примеров приводят полученные биполиmodalные гистограммы статистических распределений раскрытости трещин, не объясняя реализованные формы, а заранее предполагая их мономодальность [1, 2].

В свою очередь, проведенные исследования форм распределения интенсивностей вторичных процессов преобразования песчаной породы показали, что данные распределения полиmodalные [3, 4]. Полиминеральный песчаный коллектор в земной коре представляет собой открытую геологическую систему.

В результате литосферных тектонических процессов могут возникать глубинные разломы с опережающими их трещинами, являющимися каналами флюидомиграции. При поступлении в коллектор гидротермальных флюидов в породе нарушается геохимическое равновесие и происходит образование вторичных аутигенных минералов из генетически связанных с ними аллотигенных компонентов породы [5]. В этом случае мы разделяем процесс воздействия внешнего фактора (глубинного флюида) и внутреннего процесса трансформации элементов системы. Каждый процесс характеризуется кинематическими параметрами – периодами времён течения и преобразования. Устойчивые состояния процессов преобразования обусловлены константами отношения этих периодов, которые связаны с «золотой» пропорцией [3].

Изучение причин полиmodalности выявило, что каждая мода в статистическом распределении одного и того же процесса идентифицируется с определенной динамикой внешнего фактора воздействия. Например, исследования вероятностных графиков распределения зерен осадочной породы в системе река–озеро по размерам указывают на то, что большинство выборок являются полиmodalными, с тремя модами, возникновение которых обусловлено изменением скорости водных потоков [6]. Также полиmodal-

ность распределения размеров зерен в черноземах Северо-Восточного Китая в большей степени контролируется ветровой эрозией почв и в меньшей степени процессами замерзания–испарения и антропогенным влиянием [7]. Согласно результатам статьи [8], бимодальное распределение размеров песчинок на острове Фишер определяется фаціальными условиями.

В статье [9] проведенные экспериментальные исследования динамических характеристик процесса грануляции микрокристаллической целлюлозы и моногидрата α -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.

Полимодальное распределение состояний, свойств (например, размеров, форм, плотностей зарядов и т. д.) биомакромолекул, гидрогелей зависит от влияния внешних полей [10]. В свою очередь, рассматриваемое распределение размеров частиц обусловлено созреванием многокомпонентных дисперсных систем с испарениями (фазовыми превращениями) внутри частиц [11]. Если внешнее давление сопоставимо (или несколько выше) с внутренним давлением насыщенного пара, то для малорастворимых нелетучих веществ образуются сложные статистические распределения.

Вне зависимости от природы открытых систем при исследовании их составных элементов распределение количества преобразованных элементов (за счет внешних факторов) всегда полимодально. Преобразование геологической системы трансформирует все сопутствующие элементы, будь то минералы, поры, трещины, флюиды и т. д. Если полимодальное распределение интенсивности вторично преобразованных элементов породы коллектора зависит от раскрытости трещин, то и распределение величин раскрытости (подводящих путей внешнего фактора влияния) также может быть полимодально.

Целью данной работы является подтверждение следующих гипотез:

- величины мод в полимодальных распределениях интенсивностей вторичных процессов могут отражать динамический режим внешнего влияния и характер насыщения песчаного коллектора (в нефтегазовых месторождениях);
- существуют условия проявления полимодальности в распределениях величин раскрытости трещин песчаной породы.

Методы исследования

Интенсивность процесса преобразования элементов открытой системы соответствует следующей зависимости [3, 4]:

$$I = Q \frac{\Delta \tau}{\Delta t}, \quad (1)$$

где Q [$\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$] – произведение плотности потока (флюида) внешних элементов влияния, проникающих в сферу радиуса взаимодействия, содержания потен-

циально преобразующихся внутренних компонентов в единице объема и вероятности взаимодействия (при исследовании выборки данных вместо Q можно рассматривать относительную величину $Q' = Q / \langle Q \rangle$, где $\langle Q \rangle$ – среднее значение выборочных данных Q); $\Delta \tau$ – период времени внутреннего преобразования количественных характеристик элементов системы; Δt – период времени течения (пролета) внешнего фактора воздействия (флюида) в пределах радиуса влияния на внутренние элементы.

Если период времени пролета внешних элементов влияния окажется меньше периода времени преобразования внутренних элементов, то вероятность трансформации элементов системы близится к нулю. В свою очередь, когда в течение периода времени движения внешних элементов образуется составная подсистема с внутренними трансформирующими элементами (с возможным дальнейшим процессом релаксации преобразования), вероятность процесса трансформации самой системы стремится к единице. Это условие назовем *первым условием преобразования*:

$$\Delta \tau \leq \Delta t.$$

В случае относительного единообразия внутренних элементов, их равномерной плотности в системе и постоянства потока внешнего источника $Q = \text{const}$ изменение интенсивности процессов будет полностью обусловлено изменением величин временных параметров (1).

Согласно ранее разработанной кинематической теории преобразования системы сам процесс преобразования приобретает *устойчивость*, только когда вектор *состояния процесса* трансформации в векторном пространстве временных координат (τ ; t) определяется угловыми константами, связанными с «золотой» пропорцией («золотая» пропорция – отношение большего к меньшему пропорционально отношению целого к большему, равного 1, 618... [12], «проявляет себя» в качестве «стандартизатора-гармонизатора» эволюции естественных процессов) [3].

На основе вычисленных базовых состояний процессов: пропорционально-стабильного (ПС); пропорционально-мобильного (ПМ); непропорционально-стабильного (НС), определены семь устойчивых состояний процессов преобразования открытых систем, обуславливающих полимодальность в статистических распределениях интенсивностей процессов преобразования (табл. 1). Причем данные состояния могут быть одномерными (выделяются звездочкой), т. е. с одним (нормальным, доминирующим) внешним фактором воздействия, и двумерным – с присутствием еще и альтернативного источника влияния. ПС-состояние характеризуется начальным равновесным состоянием, а также равновесными состояниями в нормальном (x) и альтернативном (y) внешних потоках.

В табл. 1 показаны вычисленные константы мод для распределения унифицированной выборки. Унифицированные математические ожидания мод определяются согласно уравнению [4, 13]:

$$\mu_{\text{mod}} = \exp \left[\frac{G_{\text{mod}} - C}{\chi} \right] - 1, \quad (2)$$

где $G_{\text{mod}} = \frac{n_0}{\langle n \rangle} \cdot \frac{I_0}{\langle I \rangle}$, т. е. относительная величина лю-
бых измеряемых выборочных значений, соответствую-
ющих n_0 – количеству преобразованных элементов,
 I_0 – интенсивностям процессов преобразования эле-
ментов, измеряемых характеристик элементов систе-
мы на уровне мод; $\langle n \rangle$ и $\langle I \rangle$ – средние значения выбо-
рок преобразованных элементов и интенсивностей

процессов преобразования; константы равны $C = -3,5$
и χ , находящейся в пределах 12–14. Для каждой гене-
ральной выборки систем различной природы преоб-
разования среды в гистограмме распределения изме-
ряемого значения n , постоянная χ в уравнении (2)
определяется в случае соответствия математического
ожидания моды $\mu_{\text{ПС}} = 0,3819$ минимальной (первой
либо, в редком случае, второй) моде. Формула вычис-
ления константы χ выглядит так:

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

Таблица 1. Математические ожидания мод унифицированных дискретных состояний статистических распределений интенсивностей процессов преобразования систем

Table 1. Mathematical expectations of modes of unified discrete states of statistical distributions of intensities of system transformation

№	Состояния States	Угол, рад Angle, rad	Мода, усл. ед. Mode, arb. unit	Описание принципа состояния процесса Description of the process state principle
1	ПС	1	0,382	Начальное равновесное состояние процесса Initial equilibrium state of the process
2	ПМ*	0,973	0,392	Уменьшение времени воздействия внешнего нормального (доминирующего) фактора либо увеличение времени преобразования внутренней системы относительно равновесного состояния процесса Reducing the time of influence of the external normal (dominating) factor or increasing the time of transformation of the internal system relative to the equilibrium state of the process
3	ПМ	0,947	0,403	Уменьшение времени течения внешнего фактора либо увеличение времени преобразования внутренней системы под действием нормального 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 influence of normal and alternative sources of influence relative to the equilibrium state of the process
4	НС*	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
5	НС	0,887	0,43	Уменьшение времени воздействия внешнего фактора и пропорциональное увеличение времени преобразования внутренней системы включительно под действием нормального и альтернативного источников влияния относительно равновесного состояния процесса Reducing the time of influence of an external factor and proportional increase of time of transformation of the internal system inclusive under the action of normal and alternative sources of influence relative to the equilibrium state of the process
6	ПС(2)у	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
7	ПС(2)х	0,757	0,504	Равновесное состояние процесса в нормальном внешнем потоке относительно начального равновесного состояния процесса Equilibrium state of the process in the normal external flow relative to the initial equilibrium state of the process

При исследовании интенсивностей вторичных преобразований песчаных пластов в разрезах скважин, определив интенсивности в 10–30 пластах по глубине 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 исследуемого горизонта по скважине, мы получаем выборку (по количеству скважин) закономерности латерального распределения флюида и, наоборот, усредняя по скважинам данные интенсивностей пластов всего разреза, мы получаем закономерности вертикального распределе-

ния. 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 нормальный поток, а «латеральная» гистограмма – альтернативный внешний фактор. В первом случае в распределении интенсивностей появляется мода № 7 (табл. 1), а во втором случае – мода № 6, относительно которых определяются последующие моды данных гистограмм.

В работах [4, 13] приводятся теоретические и эмпирические доказательства того, что интенсивность

вторичных преобразований эквивалентна $P(A; B)$ – двухмерной вероятности данных преобразований:

$$I \sim i \sim P(A; B) \sim |R|,$$

где i – статистическая интенсивность вторичных геохимических преобразований; R – коэффициент корреляции A и B – измеряемых (вычисляемых) параметров геофизических исследований скважин (ГИС). Подтверждена валидность статистически-корреляционного метода интерпретации (СКИ) материалов ГИС, на основании которого статистическая интенсивность определяется по формуле:

$$i = YR^2, \quad (4)$$

$$Y = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H p_h^j,$$

где p – количество всех выборочных значений при $R_h > |\pm 0,6|$; K – количество выборочных значений всего исследуемого интервала; H – количество «внутри интервальных» выборочных значений; J – количество «внутри интервалов», причем $J < H \leq K$, а если $H=K$, то $J=1$. Статистический параметр Y выражает интервальную меру влияния вторичных процессов, т. е. в данном случае показывает долю преобразованного вещества исследуемого пласта.

Мигрирующие в литосфере флюиды могут оставлять значительный геохимический «след наложенного эпигенеза» в коллекторах фундамента и осадочного чехла [5, 14]. В этом случае для каждого пласта исследуемой территории фоном служат все процессы диагенеза и катагенеза, приводящие к однородному влиянию на содержание минералов. Данный «след» является доминантным относительно других фоновых процессов в песчаных отложениях, и его можно зафиксировать при следующих корреляционных связях (4):

- отрицательная регрессия содержания железа с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) породы – *пириты либо хлоритизированные биотиты*;
- положительная регрессия глинистости с пористостью породы – *вторичные каолиниты*;
- отрицательная регрессия содержания калия с УЭС породы – *вторичные пелиты*.

Вычисление статистической интенсивности вторичных геохимических преобразований по материалам ГИС на основе репрезентативного количества данных позволяет исследовать формы гистограмм распределения интенсивностей вторичных преобразований по всему разрезу скважин.

В источниках [4, 13] рассмотрены геохимические условия и обоснована валидность перечисленных корреляционных зависимостей. Причем относительные содержания железа и калия в песчаной породе определяются по разработанной методике, на основе материалов нейтронного каротажа и гамма-каротажа скважины [4].

Результаты исследования

В монографии Б.А. Лебедева [15; рис. 38, 40] показаны гистограммы числа контактов (ЧК) на зерно

«терригенного девона» для водонасыщенных и нефтенасыщенных песчаников. Число контактов пропорционально интенсивности вторичного геохимического процесса. Гистограмма ЧК нефтенасыщенного песчаника бимодальна, причем её центр тяжести сдвинут в меньшую сторону относительно мономодальной гистограммы ЧК водонасыщенной породы. Данное свойство «нефтеносной» гистограммы обусловлено закономерностью Чепикова, основанной на свойстве углеводородов консервировать процессы вторичных преобразований.

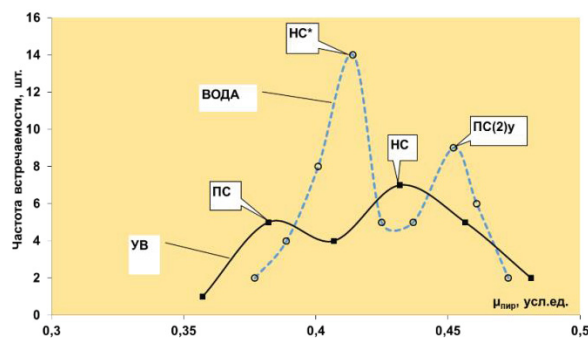


Рис. 1. Гистограммы унифицированных математических ожиданий мод интенсивностей пиритизации для нефтегазоносных и водоносных песчаных интервалов Томской области

Fig. 1. Histograms of unified mathematical expectations of pyritization intensity modes for oil and gas and water-bearing sandy intervals of the Tomsk region

Закономерность Чепикова проявилась при построении гистограмм выборочных данных интенсивностей вторичных процессов пиритизации и пелитизации. Например, на нефтегазовых месторождениях Томской области были изучены 59 водоносных и 19 нефтеносных песчаных пластов мезозоя. На основании формул (2)–(4) вычислены статистические интенсивности и математические ожидания мод вторичной пиритизации. Полученные гистограммы математических ожиданий мод пиритизаций выявили следующие закономерности (рис. 1): бимодальность пиритизации водоносных и нефтеносных пластов различная; для нефтеносных интервалов моды пиритизации сдвинуты влево (относительно «водоносных» мод), они относятся к начальному равновесному состоянию (быстрой «консервации» – ПС) и состоянию интенсивной пиритизации в результате поступления в коллектор глубинной УВ-смеси флюидов с латеральной миграцией и дальнейшим её фазовым разделением (НС); для водоносных интервалов низшая мода (НС*) относится к состоянию интенсивного вторичного образования пиритов в результате поступления флюидов только по вертикальным глубинным разломам, а состояние (ПС(2)у) обусловлено интенсивным образованием вторичных пиритов в результате латерального течения флюида с последующей «консервацией», т. е. формированием химически равновесной среды.

На Северо-Тамбейском газоконденсатном месторождении полуострова Ямал при исследовании распределения интенсивностей вторичной пелитизации в

песчаных пластах меловых отложений были изучены 28 водоносных и 60 УВ-насыщенных интервалов. Получены две гистограммы: бимодальная – для УВ насыщенных пластов; мономодальная – для водоносных интервалов (рис. 2). Здесь также видно, что присутствие ПС-состояния для УВ-насыщенных пластов можно объяснить закономерностью Чепикова, а одинаковые моды НС-состояний водоносных и газоконденсатных интервалов указывают на единообразный процесс вторичной пелитизации в этом режиме. Полученная бимодальная гистограмма интенсивности пиритизации УВ-насыщенных песчаников на Северо-Тамбейском месторождении подтверждает процесс консервации вторичного минералообразования (рис. 3).

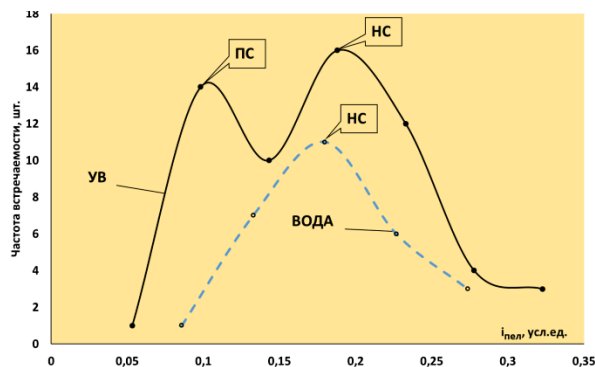


Рис. 2. Гистограммы интенсивностей вторичной пелитизации для УВ-насыщенных и водоносных песчаных интервалов Северо-Тамбейского газоконденсатного месторождения

Fig. 2. Histograms of secondary pelitization intensities for hydrocarbon-saturated and water-saturated sandy intervals of the North Tambeysk gas condensate field

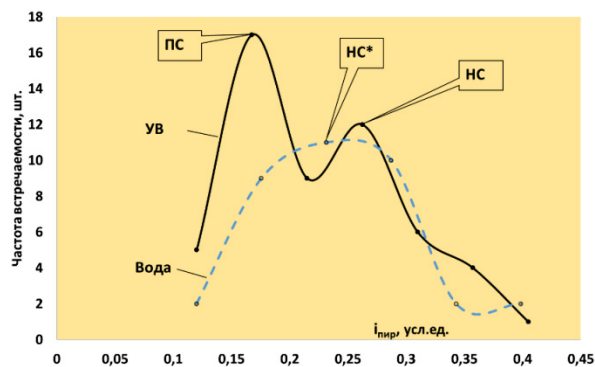


Рис. 3. Гистограммы интенсивностей вторичной пиритизации для УВ-насыщенных и водоносных песчаных интервалов Северо-Тамбейского газоконденсатного месторождения

Fig. 3. Histograms of secondary pyritization intensities for hydrocarbon-saturated and water-saturated sandy intervals of the North Tambeysk gas condensate field

Интенсивность усреднённого (по разрезу скважины) вторичного минералообразования зависит от состояния до разлома и раскрытости трещин согласно следующей зависимости [4, 13]:

$$\langle i \rangle_z = A \eta_z \exp(-Br \eta_z^2),$$

где r – расстояние от скважины до разлома [м]; B – константа песчаных интервалов для исследуемого горизонта (мелового, юрского) относительно территориального флюидоупора [м³]; $A=6 \times 10^{-3}$ – унифицированная постоянная, приводящая в соответствие правую часть уравнения и статистическую интенсивность, одинаковая для всех горизонтов и территорий [1/м²]; эмпирические универсальные константы интенсивностей вторичной каолинитизации: $\eta_1=41,2$ [м²·д.ед.], $\eta_2=28,6$ [м²·д.ед.], $\eta_3=21,74$ [м²·д.ед.], $\eta_4=16,13$ [м²·д.ед.]. Универсальные константы для определенного геохимического процесса зависят от квадрата раскрытости трещин:

$$\eta = \frac{\delta^2 (C^m - C_0^m)}{m},$$

где δ – раскрытость трещин, [м]; $m=1-\gamma$, γ – показатель гетерогенной реакции ($\gamma \neq 1$), C и C_0 – концентрации флюида до и после вступления в реакцию. Объемная константа B в большей степени зависит (обратно пропорционально) от градиента давления глубинного флюида и пропорциональна коэффициенту трещиноватости.

Для определения универсальных констант по каждой скважине исследуемого горизонта усреднялись параметры статистической интенсивности каолинитизации. Априори предполагалось, что химизм процесса каолинитизации всего разреза единообразен, т. е. C , m – const. Расстояния от скважины до ближайшего разлома брались на основании сейсмических карт по тектоническим нарушениям баженовской свиты (для меловых отложений) и фундамента (для юрских пластов) исследуемых площадей. Были получены четыре регрессии, и при $r \rightarrow 0$ определялись константы η_z , моды и состояния (табл. 2).

Таблица 2. Полиmodalность раскрытости трещин по результатам определения интенсивности вторичной каолинитизации

Table 2. Polymodality of crack opening based on the results of determining the intensity of secondary kaolinitization

η_z , м ² ·д.ед. Universal constants	δ , мкм Openness	μ_{mod} , усл.ед. Mode, arb. unit	Состояния States
16,1	10,0	0,382	ПС
21,7	11,65	0,407	ПМ
28,6	13,37	0,438	НС
41,2	16,0	0,499	ПС(2)х

В табл. 2 раскрытости трещин вычислялись на основании двух допущений: во-первых, показатель гетерогенной реакции и концентрации флюида до и после вступления в реакцию постоянны, во-вторых, средняя минимальная величина раскрытости трещин песчаных пород соответствует 10 мкм. На основании табличных данных исследований 1110 образцов каменного материала [1. С. 69] построена гистограмма распределения раскрытости трещин в песчаных породах (рис. 4). Наибольшее число измерений (430 изм.) было получено по результатам минимальной раскрытости. На рис. 4 проявились 3 моды раскрытости трещин: 10, 100 и 300 мкм. Но если посмотреть её

статистическое распределение в пределах $\sim 5\text{--}20$ мкм, то, вполне возможно, мы обнаружим 4 моды высшей modalности. К тому же необходимо соблюсти ещё одно условие – расстояния от скважин (в которой брался керн) до разломов приблизительно должны быть одинаковы. Это связано с тем, что раскрытость трещин сильно зависит от порового давления и тензора эффективных напряжений, величины которых также контролируются расстоянием до разрыва литосферы.

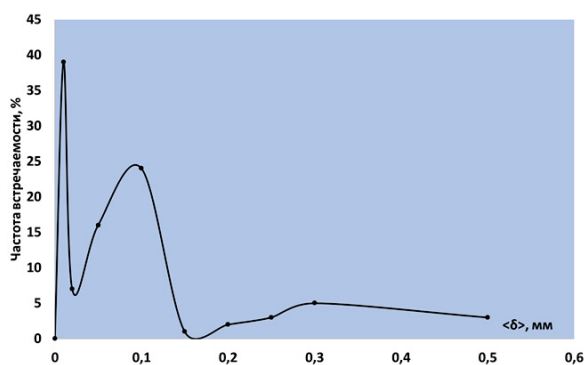


Рис. 4. Гистограмма усредненной раскрытости трещин песчаной породы по [1]

Fig. 4. Histogram of averaged crack opening in sandy rock according to [1]

Согласно модели раскрытости трещин Бартон–Бандиса раскрытость бывает механическая и гидравлическая [16–19]. Данные характеристики обусловлены напряженно-деформированным состоянием, шероховатостью стенок трещин и прочностью породы. Причем при тектонических процессах литосферы трещины в породе распространяются с очень высокой скоростью – порядка 0,4–0,5 величины скорости звука в материале. Процесс распространения трещины является дискретным в зависимости от вязкости материала. В наиболее вязкой среде наступает период «спокойствия», когда рост трещины приостанавливается. Поэтому скорость распространения трещин в разнообразных породах литосферы различна, и время образования раскрытости также различается [20], соответственно, полиmodalность статистического рас-

пределения раскрытости трещин в коллекторах должна подчиняться закономерностям уравнений (2), (3).

Заключение

В результате применения предлагаемого метода статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин при изучении вторичных процессов в песчаных породах были выявлены следующие закономерности:

1. Формы и центры тяжести статистических гистограмм интенсивностей вторичных процессов (в песчаной породе) для водонасыщенных и углеводороды насыщенных интервалов отличаются друг от друга.
2. Для углеводородов насыщенных интервалов гистограммы интенсивностей вторичных процессов всегда бимодальны (в отличие от водоносных), причем частота встречаемости первой (меньшей) моды нефтегазонасыщенных интервалов намного превышает частоту встречаемости данной интенсивности водонасыщенных пластов. Минимальная мода соответствует состоянию пропорционально-стабильного процесса, где при УВ-насыщении интервала объясняется «замораживанием» всех процессов преобразования (закономерность Чепикова).
3. Появление полиmodalности в гистограммах раскрытости трещин возможно в случае соблюдения следующего условия – при изучении образцов керна, расстояния от скважин до тектонических разломов должны быть приблизительно одинаковыми.

Таким образом, определение унифицированных математических ожиданий мод в выборке полиmodalных распределений интенсивностей вторичных процессов и раскрытости трещин полностью соответствует ранее вычисленным величинам-константам, обусловленным постоянной «золотой» пропорции. «Привязав» выборочные данные интенсивности процесса либо раскрытости трещин к определенной моде, можно выявить состояние процесса преобразования среды и динамический режим трансформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов. – М.: Недра, 1986. – 608 с.
2. Подходы к моделированию карбонатного трещиноватого коллектора на примере месторождения Восточной Сибири / А.А. Козяев, Е.И. Смоленцев, А.Н. Бирик, К.Е. Закревский // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». – 2016. – Вып. 42. – № 1. – С. 11–15.
3. 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.
4. Мельник И.А. Определение интенсивности геохимических процессов по материалам геофизических исследований скважин. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2016. – 146 с.
5. Мельник И.А., Харламов С.Н. К вопросу гидродинамического моделирования процессов восходящей миграции реологически сложных неоднородных флюидов из глубинных подзем-

ных коллекторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 24–37.

6. 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 24.05.2022).
7. 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. – 3706. URL: <https://doi.org/10.3390/su13073706> (дата обращения 24.05.2022).
8. Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments of 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: https://www.researchgate.net/publication/276077395_Hydrochemistry_and_sediment_characteristics_of_polar_periglacial_lacustrine_environments_on_Fisher_Island_and_Broknes_PeninsulaEast_Antarctica (дата обращения 07.09.2022).

9. Torrecillas C.M., Halberta W.G., 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 24.05.2022).
10. Lin Y.-C., Rotenberg B., Dzubiella J. Structure and position-dependent properties of inhomogeneous suspensions of responsive colloids. DOI: 10.1103/PhysRevE.102.042602 URL: <https://arxiv.org/abs/2009.07511> (дата обращения 24.05.2022).
11. Fedoseev V.B., Fedoseeva E.N. Formation of bi- and polymodal distributions and the Nonostwald behavior of disperse system // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2019. – V. 92. – № 5. – P. 1191–1200.
12. Stakhov A.P. The «golden» number theory and new properties of natural numbers // *British Journal of Mathematics & Computer Science*. – 2015. – V. 11 (6). Article no. BJMCS.21385. URL: <http://www.sciencedomain.org/> (дата обращения 24.05.2022).
13. Мельник И.А. Основы статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин. – М.: РУСАЙНС, 2022. – 76 с.
14. Никитин И.А. Факторы, влияющие и определяющие характер насыщения низкоомных коллекторов на примере месторождения Сургутского свода // *East European Scientific Journal*. – 2021. – Т. 12 (76). – С. 43–52.
15. Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Л.: Недра, 1992. – 239 с.
16. Жигульский С.В., Тихоцкий С.А. Оценка раскрытости системы трещин в условиях изменения коэффициента шероховатости трещины на основе данных о напряженно-деформированном состоянии // *Специализированный журнал «Бурение и нефть»*. – 2020. – № 7–8. URL: <https://burneft.ru/archive/issues/2020-07/30> (дата обращения 24.05.2022).
17. Byerlee J. Friction of rocks // *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*. – 1978. – V. 116. – P. 615–626. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF00876528.pdf> (дата обращения 07.09.2022).
18. Barton N. R. Modelling rock joint behavior from in situ block tests: implications for nuclear waste repository design. – 1982. – 118 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/236433630_Modelling_rock_joint_behavior_from_in_situ_block_tests_Implications_for_nuclear_waste_repository_design (дата обращения 24.05.2022).
19. Barton C.A., Zoback M.D., Moos D. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock // *Geology. Geological Society of America*. – 1995. – № 23–8. – P. 683–686.
20. Sheng Zhang, Yang Qiao, Hong-Bao Zhao. The crack opening displacement of rock fracture process zone. – 2019. DOI: 10.2298/TSCI180913214Z URL: https://www.researchgate.net/publication/333278411_The_crack_opening_displacement_of_rock_fracture_process_zone (дата обращения 24.05.2022).

Поступила 26.05.2022 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 53.081; 550.83+552.5+553.98

POLYMODALITY OF HISTOGRAMS OF GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AS A CRITERION OF FLUID DYNAMICS

Igor A. Melnik,
melnik@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the work is caused by the necessity to identify the polymodality in distributions of the intensities of processes of various nature. Moreover, the reason for the polymodality of histograms is universal, and their modes can serve as a search criterion for oil and gas deposits.

Purpose: to determine the values of modes in the polymodal distributions of the intensities of secondary processes, which reflect the dynamic regime of external influence and the nature of sandy reservoir saturation, as well as to identify the conditions for polymodality manifestation in distributions of the values of the cracks in sandy rock.

Methods. Based on the previously developed methodology and the theory of unification of the statistical intensity of the matter transformation in the polymodal distribution of these intensities, each mode corresponds to a certain dynamics of the external flow. According to the previously developed kinematic theory of system transformation, the transformation itself acquires stability only when the state vector of transformation in the vector space of time coordinates (the time of internal transformation of the elements of the system and the time of the external influence within the radius of influence on the internal elements) is determined by the angular constants associated with «golden» proportion. Steady states of processes are the reason for the formation of a polymodal statistical distribution.

Results. The studies conducted based on empirical data, have shown that the distributions of samples of the intensities of secondary processes in oil and gas saturated sandy rocks are always bimodal. The smaller value of the bimodal distribution mode is caused by the conservation pattern of all secondary transformations of matter by hydrocarbons. The center of gravity of a mono- or polymodal distribution of intensities in water-saturated reservoirs is shifted towards a larger value. The intensity of rock transformation depends on its fracture opening, and the distribution of the sample of fracture opening values can also be polymodal, provided that the distance from the wells (the place where the core sample was taken) to tectonic faults is approximately equal.

Key words:

Intensity of secondary processes, fracture opening, polymodal distribution, hydrocarbons, «golden» proportion, well logging, conversion state.

REFERENCES

- Golf-Rakht T.D. *Osnovy neftepromyslovoy geologii i razrabotki treshchinovatykh kollektorov* [Fundamentals of oilfield geology and the development of fractured reservoirs]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 608 p.
- Kozyaev A.A., Smolentsev E.I., Bibik A.N., Zakrevskiy K.E. Approaches to modeling a carbonate fractured reservoir on the example of a field in Eastern Siberia. *Scientific and technical bulletin of Rosneft Oil Company OJSC*, 2016, vol. 42, no. 1, pp. 11–15. In Rus.
- 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. *Opredelenie intensivnosti geokhimicheskikh protsessov po materialam geofizicheskikh issledovaniy skvazhin* [Determination of the intensity of geochemical processes based on the materials of geophysical studies of wells]. Novosibirsk, SNIIGiMS Publ., 2016. 146 p.
- Melnik I.A., Kharlamov S.N. On the issue of hydrodynamic modeling of the processes of ascending migration of rheologically complex heterogeneous fluids from deep underground reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 24–37. In Rus.
- 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 24 May 2022).
- 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, 3706. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13073706> (accessed 24 May 2022).
- 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 (24), pp. 281–295. Available at: (PDF) Hydrochemistry and sediment characteristics of polar periglacial lacustrine environments on Fisher Island and Broknes Peninsula, East Antarctica (researchgate.net) (accessed 24 May 2022).
- Torrecillas C.M., 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 24 May 2022).
- Lin Y-C, Rotenberg B., Dzubiella J. Structure and position-dependent properties of inhomogeneous suspensions of responsive colloids. DOI: 10.1103/PhysRevE.102.042602 Available at: <https://arxiv.org/abs/2009.07511> (accessed 24 May 2022).
- Fedoseev V.B., Fedoseeva E.N. Formation of bi- and polymodal distributions and the Nonostwald behavior of disperse system. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 5, pp. 1191–1200.
- Stakhov A.P. The «golden» number theory and new properties of natural numbers. *British Journal of Mathematics & Computer Science*, 2015, vol. 11 (6), article no. BJMCS.21385. Available at: <http://www.sciencedomain.org/> (accessed 24 May 2022).
- Melnik I.A. *Osnovy statisticheski-korrelyatsionnoy interpretatsii materialov geofizicheskikh issledovaniy skvazhin* [Fundamentals of statistical-correlation interpretation of well logging materials: textbook]. Moscow, RUSSIGNS Publ., 2022. 76 p.
- Nikitin I.A. Factors influencing and determining the nature of saturation of low-resistance reservoirs on the example of the Surgut arch field. *East European Scientific Journal*, 2021, no. 12, vol. 76, pp. 43–52. In Rus.
- Lebedev B.A. *Geokhimiya epigeneticheskikh protsessov v osadochnykh basseynakh* [Geochemistry of epigenetic processes in sedimentary basins]. Leningrad, Nedra Publ., 1992. 239 p.

16. Zhigulsky S.V., Tikhotsky S.A. Estimation of the crack system openness under conditions of change in the crack roughness coefficient based on data on the stress-strain state. *Specialized journal «Drilling and Oil»*, 2020, no. 7–8. In Rus. Available at: <https://burneft.ru/archive/issues/2020-07/30> (accessed 24 May 2022).
17. Byerlee J. Friction of rocks. *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*, 1978, vol. 116, pp. 615–626. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF00876528.pdf> (accessed 24 May 2022).
18. Barton N. R. Modelling rock joint behavior from in situ block tests: implications for nuclear waste repository design. 1982. 118 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/236433630_Modelling_rock_joint_behavior_from_in_situ_block_tests_Implications_for_nuclear_waste_repository_design (accessed 24 May 2022).
19. Barton C.A., Zoback M.D., Moos D. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology. Geological Society of America*, 1995, no. 23-8, pp. 683–686.
20. Sheng Zhang, Yang Qiao, Hong-Bao Zhao. The crack opening displacement of rock fracture process zone. 2019. DOI: 10.2298/TSCI180913214Z Available at: https://www.researchgate.net/publication/333278411_The_crack_opening_displacement_of_rock_fracture_process_zone (accessed 24 May 2022).

Received: 26 May 2022.

Information about the authors

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