

УДК 550.83+552.5+553.98

DOI 10.31087/0016-7894-2018-6-129-136

Причины образования нефтенасыщенных низкоомных коллекторов

© 2018 г. | И.А. Мельник

Инженерная школа природных ресурсов ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия; migranis@mail.ru

Поступила 21.03.2018 г.

Принята к печати 13.08.2018 г.

Ключевые слова: *низкоомный коллектор; углеводороды; нефтегазонасыщение; удельное электрическое сопротивление; геофизические исследования скважин.*

Проведены анализ и обобщение причин образования нефтегазонасыщенных низкоомных коллекторов, которые позволили выделить два комплекса геологических причинно-следственных связей, обуславливающих появление петрофизических и физических причин низкоомности пород. Первопричинами являются фациальная обстановка процесса осадконакопления и тектонический процесс, в результате которого образуются каналы флюидомиграций. Показано, что в общем случае вторичной геологической причиной всегда будет либо литотип пород (четыре типа проводников), приводящий к пленочно-связанной воде и электропроводящим минералам, либо наличие разломов растяжения и трещин, на основе которых будет реализовываться наложенно-эпигенетический процесс с появлением дополнительной поверхностной проводимости. Оба комплекса геологических причин вызывают появление дополнительной (поверхностной) электропроводимости, определяющейся следующими факторами: увеличением внутренней площади поровой и трещинной поверхности пленочно-связанной воды в породе и, соответственно, плотности зарядов; двойным электрическим слоем глинистой фракции; межслоевой проводимостью электрических зарядов в трехслойных глинистых минералах; образованием в породе коллектора электропроводящих минералов группы пирита. Определены геологические признаки присутствия перспективных низкоомных коллекторов.

Для цитирования: Мельник И.А. Причины образования нефтенасыщенных низкоомных коллекторов // Геология нефти и газа. – 2018. – № 6. – С. 129–136. DOI: 10.31087/0016-7894-2018-6-129-136.

Reasons for formation of low-resistivity oil saturated reservoirs

© 2018 | I.A. Mel'nik

School of Earth Sciences & Engineering of Federal Independent Educational Institution "National Research Tomsk Polytechnic University", Tomsk, Russia; migranis@mail.ru

Received 21.03.2018

Accepted for publication 13.08.2018

Key words: *low-resistivity reservoir; hydrocarbons; oil and gas saturation; resistivity; well logging.*

Analysis and synthesis of the reasons for low-resistivity oil and gas saturated reservoirs formation are carried out. This work allowed identifying two groups of geological cause-and-effect relations, which determine petrophysical and physical reasons for low-resistivity rocks occurrence. The prime mover is facies environment of sedimentation together with tectonic activity resulting in formation of channels for fluid migration. It is shown that in general the secondary geological reasons will always be a rock lithotype (four conductor types) determining film-bound water and electrically conductive minerals, or extension faults and fractures, which make a basis for imposed-epigenetic process resulting in additional surface conductivity. Both groups of geological relations cause an additional (surface) conductivity determined by the following factors: increase of inner area of pore and fracture surface of film-bound water in the rock and, thus, charge density; double electrical layer of clay fraction; interlaminar conductivity against electric charges in three-layer clay minerals; formation of electrically conductive minerals (pyrite) in the reservoir rock. In the case of anisotropy of electrically conductive clay partings in a bed, rock resistivity decreases with the increase of borehole inclination. Increased fracturing of a rock may cause its increased electric conductivity. Geological attributes of promising low-resistivity reservoirs are determined. The mentioned petrophysical reasons for the formation of rocks with higher electric conductivity (not accounted for in the course of well log data interpretation) are defined by the following physical principles: formation of surface electric circuit; increase of charge density; increase of charge mobility.

For citation: Mel'nik I.A. Reasons for formation of low-resistivity oil saturated reservoirs. *Geologiya nefi i gaza = Oil and gas geology*. 2018;(6):129–136. DOI: 10.31087/0016-7894-2018-6-129-136.

OIL AND GAS RESERVOIRS

За последние 15 лет опубликованы десятки работ по выявлению нефтегазонасыщенных коллекторов с пониженным удельным электрическим сопротивлением (УЭС) в терригенных и карбонатных пластах. По материалам геофизических исследований скважин (ГИС) эти низкоомные коллекторы интерпретируются как водонасыщенные, вследствие чего их часто пропускают.

В публикациях отечественных и зарубежных авторов были выделены следующие наиболее частые причины образования низкоомных коллекторов [1–16]:

- присутствие в породе электропроводящих минералов группы пирита);
- тонкое переслаивание глин с пониженным УЭС (анизотропия пород);
- повышенная глинистость коллекторов, мелкозернистость, микропористость;
- влияние связанной водонасыщенности;
- фациальная обстановка седиментации;
- диагенетические и катагенетические преобразования минералов и цемента;
- текстурные особенности распределения и состава глинистого минерала;
- влияние трещин;
- большой угол искривления скважин;
- присутствие шунтирующей поверхностной пленочной воды.

Среди перечисленных причин выделяются как процессы преобразования пород, так и их приобретенные свойства, характеристики и вещества, влияющие на УЭС. Причем по физико-химической сути некоторые перечисляемые положения дублируются. Например, представлены частный (тонкая слоистость) и общий (текстурные особенности) признаки одного и того же явления. К тому же очень часто следствие путают с причиной, тем самым нарушая закономерные понятия о причинно-следственных связях.

В итоге смешение и отсутствие в различении причин и следствий, частного и общего, процессов и приобретенных свойств в перечисленных причинах образования низкоомных коллекторов приводит к ошибочному представлению доминанты влияния на УЭС и определению первопричины рассматриваемого явления. Все это может вызывать непонимание оснований образования низкоомных интервалов и построение принципиально неверных моделей.

Проведем анализ и классификацию заявленных причин, а также определим причинно-следственные связи формирования коллекторов с пониженным УЭС.

Анализ и обобщение

В основе процесса появления электрического тока (соответственно его измерения) лежит условие образования замкнутой электрической цепи. Это

необходимое, но не достаточное условие для формирования пород с повышенной (относительно ожидаемой) электрической проводимостью. Вторым и достаточным условием являются неучтенные при интерпретации ГИС *повышения плотности и (или) подвижности* зарядов в электрической цепи пород.

В водонасыщенных гетерогенных средах, как правило, параллельно сквозному электрическому току ионов в воде выстраивается сеть поверхностной (в сообщающихся порах и трещинах) проводимости. Поверхностную электрическую проводимость представляют ионы двойного электрического слоя (ДЭС) глинистой и алевролитовой фракций, катионы межслоевой электрической проводимости трехслойной глинистой фракции и электроны проводящих минералов группы пирита. Присутствие связанной воды в глинистой и алевролитовой фракциях — необходимое условие образования свободных зарядов и, соответственно, электрической цепи. Связанная вода находится в адсорбционном (силы Ван-дер-Ваальса и электростатические), диффузионном (кулоновские силы) и рыхлосвязанном (силы поверхностного натяжения) состояниях (Гудок Н.С. и др., 2007; Кобранова В.Н., 1986; [2]).

Пленка рыхлосвязанной воды присутствует в основном на поверхности пор алевролитистой и мелкопесчанистой фракций, а площадь ее поперечного сечения зависит от радиуса кривизны поверхности. С уменьшением радиуса кривизны увеличивается сила поверхностного натяжения и устойчивы пленки воды, тем самым уменьшается ее толщина и площадь поперечного сечения. С уменьшением площади сечения понижается поверхностная компонента УЭС породы. С уменьшением радиуса капилляров, в свою очередь, увеличивается удельная площадь поверхности, что приводит к большей плотности зарядов породы и ее электрической проводимости. Поэтому в нефтенасыщенных мелкопористых гидрофильных песчано-алевролитовых породах, где значительную долю порового пространства занимает рыхлосвязанная пленка воды, с увеличением пористости УЭС будет уменьшаться. Это видно по зависимостям, приведенным в работах [9, 13, 14].

В трехслойных глинистых минералах группы монтмориллонита наличие межслоевого обменного катионного комплекса позволяет повышать концентрацию катионов в межслоевом пространстве, тем самым значительно увеличивать межслоевую электрическую проводимость глинистой фракции [2]. Межслоевую проводимость можно причислить к одному из видов поверхностной электрической проводимости в модели заполнения стенок порового пространства глинистым материалом параллельно участкам водных растворов. С увеличением содержания глинистых минералов с высокой сорбционной способностью группы монтмориллонита, гидрослюды) увеличивается связанная водонасыщенность

песчаных пород. Соответственно увеличивается подвижность и плотность зарядов поверхностного слоя как при межслоевой проводимости, так и при ДЭС. Но если в песчаной породе увеличивается содержание каолинита, то даже при неизменной глинистости произойдет снижение поверхностной электрической проводимости. Это обусловлено тем, что из всех глинистых минералов каолинит обладает наименьшей сорбционной способностью и емкостью катионного обмена в отсутствии межслоевой проводимости. Поэтому трансформация минерального состава цемента может внести в электрическую проводимость пород значительные изменения (Кобранова В.Н., 1986; [2, 15]).

Доля поверхностной электрической проводимости в общей проводимости породы сильно зависит от минерализации свободной (поровой) воды. При минерализации воды выше 30 г/л (по Б.Ю. Вендельштейну) изменение УЭС породы в большей степени зависит от изменения пористости (к тому же, ионы солей разрушают сольватные слои). При меньшей минерализации воды вклад поверхностной проводимости становится весомей, чем доля проводимости свободной воды. Но и при высокой минерализации воды возможны ситуации, когда поверхностная проводимость может быть выше поровой, например, увеличение плотности зарядов на поверхности электропроводящих слоев может происходить вследствие вторичных геохимических преобразований, сильной пиритизации, увеличении удельной внутренней поверхности и т. д. (Гудок Н.С. и др., 2007).

Значительное повышение глинистости в песчаных интервалах вплоть до образования тонких глинистых прослоев (до 30 см), как правило, приводит к понижению УЭС всего исследуемого пласта [2, 8, 10, 16]. Причем данные латерально протяженные прослои не выделяются на каротажных диаграммах вследствие их незначительных толщин, поэтому продуктивные пласты с низким УЭС пропускаются.

Латеральная анизотропия совокупности глинистых слоев приводит к ухудшению вертикальной проницаемости флюидов относительно ее горизонтальной компоненты. Поэтому подвижность электрических зарядов по вертикали и горизонтали будет отличаться, а электрическая проводимость пласта будет определяться вертикальной и латеральной компонентами [8, 16]. В таком случае разница в показаниях электрических приборов для наклонной и вертикальной скважин зависит от угла наклона относительно вертикальной оси. Покажем это на примере вычисления двухкомпонентной проводимости по формуле

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_z \cos \alpha)^2 + (\sigma_x \sin \alpha)^2},$$

где $\sigma_{z,x}$ — удельная электрическая проводимость породы по вертикали и латерали соответственно; α — угол наклона скважины относительно вертикальной оси.

Согласно предложенной модели, вертикальная и горизонтальная компоненты проводимости пласта могут отличаться в 3–5 раз [16]. Тогда возьмем $\sigma_z = 0,1$ см/м; $\sigma_x = 0,3$ см/м и при $\alpha = 0$ получаем УЭС породы $\rho_0 = 10$ Ом · м, при $\alpha = 30^\circ$ — $\rho_{30} = 5,7$ Ом · м. С увеличением угла наклона показание прибора УЭС породы уменьшится до предельного значения — 3,3 Ом · м, т. е. исследуемый слоистый пласт при больших углах наклона скважины будет представлять собой идеальный низкоомный объект.

Таким образом, анализируя все перечисленные причины образования низкоомного коллектора, можно выстроить следующие причинно-следственные цепочки формирования продуктивных пластов с пониженным УЭС. Рассмотрим базовый процесс его образования при осадконакоплении: *фациальная обстановка седиментогенеза* → *полиминеральный литотип породы* → *сорбция* → *образование пленочно-связанной воды* → *появление поверхностной проводимости* → *заполнение УВ* → *образование низкоомного коллектора*. Видно, что первопричиной является процесс седиментации, формирующий соответствующий песчаный литотип породы, а именно мелкогранулярной либо внутрипорово-структурированной или слоистой глинистости, а также пиритизированный по поверхности сообщающихся пор. В основном это зависит от фациальной обстановки (например, в барах). Процессы сорбции глинистыми минералами молекул воды и образования ее связанного состояния по поверхности пор формируют замкнутую электрическую цепь, в которую могут быть встроены высокоэлектропроводящие минералы группы пирита, формирующие отдельную электрическую сеть. А так как УЭС минералов группы пирита очень низкое (10^{-4} – 10^{-2} Ом · м), то их влияние значительно как при параллельном, так и при последовательном соединении. Выделяется три последовательных процесса, связанных между собой: седиментогенез, сорбция и поверхностная проводимость. Эти процессы определяют стадийность образования вещества, материала, структуры: литотип породы, электропроводящие минералы и связанную воду (поверхностную электрическую цепь). В этом случае при заполнении коллектора нефтью проявляется свойство низкоомности.

Процессы диагенеза и катагенеза также являются причиной преобразования веществ и изменяют свойства связанной воды. Качество и интенсивность этих изменений зависят от глубины залегания пласта, а локально-латеральные изменения в пределах структур III–IV порядков обусловлены литофациальными условиями осадконакопления.

На седиментационно-катагенетические процессы преобразования породы в свою очередь могут наложиться вторичные эпигенетические процессы трансформации веществ. По сути, вторичные процессы локальны и проявляются в результате образования тектонических каналов (разломов растяжения,



OIL AND GAS RESERVOIRS

трещин) миграции глубинных флюидов, которые меняют геохимические (кислотно-щелочные) и петрофизические (проницаемость) условия существования пористой среды. В этом случае наложенно-эпигенетическая пиритизация и пелитизация полевых шпатов является следствием тектонического процесса, представляющего первопричину низкоомности коллектора [17–20]. Однако при вторичных геохимических процессах свойство низкоомности не всегда обусловлено формированием электропроводящих слоев. Повышенная проводимость может быть связана и с увеличением плотности катионов в свободном растворе. Это четко показано в работе С.М. Шевченко и др. [21], где при неполной гидрослюдизации (глауконитизация происходит при внедрении свободного иона калия) монтмориллонита в свободной воде образуется повышенное содержание катионов железа, уменьшающее УЭС породы.

Таким образом, причинно-следственную цепь при наложенно-эпигенетических процессах можно выстроить следующим образом: *тектонический процесс → разломы растяжения и трещины → флюидодинамика → вторичные геохимические процессы → образование минералов группы пирита, пелитов, свободных катионов → появление дополнительной проводимости → заполнение УВ → образование низкоомного коллектора.*

Минералы группы пирита в природных условиях, как правило, образуются вследствие реакции взаимодействия сероводорода и железистых соединений, растворенных в воде. При низких температурах (менее 200 °С) в большинстве случаев продуктом реакции на первой стадии являются метастабильные моносulfиды железа, которые затем переходят в пирит [22]. В гидротермальных системах при изменении термобарических условий среды (ниже 100 °С) и при pH около 5–6 происходит пиритизация. В этом случае формирование пирита проходит через стадию гидротроилитизации, а при pH = 4–5 пиритизация осуществляется непосредственно из раствора. В щелочной среде при pH = 7–9 образуется моносulfид железа, который через некоторое время превращается в пирит.

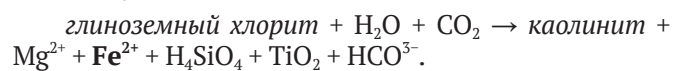
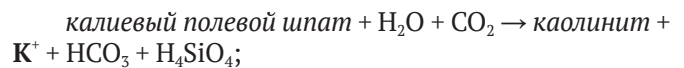
Присутствие серы (либо сероводорода) в углеводородах и железа в той или иной форме приводит к образованию в песчаной среде вторичных минералов группы пирита. Получается, что они могут быть связаны как с процессами миграции флюидов (вода, рассолы, нефть, растворенные газы, смеси) с наложенным эпигенезом в земной коре, так и с осадконакоплением в восстановительных условиях. Многочисленные исследования показали, что к доминирующему фактору присутствия пирита в песчаных отложениях относится процесс наложенного эпигенеза [23]. В этом случае пирит может служить индикатором вероятного присутствия УВ.

Корреляционный анализ между выборками интенсивностей процессов пиритизации и каолини-

зации на территории Западной Сибири позволил выявить следующую закономерность — для нефтенасыщенных интервалов между выборками рассматриваемых интенсивностей всегда присутствует положительная корреляция (рис. 1), а для водонасыщенных пластов регрессия между ними полностью отсутствует.

Положительная корреляция ($R = 0,88$) свидетельствует о том, что в нефтенасыщенных пластах парагенез рассматриваемых процессов обусловлен присутствием УВ (см. рис. 1). Возможно, что в процессе формирования залежи с распадом гидратной оболочки частиц «микроневфти» на нефть и временно диссоциированную воду с образованием избытка свободных ионов водорода pH уменьшается до 4–5. Гидроксильная группа, в свою очередь, идет на образование гидроксида железа, и с присутствием сероводорода пиритизация будет проходить одностадийно, совместно с каолинизацией породы [22–24].

Рассмотрим процесс каолинизации. В результате поступления глубинных флюидов с растворенной углекислотой углекислотный метасоматоз может протекать следующим образом [25]:



В кислых средах (pH = 4–5) 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. И самое важное — образующиеся катионы железа и калия будут диффундировать к отрицательно заряженной глинистой поверхности, тем самым увеличивая плотность зарядов проводимых поверхностных слоев.

Наибольшей площадью сорбционной поверхности и емкостью катионного обмена обладает группа глинистых минералов (смектитов), образующихся в слабощелочной среде в процессе гидролиза, в результате последующего ощелачивания глубинных кислых гидротерм [25]. И наоборот, в кислых средах при гидрослюдизации монтмориллонита в воде появляются свободные катионы, повышающие плотность зарядов.

Интенсивности наложенно-эпигенетических процессов сильно зависят от проницаемости (трещиноватости) гетерогенной среды [23]. Также плотность сквозного электрического тока прямо пропорциональна подвижности зарядов, т. е. связана с трещиноватостью породы (Кобранова В.Н., 1986). С увеличением трещиноватости среды увеличивается средняя длина свободного пробега зарядов, что в конечном итоге приводит к увеличению электрической проводимости.

Рис. 1. Сопоставление интенсивностей вторичных процессов пиритизации с каолинитизацией в нефтенасыщенных интервалах месторождения Самотлор

Fig. 1. Comparison of secondary pyritization and kaolinisation processes in oil saturated intervals of Samotlor field

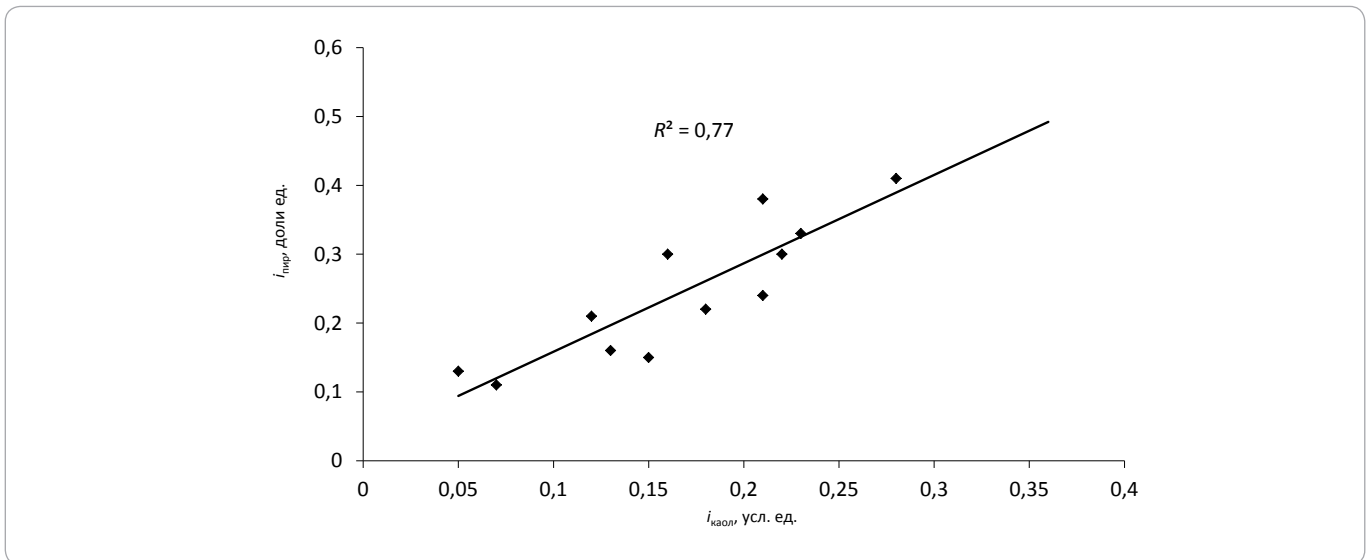
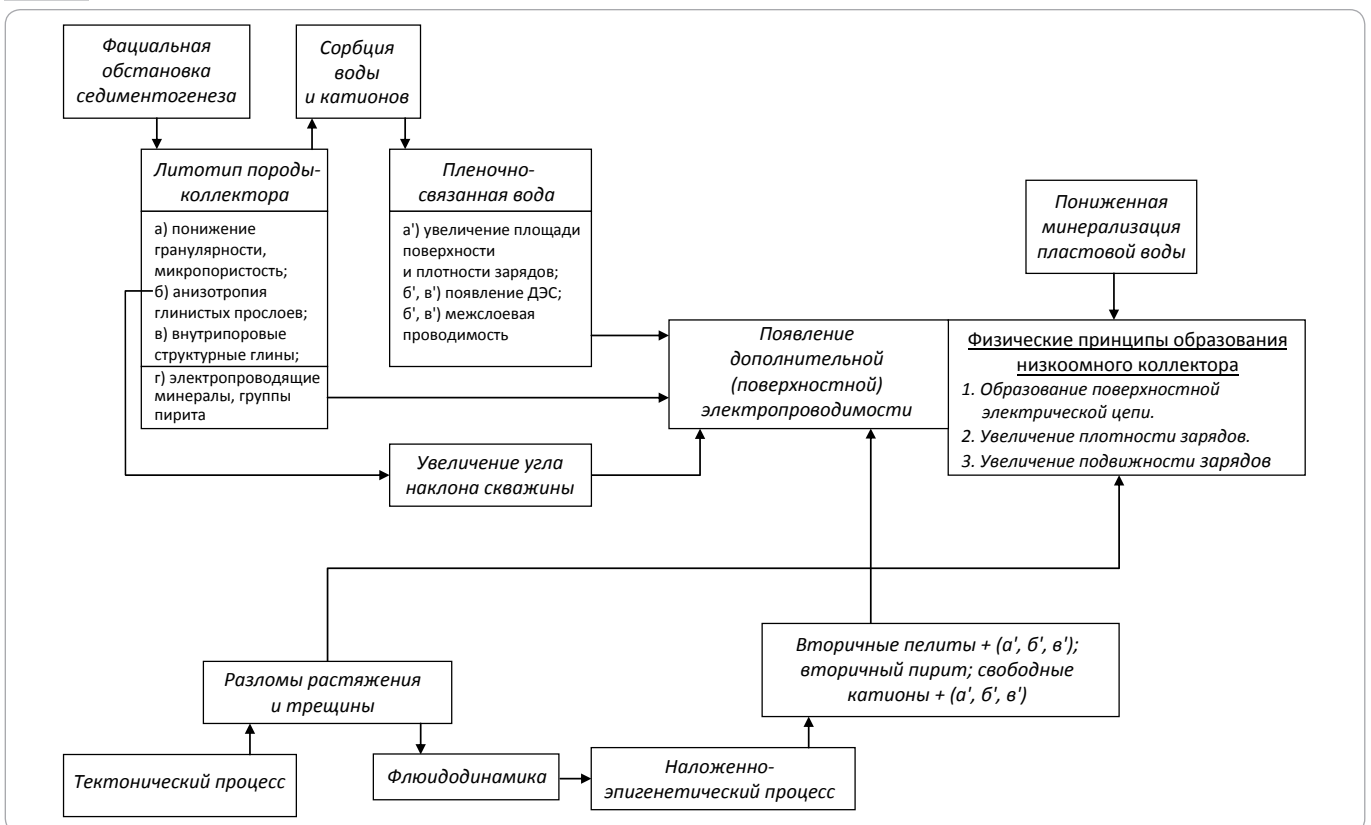


Рис. 2. Блок-схема систематизации наиболее вероятных причин образования нефтегазонасыщенных низкоомных коллекторов

Fig. 2. Schematic systematisation diagram of most probable reasons for formation of low-resistivity oil and gas saturated reservoirs



Поэтому в зонах с повышенной проницаемостью необходимо проводить корректировку ее опосредованного и непосредственного влияния на УЭС породы.

Обобщая сказанное, отметим, что проявление низкоомных коллекторов приводит к образованию двух комплексов причинно-следственных связей с

различными первопричинами (рис. 2). В одном случае — это *фациальная обстановка* процесса осадконакопления, во втором — *тектонический процесс*, в результате которого образуются каналы флюидомиграций. Геологический процесс служит причиной образования веществ, пустот и форм их распределений

OIL AND GAS RESERVOIRS

в пространстве, которые, в свою очередь, изменяют первичные условия существования породы. Эти вещественно-структурные изменения порождают следующие петрофизические или геохимические процессы преобразования материи. Поэтому в общем случае *вторичной* геологической причиной всегда будет либо литотип пород (четыре типа проводников), определяющий присутствие пленочно-связанной воды и электропроводящих минералов, либо наличие разломов растяжения и трещин, на основе которых будет развиваться наложенно-эпигенетический процесс с появлением дополнительной поверхностной проводимости.

Вторичная пелитизация одновременно связана с сорбционным процессом при образовании ДЭС и межслоевой проводимости глинистой фракции (см. рис. 2). Свободные катионы, присутствующие как в поровом растворе, так и в связанном состоянии глинистых минералов (в процессе наложенного эпигенеза), также увеличивают плотность зарядов поверхностного слоя.

Сформированная поверхностная электропроводимость может стать причиной понижения УЭС породы в случае соответствующего повышения ее вклада в общую электропроводимость относительно проводимости свободной воды. Данное условие отражено в блок-схеме как «пониженная минерализация пластовой воды». К сожалению, это не всегда учитывается при анализе причин появления низкоомных коллекторов. Например, поверхностную проводимость часто связывают с сидеритом (карбонат железа) [2]. Однако известно, что УЭС сидерита достаточно высокое (около $10-10^3$ Ом · м); это намного выше УЭС пластовой воды, которая при температуре 40–50 °С и минерализации ~30 г/л составляет 0,2 Ом · м. В этом случае при сидеритизации песчаника УЭС породы будет повышаться.

Выводы

Анализ и обобщение причин образования низкоомных нефтегазонасыщенных коллекторов позволили выделить два комплекса геологических

причинно-следственных связей, обуславливающих существование петрофизических и физических причин низкоомности пород: *фациальная обстановка* процесса осадконакопления и *тектонический процесс*, образующий каналы флюидомиграций.

Оба геологических процесса приводят к появлению дополнительной (поверхностной) электропроводимости, определяющейся следующими факторами:

- увеличением внутренней площади поровой и трещинной поверхностей пленочно-связанной воды в породе и соответствующей плотности зарядов;
- ДЭС глинистой фракции;
- межслоевой проводимостью электрических зарядов в трехслойных глинистых минералах;
- образованием в породе коллектора электропроводящих минералов группы пирита.

В случае анизотропии глинистых электропроводящих прослоев пласта увеличение угла наклона скважин приводит к понижению УЭС породы. Повышение трещиноватости породы может привести к повышению ее электропроводности.

Перечисленные петрофизические причины образования пород с повышенной электропроводимостью (неучтенной при интерпретации данных ГИС) обусловлены следующими физическими принципами:

- образованием поверхностной электрической цепи;
- повышением плотности зарядов;
- повышением подвижности зарядов.

Таким образом, перечисленные геологические процессы могут определять присутствие низкоомных коллекторов (с относительно низкой минерализацией пластовой воды). А классификация наиболее часто встречающихся причин проявления пластов с пониженным УЭС позволяет построить реалистичную модель низкоомности уже на стадии разведки УВ-залежей.

Литература

1. Зарипов О.Г., Сонич В.П. Влияние литологии пород-коллекторов на удельное электрическое сопротивление пластов // Нефтяное хозяйство. – 2001. – № 9. – С. 18–21.
2. Зубков М.Ю. Кристаллографическое и литолого-петрографическое обоснование электрических свойств минералов железа, глин и терригенных коллекторов (на примере пластов БВ₈ и ЮВ₁ Повховского месторождения). Ч. 1; 2 // Горные ведомости. – 2008. – № 11; 12. – С. 20–32; 30–53.
3. Ежова А.В. Методика оценки нефтенасыщенности низкоомных коллекторов в юрских отложениях юго-востока Западно-Сибирской плиты // Известия ТПУ. – 2006. – Т. 309. – № 6. – С. 23–26.
4. Леонтьев Е.И., Малыхин А.Я. и др. Аномальная электропроводность связанной воды и ее влияние на геофизические параметры // Особенности геологического строения и нефтенасыщенности продуктивных горизонтов Западно-Сибирской низменности : Тр. Тюменского индустриального института. – Тюмень : Изд-во ТИИ, 1974. – Вып. 26. – С. 173–179.
5. Чикишев А.Ю., Чикишев Ю.А., Ковалева Н.П. и др. Причина наличия низкоомных коллекторов юрских отложений Каймысовского свода (в порядке обсуждения) // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 8. – С. 42–45.
6. Чикишев Ю.А., Ковалева Н.П., Резниченко В.А., Шишкин Р.А. Проблема выделения низкоомных коллекторов сложного строения юрских отложений Каймысовского свода // НТВ ОАО «НК «Роснефть». – 2008. – № 1. – С. 17–21.

7. Теплоухов В.М., Наконечный А.В., Теплоухов А.В. Выделение низкоомной фации и ее влияние на геологическую модель пласта Ю₁₋₁ Шингинского месторождения // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 6. – С. 85–87.
8. Гусев С.И. Анализ причин, приводящих к снижению удельного электрического сопротивления продуктивных коллекторов // Нефтепромысловое дело. – 2016. – № 5. – С. 36–40.
9. Гильманова Р.Х., Егоров А.Ф., Кротов С.А., Зиятдинов Р.Р. Влияние литологии на сопротивление нефтенасыщенных карбонатных коллекторов в переходной зоне и их разработка // Нефтепромысловое дело. – 2012. – № 1. – С. 84–89.
10. Буллер Д. Выделение продуктивных песчаников в тонкослоистых низкоомных русловых отложениях в скважинах старого фонда // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. – 1993. – № 1. – С. 26–32.
11. Виноградов В.Г. Влияние минерального состава цемента полимиктовых песчаников и алевролитов на их удельное сопротивление // Особенности геологического строения и нефтенасыщенности продуктивных горизонтов Западно-Сибирской низменности : Тр. Тюменского индустриального института. – Тюмень : Изд-во ТИИ, 1974. – Вып. 26. – С. 185–189.
12. Кузьмичев О.Б. Методика оценки характера насыщения сложно построенных, в том числе низкоомных, нефтенасыщенных коллекторов на месторождениях ООО «Лукойл-Западная Сибирь» // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 11. – С. 26–32.
13. Комова А.Д., Дьяконова Т.Ф., Исакова Т.Г., Бата Л.К., Калугин А.А., Терентьев В.Ю. Особенности строения и оценки нефтенасыщенности верхнеюрских низкоомных коллекторов на примере Ватьеганского месторождения Западной Сибири // Экспозиция Нефть Газ. – 2016. – Т. 53. – № 7. – С. 17–21.
14. Матвеев В.С., Рыжов А.А. Геофизическое обеспечение региональных гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических и геоэкологических исследований // Разведка и охрана недр. – 2006. – № 2. – С. 50–57.
15. Грим Р.Э. Минералогия и практическое использование глин / Под ред. В.П. Петрова. – М. : Мир, 1967. – 510 с.
16. Cai Jun, Wu Hongshen, Guo Shusheng. Low Resistivity Pay Evaluation Using Triaxial Induction in Offshore South China // International Oil and Gas Conference and Exhibition in China. – SPE, 2010.
17. Бужук Л.А., Поливцев А.В., Архипова Л.Д. Влияние вторичных преобразований пород-коллекторов на электрофизические свойства по результатам электронномикроскопических исследований // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Шестые научные чтения Ю.П. Булашевича : сб. мат-лов конференции. – Екатеринбург: УРО РАН, 2011. – С. 52–55.
18. Мельник И.А. Выделение нефтенасыщенных интервалов на основе переинтерпретации ГИС в низкоомных коллекторах-песчаниках // Нефтяное хозяйство. – 2008. – № 4. – С. 34–36.
19. Мельник И.А., Ерофеев Л.Я. Физико-геохимическая модель низкоомного коллектора и ее практическое применение // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – № 3. – С. 46–50.
20. Мельник И.А. Причины понижения электрического сопротивления в низкоомных коллекторах // Геофизические исследования. – 2014. – Т. 15. – № 4. – С. 44–53.
21. Шевченко С.М., Шевченко В.Н., Губарев О.В., Бушковский А.П. Гипотеза причины образования низкоомного коллектора на Катыльгинском месторождении // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2008. – № 6. – С. 13–15.
22. 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.
23. Мельник И.А. Интенсивность пиритизации как индикатор характера насыщения юрских пластов Томской области // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 3. – С. 41–49.
24. Тараненко Е.И., Безбородов Р.С., Хакимов М.Ю. Преобразование коллекторов в нефтяных залежах // Геология нефти и газа. – 2001. – № 2. – С. 18–22.
25. Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Л. : Недра, 1992. – 239 с.

References

1. Zarirov O.G., Sonich V.P. Influence of reservoir rock lithology on beds' resistivity. *Neftyanoe khozyaystvo*. 2001;(9):18–21.
2. Zubkov M. Yu. Crystallographic and litho-petrographic substantiation of electric behaviour of iron minerals, clay and terrigenous reservoirs (by the example of BV₃ and JV₁ beds in the Povkhovsky field). *Gornye vedomosti*. 2008;(11;12):20–32;30–53.
3. Ezhova A.V. Methodology for oil saturation evaluation in low-resistivity reservoirs of the Jurassic formations, south-eastern part of the West Siberian Plate. *Izvestiya TPU*. 2006;309(6):23–26.
4. Leont'ev E.I., Malykhin A.Ya. et al. Abnormal electric conductivity of bound water and its influence on geophysical parameters. *Osobennosti geologicheskogo stroeniya i neftenasyschennosti produktivnykh gorizontov Zapadno-Sibirskoi nizmennosti* : Tr. Tyumenskogo industrial'nogo instituta. – Tyumen' : Izd-vo TI, 1974. Issue 26. pp. 173–179.
5. Chikishev A.Yu., Chikishev Yu.A., Kovaleva N.P. et al. The reason of presence of low-resistance reservoirs of Kaymysovskiy arch Jurassic deposits. *Neftyanoe khozyaystvo*. 2006;(8):42–45.
6. Chikishev Yu.A., Kovaleva N.P., Reznichenko V.A., Shishkin R.A. Problem of delineation of structurally complex low-resistivity Jurassic reservoirs in the Kaimysovsky Arch. *NTV OAO «NK «Rosneft»*. 2008;(1):17–21.
7. Teploukhov V.M., Nakonechniy A.V., Teploukhov A.V. Separation of a low-resistance facies and its impact on the geological model of the Yu₁₋₁ layer of Shinginskoye field. *Neftyanoe khozyaystvo*. 2013;(6):85–87.
8. Gusev S.I. Analysis of the reasons for low resistivity of productive pays. *Neftpromyslovoe delo*. 2016;(5):36–40.
9. Gil'manova R.Kh., Egorov A.F., Krotov S.A., Ziyatdinov R.R. Oil and gas fields of Orenburg region illustrate application of methods specifying initial data to develop geological models. *Neftpromyslovoe delo*. 2012;(1):84–59.
10. Buller D. Old wells: delineation of pay sands in thin-bedded low-resistivity channel deposits. *Neft', gaz i neftekhimiya za rubezhom*. 1993;(1):26–32.
11. Vinogradov V.G. Cement composition in polymictic sandstone and siltstone: influence on resistivity. *Osobennosti geologicheskogo stroeniya i neftenasyschennosti produktivnykh gorizontov Zapadno-Sibirskoi nizmennosti* : Tr. Tyumenskogo industrial'nogo instituta. Tyumen' : Izd-vo TI, 1974. Issue 26. pp. 185–189.

OIL AND GAS RESERVOIRS

12. Kuz'michev O.B. A method of the nature assessment of complicatedly-built oil-saturated reservoirs, including low-resistant ones, in the fields of LLC "LUKOIL-Western Siberia". *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii*. 2016;(11):26–32.
13. Komova A.D., D'yakonova T.F., Isakova T.G., Bata L.K., Kalugin A.A., Terent'ev V.Yu. Features of the structure and evaluation of oil saturation factor of low-resistivity upper Jurassic reservoirs on example of the Vat'egan field of Western Siberia. *Ekspozitsiya Neft Gaz*. 2016;53(7):17–21.
14. Matveev B.C., Ryzhov A.A. Geophysical support of regional hydrogeological, geotechnical, geocriological, and geoecological investigations. *Razvedka I okhrana nedr*. 2006;(2):50–57.
15. Grim R.E. Mineralogy and practical use of clay. In: V.P. Petrov ed. Moscow: Mir; 1967. – 510 p.
16. Cai Jun, Wu Hongshen, Guo Shusheng. Low Resistivity Pay Evaluation Using Triaxial Induction in Offshore South China. In: International Oil and Gas Conference and Exhibition in China. SPE, 2010.
17. Buzhuk L.A., Polivtsev A.V., Arkhipova L.D. Influence of reservoir rocks secondary transformations on electrophysical properties: the results of electron microscopy studies. *Glubinnoe stroenie, geodinamika, teplovoe pole Zemli, interpretatsiya geofizicheskikh polei. Shestye nauchnye chteniya Yu.P. Bulashevicha : sb. mat-lov konferentsii*. – Ekaterinburg: URO RAN; 2011. pp. 52–55.
18. Melnik I.A. Oil-saturated intervals separation on the basis of reinterpretation of wells geophysical study results in low resistance reservoirs. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2008;(4):34–36.
19. Mel'nik I.A., Erofeev L.Ya. Physical-geochemical model of low-resistance collector and its practical application. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii*. 2014;(3):46–50.
20. Mel'nik I.A. Cause of low electrical resistance in the low-resistance reservoirs. *Geofizicheskie issledovaniya*. 2014;15(4):44–53.
21. Shevchenko S.M., Shevchenko V.N., Gubarev O.V., Bushkovskii A.P. Hypothesis of low-resistivity reservoir formation in the Katyl'ginsky field. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*. 2008;(6):13–15.
22. Kozerenko S.V., Khramov D.A., Fadeev V.V. et al. Studies of pyrite formation mechanism in aqueous solutions at low temperature and pressure. *Geokhimiya*. 1995;(9):1553–1565.
23. Mel'nik I.A. Pyritization intensity as an indicator of the nature of the Jurassic formations saturation in Tomsk region. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii*. 2016;(3):41–49.
24. Taranenko E.I., Bezborodov R.S., Khakimov M.Yu. Transformations of reservoirs in oil pools. *Geologiya nefiti i gaza*. 2001;(2):18–22.
25. Lebedev B.A. Sedimentary basins: geochemistry of epigenetic processes. Leningrad: Nedra; 1992. 239 p.