

УДК 550.83+552.5+553.98

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4890

Шифр специальности ВАК: 1.6.9, 1.6.12

Определение водонасыщенности песчаника в нефтегазонасыщенных низкоомных коллекторах при присутствии поверхностной электропроводимости

И.А. Мельник✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ melnik@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. При стандартной интерпретации материалов промысловой геофизики иногда возникают проблемы несоответствия результатов интерпретации результатам испытаний пластов. Продуктивные нефтегазонасыщенные интервалы интерпретируются как водонасыщенные и пропускаются, причем данное явление обусловлено образованием низкоомных коллекторов в результате формирования в породе поверхностной электрической проводимости. При отсутствии каменного материала традиционным методом невозможно определить долю электрической проводимости поверхностного слоя, что приводит к ошибочному вычислению остаточной водонасыщенности. **Целью** настоящей работы является развитие уникального алгоритма вычисления удельного электрического сопротивления смеси поверхностного слоя и воды (по данным геофизических исследований скважин) в проницаемых терригенных породах нефтенасыщенных низкоомных коллекторов, связанных с процессами вторичного геохимического преобразования. **Метод** исследования заключается в разработке математического алгоритма вычисления удельного электрического сопротивления смеси поверхностного слоя и воды на основе формулы Б.Ю. Вендельштейна в рамках модели параллельного соединения и редуцированного уравнения удельным электрическим сопротивлением поверхностного слоя эпигенетически преобразованного песчаника. При постоянных минерализации и температуре интервала в редуцированном уравнении поверхностного слоя переменной величиной является параметр относительной концентрации зарядов. Для вычисления этого параметра предложен метод статистически-корреляционной интерпретации материалов геофизических исследований скважин, позволяющий вычислять содержание калия в песчаной породе. После поточечного определения содержания калия (C_K) по отрицательно-корреляционной степенной зависимости удельного электрического сопротивления (C_K) выявляется уравнение тренда, где определяются три параметра: величина степени и величины максимальной и минимальной концентраций калия. На основании этих трех значений вычисляется параметр относительной концентрации зарядов в поверхностном слое с соответствующим вычислением его удельного электрического сопротивления. Усредненная (по интервалу) величина доли поверхностного слоя в порах определяется по данным каротажных диаграмм. **Результаты.** На основе полученного уравнения удельного электрического сопротивления смеси построены теоретические зависимости, подтверждающие релевантность предложенного алгоритма и валидность результатов его применения. В низкоомных коллекторах четырех пластов различных скважин вычислены удельные электрические сопротивления смеси, приращенные удельные электрические сопротивления и на основе уравнения Дахнова–Арчи определены коэффициенты остаточной водонасыщенности и нефтенасыщенности, соответствующие результатам испытаний пластов. **Выводы.** Сопоставление результатов определения характера насыщения пластов, вычисленного на основе предлагаемого алгоритма, с эмпирическими результатами испытания пластов показали их соответствие между собой с высокой степенью достоверности.

Ключевые слова: низкоомный коллектор, нефтегазонасыщенность, водонасыщенность пласта, поверхностная электропроводимость, удельное сопротивление песчаника, пропущенная залежь

Для цитирования: Мельник И.А. Определение водонасыщенности песчаника в нефтегазонасыщенных низкоомных коллекторах при присутствии поверхностной электропроводимости // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 141–150. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4890

UDC 550.83+552.5+553.98
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4890

Sandstone water saturation in oil and gas saturated low resistivity reservoirs with surface conductivity

I.A. Melnik✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ melnik@tpu.ru

Abstract. Relevance. At standard interpretation of field geophysics materials there are sometimes the problems of inconsistency of interpretation results to the results of reservoir tests. Productive oil and gas saturated intervals are interpreted as water-saturated and skipped, and this phenomenon is caused by formation of low resistivity reservoirs as a result of formation of surface electrical conductivity in the rock. In the absence of rock material, it is impossible to determine the fraction of surface electrical conductivity by the traditional method, which leads to erroneous calculation of residual water saturation. **Aim.** To determine an algorithm for calculating the specific electrical resistivity of the surface layer and water mixture (based on the data of geophysical well surveys) in permeable terrigenous rocks of oil-saturated low resistivity reservoirs associated with secondary geochemical transformation. **Method.** Development of a mathematical algorithm for calculating the specific electrical resistance of the surface layer and water mixture on the basis of the previously proposed formula of B.Yu. Wendelstein within the framework of the parallel connection model and the reduced specific electrical resistivity equation of the surface layer of epigenetically transformed sandstone. At constant salinity and interval temperature in the reduced equation of the surface layer, the parameter of relative charge concentration is a variable value. To calculate this parameter, the author has proposed a method of statistical-correlation interpretation of the materials of geophysical studies of wells. This method allows calculating the potassium content in the sandstone rock. After point-by-point determination of potassium content (C_K), a trend equation is established by negative-correlation power dependence of specific electrical resistivity (C_K), where three parameters are determined: degree value and values of maximum and minimum potassium concentrations. Based on these three values, the parameter of relative concentration of charges in the surface layer is calculated with the corresponding calculation of its specific electrical resistivity. The averaged (over the interval) value of the share of the surface layer in pores is determined from the data of logging diagrams. **Results.** On the basis of the obtained specific electrical resistivity equation of the mixture, theoretical curves were constructed, confirming the relevance of the proposed algorithm and validity of the results of its application. In low resistivity reservoirs of four formations of different wells the specific electrical resistivity of the mixture, incremented specific electrical resistivity were calculated and the residual water saturation and oil saturation coefficients corresponding to the results of reservoir tests were determined on the basis of the Dakhnov–Archaie equation. **Conclusions.** Comparisons of the results of determining the nature of reservoir saturation calculated on the basis of the proposed algorithm with empirical results of reservoir testing shown their full correspondence.

Keywords: low resistivity reservoir, oil and gas bearing capacity, water saturation of the formation, surface electrical conductivity, sandstone resistivity, missing reservoir

For citation: Melnik I.A. Sandstone water saturation in oil and gas saturated low resistivity reservoirs with surface conductivity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 141–150. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4890

Введение

При низкой минерализации воды поверхностная электрическая проводимость (ПЭП) полимиктовой песчаной породы зачастую оказывает значительное влияние на общую величину удельного электрического сопротивления (УЭС) данной породы [1]. А вследствие того, что при стандартной интерпретации материалов геофизических исследований скважин (ГИС) это явление невозможно вычленить и учесть в качестве дополнительной электропроводимости, при определении характера насыщения пласта пренебрежение влияния компоненты ПЭП может приводить к ошибочным результатам интерпретаций ГИС.

Согласно традиционной парадигме, электропроводимость песчаной породы в основном контролируется сквозным током ионов минерализованной воды, заполняющей открытые пустоты песчаника, но с незначительной долей влияния ПЭП [2, 3]. А так как нефть является изолятором, в отличие от минерализованной воды, пониженное УЭС породы всегда ассоциируется с водонасыщенным коллектором. Ошибочно-априорное, субъективное представление о несущественном влиянии ПЭП и других морфологических факторов в нефтегазонасыщенных пластах может привести к пропуску углеводородных залежей, обусловленных появлением низкоомных коллекторов [4–11].

В некоторых случаях такие петрологические характеристики, как структура пород, их фракционный состав с присутствием пирита, являются причиной образования локальной ПЭП, понижающий УЭС породы юрского пласта [5]. Отличие морфологии микропористо-капиллярной структуры, являющейся единственным каналом фильтрации в породе, может быть причиной понижения УЭС. Это показано в работе [6], где образование проводящих путей с гораздо меньшей извилистостью (относительно породы этого же пласта, но в другом месте) явилось причиной формирования низкоомных коллекторов.

В свою очередь, были проведены исследования значимости влияния различных факторов на УЭС пористой породы изучаемого пласта. Важность факторов влияния распределилась в порядке убывания следующим образом: пористость, содержание глины, температура, солёность воды, железистые минералы, типы глин и смачиваемости [7]. Соответственно, такой фактор, как глинистость, характеризующий параметр ПЭП, несет в себе высокую степень актуальности. В [8] показано, что песчаная порода, определяющаяся высокими содержаниями таких глинистых минералов, как иллит и каолинит, характеризуется пониженным УЭС. На одном из нефтегазовых месторождений государства Судан зафиксировано 37 % нефтяных зон с низким УЭС породы, обусловленных высокой остаточной водонасыщенностью, вызванной значительным содержанием иллита, смектита и сложной структурой пор [9]. В порых песчаных пород дельтовых фаций Северной Йотаны содержится значительное количество мелкодисперсных глинистых минералов, что приводит к высокому содержанию связанной воды с соответствующим повышением величины ПЭП, т. е. к низкоомному коллектору [10]. В статье [11] показано, что основной причиной низкого сопротивления в резервуарах сланцевого газа в районе Фулин (Китай) являются графитизация сланца, развитие пирита и дополнительная электропроводимость глин.

В работе [4] дан обобщающий материал всех возможных объективных причин образования ПЭП. Как правило, они делятся на следующие категории: петрофизические, петрологические и геохимические, обусловленные проявлением одной из двух первопричин – условием седиментации либо тектоническим процессом, предопределяющим возникновение каналов фильтраций глубинных флюидов с последующим вторичным процессом наложенного эпигенеза.

Итак, наиболее часто встречаемой петрологическо-петрофизической причиной образования ПЭП являются формирования двойного электрического слоя (ДЭС) глинистой фракции и электропроводя-

щего слоя минералов, содержащих железо (пириты). В свою очередь, в исследуемых пластах земной коры локальные вторичные геохимические изменения породы происходят под влиянием поступающих глубинных флюидов по вертикальным зонам фильтраций – разломам растяжения [12, 13]. Процессы перекристаллизации, метаморфизма полимиктовой песчаной породы при формировании вторичных минералов (например, пирита, иллита) с образованием свободных катионов, приводят к повышению плотности зарядов в диффузионном слое и слое Штерна ДЭС вторичных глин. Формирование слоя с повышенной электрической проводимостью обусловлено геохимическим процессом наложенного эпигенеза в результате углекислотного либо щелочного метасоматозов [4, 14–16]. В этом случае повышение плотности электрических зарядов (ионов, электронов) в «сети» поверхностного слоя приводит к понижению УЭС породы.

Целью настоящей работы является развитие уникального алгоритма вычисления УЭС смеси поверхностного слоя и воды (по данным геофизических исследований скважин) в проницаемых терригенных породах нефтенасыщенных низкоомных коллекторов, связанных с процессами вторичного геохимического преобразования.

Методы исследования

При определении коэффициента k_b – остаточной водонасыщенности исследуемого интервала песчаного пласта, используют уравнение Дахнова–Арчи [2, 3, 17–19]:

$$k_e = \sqrt[n]{\frac{a\rho_e}{k_{no}^m \rho_n}},$$

где a – коэффициент извилистости песчаника; ρ_b – УЭС воды; k_{no} – коэффициент открытой пористости; n – коэффициент насыщенности, зависящий от смачиваемости и геометрии пор; m – коэффициент цементации, зависящий от уплотнения и извилистости пор; ρ_n – «истинное» УЭС породы пласта.

Кроме модели Дахнова–Арчи в петрофизике используют модель И.К. Овчинникова–А.С. Семенова (О–С), модифицированную А.В. Тимохиным. Для уточнения УЭС в терригенных осадочных породах в представленных уравнениях (О–С) необходимо внести такие входные данные, как: УЭС заполнителей мелких фракций, отношения полуосей эллипсоидов, объем крупной фракции. В другой модели (А.А. Рыжова), основанной на строгих физико-химических формулах двойного электрического слоя, при уточнении УЭС породы в череде входных данных необходимо знать радиусы активных и пассивных капилляров, концентрации электрических зарядов. Все перечисленные характеристики можно установить только в результате изучения керн в лабораторных условиях [17].

В отличие от перечисленных моделей, в уравнение Дахнова–Арчи входные параметры можно определить по материалам ГИС.

Как правило, УЭС минерализованной воды определяют лабораторным способом либо, зная температуру и минерализацию пластовой воды, по известной эмпирической зависимости [16]. В этом случае априори считается, что ПЭП в породе отсутствует, либо её вклад несущественен.

Однако многочисленные исследования показывают, что горизонтальные распределения интенсивности вторичных геохимических преобразований контролируются присутствием вертикальных каналов фильтрации, образуя тем самым локальные латеральные зоны формирования ПЭП [5, 12–14, 16, 18]. Следовательно, УЭС одного и того же пласта в различных скважинах может значительно различаться величиной долевого вклада поверхностной проводимости.

В конце шестидесятых годов прошлого века Б.Ю. Вендельштейном была предложена модель параллельного соединения электропроводности воды и поверхностного слоя в зависимости от z – долевого содержания ПЭП [19]:

$$\frac{1}{\rho_{см}} = \frac{1-z}{\rho_v} + \frac{z}{\rho_{сл}}, \quad (1)$$

где $\rho_{сл}$ – УЭС ДЭС глинистой фракции, её межслоевой проводимости с возможным присутствием вкраплений пиритов и т. д.; $\rho_{см}$ – УЭС смеси воды и ПЭП при параллельном соединении. В этом случае в уравнение Дахнова–Арчи вместо ρ_v необходимо поставить УЭС смеси, соответственно, появляется необходимость в определении УЭС поверхностного слоя и его долевого содержания. УЭС слоя зависит от типа глины, водонасыщенности и интенсивности вторичного геохимического преобразования породы. Все эти характеристики можно определить на основании лабораторных исследований керна, его шлифов и образцов. При отсутствии каменного материала вычисление УЭС слоя возможно только по материалам ГИС. Естественно, точность его вычисления зависит от множества косвенных факторов, учёт которых не всегда представляется возможным. Но, используя метод статистически-корреляционного анализа материалов ГИС исследуемого интервала, можно вычлнить и учесть совокупность вторичных геохимических факторов, влияющих на формирование ПЭП [12, 18].

В работе [16] показан вывод редуцированного уравнения УЭС поверхностного слоя эпигенетически преобразованного песчаника:

$$\rho_{сл} = 0,254 \sqrt{\frac{M}{T}} \frac{1}{q}, \quad (2)$$

где M – минерализация воды [г/л]; T – температура [°C]; $q = Q/Q_{\min}$ – относительная Q -концентрация

либо плотность электрических зарядов [отн. ед.]. При исследовании массивов геофизических и петрофизических данных песчаного интервала в скважинных условиях в уравнениях (1), (2) переменными величинами могут быть только параметры z и q , а минерализация и температура являются постоянными величинами.

Если общую пористость песчаной породы рассматривать как сумму: $k_{по} + z$, где z – доля глинистых и электропроводящих минералов, как вторично преобразованных, с повышенной плотностью зарядов, так и первичных, то плотность зарядов будет зависеть от содержания химических элементов в породе, несущих заряд, и степени электрохимического преобразования аллотигенных минералов с содержанием данных элементов. Обозначим C – концентрацию химических элементов в породе; α – степень преобразования породы (в совокупности процессов: электрохимического, флюидодинамического, геохимического). В этом случае плотность зарядов $Q \sim C^\alpha$.

В каждом интервале последовательных выборочных значений либо в выборке интервалов зависимостей электропроводности от концентраций элементов существуют граничные величины данных содержаний, оказывающих влияние на изменение величины проводимости. Если содержания элементов больше либо меньше определенных граничных значений, то электропроводность породы не зависит от влияния данных элементов. Вдоль исследуемой координаты (по глубине исследуемого интервала) соответствующие границы выборочных значений содержаний элементов, влияющих на УЭС, обозначим как $C_{\min}$ и $C_{\max}$. Поэтому относительная концентрация зарядов равна:

$$q = \lim_{C \rightarrow \max} \left[\frac{C}{C_{\min}} \right]^\alpha = \left[\frac{C_{\max}}{C_{\min}} \right]^\alpha. \quad (3)$$

При $\alpha=0$ параметр $q=1$, следовательно, при отсутствии преобразования породы, приводящего к повышению плотности зарядов, величина ПЭП в исследуемом интервале постоянная.

Рассмотрим необходимые условия проведения корреляционного анализа по данным каротажа скважин, на основании которых определяются содержания химических элементов в изучаемом интервале. Допустим, на основе показаний (в песчаном интервале) приборов спектрального гамма-каротажа либо нейтронного-гамма каротажа скважин получены массивы данных содержаний таких химических элементов, как калий и железо. В песчано-алевролитистой породе калий и железо являются наиболее распространёнными элементами, участвующими в образовании зарядов. В песчаных породах в основном калий содержится в калиевых полевых шпатах и в гидрослюдах (иллитах). В про-

цессах геохимического преобразования, пелитизации полевого шпата (являющегося диэлектриком) данный минерал трансформируется в иллит либо в группу смектитов с повышенной плотностью катионов калия в проводящих, гидратированных слоях ДЭС. Железо содержится в пирите (обладающем электронной проводимостью) и в слабопроводящих либо непроводящих минералах – глауконите и сидерите. Но в результате процессов наложенного эпигенеза данные минералы могут стать источником высокого содержания ионов железа как в растворе, так и в ДЭС глинистой фракции, сильно повышающих электрическую проводимость породы [14, 15, 20]. В этом случае понижение величины УЭС породы в разрезе скважины исследуемого интервала будет обусловлено степенью интенсивности преобразования.

При постоянной пористости породы, на основании формул (1), (2), приращенное УЭС будет равно:

$$\Delta\rho = \rho_g - \rho_{cm} = \rho_g \left(1 - \frac{B}{B(1-z) + q\rho_g z}\right),$$

где $B = 0,254\sqrt{\frac{M}{T}}$. Во всех точках исследуемого по глубине песчаного интервала минерализация воды и температура среды – величины постоянные. УЭС смеси вычисляется по формуле:

$$\rho_{cm} = \rho_g \frac{B}{B(1-z) + q\rho_g z}. \quad (4)$$

Согласно полученному уравнению (4) видно, что в песчаном интервале переменными величинами могут быть только параметры q и z . Если мы будем изучать выборку с различными интервалами, то остальные параметры данной зависимости также могут оказывать сильное влияние на изменение величины УЭС смеси.

В настоящей работе при исследовании песчаных интервалов применялась технология статистически-корреляционной интерпретации (СКИ) материалов ГИС [12, 18]. Этот метод позволяет определять относительные содержания таких химических элементов, как калий и железо, с точностью от 70 % и выше. А отрицательно-степенные корреляционные тренды между выборками содержаний элементов с кажущимся УЭС породы (с коэффициентом корреляции $R > |-0,6|$) определяют тот песчаный интервал, где происходит влияние ПЭП на УЭС песчаника. Таким образом, исследуя выявленную выборку с целью вычисления относительной концентрации заряда по формуле (3), мы получаем три необходимые нам переменные: C_{min} , C_{max} и $\alpha = \beta R^2$. Причем в уравнении тренда степенной параметр β определяется при условии $R > |-0,6|$, где R^2 является показателем, мерой соответствия данных

выборочных значений степени преобразования породы. Переменную z , усредненную по интервалу, обычно находят по данным гамма-каротажа (ГК) и каротажа собственной поляризации (ПС).

Результаты исследования

Используя модель параллельного электрического соединения ДЭС и сквозного тока в пустотном пространстве песчано-алевритовой породы, на основе полученной зависимости (4), были проведены теоретические исследования влияния изменений величин относительного заряда ПЭП, его долевого содержания в порах и минерализации пластовой воды на определение УЭС породы в исследуемых интервалах (рис. 1).

На рис. 1, А показаны две зависимости: вычисляемого приращенного УЭС и задаваемого переменного долевого содержания ПЭП, где от изменения двух переменных параметров: q – относительной концентрации зарядов и z – доли содержания ПЭП, величина приращенного УЭС нелинейно меняется. Причем параметр z задавался с обратной пропорцией параметру q . Приращенное УЭС вычислялось по представленной выше формуле (при температуре 80 °С, минерализации воды 13 г/л и УЭС воды 0, 17 Ом·м), где с увеличением количества зарядов линейно уменьшается доля ПЭП. Получена возрастающе-убывающая кривая приращенного УЭС, подтверждающая то, что при постоянной минерализации и температуре (т. е. изучается интервал) увеличение концентрации зарядов в ПЭП является доминантой в образовании низкоомных интервалов относительно влияния уменьшения долевого содержания ПЭП.

В свою очередь, при исследовании массива данных различных интервалов с целью определения УЭС смеси необходимо учитывать влияние минерализации (M) воды и температуры (T) пласта на УЭС воды. На рис. 1, В показаны закономерности изменения величин доли приращенного УЭС, УЭС воды и УЭС смеси в зависимости от изменения минерализации воды и относительной концентрации зарядов. Здесь заданная положительно-регрессивная переменная q , входящая в уравнения вычислений УЭС приращенного и смеси, показана в правой части вспомогательной оси. Доля приращенного УЭС вычислялась согласно следующей формуле: $\Delta = (\rho_v - \rho_{cm})/\rho_v$. УЭС воды – по известной эмпирической зависимости [16]:

$$\rho_g = 0,5M^{-0,79} \exp\left(\frac{75}{T}\right), \quad (5)$$

где $T=70$ °С. УЭС смеси определялась по формуле (4) при $z=0,2$. Видно, что с ростом относительной концентрации заряда даже при увеличении минерализации пластовой воды до 50 г/л доля приращенного УЭС превышает 10 %.

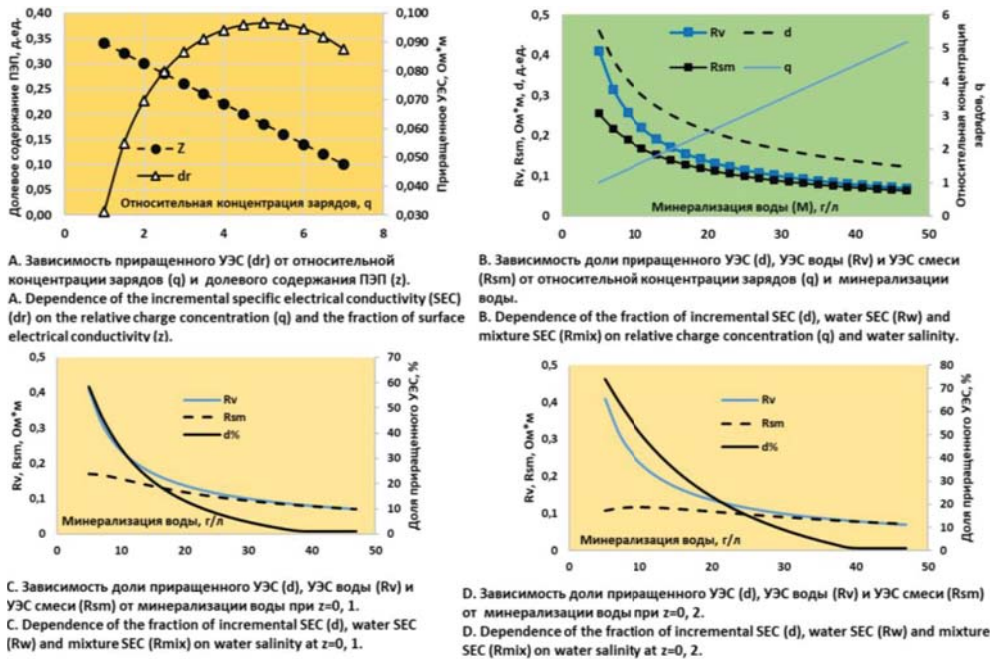


Рис. 1. Результаты теоретических исследований влияния поверхностной электрической проводимости на УЭС песчано-алевритовой породы

Fig. 1. Results of theoretical studies of the effect of surface electrical conductivity on the SEC of sandy silty rock

При постоянной величине относительной концентрации заряда ($q=2,5$) и при $z=0,1$ в районе минерализации 30 г/л доля приращенного УЭС приблизительно равна 5 % (рис. 1, C), но с повышением $z=0,2$, приращенное УЭС $\Delta=10$ % (рис. 1, D). Итак, увеличение доли проводящей компоненты ПЭП приводит к усилению его влияния на понижение УЭС породы даже при минерализации пластовой воды более 30 г/л.

Рассмотрим пример вычисления доли приращенного УЭС (по материалам ГИС) в нефтенасыщенном низкоомном коллекторе. В работе [18] показаны результаты выявления пропущенного продуктивного коллектора (пласт Б9) в скважине 606 на Вахском месторождении. Вычисление содержания калия проводилось по методу СКИ-материалов ГИС. Открытая пористость определялась стандартным способом по ПС.

Рассмотрим корреляционную зависимость кажущегося УЭС, нормированного на коэффициент открытой пористости, от концентрации калия в песчаном интервале (рис. 2). На основании зависимости Дахнова–Арчи устанавливаем следующее: кажущееся УЭС породы изучаемого интервала ($\rho_{\text{каж}}$ – УЭС градиент-зонда ГЗ-3) обратно пропорционально открытой пористости в степени $m \sim 2$, поэтому параметр $J = \rho_{\text{каж}} k_{\text{по}}^2$. В соответствии с полученной зависимостью $J(\rho_{\text{каж}}) = j C_K^{-\beta}$ (рис. 2) степенной параметр $\alpha = 1,47 \times 0,84 = 1,24$ и $C_{\text{min}} = 0,89$; $C_{\text{max}} = 3,75$, где относительная концентрация зарядов равна $q \approx 6$. При усредненной $z=0,18$ (определенной

по ГК и ПС), минерализации воды $M=23,7$ г/л и температуре $T=80$ °С, используя уравнения (1)–(5), была вычислена доля приращенного УЭС (таблица). Следовательно, «действительное» УЭС породы пласта равно $\rho_d = \rho_n(1+\Delta)$. В уравнении Дахнова–Арчи коэффициент $a=0,5$, $k_{\text{по}}=0,17$, $\rho_v=0,270$ Ом·м. Коэффициент нефтегазонасыщенности равен $K_{\text{НГ}}=1-k_v$. При инновационном методе, предложенном автором статьи, в результате интерпретации ГИС вместо ρ_v подставляется УЭС смеси $\rho_{\text{см}}=0,092$ Ом·м.

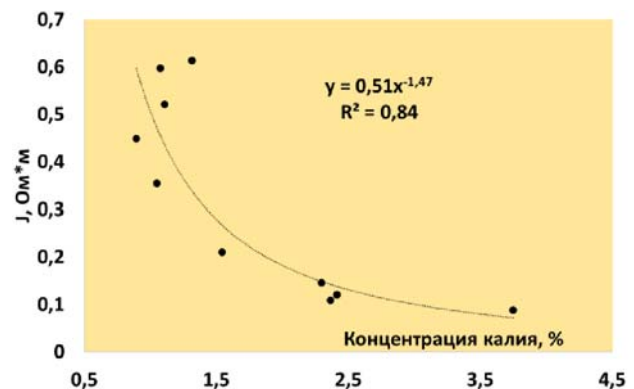


Рис. 2. Зависимость кажущегося УЭС, умноженного на коэффициент открытой пористости, от содержания калия в песчаном интервале 2091,2–2093 м скважины 606 Вахского месторождения

Fig. 2. Dependence of apparent SEC multiplied by open porosity coefficient on potassium content in the sandy interval 2091.2–2093 m of well 606 of the Vakhskoe field

Таблица. Сравнительные результаты традиционного и инновационного методов интерпретации материалов ГИС в низкоомных коллекторах

Table. Comparative results of traditional and innovative methods of interpretation of GIS materials in low resistivity reservoirs

Название скважины Well name	Интервал (пласт) Interval (stratum)	Результаты традиционной интерпретации ГИС Results of traditional interpretation of geophysical well surveys				Результаты СКИ данных ГИС Results of correlation interpretation of geophysical well surveys			
		$\rho_{гр}$, Ом Electrical resistivity of the formation, Ohm	$\rho_{гп}$, Ом Boundary resistivity, Ohm	$K_{иг}$ Oil and gas saturation factor	Насыщение Saturation	Δ , д.ед. Incremental resistance fraction, d.u.e.	$\rho_{а}$, Ом Actual electrical resistance, Ohm	$K_{иг}$ Oil and gas saturation factor	Насыщение по результатам испытаний Saturation based on test results
Вахская, 606 Vakhskaya, 606	2091,2–2093 (Б9)	4,5	6,6	0	Вода Water	0,66	7,50	0,40	Нефть+вода Oil+water
Вынгапуровская, 614 Vyngapurovskaya, 614	1646,8–1651 (ПК22-2)	4,0	4,8	0,25	Неясно Uncertain	0,26	5,04	0,35	Вода+нефть Water+oil
Вынгапуровская, 614 Vyngapurovskaya, 614	1655–1657,8 (ПК22-2)	3,2	3,8	0,32	Неясно Uncertain	0,19	3,81	0,39	
Нижнелугинецкая, 300Р Nizhneluginetskaya, 300R	2407,6–2412 (Ю1-3)	3,6	4,0	–	Вода Water	0,16	4,20	–	

В таблице показаны результаты различных методов интерпретации данных ГИС исследуемых песчаных интервалов, где СКИ-метод можно рассматривать в качестве дополнения к традиционному методу. Согласно полученным результатам, при традиционной интерпретации «истинное» УЭС меньше граничной величины ($\rho_{гр}$), а при инновационной – «действительное» УЭС больше граничной УЭС. Испытания пластов подтвердили наличие нефти в исследуемых интервалах. В качестве примера на рис. 3 представлены результаты спиртбензольной вытяжки образцов породы исследуемого пласта, где присутствие углеводородов в породе определяется по гуммигутовому цвету.



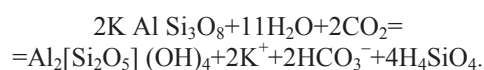
Рис. 3. Спиртбензольная вытяжка образцов породы пласта ПК22-2 (глубина отбора 1647,3–1650,5 м, Вынгапуровская скважина 614). Справа экспонируется бюкс с чистой спиртбензольной смесью

Fig. 3. Alcohol-benzene extract of rock samples from the PK22-2 formation (sampling depth 1647.3–1650.5 m, Vyngapurovskaya well 614). Bunker with pure alcohol-benzene mixture is on the right

Обсуждение результатов

Вторичные геохимические преобразования песчаной породы подразделяются на стадийный и наложенный эпигенез [14]. При стадийном эпигенезе с развитием глинистых минералов открытая пористость и проницаемость породы уменьшаются. Например, в нижнемеловых песчаниках Томской области с высоким содержанием гидробиотитов часто наблюдается формирование по биотиту железистых хлоритов. С образованием по поверхности пор электропроводящей хлоритовой пленки в раствор попадают катионы калия, которые, устремляясь к отрицательно заряженной поверхности глинистой фракции, увеличивают плотность зарядов ДЭС, причем пористость породы уменьшается почти на 2 %, а проницаемость – в 2 раза.

При наложенном эпигенезе, в отличие от стадийного, происходит резкое разделение в пространстве зон с реакциями углекислотного метасоматоза (вторичная каолинитизация с последующей пелитизацией) и щелочного, с отложением карбонатов [14]. Наложный эпигенез обусловлен притоком внешних глубинных флюидов с различной pH относительно заполняемой среды. Например, поступление глубинной воды с растворенным углекислым газом в породу, содержащую калиевый полевой шпат, приводит к следующей реакции [14]:



Здесь мы видим процесс каолинитизации калиевого полевого шпата с генерацией катионов калия. При углекислотном метасоматозе происходит растворение матрицы породы с соответствующим уве-

личением пористости на 2–3 % и проницаемости в несколько раз. Дальнейшее ощелачивание среды, при наличии углеводородов и растворенных в воде органических соединений, приводит к гидрослюдизации каолинита. Получается, что пелитизация калиевого полевого шпата – процесс многоступенчатый. Образующие трёхслойные глинистые минералы (с большей площадью поверхности) с повышенной плотностью зарядов калия в ДЭС контролируют понижение УЭС породы в зависимости от содержания калия. Повышение проницаемости песчаников в процессе вторичной пелитизации подтверждено в работе [21], где показано значительно-аномальное увеличение проницаемости породы с ростом интенсивности процесса пелитизации.

В свою очередь изменение фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) породы вследствие цементации пор может оказывать существенное влияние на проводимость сквозной компоненты электрического тока. Это явление необходимо учитывать при использовании СКИ-данных ГИС. Например, уменьшение пористости в результате увеличения по глубине в порах непроводящего цемента повышает УЭС породы. А если в этой же зоне в заданном направлении происходит уменьшение калийсодержащих минералов, то обратная степенная корреляция УЭС с содержанием калия может быть связана не только с влиянием ПЭП. В этом случае доля влияния ПЭП и сквозного тока может оцениваться при сравнении величин степени уравнений тренда.

Анализ результатов теоретических исследований при изучении песчаного интервала методом СКИ показывает, что при постоянной пористости наибольшее влияние на УЭС породы оказывает изменение концентрации заряда, накопленного на ПЭП. А степень его влияния, даже при относительно высокой минерализации воды, неоправданно игнорируется. Вторичные геохимические процессы, обусловленные эпигенезом, могут сформировать ПЭП с компонентой повышенной электропроводности. При вычислении водонасыщенности исследуемого интервала в формуле Дахнова–Арчи вместо УЭС воды ставится УЭС смеси, либо ρ_n замещается параметром ρ_d .

Рассмотренный алгоритм действий возможен при появлении ПЭП в результате вторичных эпигенетических процессов. Однако причиной появления низкоомных коллекторов может быть зональное повышение проницаемости породы вследствие увеличения её трещиноватости, что обуславливает относительный рост скорости движения зарядов

сквозного тока. Лито-фракционный состав пород также может явиться причиной понижения УЭС. В этом случае сильное уменьшение размеров гранул песчаника приводит к увеличению площади поверхности ПЭП с соответствующим ростом плотности зарядов [4].

Заключение

Обобщение материалов различных авторов по исследованию низкоомных коллекторов позволило выявить наиболее часто встречающуюся причину образования данного явления – это формирование в пористой среде слоя с повышенной электрической проводимостью. При постоянной минерализации и температуре пласта изменение величины ПЭП обусловлено изменением долевого содержания слоя и плотности (концентрации) в ней зарядов. Как правило, это явление связано со вторичным геохимическим преобразованием аллотигенных минералов в процессах метаморфизма. Образование свободных катионов приводит к формированию поверхностного слоя ПЭП с повышенной плотностью зарядов.

Итак, в рамках модели параллельного соединения сквозного тока и ПЭП теоретические и эмпирические исследования показали релевантность применения полученных зависимостей (1)–(4). С использованием метода СКИ-материалов ГИС при нахождении минерализации и температуры пласта вычисляется относительная концентрация электрических зарядов в поверхностном слое песчаной породы с последующим определением УЭС смеси. При известных УЭС воды и УЭС смеси устанавливаются доля приращенного УЭС, «действительное» УЭС, а на основе уравнения Дахнова–Арчи, при замене УЭС воды на УЭС смеси, определяются коэффициенты остаточной водонасыщенности и нефтегазонасыщенности исследуемого интервала. В этом случае с учетом УЭС слоя удельное сопротивление смеси в низкоомных коллекторах будет всегда меньше сопротивления воды, поэтому коэффициент водонасыщенности будет уменьшаться. Величина доли приращенного УЭС прямо пропорциональна вероятности обнаружения низкоомного коллектора.

Таким образом, сопоставление результатов определения характера насыщения пластов, вычисленных на основе предлагаемого алгоритма при использовании метода СКИ-материалов ГИС, с эмпирическими результатами испытания пластов показало их соответствие между собой с высокой степенью достоверности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glover P.W.J. Nature of surface electrical conductivity in natural sands, sandstones, and clays // *Geophysical Research Letters*. – March, 1998. – P. 691–694. DOI: 10.1029/98GL00296

2. Kwader T. Estimating aquifer permeability from formation resistivity factors // *Groundwater*. – 1985. – Vol. 23. – № 6. – P. 762–766. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1985.tb01955.x>
3. Дахнов В.Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин. – М.: Недра, 1967. – 390 с.
4. Мельник И.А. Причины образования нефтенасыщенных низкоомных коллекторов // *Геология нефти и газа*. – 2018. – № 6. – С. 129–136.
5. Вахитова Г.Р., Валиуллин Р.А., Кофонова С.Р. Оценка характера насыщенности продуктивных терригенных коллекторов Западно-Сибирского месторождения, характеризующихся низкими значениями сопротивления // *Нефтегазовое дело*. – 2023. – Т. 21. – № 6. – С. 15–26. DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-6-15-26>.
6. Saturation evaluation of microporous low resistivity carbonate oil pays in Rub Al Khali Basin in the Middle East / Wang Yongjun, Sun Yuanhui, Yang Siyu, Wu Shuhong, Liu Hui, Tong Min, Lyu Hengyu // *Petroleum Exploration and Development*. – 2022. – Vol. 49. – № 1. – P. 94–106. URL: [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(22\)60007-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60007-7) (дата обращения 06.09.2024).
7. Studies of electrical properties of low-resistivity sandstones based on digital rock technology / Weichao Yan, Jianmeng Sun, Jinyan Zhang, Weiguo Yuan, Li Zhang, Likai Cui, Huaimin Dong // *Journal of Geophysics and Engineering*. – 2018. – Vol. 15. – Iss. 1. – P. 153–163. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2140/aa8715> (дата обращения 06.09.2024).
8. Integrated analysis of the-low resistivity hydrocarbon reservoir in the «S» field // *Indonesian Petroleum Association*. – May, 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.29118/IPA.0.16.436.SE> (дата обращения 09.09.2024).
9. Logging-based assessment of low-resistivity oil zones: a case study from Sudan / Li Chunmeia, Wu Furonga, Zang Dianguanga, Peng Caia, Guo Hongxib, Li Jiea // *Energi Geoscience*. – April, 2021. – Vol. 4. – Iss. 2. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.11.005> (дата обращения 09.09.2024).
10. Lowdown of resistivity: effects of microporosity on oil bearing deltafront sandstones, North Jotana, Cambay Basin, India and identification methods / H.S. Bhattacharya, V. Pratap, G.C. Deb, V. Siva, T.K. Das // *5th Conference & Exposition on Petroleum Geophysics*. – Hyderabad, 2004. – P. 115–123. URL: https://spgindia.org/conference/5thconf_hyd04/53046.PDF (дата обращения 09.09.2024).
11. Investigation of the origin of low resistivity and methods for the calculation of gas saturation in shale gas reservoirs in the Fulingarea / Shi Wenrui, Zhang Zhansong, Huang Zisang, Jiang Shu, Shen Jincai, Feng Aiguo, Zhao Hongyan, Xing Jun // *Energy Fuels*. – 2021. – Vol. 35. – № 6. – P. 5181–5193. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.1c00087> (дата обращения 10.10.2024).
12. Мельник И.А., Сидоренко Н.С., Жданова Ю.Ю. Применение метода статистически-корреляционной интерпретации данных ГИС на месторождении Самотлор // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 9. – С. 104–114. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/9/4000>
13. Предтеченская Е.А., Шиганова О.В., Фомичев А.С. Катагенетические и гидрохимические аномалии в нижнесреднеюрских нефтегазоносных отложениях Западной Сибири как индикаторы флюидодинамических процессов в зонах дизъюнктивных нарушений // *Литосфера*. – 2009. – № 6. – С. 54–65.
14. Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Л.: Недра, 1992. – 239 с.
15. Зубков М.Ю. Кристаллографическое и литолого-петрографическое обоснование электрических свойств минералов железа, глини и терригенных коллекторов (на примере пластов БВ8 и ЮВ1 Повховского месторождения. Часть 1) // *Горные ведомости*. – 2008. – № 11. – С. 20–32.
16. Мельник И.А. Причины понижения электрического сопротивления в низкоомных коллекторах // *Геофизические исследования*. – 2014. – № 4. – С. 44–53.
17. Электроразведка методом сопротивлений / С.А. Акуленко, С.А. Березина, А.А. Бобачев, Д.К. Большаков, А.А. Горбунов, И.Д. Игнатова, А.В. Любчикова, М.Н. Марченко, И.Н. Модин, Е.В. Перваго, А.А. Рыжов, М.М. Симонс, Т.Ю. Смирнова, В.А. Шевнин, А.Г. Яковлев. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 160 с.
18. Мельник И.А. Определение неявных нефтегазоносных песчаных интервалов методом статистически-корреляционной интерпретации данных ГИС // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 54–63. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/3891>
19. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика (физика горных пород). – М.: Нефть и газ, 2004. – 368 с.
20. Гипотеза причины образования низкоомного коллектора на Катыльгинском месторождении / С.М. Шевченко, В.Н. Шевченко, О.В. Губарев, А.Л. Бушковский // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. – 2008. – № 6. – С. 13–15.
21. Жданова Ю.Ю. Влияние вторичных процессов на петрофизические свойства песчаной породы танопчинской свиты Тамбейского месторождения (Ямало-Ненецкий автономный округа // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 137–147. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/8/4628>

Информация об авторе

Игорь Анатольевич Мельник, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения нефтегазового дела Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. melnik@tpu.ru

Поступила в редакцию: 05.11.2024

Поступила после рецензирования: 24.12.2024

Принята к публикации: 03.02.2025

REFERENCES

1. Glover P.W.J. Nature of surface electrical conductivity in natural sands, sandstones, and clays. *Geophysical Research Letters*, March, 1998, pp. 691–694. DOI: 10.1029/98GL00296
2. Kwader T. Estimating aquifer permeability from formation resistivity factors. *Groundwater*, 1985, vol. 23, no. 6, pp. 762–766. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1985.tb01955.x>
3. Dahnov V.N. *Electrical and magnetic methods of well testing*. Moscow, Nedra Publ., 1967. 390 p. (In Russ.)
4. Melnik I.A. Causes of formation of oil-saturated low-resistance reservoirs. *Oil and Gas Geology*, 2018, no. 6, pp. 129–136. (In Russ.)
5. Vakhitova G.R., Valiullin R.A., Kofonova S.R. Assessment of the nature of saturation of productive terrigenous reservoirs of the West Siberian field characterized by low resistivity values. *Oil and Gas Business*, 2023, vol. 21, no. 6, pp. 15–26. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-6-15-26>.
6. Wang Yongjun, Sun Yuanhui, Yang Siyu, Wu Shuhong, Liu Hui, Tong Min, Lyu Hengyu. Saturation evaluation of microporous low resistivity carbonate oil pays in Rub Al Khali Basin in the Middle East. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, vol. 49, no. 1, pp. 94–106. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(22\)60007-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60007-7) (accessed 6 September 2024).
7. Weichao Yan, Jianmeng Sun, Jinyan Zhang, Weiguo Yuan, Li Zhang, Likai Cui, Huaimin Dong. Studies of electrical properties of low-resistivity sandstones based on digital rock technology. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2018, vol. 15, Iss. 1, pp. 153–163. Available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-2140/aa8715> (accessed 6 September 2024).
8. *Integrated analysis of the low resistivity hydrocarbon reservoir in the «S» field*. Indonesian Petroleum Association. May, 2016. Available at: <http://dx.doi.org/10.29118/IPA.0.16.436.SE> (accessed 9 September 2024).
9. Li Chunmeia, Wu Furonga, Zang Dianguanga, Peng Caia, Guo Hongxib, Li Jiea. Logging-based assessment of low-resistivity oil zones: a case study from Sudan. *Energi Geoscience*, April, 2021, vol. 4, Iss. 2. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.11.005> (accessed 9 September 2024).
10. Bhattacharya H.S., Pratap V., Deb G.C., Siva V., Das T.K. Lowdown of resistivity: effects of microporosity on oil bearing deltafront sandstones, North Jotana, Cambay Basin, India and identification methods. *5th Conference & Exposition on Petroleum Geophysics*. Hyderabad, 2004. pp. 115–123. Available at: https://spgindia.org/conference/5thconf_hyd04/53046.PDF (accessed 9 September 2024).
11. Shi Wenrui, Zhang Zhansong, Huang Zisang, Jiang Shu, Shen Jincai, Feng Aiguo, Zhao Hongyan, Xing Jun. Investigation of the origin of low resistivity and methods for the calculation of gas saturation in shale gas reservoirs in the Fulingarea. *Energy Fuels*, 2021, vol. 35, no. 6, no. 5181–5193. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.1c00087> (accessed 10 October 2022).
12. Melnik I.A., Sidorenko N.S., Zhdanova Yu. Application of the method of statistical-correlation interpretation of GWS data in the Samotlor field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 9, pp. 104–114. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/9/4000>
13. Predtechenskaya E.A., Shiganova O.V., Fomichev A.S. Catagenetic and hydrochemical anomalies in the Lower Middle Jurassic oil-and-gas bearing sediments of Western Siberia as indicators of fluid dynamic processes in the zones of disjunctive disturbances. *Lithosphere*, 2009, no. 6, pp. 54–65. (In Russ.)
14. Lebedev B.A. *Geochemistry of epigenetic processes in sedimentary basins*. Leningrad, Nedra Publ., 1992. 239 p. (In Russ.)
15. Zubkov M.Yu. Crystallographic and lithologic-petrographic substantiation of electrical properties of iron minerals, clays and terrigenous reservoirs (by the example of formations BV8 and YV1 of Povkhovskoye deposit. Part 1). *Gornye vedomosti*, 2008, no. 11, pp. 20–32. (In Russ.)
16. Melnik I. A. Causes of electrical resistance decrease in low resistivity in low resistivity collectors. *Geophysical Research*, 2014, no. 4, pp. 44–53. (In Russ.)
17. Akulenko S.A., Berezina S.A., Bobachev A.A., Bolshakov D.K., Gorbunov A.A., Ignatova I.D., Lyubchikova A.V., Marchenko M.N., Modin I.N., Pervago E.V., Ryzhov A.A., Simons M.M., Smirnova T.Yu., Shevchin V.A., Yakovlev A.G. *Electrical exploration by the resistance method*. Moscow, Moscow State University Publ. House, 1994. 160 p. (In Russ.)
18. Melnik I.A. Determination of implicit oil-and-gas-bearing sand intervals by method of statistical-correlation interpretation of GWS data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 1, pp. 54–63. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/3891>
19. Dobrynin V.M., Wendelstein B.Y., Kozhevnikov D.A. *Petrophysics (rock physics)*. Moscow, Neft i gaz Publ., 2004. 368 p. (In Russ.)
20. Shevchenko S.M., Shevchenko V.N., Gubarev O.V., Bushkovsky A.L. Hypothesis of the reason of low resistivity reservoir formation at Katylginskoe oilfield. *Equipment and technologies for oil and gas complex*, 2008, no. 6, pp. 13–15. (In Russ.)
21. Zhdanova Yu.Yu. Influence of secondary processes on petrophysical properties of sandy rock of Tanopchinsky Formation of Tambeyskoe field (Yamalo-Nenets Autonomous District). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 137–147. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/8/4628>

Information about the authors

Igor A. Melnik, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. melnik@tpu.ru

Received: 05.11.2024

Revised: 24.12.2024

Accepted: 03.02.2025