

СООТНОШЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕОХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАЛОЖЕННОГО ЭПИГЕНЕЗА И «ЗОЛОТОЕ СЕЧЕНИЕ»

И. А. Мельник

ТФ ФГУП «СНИИГГИМС», 634021, г. Томск, пр. Фрунзе, 232

Аннотация. На основании разработанной кинематической теории наложенного эпигенеза и определения его интенсивности обоснован квазидискретный характер распределения содержания вторичных минералов, обусловленный пропорциональным и стабильным процессами геохимических состояний. Закономерности изменения геохимических состояний можно описать с помощью «золотого сечения» на основе решения квадратного уравнения в системе ортогональных временных координат, а именно времени преобразования вещества и времени течения флюида.

Введение

Содержания химических элементов и минералов в горной породе обычно подчиняются логнормальному непрерывному распределению [3]. Традиционно считается, что распределения вторичных минералов также подчиняются этому закону. Статистические исследования по распределению содержаний различных минералов, образованных в толще песчаных пород в результате вторичных геохимических процессов позволили выявить занимательную закономерность. Оказалось, что концентрации вторичных минералов распределяются квазидискретно (например, рис. 1), значимые провалы чередуются с большой плотностью распределения, причем данная закономерность не связана с температурным влиянием. Между средними концентрациями минералов и температурой исследуемых интервалов рассматриваемой площади корреляционных зависимостей выявлено не было.

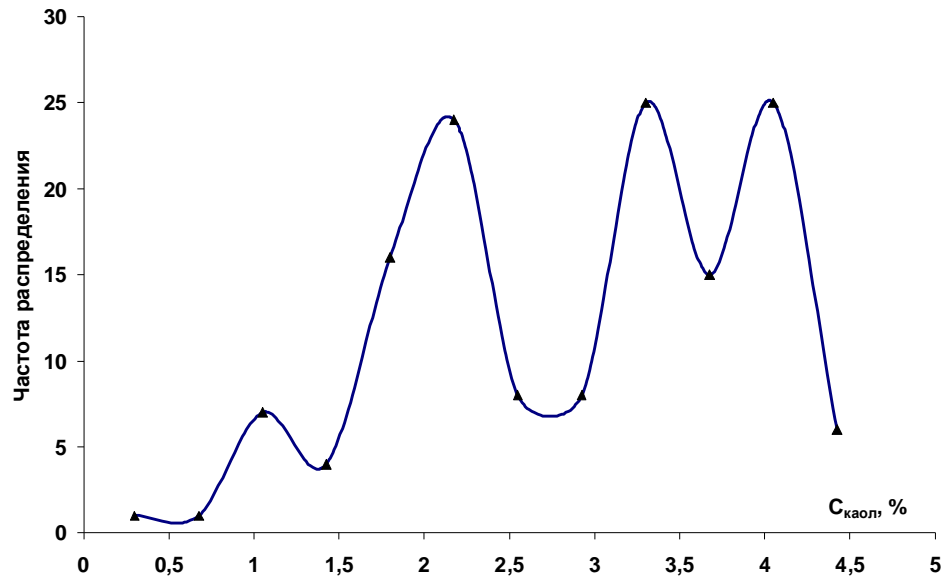


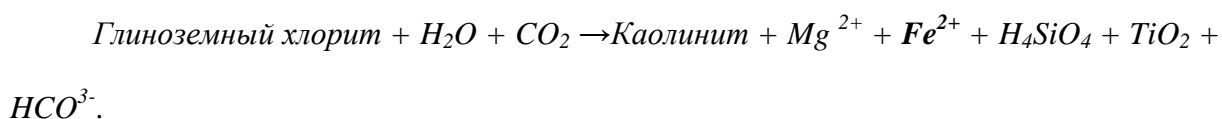
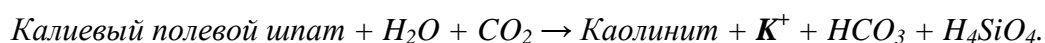
Рис. 1. Распределение содержания каолинитов (при $0.2\% < C_{\text{каоил}} < 5\%$) в песчаных породах пласта Ю₁ Столбового месторождения Томской области, определенных по результатам петрографических исследований шлифов.

На рис. 1 показано статистическое распределение концентраций каолинита в полиминеральной песчаной породе верхней юры (Ю₁) в различных скважинах Столбового месторождения Томской области (с содержанием от 0.2% до 5%, определенных на основании петрографического изучения шлифов 149 образцов керна), где проявились три максимума. Определение количества минералов на единице площади поверхности шлифа в интервале [0-0.99%] проводилось с погрешностью $\sigma = \pm 0.06\%$, а в интервале [1-5%] – $\sigma = \pm 0.09\%$. Причем, весьма похожий вид распределения присущ и другим вторичным минералам, таким как вторичные карбонаты, гидрослюда, пириты, накопления которых определяются различными физико-химическими условиями образования. Поэтому исследуемый «феномен» принципиально не связан с конкретными физико-химическими условиями, а обусловлен проявлением некоего фундаментального явления. Возникает естественный вопрос, какова природа данного дискретного распределения, в чем ее причина? В этой

работе предпринята попытка теоретически обосновать квазидискретный характер распределения содержаний вторичных минералов (в песчаной породе), обусловленных процессами наложенного эпигенеза и представить эмпирические доказательства предложенной теории.

Кинематическая теория наложенного эпигенеза

Под наложенным эпигенезом понимается процесс преобразования породы обусловленного поступающими флюидами (водные растворы с растворенными газами, углеводороды) с внешнего источника [5]. Например, в результате поступления глубинных флюидов с растворенной углекислотой углекислотный метасоматоз может протекать следующим образом (Б. А. Лебедев, 1992):



Здесь мы видим, что в кислых средах происходит каолинизация, как полевого шпата, так и глинистых минералов. Причем, 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. Соответственно, в этом случае прослеживается прямая зависимость пористости с глинистостью (т.е. с концентрациями каолинита, гидрослюды), о чем неоднократно свидетельствовали различные исследователи [9, 11].

Содержание вторично образованных минералов напрямую связано с интенсивностью процессов метаморфизма и метасоматоза. Интенсивность наложенного эпигенеза, прежде всего, зависит от количества поступивших флюидов в гетерогенную среду в течение времени преобразования вещества на единице площади поверхности.

Химическая реакция или замещение элементов вещества может произойти при неком соответствии скорости движения растворенных элементов со скоростью (временем) данной реакции. Чем больше скорость миграции флюида, тем больше количества поступающего вещества за единицу времени в течение времени преобразования данного вещества. Получается, что интенсивность преобразования будет прямо пропорциональна скорости потока флюида и времени преобразования. Введем следующее допущение – момент начала взаимодействия флюида с породой соответствует моменту начала преобразования вещества. В этом случае векторное значение скорости потока (меняющую свою величину после каждого акта взаимодействия с породой) переводим в скаляр. Общее определение скалярной величины *интенсивности* (I) процесса преобразования вещества горной породы, обусловленного наложенным эпигенезом на границе фаз гетерогенной среды, дано в работе [6]:

$$I = \Delta\tau \cdot \text{div } u/S, \quad (1)$$

где $\Delta\tau$ – время преобразования вещества с момента начала преобразования до момента измерения, u – скорость потока флюидов в трещинно-поровой среде, S – площадь поверхности взаимодействия флюида с веществом породы. Очевидно следующее – при вертикальной миграции флюидов дивергенция скорости потока выражает изменение плотности (объема, концентрации, количества) вещества (ΔQ) по глубине в зависимости от времени течения флюида (Δt) в определенном интервале пласта. Причем, положительное значение дивергенции означает разуплотнение породы, и наоборот, отрицательное значение – повышение плотности вещества.

Итак, интенсивность процесса преобразования можно переписать следующим образом:

$$I = \Delta Q \Delta\tau / (\Delta t S), \quad (2)$$

т.е., интенсивность процесса эпигенетического преобразования пористой породы – это количество образованного вещества на единице площади пористой поверхности за время его преобразования относительно времени миграции флюида, вступившего в химическую реакцию с породой.

Интенсивность преобразования, соответственно и содержания вторичных минералов, в значительной степени обусловлены отношением времени (периода) преобразования вещества к времени миграции флюида. Но при каких отношениях данных периодов времени происходит накопление вторичных минералов в породе? Очевидно, что накопление случается только при $\Delta\tau < \Delta t$, т.е. когда период преобразования меньше времени течения флюида, то химическая реакция (между молекулами флюида и преобразующейся породой) успевает протекать необходимым образом. В этом случае можно определить оптимальные временные условия для преобразования и накопления вещества.

Введем понятие *пропорционального состояния* системы геохимического процесса наложенного эпигенеза характеризующегося двумя параметрами. Пропорциональное состояние это такое состояние, когда изменение хотя бы одного из параметров (например, b) двухпараметрической системы влечет за собой пропорциональное изменение количества вторично образованного вещества (y), а второй параметр (a) при этом остается постоянным. Данное утверждение можно описать следующей линейной зависимостью: $yb - a = 0$, т.е. при переменном Δt , $\Delta\tau/\Delta t = f(\Delta t)$.

При условии $\Delta\tau = \Delta t$ формируется предельное пропорциональное состояние системы флюид-вещество породы ($f(\Delta t) = 1$). Причем, вторичного вещества образуется столько же, сколько и выносится из системы. Общий баланс системы не меняется. Все ее параметры (трещиноватость, соответственно скорость течения флюида,

окислительно-восстановительный потенциал, т.е. скорость преобразования вещества) постоянны. Система находится в *пропорционально-стабильном* (ПС) геохимическом состоянии.

Но стабильное состояние может проявиться и при $\Delta\tau < \Delta t$, $\Delta\tau/\Delta t \neq f(\Delta t)$ (т.е. при *непропорциональном* характере), когда меняется скорость накопления вторичного вещества во всей исследуемой структуре в зависимости от переменного параметра, т.е. при изменении одного из параметров (например, трещиноватости, скорости течения) обратно пропорционально меняется и второй параметр (скорость преобразования). Данное геохимическое состояние назовем *непропорционально-стабильное* (НС). НС состояние говорит об отличии pH (от pH вмещающей среды) поступающего внешнего флюида при изменении его времени течения. Понятие «стабильность» предполагает следующую связь – $\Delta\tau \sim 1/\Delta t$ и, следовательно, при условии пропорционально-стабильного состояния $\Delta\tau\Delta t_{ПС} = const$ мы получаем условие стабильности:

$$\Delta\tau \Delta t_{ПС} = \Delta\tau \Delta t_{НС} = const.$$

В случае, когда $\Delta\tau < \Delta t$, $\Delta\tau/\Delta t = f(\Delta t)$ образуется *пропорционально-мобильное* (ПМ) геохимическое состояние. В этом состоянии скорость накопления вторичного вещества в толще породы линейно связана с одним из переменных параметров (например, от Δt). Поэтому нарушая условие стабильности, система не нарушает пропорциональности и постоянный процесс преобразования породы происходит в соответствии с изменением переменного параметра.

Если $\Delta\tau > \Delta t$, то при любом условии преобразования породы вынос вещества из системы будет превышать степень преобразования, соответственно в исследуемой системе накопление вторичного вещества происходить не будет.

Как правило, наиболее интенсивная миграция флюидов идет по разломам и трещинам горных пород. Скорость фильтрации жидкости (u) прямо пропорциональна трещинноватости породы (k_{mp}) [2]:

$$u = v k_{mp}, \quad (3)$$

$$k_{mp} = n \delta \Gamma,$$

где v – средняя скорость течения флюида, n – форма (мерность) трещин ($n=1; 2; 3$), δ – раскрытость трещин [м], Γ – густота трещин [1/м]. Если среднюю скорость течения флюида представить через отношение расстояния миграции Δh к времени течения Δt от истока к месту преобразования породы (стоку), а скорость фильтрации выразить через градиент давления dp/dh и динамическую вязкость (μ) по формуле Буссинеска [2]:

$$u = k_{mp} \delta^2 / 12 \mu \cdot dp/dh,$$

то, подставив в формулу (3) зависимость Буссинеска при условии ($dh = \Delta h$ и $dp = \Delta p$) получим зависимость времени течения флюида от следующих переменных параметров:

$$\Delta t = const \cdot \Delta h^2 / (\delta^2 \Delta p), \quad (4)$$

где $const = 12\mu$, т.к. изменение динамической вязкости относительно изменения переменных параметров незначительно. Заметно, что изменение времени течения в большей степени обусловлено изменением расстояния миграции флюида и раскрытостью трещин.

В работе [6] для гетерогенной среды на основе закона Гульдберга-Вааге получено уравнение зависимости времени преобразования вещества ($\Delta \tau$) от поверхностной константы реакции (γ), показателя гетерогенной реакции (m) и разницы концентраций флюида до вступления в реакцию и после реакции ($C_0^m - C^m$):

$$\Delta \tau = \rho V / (\gamma S_n) \cdot (C_0^m - C^m) / m, \quad (5)$$

где ρ – плотность флюида, V – объем открытых пор, S_n – площадь поверхности открытых пор.

Таким образом, сопоставляя полученные уравнения (4) и (5) мы видим, что временные параметры Δt и $\Delta \tau$ характеризуются различными независимыми физическими величинами, следовательно, они независимы друг от друга. Если функции независимы, то они могут быть ортогональны.

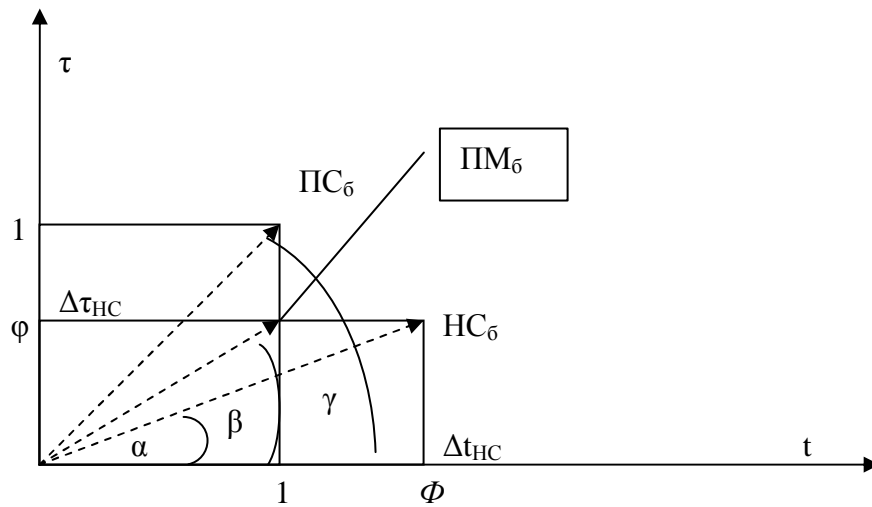


Рис. 2. Геохимические состояния в системе координат времени преобразования вещества (τ) и времени миграции флюида (t) в определенном интервале пласта.

Итак, рассмотрим ортогональную систему координат из двух переменных τ и t , где постоянную стабильности $const=1$ (рис. 2). Изобразим на ее плоскости единичный квадрат ($\Delta \tau_{ПС} = \Delta t_{ПС} = 1$) и четырехугольник, а в соответствии с условием стабильности, их площади между собой будут равны: $\Delta \tau \Delta t_{ПС} = \Delta \tau \Delta t_{НС} = 1$. Стороны двух фигур можно определить квадратным уравнением:

$$\Delta \tau^2_{ПС} = \Delta \tau^2_{НС} + \Delta \tau_{ПС} \Delta \tau_{НС}. \quad (6)$$

Разделив обе части уравнения (6) на $\Delta \tau_{ПС}$ и $\Delta \tau_{НС}$ получим пропорцию:

$$\Delta \tau_{ПС} / \Delta \tau_{НС} = (\Delta \tau_{НС} + \Delta \tau_{ПС}) / \Delta \tau_{ПС}. \quad (7)$$

Пусть отношение $\Delta\tau_{\text{ПС}} / \Delta\tau_{\text{НС}} = x$, тогда преобразуя (7) получим следующее уравнение:

$$x^2 - x - 1 = 0. \quad (8)$$

Единственным решением данного уравнения для положительного значения будет число «золотого сечения» [10]:

$$\Phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1.618\dots$$

Это число обладает уникальным свойством: $1/\Phi = (\Phi - 1) = \varphi$, а их произведение $\Phi\varphi = 1$. Поэтому, $\Delta\tau_{\text{НС}} = \varphi$, $\Delta t_{\text{НС}} = \Phi$ и $\Delta\tau_{\text{НС}}/\Delta t_{\text{НС}} = \varphi^2$.

Используя временную диаграмму (рис. 2) можно вычислить угловые координаты основных (базовых) геохимических состояний процесса наложенного эпигенеза:

$$\begin{aligned} \text{Cos } \alpha &= \Phi / \sqrt{\Phi^2 + \varphi^2} = 0.9342\dots (\text{НС}_\delta), \\ \text{Cos } \beta &= 1 / \sqrt{\varphi^2 + 1} = 0.8506\dots (\text{ПМ}_\delta), \\ \text{Cos } \gamma &= 1 / \sqrt{2} = 0.707\dots (\text{ПС}_\delta). \end{aligned} \quad (9)$$

Назовем систему полученных углов базовыми. Согласно данным определениям геохимических состояний каждый угол характеризует состояние процесса, а переход из одного состояния в другое будет отражать косинус разницы углов, т.е. поворот системы координат. В свою очередь, базовое пропорционально-стабильное состояние является начальным, при котором накопления вторичных минералов еще не происходят. Поэтому все изменения состояний определяются относительно ПС. В итоге получаем еще два угла, выражающих промежуточные состояния:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{ПМ}'} &= \text{Cos } (\gamma - \beta) = 0.973\dots (\text{ПМ}'), \\ \lambda_{\text{НС}'} &= \text{Cos } (\gamma - \alpha) = 0.912\dots (\text{НС}'). \end{aligned} \quad (10)$$

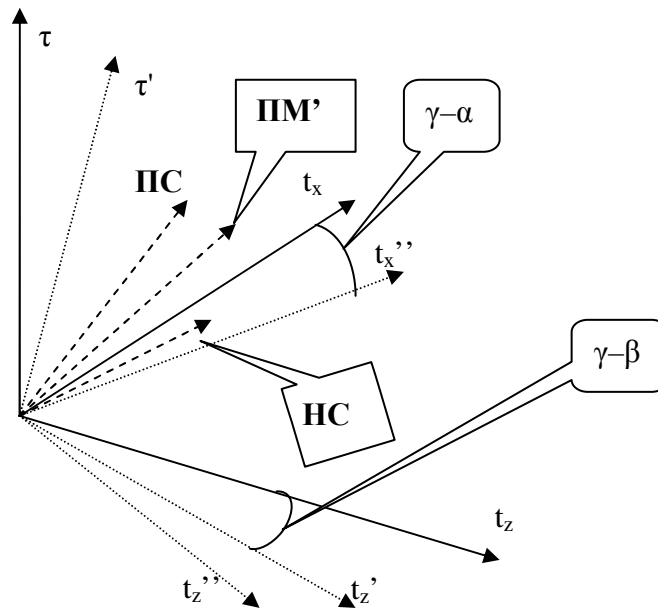


Рис. 3. Преобразования геохимических состояний в трехмерной системе временных координат, где τ – время преобразования вещества, t_x – латеральное время течения флюида, t_z – вертикальное время течения флюида.

В толще горной породы флюидные потоки в основном текут по разломам и ослабленным зонам вертикально вверх, вследствие разницы давления пластов залегания. Однако флюиды могут мигрировать и латерально, заполняя на своем пути пористо-трещиноватые коллекторы. Очевидно, что в уравнении (4) исток флюидов, при их (z) вертикальной миграции по разлому (системы вертикальных трещин), имеет свое глубинное начало, а при горизонтальном (x) течении – сам разлом или система вертикальных трещин является истоком, относительно которого проводится латеральное измерение, т.е. $\Delta h_z \neq \Delta h_x$, $\Delta p_z \neq \Delta p_x$. При латеральном заполнении коллектора в качестве проводников флюидов (кроме трещин) повышает свою значимость открытая пористость, т.е. $\delta_x \rightarrow V_x$ (размер пор). Если физические (либо кинематические) латеральные и вертикальные значения временных параметров независимы, то и параметры Δt_z и Δt_x также независимы друг от друга. Поэтому в систему временных

координат необходимо ввести еще одну ортогональную ось, t_x – латеральное время течения флюида, что приводит к трехмерной временной диаграмме (рис. 3).

Рассмотрим множество концентраций вторичных минералов распределенных как по площади, так и по глубине залегающих пластов. На рис. 3 плоскость tt_z отражает процесс преобразования при вертикальной миграции, а tt_x – процесс преобразования при горизонтальном (латеральном) течении флюида. При понижении раскрытости трещин (либо повышении расстояния до разлома) время течения увеличивается и $\Delta t < \Delta t$, что позволяет перевести состояние ПС в промежуточное состояние ПМ' относительно одной из плоскостей tt , латеральной, либо вертикальной, в зависимости от изучаемой статистической выборки значений интенсивности процесса. Вне зависимости от того, какой из переменных параметров меняется (т.е. является причиной перехода в иное состояние) всегда промежуточным состоянием рассматриваемой системы будет ПМ'. Это происходит потому, что при изменении стабильности, пропорциональность еще не нарушается. На рис. 3 показано изменение времени миграции по глубине, при этом по латерали время течения не меняется. Затем поворот плоскости $t_x t_z$ в конечную фазу ПМ или НС увеличивает интенсивность рассматриваемого процесса еще на величины углов (10). В итоге получаем следующие угловые координаты:

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{ПМ}} &= \text{Cos}(\gamma - \beta) \text{Cos}(\gamma - \beta) = 0.947\dots, \\ \lambda_{\text{НС}} &= \text{Cos}(\gamma - \beta) \text{Cos}(\gamma - \alpha) = 0.887\dots\end{aligned}\quad (11)$$

При определении интенсивности в границах $[j; 1]$ важно определить нижнее граничное значение j интенсивности начального базового состояния ПС. Очевидно, что его величина должна быть связана с «золотым сечением» Φ . Пусть верхнее граничное значение модуля амплитуды интенсивности состояния ПС соответствует

$\Phi_{zx} = \sqrt{3(\sqrt{2\Phi^2})^2} = 3.963\dots$, а нижнее – $\varphi_{zx} = \sqrt{3(\sqrt{2\varphi^2})^2} = 1.5137\dots$, тогда величина $j = \varphi_{zx}/\Phi_{zx} = \varphi^2 = 0.3819\dots$

Каждое квазидискретное состояние, прежде всего, будет характеризоваться σ – шириной распределения (стандартным отклонением). При нормальном распределении квазидискретного состояния ($\sigma \approx 4-6\%$ от μ) математическое ожидание начального состояния ПС будет равно:

$$\mu_{ПС} = j + \sigma/2. \quad (12)$$

В этом случае согласно (11) остальные два состояния геохимического процесса наложенного эпигенеза соответствуют следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} \mu_{ПМ} &= \mu_{ПС} / \lambda_{ПМ} \\ \mu_{НС} &= \mu_{ПС} / \lambda_{НС}. \end{aligned} \quad (13)$$

В итоге получили статистический комплекс математических ожиданий распределения интенсивности вторичного процесса трех состояний (12, 13), связанных в единое целое, обусловленное трещиноватостью, т.е. формой и геометрией трещин.

Если мы изучаем генеральную выборку усредненных значений интенсивности вторичных процессов всех исследуемых интервалов по скважине, то выборка из средних значений интенсивностей представляет собой площадное (латеральное) распределение. Латеральное распределение интенсивности процессов, при постоянной трещиноватости породы, обусловлено квазидискретностью данного распределения вследствие условия стабильности. Например, в результате появления тектонических нарушений в толще породы пропорциональность вторичного процесса нарушается, по причине поступления флюидов меняющих окислительно-восстановительные условия среды. Интенсивность преобразования песчаников в латеральном распределении зависит от расстояния до разлома, а также разницы окислительно-восстановительного потенциала флюида и заполняющей среды соответственно, при уменьшении времени

миграции время преобразования увеличивается. Поэтому базовые состояния процессов могут меняться на некую константу Ψ в зависимости от непропорционально-стабильного состояния вследствие нарушения пропорциональности и сохранения стабильности.

В случае изучения выборки значений интенсивности метаморфизма песчаных интервалов по разрезу скважины (например, N интервалов в скважине, при $N \gg 1$) в n скважинах, мы получим вертикальное распределение интенсивности с вероятностью влияния латеральной компоненты равной $P_x \approx 1/N$. При больших значениях N значимость интенсивности преобразования в результате миграции вертикальной компоненты ($P_z \approx 1 - 1/N$) несопоставимо выше латеральной, поэтому базовые состояния будут меняться по закону вертикального преобразования.

Если тектонические нарушения простираются в толще породы вертикально, то трещиноватость и расстояние от разлома до скважины по глубине не меняются и, следовательно, меняется только время метаморфизма породы, приводящее к изменению интенсивности преобразования, т.е. условие стабильности нарушается. В итоге получаем новую базовую систему координат в зависимости от ПМ состояния.

Начальное пропорциональное состояние i преобразуется в последующее пропорциональное состояние по закону:

$$\mu_{\text{ПС}}^{i+1} = \mu_{\text{ПС}}^i / \Psi. \quad (14)$$

Величина постоянной преобразования базовых состояний Ψ будет различна для латеральной и вертикальной миграции. В системе координат начальное пропорциональное состояние ПС преобразуется в промежуточное состояние ПС' (на латеральную, либо вертикальную плоскость τt) с последующим поворотом плоскости на косинус угла НС_δ или ПМ_δ . В итоге получаем два уравнения констант базовых преобразований системы координат:

$$\Psi_x = \cos \gamma / \cos \alpha = 0.757 \dots,$$

$$\Psi_z = \cos \gamma / \cos \beta = 0.831 \dots \quad (15)$$

Таким образом, в пределах нормированной интенсивности $[j, 1]$ при исследовании латеральной выборки значений интенсивности мы получаем 4.7 комплекса математических ожиданий, а в случае вертикальной выборки – 7.3 комплекса. Очевидно, что при логнормальном распределении квазидискретных состояний, прежде всего, проявятся первые 2-4 комплекса. Остальные комплексы можно обнаружить только при очень большой выборке статистических данных.

Важно отметить, что для различных групп минералов комплекс математических ожиданий будет состоять из различного количества квазидискретных состояний (с проявленными промежуточными состояниями и без них). Это связано с неодинаковыми условиями седиментационно-диагенетического образования данных минералов и их отличием в свойствах метаморфизма.

В качестве примера образования комплексов латерального распределения можно привести результаты исследований проведенных по материалам 53 скважин с усредненными данными интенсивности (интервального параметра) вторичных образований пирита в 122 песчаных интервалах в зависимости от трещиноватости [6]. Получены 4 комплекса выборочных значений интенсивности с последующим отношением между собой: $0.026/0.035 \approx 0.035/0.046 \approx 0.046/0.062 \approx 0.75$. Что соответствует константе базовых преобразований при латеральной миграции флюидов.

Эмпирические подтверждения кинематической теории

Рассмотрим распределение каолинитов в процессе вторичной каолинизации. Содержания минералов, по результатам петрографических исследований шлифов керна 225 образцов песчаных интервалов пласта Ю₁ 14 скважин Столбовой площади

Каймысовского свода Томской области, любезно предоставлены лабораторией литологии нефтегазовых отложений ФГУП «СНИИГГиМС». По ним был проведен статистический анализ и построена гистограмма распределения каолинита. Причем, в начале выборочные значения содержаний каолинитов были приведены в соответствие с граничными условиями [j; 1] на основании уравнения (21), обоснования которого показаны в последующем изложении.

На Столбовом месторождении проведены сейсморазведочные работы МОГТ-3Д и МОГТ- 2Д. Анализ сейсмо-геофизических работ показал, что в основании Столбовой структуры по отражающему горизонту Φ_2 (кровля доюрских образований) картируется локальный выступ фундамента, преимущественно, субширотного простирания. Склоны Столбового выступа по отражающему горизонту Φ_2 осложнены тектоническими нарушениями северо-западного простирания [1].

К тому же часто встречающиеся разломы, секущие отражающий горизонт баженовской свиты, являются причиной миграции флюидов в верхние (меловые) горизонты, что соответственно отражается на величине интенсивности вторичных процессов и в верхних юрских пластах.

В фациальном отношении продуктивный пласт $Ю_1$ представляет собой полимиктовые песчаные отложения прибрежно-морской и континентальной зон оксфорд-валанжинской трансгрессии. Пластовые воды характеризуются слабо-кислым раствором с pH от 5.7 до 7.5 и минерализацией порядка 37 г/л. Газовый анализ воды показал отсутствие в ней сероводорода, а также присутствие углекислого газа (~1%) и легких углеводородов.

Покажем возможность сопоставления содержания эпигенетически образованного вещества с интенсивностью вторичного процесса. Для этого, на

основании введенного определения интенсивности процесса наложенного эпигенеза (2) осуществим следующие аналитические преобразования данной формулы.

Определим ΔQ как разницу количества вещества после прохождения процесса наложенного эпигенеза, т.е. от момента начала преобразования (Q_0) и до момента измерения (Q'). В свою очередь, в породе могут идти химические реакции с уменьшением количества данного материала. Поэтому, общее количество изучаемого вещества (измеряемое) после вторичного преобразования вычисляется как:

$$Q' = Q_0 - Q'' + Q''', \quad (16)$$

где Q'' – часть изучаемого вещества Q_0 преобразованного в другой материал, Q''' – исследуемое вещество, образованное вследствие процесса наложенного эпигенеза (например, содержание каолинита после пелитизации полевых шпатов с дальнейшей каолинизацией). Используя полученное равенство (16) мы можем записать следующее выражение $\Delta Q = Q''' - Q''$, где оба переменных параметра нам не известны. В таком случае допуская, что почти все изменения исследуемого вещества могут быть обусловлены только процессом наложенного эпигенеза (т.е. $Q_0 \rightarrow const$), следовательно $(Q''' - Q'') \neq (Q' - const)$, то для сохранения равенства следует ввести переменный множитель $\Delta Q(g) = [Q_1(g) - Q_2(g)] / Q_2(g)$, отвечающий за характер и степень преобразования, где g – показатель преобразования вещества, т.е.:

$$\Delta Q \approx (Q' - Q_0) \Delta Q(g). \quad (17)$$

В полученном выражении (17) показателем преобразования может служить некая функция, характеризующая такой процесс, в результате которого происходит изменение содержания исследуемого вещества, оказывающего непосредственное влияние на определяемый параметр $Q_1(g)$ относительно постоянного параметра $Q_2(g)$. Например, нам хорошо известно что при вторичной каолинизации увеличивается пористость (k_n) песчаника [11] (в отличие от остального глинистого цемента) и в этом

случае мы можем провести знак тождества $Q_I(g) = k_n = wQ^g$, где Q – содержание глинистого цемента, g – показатель зависящий от потенциала химической реакции, приводящий к образованию каолиновой глинистой компоненты, w – коэффициент пропорциональности. С увеличением содержания глинистого цемента параметр $Q_I(g)$ (соответственно k_n) увеличивается. Здесь положительное значение ΔQ будет отражать процесс разуплотнения породы.

Пусть $A = \Delta\tau / (\Delta t S)$ и $F = \Delta Q(g)$, тогда уравнение (2) перепишем как:

$$AFQ' = I + AFQ_0. \quad (18)$$

Рассмотрим второй член правой части данного уравнения. Произведение AFQ_0 будет представлять собой начальную интенсивность образования. В свою очередь, если вторичное вещество образовывалось только с момента начала наложенного эпигенеза, то с увеличением параметра A обратно пропорционально уменьшается величина F . Происходит некая компенсация изменений этих величин. Данное замечание можно обосновать следующим образом, параметр F характеризует изменение измеряемой физической величины $dQ_I(g)$ (например, пористость при каолинизации), где в результате химических преобразований породы измеряемая величина отражает изменение значимости преобразования, т.е. $1/dg \sim dA$ – изменение A параметра наложенного эпигенеза. И, в этом случае, при $Q_0 = const$ второй член можно нормировать на единицу, т.е. $AFQ_0 = 1$ [д.ед.·м]. В результате получаем относительный параметр количества образованного вещества:

$$G = Q' / Q_0 = I + 1. \quad (19)$$

Естественно, данный параметр меняется по глубине на некую величину dG , поэтому определим среднее значение изменения этого параметра относительно количества вещества Q' в исследуемом интервале. Для этого используя равенство (19) возьмем интеграл:

$$\langle G \rangle = \int \frac{dG}{Q} = s \ln(I + 1) \pm C, \quad (20)$$

где $s=1/Q_0=AF$. В итоге обретаем зависимость среднего количества эпигенетически образованного вещества по исследуемому интервалу от натурального логарифма средней интенсивности процесса наложенного эпигенеза. Очевидно, что величины констант s и C связаны с определенным эпигенетическим процессом, т.е. по величине, для каждого вторично образованного минерала, они будут отличаться. Это обусловлено различием константы химических реакций. Сопоставления содержаний вторичных минералов вычисленных по формуле (20) на базе материалов ГИС с содержанием данных минералов определенных лабораторным способом выявили их высокое корреляционное соответствие, с $R > 0.9$ [8].

Итак, полученную зависимость (20) преобразуем в следующее уравнение:

$$I_i = \exp((\langle G_i \rangle + C) / s) - 1, \quad (21)$$

где $\langle G_i \rangle = Q_i / \langle Q \rangle$ – относительное содержание каолинита, являющее инвариантом.

В случае приведения исследуемой выборки $[I_{min}; I_{max}]$ в соответствие граничным значениям $[0.37; 1]$ (т.е. при I_i / I_{max} а также, при использовании инварианта $\langle G_i \rangle = Q_i / \langle Q \rangle$) мы получим следующие коэффициенты, не зависящие от конкретных минералов, т.е. $C=3.5, s=12.2$.

Для более детального анализа генеральную выборку из 225 значений интенсивности каолинита разбили на две части: $[0.38-0.45]$ и $[0.45-0.62]$. Получили две выборки, по 153 и 51 значениям причем, для построения распределения использовали статистический инструмент анализа данных в *Microsoft Excel*. Двадцать одно значение не вошло в исследуемые выборки потому, что их величины распределились вплоть до единицы с незначительной плотностью вероятности, т.е. их статистика достаточно мала для изучения. Далее объединив две построенные гистограммы этих распределений в

одну гистограмму, были выявлены два комплекса квазидискретных состояний (рис 4). Математические ожидания данных состояний отмечены следующими величинами: $\mu_{\text{ПС}}=0.38$, $\mu_{\text{ПМ}}=0.40$, $\mu_{\text{НС}}=0.43$, $\mu_{\text{ПС2}}=0.51$, $\mu_{\text{ПМ2}}=0.54$, $\mu_{\text{НС2}}=0.58$. Отношения между ними соответствуют определенным в (11 и 15) угловым координатам, т.е. $\mu_{\text{ПС}}/\mu_{\text{ПС2}}\approx 0.75$, $\mu_{\text{ПС}}/\mu_{\text{ПМ}}\approx 0.95$, $\mu_{\text{ПС}}/\mu_{\text{НС}}\approx 0.88$, $\mu_{\text{ПС2}}/\mu_{\text{ПМ2}}\approx 0.95$, $\mu_{\text{ПС2}}/\mu_{\text{НС2}}\approx 0.88$.

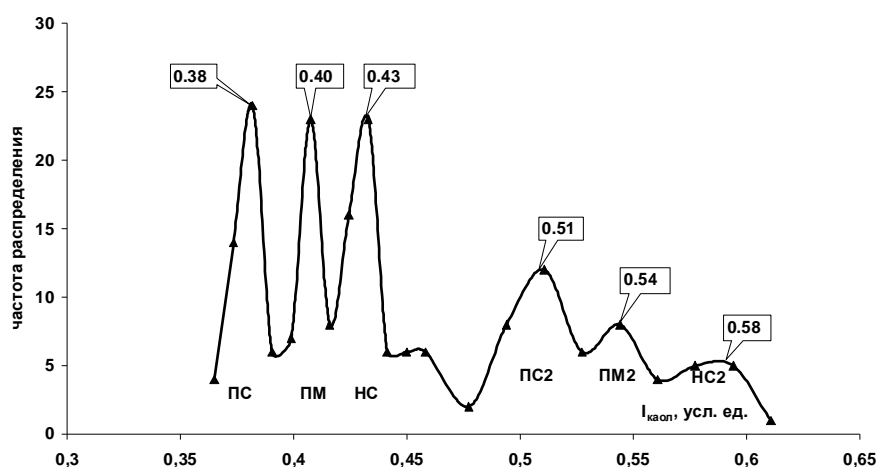


Рис. 4. Распределение латеральной интенсивности каолинизации в граничных значениях $[j, 1]$, определенной на основе результатов петрографических исследований шлифов зерна пласта Ю₁ Столбовой площади.

В итоге, мы получили эмпирическое подтверждение соответствия величин угловых координат, вычисленных теоретическим образом. Причем, площадное (латеральное) распределение содержаний минералов в пласте верхнего юрского горизонта по 14 скважинам предполагает совпадение отношения математических ожиданий $\mu_{\text{ПС}}/\mu_{\text{ПС2}}$ определенной константе базовых преобразований системы координат равной 0.757... .

В этом случае уместно будет показать вертикальное распределение интенсивности каолинизации, ее соответствие рассматриваемой теории. Для этого можно использовать вычисление среднего содержания каолинита, по каждому

песчаному интервалу в разрезе скважины, на основании материалов геофизических исследований скважин (ГИС). Причем, определив по нейтрон-нейтронному каротажу водородосодержание (общую пористость), а по гамма-каротажу – глинистость, можно использовать «поточечно» вычисленные данные пористости и глинистости для построения корреляционных связей в статистическом анализе [7].

Важнейшим показателем взаимосвязи двух дискретных выборок (X, Z) являются коэффициенты корреляции R и аппроксимации R^2 определяющих следующим образом [3]:

$$R = \left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z}) \right) / (n\sigma_x\sigma_z), \quad (22)$$

где σ – стандартное (среднеквадратичное) отклонение выборочных значений. Коэффициент аппроксимации отражает долю дискретных значений от общего их количества n , соответствующую определенной функциональной зависимости (например, $f=Z(X)$), т.е. «тесноту» их связи.

Очевидно, если две независимых статистических выборки находятся в корреляционной зависимости, то можно утверждать, что существует некий фактор (вещество, физико-химический процесс) синхронно влияющий на изменение величин этих выборочных значений. В таком случае величина коэффициента корреляции будет выражать степень воздействия данного фактора на обе выборки.

Далее, для определения доли интервала пласта, где вторичный процесс преобразует вещество, вычисляем необходимый параметр (путем скользящей линии точек вдоль оси скважины с неким шагом) по следующей зависимости:

$$Y = q/n = \left(\sum_{i=1}^n q_i \right) / n, \quad (23)$$

где q – количество выборочных значений, при условии определения каолинизации должно выполняться условие между пористостью и глинистостью $R_i > +$

0.6; n – генеральная выборка (количество точек пласта). Статистический параметр Y выражает интервальную меру влияния вторичных процессов в песчаниках исследуемых пластов, т.е. показывает долю преобразованного вещества исследуемого интервала. Назовем его *интервальный параметр*.

Исследования показали, что содержания каолинитов, определенных на основании петрографического исследования шлифов, прямо пропорционально вычисляемому параметру YR^2 двух дискретных выборок, с положительной зависимостью глинистости и пористости [7, 8]. Поэтому, определив $\langle G_i \rangle = YR_i^2 / \langle YR^2 \rangle$ и применив зависимость (21) можно вычислить среднюю интенсивность каолинизации (в граничных значениях) в песчаных интервалах по глубине.

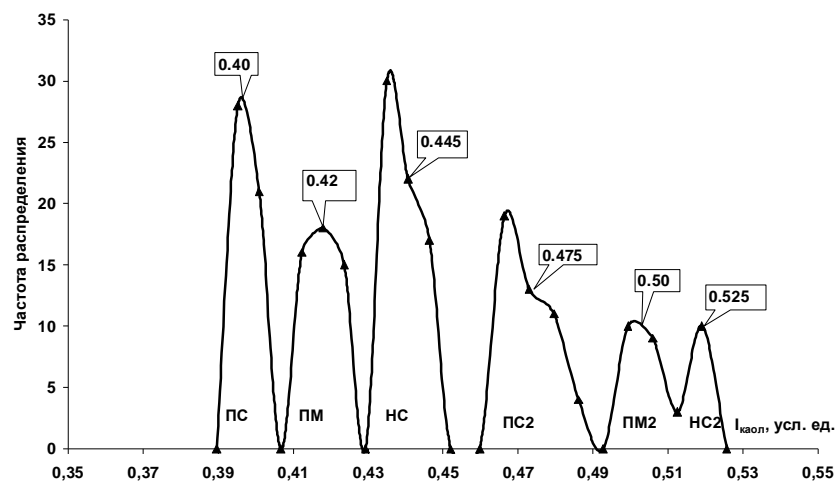


Рис. 5. Распределение вертикальной интенсивности каолинизации в граничных значениях $[j, 1]$, определенной на основе результатов статистической интерпретации материалов ГИС (370 интервалов в 10 скважинах) различных участков Томской области.

Проведенный статистический анализ данных пористости и глинистости в песчаных интервалах, вычисленных по материалам ГИС в 10 скважинах различных участков Томской области (370 интервалов меловых отложений, что соответствует $P_z = 1 - 1/37 \approx 0.973$), позволил исследовать вертикальное распределение интенсивности

каолинизации. Оказалось, что математические ожидания и их отношения полностью соответствуют ранее проведенным исследованиям (рис. 5). Единственное отличие – в величине отношения: $\mu_{ПС} / \mu_{ПС2} \approx 0.83$. Как и следовало ожидать, величина отношения математических ожиданий равновесных состояний полностью отражает закон преобразования базовой системы временных координат для вертикальной компоненты (15).

Сопоставление математических ожиданий шести квазидискретных состояний каолинита со средним содержанием пирита в этих же интервалах (для пяти значений) показало прямо пропорциональную линейную регрессию с коэффициентом корреляции $R=0.99$ (парагенезис с каолинитом). Очевидно, что образование пиритов обусловлено слабокислой средой и сероводородным газом, растворенным в воде, где в результате взаимодействия гидроксида железа с сероводородом накопление пирита носит стадийный характер [4]. Одно значение (а именно состояние ПМ2) выпало из общей регрессии, величина содержания пирита оказалась меньше чем при состоянии ПС. Содержание пирита определялось согласно эмпирической зависимости [7]:

$$C_{пир} = 0.0041 Y_{Fe}^2 - 0.1338 Y_{Fe} + 0.9194,$$

где интервальный параметр Y_{Fe} вычислялся на основании отрицательной корреляционной регрессии удельного электрического сопротивления породы и относительного содержания железа, определенных на основе материалов ГИС. Вычислив $\langle G_i \rangle = Y_{Fe(i)} / \langle Y_{Fe} \rangle$ и подставив в зависимость (21) была определена выборка интенсивности пиритизации в граничных значениях за исключением выборочных значений состояния ПМ2. Распределение этой выборки показало пять состояний: $\mu_{ПС}=0.40$, $\mu_{ПМ}=0.42$, $\mu_{НС}=0.45$, $\mu_{ПС2}=0.477$, $\mu_{НС2}=0.52$. Отношения между ними соответствуют определенным в (10, 11 и 15) угловым координатам, т.е. $\mu_{ПС} / \mu_{ПС2} \approx 0.83$, $\mu_{ПС} / \mu_{ПМ} \approx 0.95$, $\mu_{ПС} / \mu_{НС} \approx 0.88$, $\mu_{ПС2} / \mu_{НС2} \approx 0.91$.

На основании проведенных исследований можно увидеть, что в пиритизации отсутствует состояние ПМ2. По всей видимости, это связано с повышением в растворе воды долевого содержания углекислого газа относительно сероводорода, что влечет за собой нарушение гармоничного отношения $\Delta\tau/\Delta t$ для пирита, а его содержание резко уменьшается. Повышение содержания пирита относительно ПС2 состояния может произойти в случае увеличения времени течения флюида с соответствующим уменьшением времени преобразования, т.е. увеличения содержания в воде сероводорода. Это все происходит на фоне увеличивающегося содержания углекислого газа (т.к. количество каолинитов увеличивается). Поэтому состояние пирита ПС2 переходит в промежуточное геохимическое состояние НС2' (не нарушая условия стабильности). Другими словами, при большой кислотности раствора пириты растворяются более интенсивно, чем образуются (конечно, при нарушении равновесного состояния и стабильности).

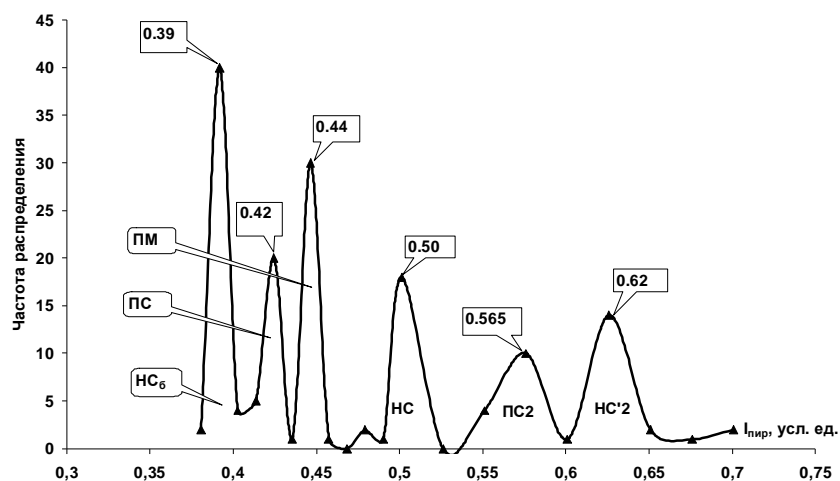


Рис. 6. Распределение латеральной интенсивности пиритизации в граничных значениях $[j, 1]$, определенной на основе результатов петрографических исследований шлифов керн пласта Ю₁ Столбовой площади.

Для подтверждения причины «выпадения» состояния ПМ2 из общей регрессии был проведен статистический анализ распределения пирита по материалам петрографического исследования шлифов керна Столбовой площади. Генеральная выборка состояла из показаний содержания пирита по 218 образцам керна. После применения уравнения (21) и разбивки полученной выборки согласно граничным значениям [0.38-0.45] и [0.45-0.7], была построена гистограмма распределения интенсивности пиритизации по 165 значениям (рис. 6). Получено полное подтверждение результатов статистического анализа по материалам ГИС. Распределение этой выборки показало шесть состояний: $\mu_{\text{НС6}}=0.39$, $\mu_{\text{ПС}}=0.42$, $\mu_{\text{ПМ}}=0.44$, $\mu_{\text{НС}}=0.50$, $\mu_{\text{ПС2}}=0.565$, $\mu_{\text{НС}^2}=0.62$. Отношения между ними соответствуют определенным в (10, 11 и 15) угловым координатам, т.е. $\mu_{\text{ПС}}/\mu_{\text{ПС2}}\approx 0.75$, $\mu_{\text{ПС}}/\mu_{\text{ПМ}}\approx 0.95$, $\mu_{\text{ПС}}/\mu_{\text{НС}}\approx 0.88$, $\mu_{\text{ПС2}}/\mu_{\text{НС}^2}\approx 0.91$, а при пониженном содержании – $\mu_{\text{НС6}}/\mu_{\text{ПС}}\approx 0.93$. Образовались два комплекса, причем один из них неполный. В свою очередь, возможно первое базовое состояние ($\mu_{\text{НС6}}$) образовалось вследствие седиментационно-диагенетических процессов накопления.

Но все же, в сравнении с выборкой пирита составленной по материалам ГИС существует принципиальное различие – отрицательная корреляция пирита с содержанием каолинита, с коэффициентом $R = - 0.88$. Очевидно, что основное содержание пиритов образовалось в восстановительных условиях (возможно также и на стадии диагенеза), но в дальнейшем, при появлении тектонических нарушений осадочного чехла с миграционными потоками углекислотных флюидов в процессе метасоматоза часть пиритов растворяется и выносится за пределы пласта Ю₁. В случае повышения щелочности среды определенная доля пирита вновь отлагается в породе. Наложенный процесс определяет квазидискретный характер распределения концентраций аутигенных сульфидных минералов.

Выводы

Таким образом, теоретические и эмпирические исследования по характеру распределения содержаний вторичных минералов, обусловленных процессами наложенного эпигенеза, позволили выявить кинематические закономерности и причины их квазидискретного распределения. На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– Интенсивности вторичных процессов определяются отношением времени преобразования вещества к времени миграции флюида в интервале пласта, в котором происходят геохимические преобразования.

– Отношение временных параметров определяет пропорциональное, либо стабильное геохимические состояния при которых происходят накопления вторичных минералов.

– Пропорциональное и стабильное геохимические состояния, прежде всего, обусловлены кинематическими закономерностями гармонического характера, связанными с иррациональным числом «золотого сечения» $\Phi = 1.618\dots$

– Вертикальные и горизонтальные (латеральные) компоненты миграционных вторичных процессов задают величину углов, определяющих поворот координатных плоскостей в системе временных координат, являющихся количественной мерой интенсивности процесса и образования комплексов квазидискретных состояний.

– Дискретность распределения интенсивностей вторичных геохимических процессов (соответственно и концентрации вещества) в горной породе связана с пропорциональным и метастабильным геохимическими состояниями, в которых происходят метасоматические преобразования пород.

Итак, анализ полученных геолого-геохимических результатов позволил сформулировать общую концепцию наложенного преобразования (пока еще гипотетическую). Вполне возможно, что при *любом* процессе (физическом, химическом, биологическом, геологическом, экономическом, социальном и т.д.), где его интенсивность определяется как отношение времени преобразования к времени течения хотя бы одной преобразующейся среды, будет проявляться дискретность интенсивности этого процесса.

Литература

1. Волков В. И., Суханова О. Н., Беряльцева Т. К. и др. Структурно-литологический анализ строения горизонта Ю₁ ачимовских отложений, корреляция формирующих пластов на северо-восточном склоне Каймысовского свода на примере Столбового поднятия (с уточнением балансовых запасов)/Томск, Отчет ОАО «Томскнефтегазгеология» ВНК, 1998, том 1, 226 с.
2. Голф-Рахт Т. Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов. М., Недра, 1986, 608 с.
3. Дэвис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии. Кн. 1. М., Недра, 1990, 319 с.
4. Козеренко С.В., Храмов Д.А., Фадеев В.В. и др. Исследование механизма образования пирита в водных растворах при низких температурах и давлениях // Геохимия, 1995, № 9, с. 1553-1565.
5. Лебедев Б. А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах, Л., Недра, 1992, 239 с.
6. Мельник И. А. Определение интенсивности вторичных геохимических процессов на основе статистической интерпретации материалов ГИС//Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2012, №11, с. 35–40.
7. Мельник И. А. Выявление вторично преобразованных терригенных коллекторов на основе статистической интерпретации материалов ГИС//Геофизика, 2013, №4, с. 38–44.
8. Мельник И. А. Вычисление интенсивности вторичных геохимических процессов в песчаных пластах по материалам геофизических исследований скважин//Каротажник. – 2014. – №1. – С. 52–66.
9. Недоливко Н.М., Ежова А.В., Перевертайло Т.Г., Полумогина Е.Д. Роль дизъюнктивной тектоники в фоПМировании пустотного пространства в коллекторах пласта Ю₁³ Западно-Моисеевского участка Двуреченского нефтяного месторождения (Томская область)// Известия ТПУ, 2005, том 308, №5, с. 47 – 53.
10. Стахов А.П. Как Евклид использовал «золотое сечение» в своих «Началах»? // «Академия Тринитаризма», М., Эл № 77-6567, публ.18141, 17.08.2013, <http://www.trinitas.ru/rus/doc/0232/009a/02321276.htm>
11. Шалдыбин М. В. Геохимические критерии оценки влияния процессов наложенного эпигенеза на фильтрационно-емкостные свойства обломочных пород-коллекторов (на примере нефтяных месторождений Томской области)// Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук/ Томск.– ТПУ.– 2005. – 179 с.