



УДК 53.081; 550.83+ 552.5 +553.98

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОТКРЫТЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

И. А. Мельник

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Дается теоретическое обоснование параметра статистической интенсивности процессов преобразования открытых систем, состоящих из элементов; приводится иллюстрация эмпирического подтверждения валидности этого параметра. При воздействии внешнего динамического потока на элементы открытой системы данные элементы трансформируются. Корреляция между независимыми характеристиками преобразованных элементов может быть обусловлена доминирующим процессом воздействия на систему. Произведение коэффициента аппроксимации и статистического интервального параметра двух выборок измеряемых характеристик соответствует статистической интенсивности преобразования открытой системы. Исследуется процесс вторичной каолинитизации, интенсивность которого определяется по положительным корреляционным связям геофизических (петрофизических) показаний общей пористости и глинистости песчаных пород на разных нефтегазовых месторождениях. Положительная регрессия между выборками петрофизических параметров пористости и глинистости интерпретируется как вторичная каолинитизация песчаной породы, а произведение коэффициента аппроксимации и доли исследуемого интервала данной положительной корреляции выборочных значений определяется как статистическая интенсивность процесса вторичной каолинитизации. Валидность используемого метода подтверждается при сопоставлении вычисляемой интенсивности вторичной каолинитизации изучаемого интервала с петрографическим исследованием шлифов керна.

Ключевые слова: открытая система, преобразование геологических систем, геофизические параметры, корреляция регистрируемых параметров, статистическая интенсивность процесса.

STATISTICAL INTENSITY OF TRANSFORMATION PROCESSES OF OPEN GEOLOGICAL SYSTEMS BASED ON GEOPHYSICAL DATA

I. A. Melnik

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

The article provides a theoretical justification for the parameter of statistical intensity of transformation processes of open systems consisting of elements and the illustration of empirical confirmation of this parameter validity. Under the influence of external dynamic flow on the elements of open system, the process of their transformation takes place. The correlation between independent characteristics of these elements may be due to the dominant process of influencing the system. The product of approximation coefficient and statistical interval parameter of two samples of measured characteristics corresponds to the statistical intensity of the open system transformation process. The process of secondary kaolinitization is investigated, its intensity is determined by positive correlation relationships of geophysical (petrophysical) indications of the total porosity and clay content of sand rocks at various oil-and-gas fields. The positive regression between samples of petrophysical parameters of porosity and clayiness is interpreted as a secondary kaolinitization of sandy rock, and the product of approximation coefficient with a part of the studied interval of this positive correlation of sample values is defined as the statistical intensity of the secondary kaolinitization process. The validity of the method used is confirmed by comparing the calculated intensity of secondary kaolinitization of the studied interval with the petrographic study of core sections.

Keywords: open system, transformation of geological systems, geophysical parameters, correlation of response parameters, statistical intensity of process.

DOI 10.20403/2078-0575-2022-4-22-27

Состояние любой открытой системы (механической, физической, химической, геологической, биологической и т. д.) может быть изменено в результате воздействия внешних факторов. Сама система представляет собой совокупность различных элементов, определенным образом связанных между собой, а внешнее воздействие формируется динамическим потоком, проникающим в систему и трансформирующим ее элементы. Преобразование элементов системы при воздействии внешних факторов происходит при условии введения в не-

равновесное состояние преобразующих элементов с присутствием каналов входа внешнего «воздействия» и выхода из системы.

Процесс преобразования систем характеризуется интенсивностью трансформации, под которой обычно понимают результат процесса, отнесенный к единице времени и единице его рабочего объема, либо площади, либо отрезка [5]. При физико-химических процессах интенсивность преобразования элементов открытых систем определяется произведением скорости реакции на порцию энергии

базисной реакции [1]. В представленных формулировках интенсивности процессов преобразования регистрируемых величин определяются относительно единицы времени. Однако в естественных средах встречаются такие системы, в которых время образования измеряемых параметров определить в принципе невозможно. В этом случае результаты измерения интенсивности процессов трансформации систем необходимо выразить другим способом, видимо, в условных единицах.

Как правило, на основании многократно измеренных параметров формируется распределенная по времени либо по пространству статистическая выборка, отражающая трансформацию исследуемой системы. Процесс преобразования от одного внешнего источника может касаться всех ее элементов или различных частей, выражающихся в регистрируемых характеристиках. Измерение различных параметров (характеристик) различных элементов позволяет получать от двух и более выборок, описывающих преобразование системы, которые могут коррелировать между собой. Степень изменения величины регистрируемого параметра далеко не всегда обусловлена интенсивностью процесса преобразования, а может зависеть от качества внутреннего взаимодействия элементов системы и распределения ее структуры. Но степень корреляции между выборками различных параметров, связанных с процессом преобразования, может быть обусловлена интенсивностью трансформации системы [3, 6].

Целью данной статьи является теоретическое обоснование и иллюстрация эмпирических подтверждений следующей концепции: интенсивность процесса преобразования открытой геологической системы в результате внешнего воздействия определяется качественными и количественными статистическими данными корреляционной связи двух выборок геофизических измеряемых параметров трансформирующихся элементов. Причем процесс, преобразующий систему, может, по сути, нести в себе качество, отличное от регистрируемых характеристик. Например, регистрируются физические параметры, а преобразующий процесс химический или биологический.

Теоретическое обоснование вычисления статистической интенсивности

Рассмотрим сложную открытую систему, состоящую из элементов, взаимодействующих между собой и трансформирующихся в результате влияния внешнего потока. Параметры элементов системы делятся на регистрируемые (A ; B) и на γ -отклик регистрируемых параметров, не связанный с влиянием исследуемых геохимических процессов. Регистрируемые параметры могут относиться к одним и тем же преобразованным элементам, а могут быть результатом единого процесса преобразования различных элементов. Значения данных дискретных параметров будут представлять собой ко-

личественную характеристику. Основным условием корреляции регистрируемых параметров является доминирование исследуемого процесса, влияющего на данные параметры, над другими параллельными процессами.

Измеряемые дискретные характеристики A и B , зависящие от количества преобразованных элементов, будут взаимозависимо проявляться с различными вероятностями: $P(A)$ и $P(B)$. Причем вероятность реализации события B может быть и условной: $P(B|A)$. Вероятность реализации двух событий (двухмерная) вычисляется через произведение [6]

$$P(A; B) = P(A)P(B). \quad (1)$$

Вероятности измеряемых параметров при $\alpha = A + \gamma_A$, $\beta = B + \gamma_B$ определяются как

$$P(A) = \frac{A}{\alpha}; P(B) = \frac{B}{\beta}. \quad (2)$$

Введем постулат интенсивности: статистическая интенсивность процессов преобразования элементов открытой системы эквивалентна двухмерной вероятности регистрируемых характеристик данных элементов [4]:

$$i(A; B) \sim P(A; B). \quad (3)$$

Определение статистической интенсивности (двухмерной) предполагает наличие двух выборок массива данных измеряемых характеристик (A) и (B). Интенсивность доминирующего процесса преобразования вещества приводит к ковариационному изменению величин измеряемых параметров (dA) и (dB). Значение интенсивности процесса по всему исследуемому массиву данных усредняется. В таком случае двухмерная статистическая интенсивность данных Q выборочных параметров ($Q > 30$) в соответствии с зависимостями (2) и (3), будет представлять собой следующую эквивалентную ковариацию:

$$i(A; B) \sim \left\langle \frac{dAdB}{d\alpha d\beta} \right\rangle \sim \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^{q=Q} \frac{(A_q - \bar{A})(B_q - \bar{B})}{\Delta\alpha_q \Delta\beta_q}. \quad (4)$$

В эквивалентной зависимости (4) вместо начальных параметров (A_0) и (B_0) выставляется их статистический аналог – среднее значение выборки.

В свою очередь, если исследуемый процесс, влияющий на показания (A) и (B) является доминирующим, то соблюдаются следующие условия: $\gamma_A < A$; $\gamma_B < B$. Поэтому средняя сумма произведения разниц $\Delta\alpha\Delta\beta$ будет эквивалентна произведению стандартных отклонений (σ):

$$\frac{1}{Q} \sum_{q=1}^{q=Q} \frac{1}{\Delta\alpha_q \Delta\beta_q} \sim \frac{1}{\sigma_A \sigma_B}. \quad (5)$$

На основании обоснованных зависимостей (1–5) можно говорить об эквивалентности показателя интенсивности преобразования открытых систем и R — коэффициента корреляции между двумя выборками измеряемых параметров:

$$i(A;B) \sim \left| \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^{q=Q} \frac{(A_q - \bar{A})(B_q - \bar{B})}{\sigma_A \sigma_B} \right| = |R|. \quad (6)$$

Коэффициент корреляции в выражении (6) взят по модулю, потому что статистическая интенсивность может быть только положительной. Очевидно, что коэффициент корреляции в первую очередь отражает качественную характеристику интенсивности. Чем больше значение данного коэффициента, тем больше вероятность того, что корреляция между измеряемыми выборочными значениями обусловлена исследуемым процессом преобразования системы. Как правило, граничное значение коэффициента корреляции $R > |\pm 0,6|$ определяется общепринятым уровнем значимости 0,95.

В генеральной выборке двух массивов данных не всегда присутствует линейная корреляция между исследуемыми частями выборочных значений. Поэтому при вычислении статистической интенсивности в формулу (6) необходимо включить параметр, отражающий долю генеральной выборки, в которой линейная регрессия подчиняется условию $R > |\pm 0,6|$.

Вероятность ковариационного изменения двух регистрируемых и/или вычисляемых случайных параметров может быть обусловлена внешним воздействием с определенной интенсивностью, в нашем случае – геохимическим. И, соответственно, интенсивность изменения (преобразования) будет пропорциональна его вероятности. Здесь неважно, сколько компонентов и элементов в системе преобразуются, но важно, какие мы берем исследуемые пары для корреляционной связи. Они должны быть наиболее ковариационны между собой и обладать наибольшей функцией отклика к доминирующему геохимическому процессу.

Для определения доли интервала генеральной выборки при представленном граничном условии необходимо суммировать такие доли выборок интервалов в пределах всего массива данных, в которых наблюдаются корреляционные зависимости

$$Y = \frac{1}{Q} \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H p_h^j, \quad (7)$$

где p – количество всех выборочных значений при $R_h > |\pm 0,6|$; Q – количество выборочных значений всего исследуемого массива; H – количество «интервальных» выборочных значений; J – количество «интервалов», причем $J < H \leq Q$, а если $H = Q$, то $J = 1$.

Статистический параметр Y выражает интервальную меру влияния вторичных процессов, т.е. в данном случае показывает долю преобразованной материи исследуемой системы. Назовем его интервальным параметром.

Произведение статистических параметров

$$i = YR^2 \quad (8)$$

назовем *статистической интенсивностью процессов преобразования открытых систем*, которая

выражает как качественную (R^2), так и количественную (Y) меры статистических регрессионных связей. В уравнении (8) вместо коэффициента корреляции (6) введен квадрат данного коэффициента, называемый коэффициентом аппроксимации, для того чтобы избежать применения модульного параметра. Значение коэффициента аппроксимации, отражающего тесноту связи выборочных значений с уравнением регрессии, отражает и качество соответствия связи между собой корреляционной пары, обусловленной внешним физико-химическим воздействием, например, в процессе увеличения интенсивности вторичной (наложенно-эпигенетической) каолинитизации прямо пропорционально (линейно) увеличиваются пористость и глинистость.

Интенсивность – это наименование параметра, отражающего любой количественный процесс (движения потока частиц, преобразования среды), который регистрируется в единицу времени и объема среды. Он зависит от характеристик регистрируемого прибора. В нашем случае введение наименования параметра «статистическая интенсивность процесса» обусловлено тем, что его значение прямо пропорционально исследуемой интенсивности, но не зависит от характеристик приборов, а связано со статистическим параметром, отражающим тесноту корреляционной связи регистрируемых и/или вычисляемых выборочных значений, величина (теснота) которой обусловлена интенсивностью вторичных геохимических изменений.

Эмпирические данные

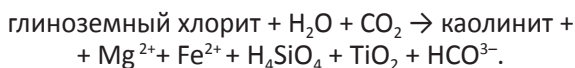
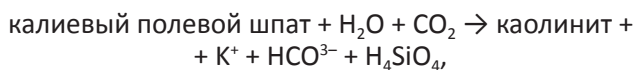
В качестве примера вычисления статистической интенсивности и ее валидности рассмотрим геологическую открытую систему – песчаный пласт-коллектор. Песчаный коллектор представляет собой пористую флюидопроницаемую среду, перекрывающую глинистой покрывкой, с подводными каналами миграции глубинных флюидов. Флюиды – это гидротермальная смесь минерализованной воды, газов и нефти. При их поступлении в коллектор минеральный состав породы преобразуется. Данный геохимический процесс называется наложенным эпигенезом [2].

Как правило, в качестве материалов исследования при изучении геохимических процессов используют образцы керна [8, 11]. При его отсутствии петрофизические и литологические свойства и параметры породы исследуемого песчаника изучаются с помощью приборов и методов геофизических исследований скважин (ГИС). На основе изменения значений и соотношения характеристик ядерно-физических, электромагнитных и акустических полей определяются такие петрофизические параметры, как пористость, проницаемость, глинистость и т.д. [10]. Традиционный метод интерпретации материалов ГИС позволяет выделять литологические разновидности (песчаники, аргиллиты, алевролиты, карбонаты и др.) [9]. Но выявлять вторичные процессы нало-

женного эпигенеза в отсутствие каменного материала считается невозможным.

В рассматриваемой геологической системе элементы – это минералы, составляющие породу песчаного коллектора. Полимиктовая порода песчаника представляет собой пористую матрицу, состоящую из минеральных комплексов (кварц, полевые шпаты, слюда и т. д.) и цементирующих их глинистых и карбонатных минералов. К тому же поры, трещины, заполняющие их флюиды, а также глинисто-карбонатные минералы тоже относятся к элементам системы.

До поступления внешних флюидов в песчаный коллектор порода песчаника находится в равновесном состоянии с точки зрения прохождения химических процессов. После поступления глубинных флюидов с различной рН относительно заполняемой среды равновесие нарушается и проходящая химическая реакция влияет как на трансформацию минералов, так и на петрофизические, емкостные свойства породы коллектора. Например, в результате поступления кислых глубинных флюидов с растворенной углекислотой углекислотный метасоматоз протекает следующим образом [2]:



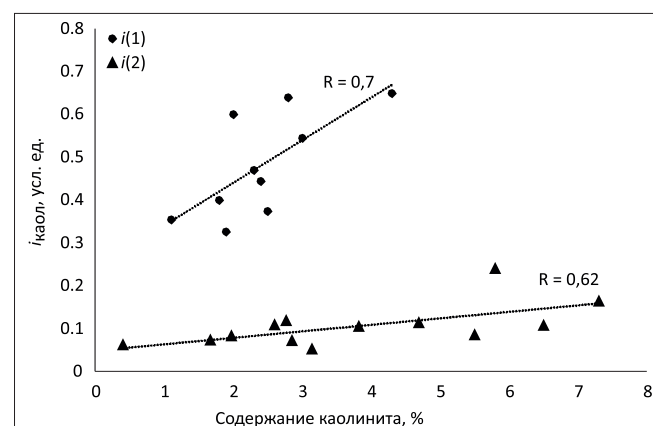
Здесь мы видим, что каолинитизация полевого шпата и глинистых минералов проходит в кислых средах (рН 4–5). Причем в результате повышенной кислотности растворяется не только заполняющий поры цемент, но и матричный алюмосиликат. Емкость коллектора повышается на 2–3 %, а проницаемость – в несколько раз. Каолинит относится к глинистым минералам, и в данном случае увеличение его содержания и одновременное повышение пористости песчаника позволяет построить положительную корреляционную зависимость между петрофизическими выборками – пористостью и глинистостью. Пористость песчаника можно определить на основании показаний нейтрон-нейтронного каротажа скважин, а глинистость – по показаниям гамма-каротажа и каротажа собственной поляризации [3].

В свою очередь, известно, что в процессе осадконакопления (седиментации) и последующего диагенеза с увеличением глинистости песчаной породы пористость песчаника уменьшается. При отсутствии наложенного эпигенеза между данными петрофизическими выборками регрессия должна быть отрицательная. Поэтому согласно уравнению (8) при положительной корреляции пористости (А) с глинистостью (В) в песчаной породе можно определить статистическую интенсивность доминирующего процесса вторичной каолинитизации.

В рассматриваемой технологии интерпретации материалов ГИС песчаные пласты в скважине разби-

ваются на исследуемые интервалы. Затем в каждом из них (50–80 значений), являющемся генеральной выборкой, с диапазоном «подынтервальных» выборочных значений (7–11 значений) вычисляем коэффициент корреляции и при условии $R > |\pm 0,6|$ определяем среднее значение параметра R всех «подынтервалов» с данным условием. Таким образом вычисляем долю исследуемого интервала генеральной выборки, которая подчиняется условию $R > |\pm 0,6|$. Эта доля и будет представлять собой «интервальный параметр», соответствующий количественной величине геохимически измененной породы.

С целью проведения эмпирической проверки соответствия вычисленной статистической интенсивности процесса каолинитизации содержанию вторичных каолинитов в песчаной породе были сопоставлены результаты статистическо-корреляционной интерпретации данных ГИС с петрографическим исследованием образцов керна. На рисунке показаны две группы положительных регрессий, данные которых относятся к различным нефтегазоносным месторождениям: Болтному (Томская область) и Тамбейскому (п-ов Ямал). Исследовались интервалы терригенных коллекторов мезозойских отложений. Причем по Болтному месторождению для каждого из 10 изучаемых интервалов (от 30 и более точек измерения в формате LAS) показания содержания каолинитов по керну усреднялись по данным 5–6 шлифов. Определение количества минералов на единице площади поверхности шлифа в интервале 0–0,99 % проводилось с погрешностью $\pm 0,06$ %, а в интервале 1–5 % – с погрешностью $\pm 0,09$ %. При статистической интенсивности каолинитизации больше критической величины $i_{кр} = 0,33$ усл. ед. (для 55 образцов) коэффициент корреляции регрессии ($i(1)$, см. рисунок) равен 0,7. На Тамбейском месторождении изучалось 13 интервалов (при условии $i > 0$), в которых усреднялись данные содержания каолинитов для 38 образцов (примерно по три шлифа на интервал). Коэффициент корреляции регрессии ($i(2)$, см. рисунок) равен 0,62.



Сопоставление статистической интенсивности каолинитизации, вычисленной по данным ГИС, с содержанием каолинита, определенным по шлифам керна (данные по месторождениям Болтному – $i(1)$, Тамбейскому – $i(2)$)



Относительно низкая статистическая интенсивность вторичной каолинитизации на Тамбейском месторождении объясняется наложением противоположного процесса (с химической точки зрения – щелочного) вторичной карбонатизации, уменьшающего пористость исследуемой породы, что и послужило причиной снижения положительного коэффициента корреляции пористости с глинистостью.

Проведенные сопоставления результатов статистически корреляционной интерпретации материалов ГИС песчаных коллекторов с результатами исследований шлифов зерна доказали их полное соответствие. Валидность данной методики вычисления статистической интенсивности различных процессов преобразования открытых систем (геологических) подтверждена и в других работах [3, 4].

Выводы

Итак, вычисление статистической интенсивности процессов преобразования открытых систем возможно при внешнем воздействии на систему и при трансформации ее элементов. Причем измеряемые параметры элементов системы могут быть различными для одного типа элементов, либо регистрируемые характеристики от различных элементов разные, но при воздействии единого внешнего источника. Исследуемый процесс, преобразующий систему, должен быть доминирующим, и в этом случае вычисляемые корреляционные параметры двух выборок измеряемых параметров трансформирующих элементов будут соответствовать интенсивности данного процесса.

Проведенные эмпирические исследования геологических открытых систем по вторичным геохимическим процессам наложенного эпигенеза (каолинитизация, карбонатизация, пиритизация и пелитизация) полностью подтвердили валидность использования параметра статистической интенсивности в преобразующихся системах. При этом для вычисления статистической интенсивности перечисленных процессов использовались выборки таких различных физических, химических и петрофизических характеристик, как удельное электрическое сопротивление, содержания железа и калия, глинистость и пористость [3, 4].

Рассматриваемая технология статистически-корреляционной интерпретации материалов ГИС старого и нового фонда позволяет накопить огромный массив данных о вторичных геохимических процессах в песчаных пластах всей глубины исследуемого нефтегазового месторождения. А в совокупности с использованием методов построения пространственно-временной нейронной сети [7] можно создать трехмерную модель глубинной фильтрации, интенсивностей вторичных геохимических преобразований песчаных пород по всему разрезу скважин.

В частности, статистическая интенсивность вторичной каолинитизации может быть использована в качестве индикатора поступления глубинных флю-

идов (углеводородов), фиксатора присутствия глубинных зон геотермальной фильтрации (разломов растяжения), параметра характеризующего состояния покрышек [4].

Таким образом, использование параметра статистической интенсивности для изучения процессов преобразования в любых естественных открытых системах позволяет получать новую информацию о самих процессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аранская О. С.** Сборник задач и упражнений по химической технологии и биотехнологии. 2-е изд. перераб. и доп. – Минск: Изд-во ун-та, 1989. – 206 с.
2. **Лебедев Б. А.** Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Л.: Недра, 1992. – 239 с.
3. **Мельник И. А.** Выявление вторично преобразованных терригенных коллекторов на основе статистической интерпретации материалов ГИС // Геофизика. – 2013. – № 4. – С. 29–36.
4. **Мельник И. А.** Основы статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин: учебник. – М.: РУСАЙНС, 2022. – 76 с.
5. **Организация**, планирование и управление химическим предприятием: учебник для вузов / А. П. Леошкин, С. К. Давидович, М. П. Синицын и др. – Л.: Химия, 1982. – 367 с.
6. **Трофимова Е. А., Кисляк Н. В., Гилев Д. В.** Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2018. – 160 с.
7. **A method for well log data generation based on a spatio-temporal neural network / Jun Wang, Junxing Cao, Jiachun You, et al. // Journal of Geophysics and Engineering. – 2021. – Vol. 18, Issue 5. – P. 700–711. – <https://doi.org/10.1093/jge/gxab046>.**
8. **Comparative Evaluation of Geochemical Methods of Searches for Secondary Dispersion Halos in Complex Landscape-Geochemical Conditions of Eastern Transbaikal / A. V. Blinov, A. E. Budyak, Yu. I. Tarasova, et al. // European Association of Geoscientists & Engineers. – 2021. – Apr. – P. 1–10. – <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152132>.**
9. **Machine learning approaches for petrographic classification of carbonate-siliciclastic rocks using well logs and textural information / C. M. Saporetta, L. G. Fonseca, E. Pereira, L. C. Oliveira // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 155. – P. 217–225. – <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.06.012>.**
10. **Petrophysical analysis of well logs data for identification and characterization of the main reservoir of Al Baraka Oil Field, Komombo Basin, Upper Egypt / A. H. Senosy, H. F. Ewida, H. A. Soliman, M. O. Ebraheem // SN Applied Sciences – 2020. – No. 2. – <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3100-x>.**
11. **Rollinson H., Pease V.** Using Geochemical Data. To Understand Geological Processes. – Cam-

bridge University Press, 2021. – 346 p. – <https://doi.org/10.1017/9781108777834>.

REFERENCES

1. Aranskaya O.S. *Sbornik zadach i uprazhneniy po khimicheskoy tekhnologii i biotekhnologii* [Collection of problems and exercises on chemical technology and biotechnology]. Minsk, University Publ., 1989. 206 p. (In Russ.).
2. Lebedev B.A. *Geokhimiya epigenicheskikh protsessov v osadochnykh basseynakh* [Geochemistry of epigenetic processes in sedimentary basins]. Leningrad, Nedra Publ., 1992. 239 p. (In Russ.).
3. Melnik I.A. [Identification of secondary converted terrigenous reservoirs based on the statistical interpretation data GIS]. *Geofizika – Geophysics*, 2013, no. 4, pp. 29–36. (In Russ.).
4. Melnik I.A. *Osnovy statisticheskoi korrelyatsionnoy interpretatsii materialov geofizicheskikh issledovaniy skvazhin. Uchebnik* [Fundamentals of statistical-correlation interpretation of well logging materials: textbook]. Moscow, RUSSIGNS Publ., 2022. 76 p. (In Russ.).
5. Leoshkin A.P., Davidovich S.K., Sinitsyn M.P., et al. *Organizatsiya, planirovaniye i upravleniye khimicheskimi predpriyatiyem. Uchebnik dlya vuzov* [Organization, planning and management of chemical enterprise. Textbook for universities]. Leningrad, Khimiya Publ., 1982. 367 p. (In Russ.).
6. Trofimova E.A., Kislyak N.V., Gilyev D.V. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: uchebnoye posobiye* [Theory of Probability and Mathematical Statistics: Study Guide]. Yekaterinburg, Ural University Publ., 2018. 160 p. (In Russ.).
7. Jun Wang, Junxing Cao, Jiachun You, et al. A method for well log data generation based on a spatio-temporal neural network. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2021, vol. 18, issue 5, pp. 700–711. <https://doi.org/10.1093/jge/gxab046>.
8. Blinov A.V., Budyak A.E., Tarasova Yu.I., et al. Comparative Evaluation of Geochemical Methods of Searches for Secondary Dispersion Halos in Complex Landscape-Geochemical Conditions of Eastern Transbaikalia. *European Association of Geoscientists Engineers*, 2021, Apr., pp. 1–10. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152132>.
9. Saporetti C.M., Fonseca L.G., Pereira E., C. Oliveira L. Machine learning approaches for petrographic classification of carbonate-siliciclastic rocks using well logs and textural information. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, vol. 155, pp. 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.06.012>.
10. Senosy A.H., Ewida H.F., Soliman H.A., Ebraheem M.O. Petrophysical analysis of well logs data for identification and characterization of the main reservoir of Al Baraka Oil Field, Komombo Basin, Upper Egypt. *SN Applied Sciences*, 2020, no. 2. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3100-x>.
11. Rollinson H., Pease V. *Using Geochemical Data. To Understand Geological Processes*. Cambridge University Press, 2021. 346 p. <https://doi.org/10.1017/9781108777834>.

© И. А. Мельник, 2022