



Карбонатизация терригенных коллекторов покурской свиты сеноманского яруса севера Западной Сибири: факторы образования и характер распространения

Е. С. Лопатина¹, С. Р. Бембель², Р. М. Хисматуллин¹

¹ ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия

ES_Lopatina2@tnnc.rosneft.ru, rmkhismatullin@tnnc.rosneft.ru

² Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия,

bembelsr@tyuiu.ru

В статье дан обзор публикаций, посвящённых образованию карбонатизации в терригенных породах-коллекторах. Широкое распространение этого явления на многих месторождениях углеводородов и значительное снижение пористости, обусловленное заполнением пустотного пространства карбонатным цементом, обосновывают актуальность изучаемого вопроса. Рассмотрена проблематика формирования пород-флюидоупоров в коллекторе, способных влиять на перераспределение флюидопотоков при разработке месторождения. Отмечается отсутствие общепринятой методики по выявлению и прогнозированию распространения этих интервалов по данным интерпретации геофизических методов исследований скважин, а также невозможность дифференциации по данным сейсморазведки.

Рассмотрены проблемы прогноза распространения карбонатизации на примере изучаемого месторождения X Пур-Тазовской нефтегазоносной области Западной Сибири, где отмечено наличие карбонатизации в виде тонких прослоев, цельных интервалов с различной степенью цементации, а также в виде конкреций. Установлена фациальная приуроченность карбонатизации к наиболее песчаным коллекторам прибрежно-континентальных обстановок. Рассчитано влияние карбонатизации на фильтрационно-емкостные свойства. Выявлено отсутствие взаимосвязи между интенсивностью карбонатизации и близостью разрывных нарушений по материалам рассматриваемого месторождения. Установлено, что карбонатизированные прослои простираются не более чем на первые десятки метров.

На примере других месторождений отражена необходимость учёта карбонатизированных интервалов в петрофизической, геологической и гидродинамических моделях. Показано, что наличие карбонатизации является риском для прорыва флюидов как ввиду естественной трещиноватости, так и после проведения гидравлического разрыва пласта. С этой точки зрения изучение карбонатизированных интервалов и их распространения в объёме залежи позволяет увеличить прогностические возможности гидродинамических моделей, учитывая процессы фильтрации в литологически неоднородном резервуаре.

Ключевые слова: карбонатизация, диагенетические преобразования, конкреции, трещиноватость, сеноманские отложения, литолого-фациальный анализ

Carbonatization of terrigenous reservoirs of the Pokur formation of Senomanian stage in the northern West-Siberian region: factors of occurrence and nature of distribution

E. S. Lopatina¹, S. R. Bembel², R. M. Khismatullin¹

¹ Tyumen Oil Research Center, Tyumen, Russia

² Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

The article observes publications devoted to postsedimentation carbonatization in terrigenous reservoir rocks. The widespread occurrence of this phenomenon in many hydrocarbon deposits and a significant decrease in porosity caused by filling the void space with carbonate cement constitute the relevance of the issue under study. The problems of formation of fluid-resistant rocks in the reservoir, which can influence the redistribution of fluid flows during the development of the deposit, are considered. It is noted that there is no generally accepted methodology for identifying and predicting the distribution of these intervals based on the interpretation of geophysical methods of well survey, as well as the impossibility of differentiation based on seismic data.

The problems of predicting the distribution of carbonatization are considered using the example of the studied field X in the Pur-Taz oil and gas region of Western Siberia, where the presence of carbonatization in the form of thin interlayers, solid intervals with varying degrees of cementation, and also in the form of nodules is noted. The facies association of carbonatization with the most sandy reservoirs of coastal-continental environments has been established. The effect of carbonation on filtration-capacitance properties is calculated. The absence of a relationship between the intensity of carbonatization and the proximity of discontinuous faults based on the materials of the deposit under consideration has been revealed. It is established that the carbonatized interlayers extend no more than the first tens of meters.

Для цитирования: Лопатина Е. С., Бембель С. Р., Хисматуллин Р. М. Карбонатизация терригенных коллекторов покурской свиты сеноманского яруса севера Западной Сибири: факторы образования и характер распространения // Вестник геонаук. 2025. 4(364). С. 3–13. DOI: 10.19110/geov.2025.4.1

For citation: Lopatina E. S., Bembel S. R., Khismatullin R. M. Carbonatization of terrigenous reservoirs of the Pokur formation of Senomanian stage in the northern West-Siberian region: factors of occurrence and nature of distribution. Vestnik of Geosciences, 2025, 4(364), pp. 3–13, doi: 10.19110/geov.2025.4.1

Using the example of other deposits, we focus on the need to consider for carbonatized intervals in petrophysical, geological, and hydrodynamic models. It is shown that the presence of carbonatization is a risk for fluid breakthrough both due to natural fracturing and after hydraulic fracturing. From this point of view, the study of carbonatized intervals and their distribution in the reservoir volume allow increasing the predictive capabilities of hydrodynamic models, taking into account filtration processes in a lithologically heterogeneous reservoir.

Keywords: carbonatization, diagenesis, diagenetic transformations, concretions, fracturing, cenomanian sediments, lithological and facies analysis

Введение

Под карбонатизацией терригенных отложений в настоящей работе, основанной на приведённых литературных источниках, понимаются процессы, приводящие к обогащению пустотного пространства горной породы карбонатами в результате реакции гидроксида кальция с углекислым газом (формула 1) и формированию карбонатного цемента (рис. 1).

Это явление распространено и описано как в отношении резервуаров Западной Сибири (Поднебесных, 2019), так и на месторождениях Красноярского края (Стариков и др., 2020), Анадырского и Западно-Камчатского бассейнов (Карнюшина, 2012), Северного моря (Gibbons и др., 1993), штатов Юта и Колорадо (Taylor и др., 2000), а также в китайской провинции (Cui и др., 2024), что делает проблематику общемировой.

Основная сложность в вопросе изучения карбонатизированных коллекторов заключается в определении природы возникновения карбонатного цемента и соответствующего прогноза распространения таких зон в объёме залежи.

В задачи данного исследования входят прогноз распространения карбонатизированных интервалов в объёме залежи и анализ влияния на разработку месторождения нефти с газовой шапкой. Основной же целью является установление генезиса карбонатизации на месторождении X с учётом имеющейся актуальной научной основы.

Принимая во внимание, что карбонатизированные интервалы обладают аномально упругими характеристиками, обусловленными повышенным значением плотности, логично предположить их прослеживание при атрибутом анализе данных сейсморазведки. Однако с учётом малых толщин карбонатизированных интервалов и их небольших размеров по площади проследить эти прослои по данным сейсморазведки не удалось ввиду недостаточной разрешающей способности сейсмического метода.

Седиментологическое изучение пород по данным исследования полноразмерного керна позволяет точнее исследовать природу, морфологию и относительное время их образования в породе.

Обзор существующих представлений о причинах карбонатизации

Несмотря на значительное количество изученных залежей с карбонатизированными прослоями и длительной историей исследований, на данный момент для них отсутствуют как общепринятая классификация основных типов вторичных изменений, так и критерии закономерностей их распространения. Как следствие, это приводит к недостаточной обоснованности методики прогноза распространения карбонатизации в залежах различного типа (Поднебесных, 2019). В данной работе обобщены сложности, с которыми сталки-

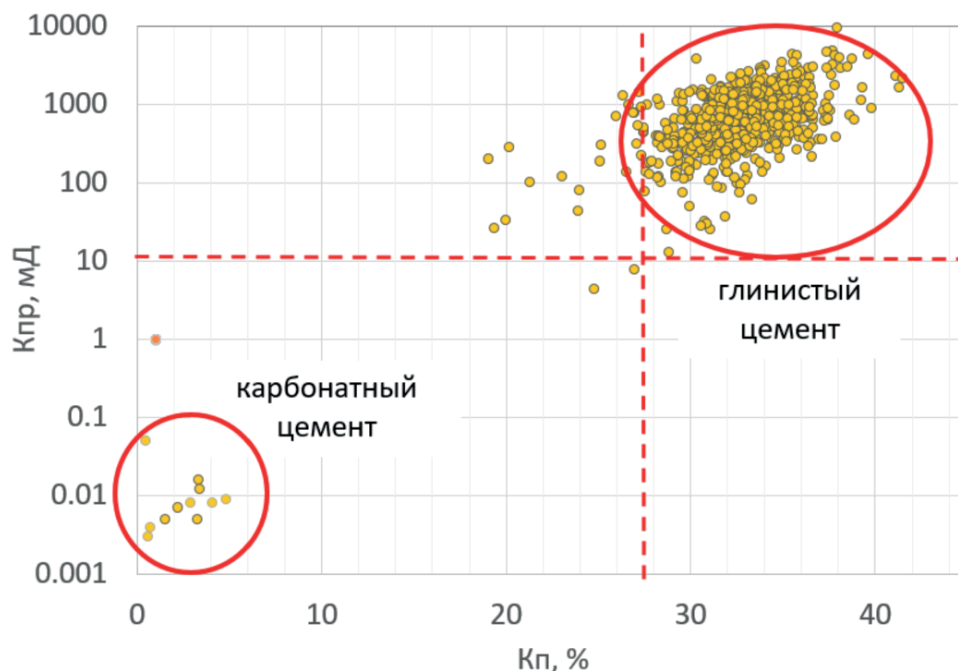


Рис. 1. Ухудшение фильтрационно-емкостных свойств при карбонатизации пород-песчаников фации каналов с влиянием приливов-отливов в зависимости от состава цемента

Fig. 1. Decrease of permeability and porosity in carbonatized sandstones in the fluvial channel facies influenced by tides in terms of cement composition

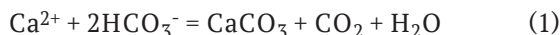


ваются специалисты научно-исследовательских центров, а также описывается проблема недостаточности геолого-геофизической информации.

В литературе по обобщённым исследованиям (Рыкус, 2020) приводятся пять основных условий формирования карбонатизации (рис. 2). Вопросы диагенетического образования карбонатов в разное время были рассмотрены исследователями: Т. И. Гуровой, Е. А. Жуковской, О. Г. Зариповым, Н. М. Недоливко, Г. Н. Перозио, Е. А. Предтеченской, Р. С. Сахибгареевым, И. Н. Ушатинским, О. А. Черниковым и другими. Отмечается, что карбонатизация алеврито-песчаных пород является наиболее распространённым в мезозойских отложениях Западной Сибири процессом, оказывающим наиболее существенное влияние на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) гранулярных коллекторов (Ян, 2019). Важно отметить, что в изучаемом разрезе породы залегают на глубине 700–900 м, поэтому отложения мелового возраста испытали лишь раннедиагенетические преобразования, характеризующиеся формированием преимущественно кальциевого цемента.

Катагенетические изменения, способствовавшие образованию доломитового, сидеритового и анкеритового цемента (Поднебесных, 2019), более широко описанные для юрских отложений Западной Сибири, в данной работе не рассматриваются, т. к. на изучаемом месторождении отсутствуют.

Источниками карбонатизации песчаников (т. е. заполнения пустотного пространства карбонатным цементом) являются растворённый в воде диоксид углерода (CO_2) и уголекислота (HCO_3^-) + Са, происхождение которых связано с растворением раковинного и растительного органического материала (Рыкус, 2020; Walderhaug, 1998). Карбонатизация соответствует формуле:



Заполнение пустотного пространства песчаной породы карбонатным цементом может происходить в раннем диагенезе. Этому процессу благоприятствуют следующие обстановки:

1) межструктурные впадины палеорельефа как зоны с пониженными температурами (Грищенко, 2021);

2) приливо-отливные условия субаэральной экспозиции;

3) заполнение врезанных долин и формирование геохимического барьера (Закревский и др., 2017).

Характерной формой проявления карбонатизации являются также конкреции — небольшие дискретные образования, сформированные в раннем диагенезе (Македонов, 1977; Ян, 2019).

Основными путями формирования постседиментационной карбонатизации (рис. 2) являются процессы выделения уголекислоты и растворённых ионов в результате отжатия минералов из глин при уплотнении породы, деградация органического вещества (сульфатредуцирующие бактерии), формирование зон декомпрессии вблизи добывающих скважин, привнос термальных вод по разломам. Также влияние оказывают процессы преобразования органического вещества на границах водонефтяного (ВНГ) и газонефтяного (ГНК) контактов (Сахибгареев, 1989).

Некоторыми учёными отмечена главенствующая роль процессов вертикальной миграции газодонефтяной эмульсии из нижележащих резервуаров, способствующих формированию залежей нефти в Западной Сибири. Углекислый газ в данном случае обеспечивает подвижность нефти. В качестве аргумента приводится отсутствие карбонатизированных прослоев в областях с отсутствием нефтяных залежей. Связь карбонатизации с древним водонефтяным контактом оспаривается (Касьянов, 2020).

Логично предположить, что если на месторождении обнаружена карбонатизация песчаника, то своей природой она может быть обязана как одному, так и нескольким процессам.

Фактический материал и методика

Изучаемым объектом являются пласты ПК₁₋₇ пур-тазовской свиты нефтегазового месторождения X Пур-Тазовской нефтегазоносной области Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна, вскрытые более чем 700 скважинами. Керновым материалом охарактеризованы 52 скважины, из которых 11 скважина с полноразмерным керном. Детальные седиментоло-

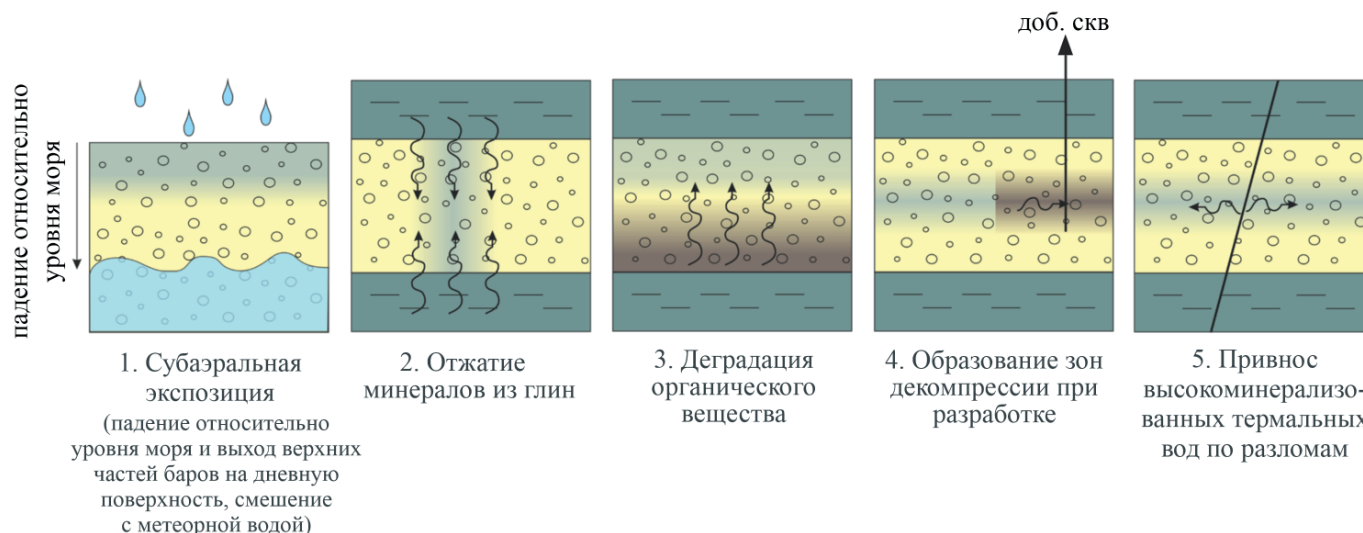


Рис. 2. Генетическая классификация условий образования карбонатизации в породе

Fig. 2. Genetic classification of carbonation formation conditions in the rock

гические исследования были проведены в объёме выноса 1406 м с привлечением бескерновых скважин для оценки масштаба распространения фациальных зон. В скважинах проведён полный комплекс геофизического исследования скважин (ГИС), позволяющий выполнить литологическое расчленение разреза. Сейсмические данные представлены обработанным в 2021 году 3D сейсмическим кубом, неопределённости которого обусловлены наличием мощной (до 140 м) газовой шапки и отсутствием контрастных отражений, связанных с условиями осадконакопления.

Краткое описание фациального строения исследуемой залежи

По результатам проведённого детального литолого-фациального анализа в соответствии с сиквенс-стратиграфической концепцией уточнена обстановка осадконакопления пластов ПК₁₋₇. Породы были сформированы в условиях постепенной бореальной трансгрессии (Конторович и др., 2014) в обстановке приливо-отливной равнины (Лопатина, 2024). Самые ранние из исследуемых отложений (ПК₅₋₇) демонстрируют свидетельства континентальной обстановки (наличие угля, янтаря, ризокреций), затем наблюдается усиление влияния приливов-отливов (ПК₂₋₄) и постепенное затопление (сдвоенные углисто-глинистые слои, ихнофашии *Skolithos-Cruziana*), завершившееся накоплением пляжевых прибрежно-морских отложений пласта ПК₁ (площадное распространение песчаников, увеличение доли монтмориллонита в породе) и полным затоплением территории (накопление глин кузнецовской свиты).

Литолого-петрофизическая характеристика

На месторождении X в разрезе каждой поисково-разведочной и пилотной скважины встречаются карбонатизированные прослои, т. е. интервалы песчано-алевролитовой породы, цемент которой частично или полностью выполнен карбонатными минералами (рис. 3).

Породы, в которых наблюдается карбонатизация, по вещественному составу представлены граувакковыми аркозами и полевошпатово-кварцевыми граувакками.

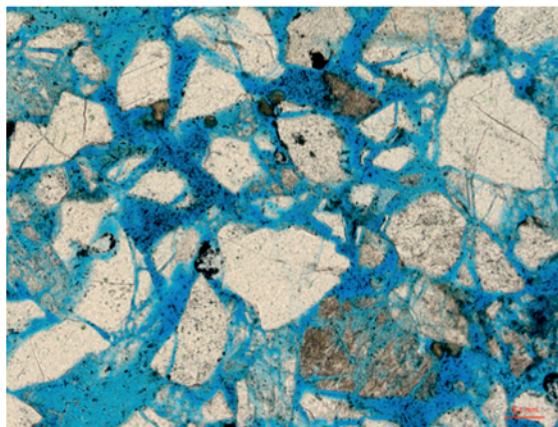
Карбонатизированные песчаники в среднем по минералогическому составу представлены кварцем (43–45 %), полевыми шпатами (33–35 %) средней и слабой степени пелитизации и серицитизации. В составе обломочных пород (13–15 %) отмечаются обломки кремнистых, эффузивных, слюдисто-кремнистых пород, единично халцедона. Слюды составляют 8 % и представлены в основном биотитом в значительной степени хлоритизированным и сидеритизированным. Порово-базальный цемент неравномерный; кальцит агрегатного, мозаичного, пойкилитового строения. Акцессорные минералы представлены цирконом, гранатом, магнетитом, апатитом, шпинелью, гематитом; приурочены к прерывистым слоям. Аутигенные минералы представлены кальцитом цемента, пелитоморфным сидеритом (по биотиту), лейкоксеном (редкие примазки), титанистыми, хлоритом (в виде чешуйчатых, волокнистых, реже червеобразных агрегатов до 2–3 %), единично пиритом. Растительный детрит присутствует в виде единичных углефицированных обломков, иногда со следами ячеистой структуры. Видимые полые поры не отмечаются.

Для базального (48 %) и порово-базального (30 %) цемента средние содержания кальцита составляют 23–45 %, доломита — 5 %, сидерита — до 3 %, редко каолинита или хлорита (2 %).

Мощность карбонатизированных прослоев, по данным из скважин с керном, составляет 0.2–1.3 м, отдельные пропластки достигают толщины 5.2 м. Коэффициент пористости, по данным лабораторных исследований, изменяется в пределах 1–6 %, в среднем составляет 3.6 %. Коэффициент проницаемости изменяется от 1 до 16 мД, в среднем составляет 4.8 мД, зависит от интенсивности карбонатизации и наличия трещиноватости.

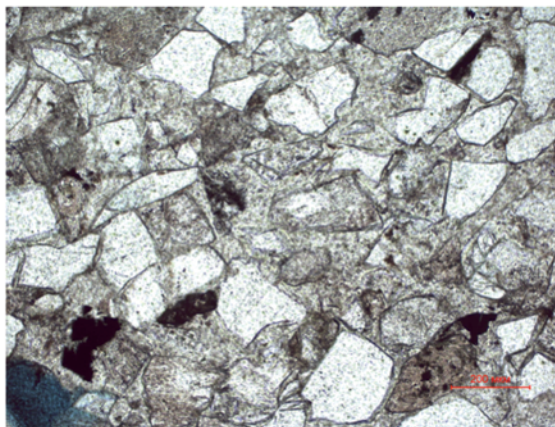
В соответствии с гранулометрическим анализом, карбонатизация песчано-алевролитовых прослоев происходит в породах со средней долей песчаной фрак-

Fct: поры связаны между собой



Скв. 8, шлиф 913/13, гл. по бур. 870.88 м, песчаник средне- и мелкозернистый, глинистый цемент

Fct_c: поры заполнены карбонатным цементом



Скв. 22, шлиф 254, гл. по бур. 915.86 м, песчаник средне- и мелкозернистый, карбонатный цемент

Рис. 3. Примеры песчаника с глинистым и карбонатным цементом

Fig. 3. Examples of sandstone with clay and carbonate cement



ции 65 % (рис. 4, левый столбец) — наибольшей из всех представленных фаций. Таким образом, можно утверждать, что карбонатизации подвержены породы с изначально высокой долей пустотного пространства и небольшим количеством глинистого материала. Текстура таких пород слабо различима, реликтовая от первоначальной фации. Отсутствие ихнофоссилий в породе подтверждает образование осадка в высокоэнергетических условиях осадконакопления, не способствовавших жизнедеятельности роющих организмов.

Генетические типы карбонатизации

В соответствии с выполненным анализом, по керну месторождения X выделены два генетических типа цементации порового пространства карбонатными минералами: раннедиагенетическая и постседиментационная.

Раннедиагенетическая карбонатизация подтверждается наличием окатанных и полуокатанных литокластов овальной, округлой формы мелкозернистого (размером от 1 × 1.5 см до 7 × 8 см) серого карбонатного песчаника с чёткими границами (рис. 5) и отличающейся от вмещающих пород текстурой. Это свидетельствует о размыве и переотложении уже карбонатизированного песчаника. При этом вмещающие песчаные породы содержат глинистый цемент. Если бы карбонатизация происходила в условиях более позднего диагенеза, то подобное включение интракластов было бы невозможно, поскольку порода имеет однородный литологический состав, а значит, граница не была бы такой резкой. Также против гипотезы о формировании конкреций говорит неизометричная морфология карбонатизированных агрегатов и отличающаяся реликтовая текстура этих включений. Таким образом, логично предположить образование карбонатов в условиях субаэрального, раннего диагенеза, связанное с эпизодическим обнажением уже сформированных приливно-отливных баров, выпадением

карбонатов ввиду смешения морской воды и атмосферных осадков, а также последующим размывом и переотложением русловыми потоками при повышении относительного уровня моря. При этом над рассматриваемыми переотложенными обломками залегает маломощный (15 см) прослой карбонатизированного песчаника, связанный с очередным колебанием относительного уровня моря.

Постседиментационная карбонатизация связана с отжатию минерализованных (элизионных) вод из глинисто-алевролитовых разностей, а также привнесом ионов кальция по зонам разломов. Именно такой вид карбонатизации может отличаться локальным площадным распространением, на которое указывают ровные границы карбонатизированных прослоев по керну. Более того, не наблюдается расхождений в показаниях разноглубинных зондов геофизических методов исследования скважин, что указывает на распространение карбонатизации в удалении от ствола скважин, а не нахождение его в виде конкреций.

Не до конца остаётся изученным вопрос о роли микробиальной сульфатредукции, но замечено, что прослой карбонатизированного песчаника в большинстве скважин встречается (рис. 6) на газонефтяном контакте. При этом явной корреляции с ВНК не выявлено.

Распространение карбонатизированных интервалов по разрезу

Общая толщина покурских пластов ПК₁₋₇ на месторождении X составляет около 220 м. Средняя суммарная толщина карбонатизированных прослоев при этом 5.04 м, что составляет 0.02 % от всего разреза. При этом распределение по седиментологическим циклам, т. е. группам пластов со сходной обстановкой осадконакопления, демонстрирует явное преобладание (53 %) карбонатизированных прослоев в прибрежно-континентальных отложениях, к которым относятся фации

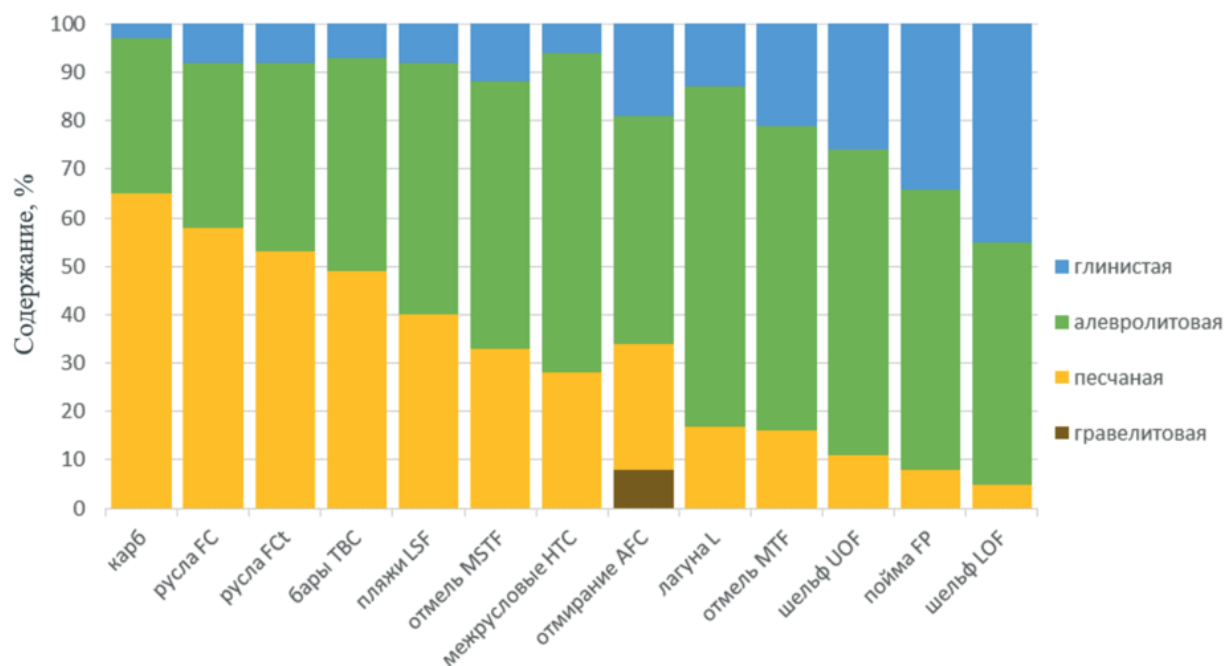


Рис. 4. Среднее распределение гранулометрических фракций по фациям

Fig. 4. Average distribution of granulometric fractions by facies

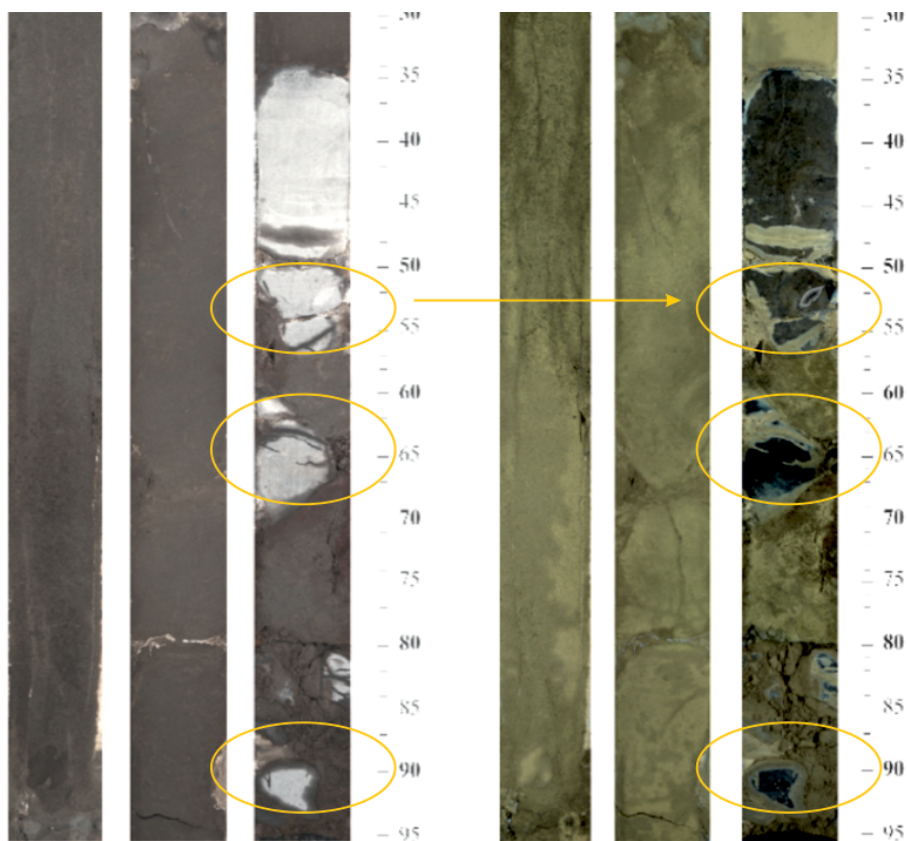


Рис. 5. Обломки карбонатизированного песчаника в массивном песчанике с глинистым цементом. Глубина по керну: 817.55–818.1 м, фото в дневном и УФ-свете

Fig. 5. Fragments of carbonatized sandstone in massive sandstones with clay cement. Core depth: 817.55–818.1 m, photos in daylight and UV light

приливно-отливной равнины (рис. 7). С одной стороны, это может быть связано с изначально улучшенными коллекторскими свойствами русловых отложений пластов ПК₅₋₇. С другой стороны, именно в прибрежно-континентальных обстановках сформировались благоприятные условия для смешивания минерализованных морских вод, наносимых приливами, и пресных вод, приносимых руслами и атмосферными осадками, что способствовало образованию геохимического барьера (Taylor, 2000).

Плотные карбонатные прослои с высоким значением карбонатизации (так называемые плотняки) уверенно выделяются по методам ГИС максимальными пиками плотности RHOV, сопротивления RT, а также минимальными значениями водородосодержания NPHI.

Согласно макроописанию полноразмерного керна выделено 4 текстурных типа карбонатизации. Она проявляется частичной или полной цементацией в виде тонких прослоев, а также конкреций (рис. 8). Полная и частичная цементация ввиду своей равномерности распознаётся методами ГИС как «плотняки» (без определённого граничного значения, толщиной не менее 0.4 м по разрешающей способности ГИС). Цементация прослоями (обычно 1–3 см) или конкрециями, напротив, определяется лишь по керну, но не диагностируется на кривых ГИС, а значит, не учитывается при моделировании. В литературе описаны возможные сценарии учёта карбонатизации в петрофизической модели через трёхмерные нелинейные петрофизические зависимости (Байков и др., 2018), однако эта методика не может считаться универсальной.

Отсутствие признаков нефтенасыщения в карбонатизированных прослоях свидетельствует о том, что сначала произошла карбонатизация осадка, затем наполнение углеводородами.

Распространение карбонатизированных интервалов по площади

В результате исследования старого неизолированного керна в объёме 932.3 м (вынос 29 %) по 41 скважине в 16 скважинах были выделены тонкие ритмичные прослои и признаки карбонатизации, в 12 скважинах карбонатизированные интервалы не обнаружены (или нет керна из этих интервалов), в 13 скважинах встречен плотный массивный карбонатизированный песчаник. Сопоставление скважин, в разрезе которых установлены массивные карбонатизированные песчаники с предполагаемыми разломами по семи моделям, принятым в разные годы разными авторами, не показало явной приуроченности процессов карбонатизации к зонам разломов, тем самым не подтвердив гипотезу о преобладающей роли дизъюнктивов в транспортировке насыщенных углекислотой растворов в коллектор (рис. 9).

Интегрирование представлений о карбонатизации в разработку месторождений

Исследования карбонатизированных прослоев демонстрируют необходимость учёта этих интервалов при разработке месторождений. Например, проведе-

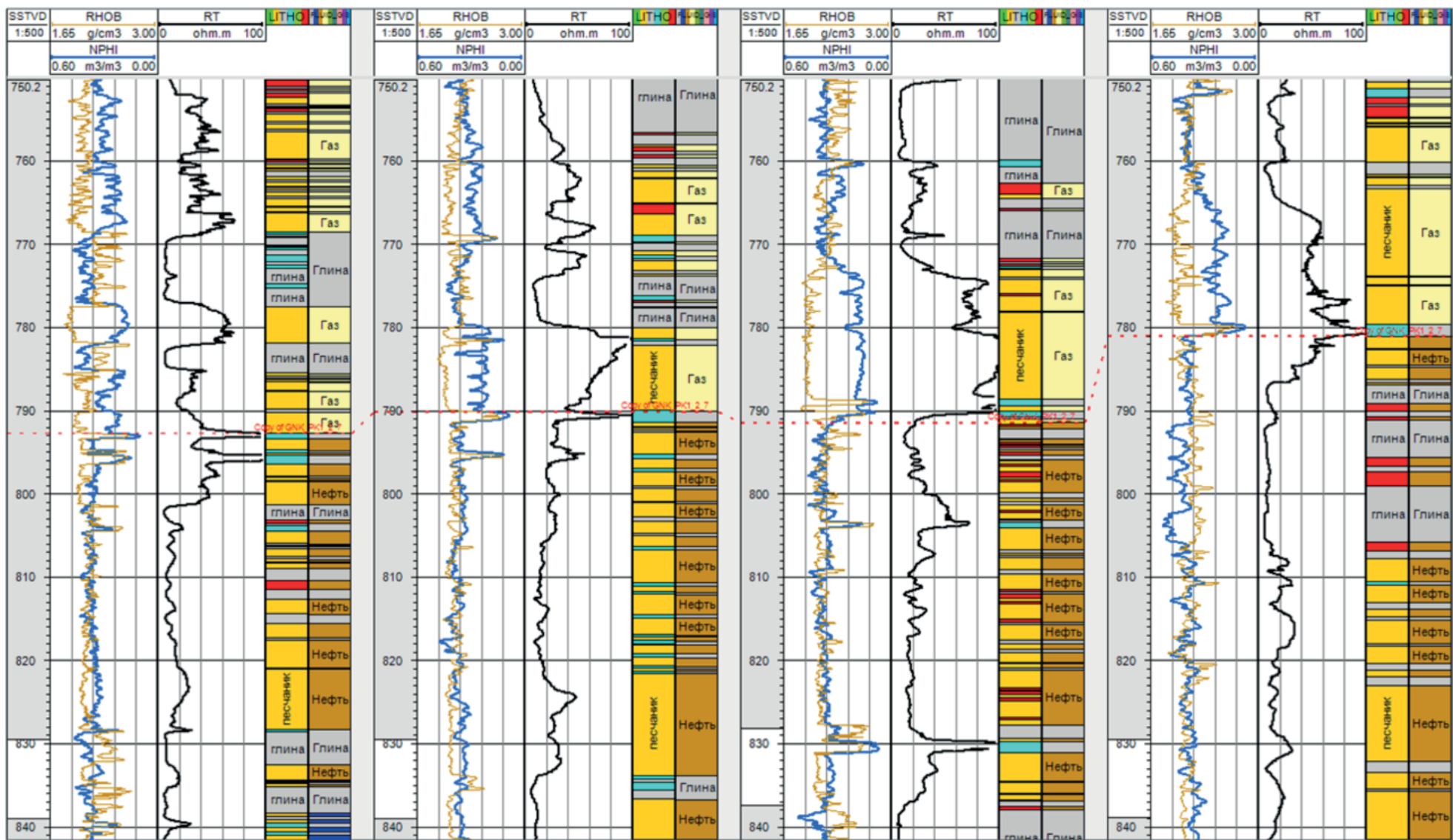


Рис. 6. Присутствие карбонатизированного песчаника (голубой цвет) на уровне ГНК (красная пунктирная линия)

Fig. 6. The presence of carbonatized sandstone (blue) at the level of the gas and oil contact (red dotted line)

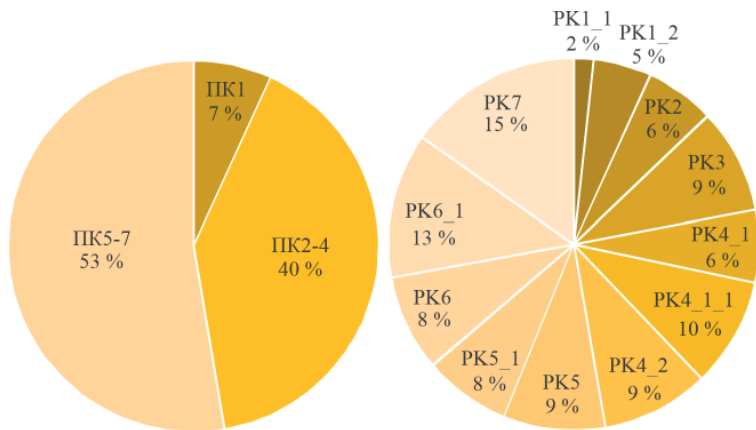


Рис. 7. Распространение карбонатизированных прослоев по разрезу: слева — по крупным циклам осадконакопления, справа — по отдельным циклитам

Fig. 7. Distribution of carbonatized interlayers along the section: on the left — by large cycles of sedimentation, on the right — by individual cyclites

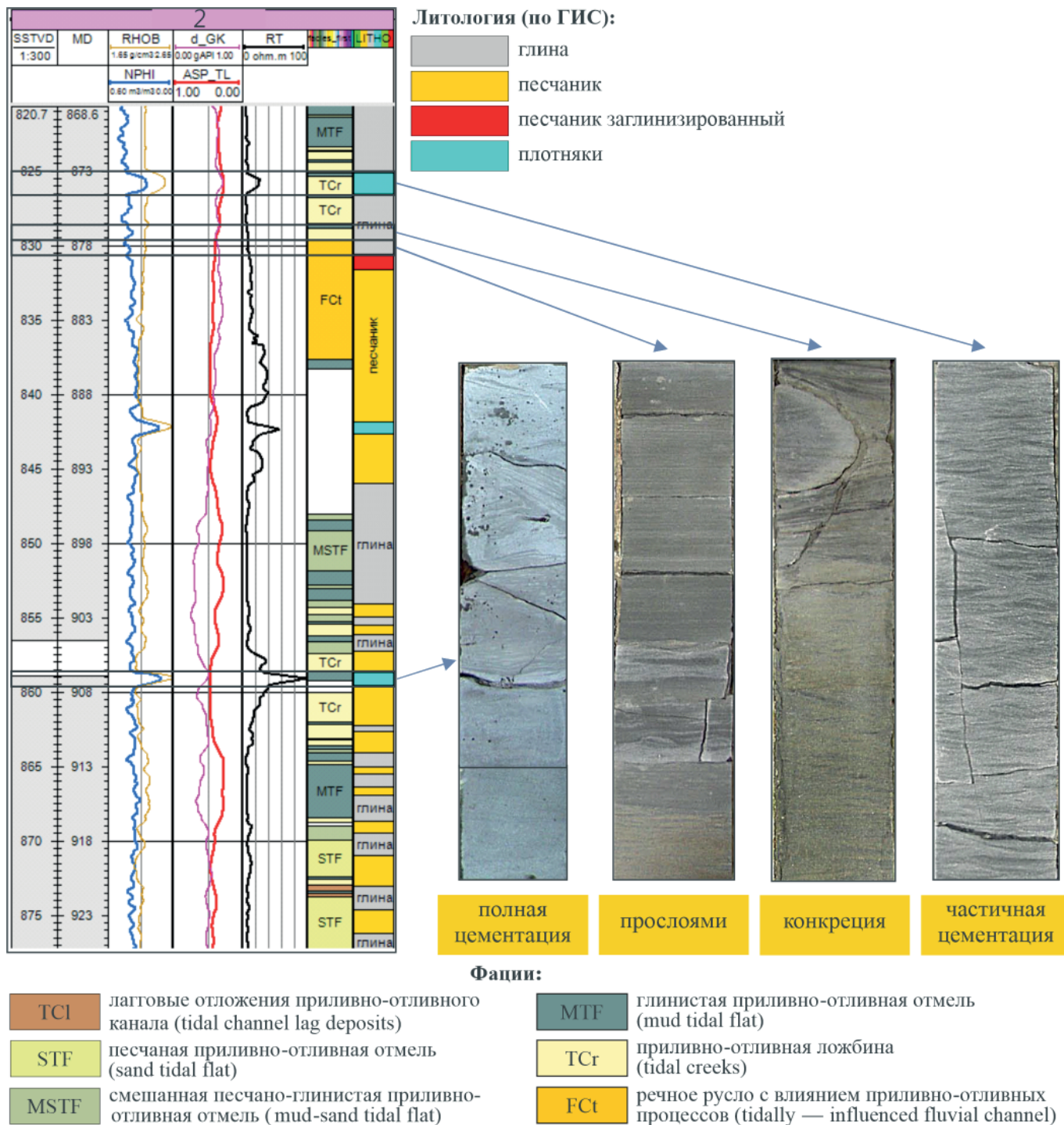


Рис. 8. Виды проявления карбонатизации в песчаниках

Fig. 8. Types of carbonatization in sandstones



ние гидроразрыва пласта на Пермьяковском месторождении спровоцировало прорыв воды вследствие растрескивания карбонатизированного прослоя, сформированного, по представлениям специалистов, на месте древнего водонефтяного контакта (Пуртова и др., 2006).

Примерами прослеживания плотных карбонатизированных пропластков в качестве репера при корреляции могут служить подошвенные отложения пласта ВК₁ на Ем-Еговском лицензионном участке (Грищенко, 2021) и пласта ЮВ₁ в пределах Бахиловского месторождения (Паняк, 2021).

В качестве интеграции карбонатизированных прослоев в геологическую модель вместо приобщения их к классу неколлектора предложена методика создания куба литологии в два этапа (Паняк, 2021). Сначала создаётся куб обобщённых литотипов «коллектор» и «неколлектор», в котором карбонатизированные пропластки входят в состав коллектора, определяя свою принадлежность к резервуару до формирования вторичных процессов. Затем в объёме «коллектора» моделируются карбонатизированные интервалы, отражающие наложенные процессы в высокопористых разностях. Предложенная этапность позволяет учесть стадийность литогенеза, уточнить морфологию распространения процессов карбонатизации и обосновать гидродинамический барьер для фильтрации флюидов.

Если по скважинным данным прослеживаемость карбонатизированных пропластков меньше размера гидродинамической ячейки 100 × 100 × 0.2 м, то имеет место их недоучёт в расчётах параметров разработки (Стариков и др., 2020). Авторы предлагают два способа моделирования карбонатизированных прослоев: задание минимальных ФЕС в ячейке с «плотняком» и задание несоседних соединений (NNC) между ячейками, разделёнными «плотняком».

На изучаемом месторождении X не обнаружено стабильного площадного распространения отдельных пропластков, а их мозаичное расположение не способствует уверенному прослеживанию и корреляции. Более того, анализ скважин с прорывом газа на месторождении X не продемонстрировал обязательного наличия карбонатизированного прослоя над зоной прорыва, по трещинам которого прорвался газ.

Обсуждение

Причина карбонатизации терригенных коллекторов и, главное, прогноз их распространения и степень влияния на процессы разработки месторождения, а также адаптацию гидродинамических моделей всё ещё остаются недоизучены и требуют от геологического сообщества создания методологии исследования. В настоящее время нет общепринятых диагностических

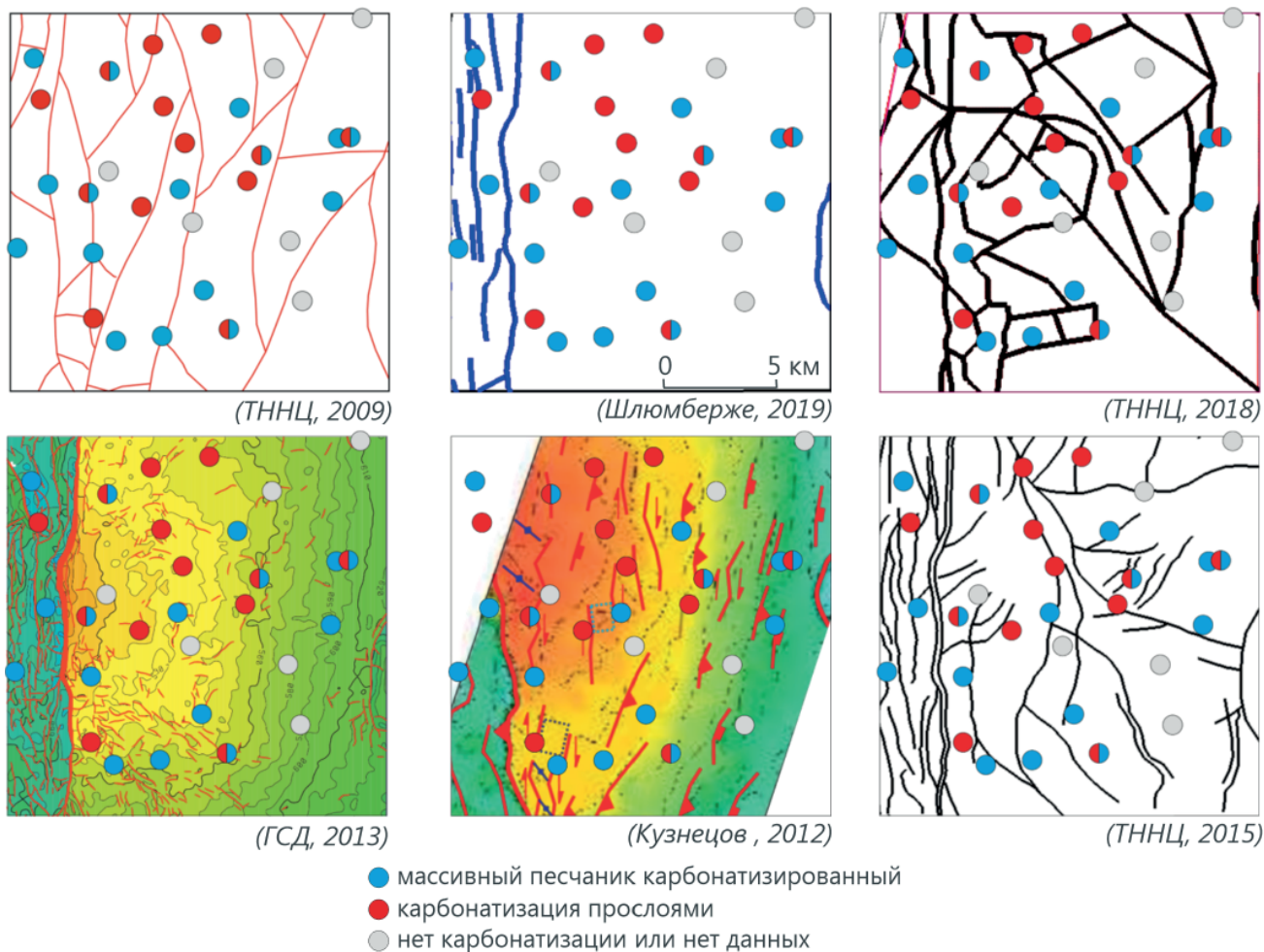


Рис. 9. Сопоставление скважин с различными типами карбонатизации с предлагаемыми в разные годы разломными моделями

Fig. 9. Comparison of wells with different types of carbonatization with different models proposed in different years

критериев и единой классификации причин образования карбонатизированных терригенных отложений.

Макро- и микроанализ керн позволяют установить морфологию и степень карбонатизации, однако интервалы с маломощной, слабой или неравномерной карбонатизацией фактически неразличимы методами ГИС, а значит, остаются недоучтёнными как в петрофизической, так и в гидродинамической модели.

Неясен также вопрос о роли и скоростях поедания нефти сульфатредуцирующими бактериями, которые также могут способствовать образованию карбонатного цемента. Если эти скорости сопоставимы со временем разработки месторождения, то это новое знание может инициировать переучёт карбонатизированных интервалов.

Наличие геохимического барьера обусловлено смешением пресных и солёных вод в пределах прибрежно-континентальных фаций. Именно в этой области происходит вероятное образование карбонатного цемента в породах. С точки зрения сопровождения бурения знание о прибрежно-континентальных условиях формирования коллектора может быть выражено в рекомендации большего отступа от газонефтяного контакта в зонах потенциального развития карбонатизированных интервалов для уменьшения риска прорыва газа из газовой шапки.

Отсутствие повсеместной корреляции карбонатизированных интервалов в соседних горизонтальных скважинах (при многозабойных скважинах расстояние между боковыми стволами составляет 50 м) на одних абсолютных глубинах или в пределах одного цикла позволяет допустить, что размеры отдельных карбонатизированных прослоев в длину не превышают десятков метров. Наличие карбонатизированных прослоев на разных абсолютных глубинах в соседних скважинах указывает на то, что образование карбонатного цемента происходило до окончательного формирования антиклинальной структуры и контролировалось диагенетическими процессами.

С другой стороны, повсеместно встречаются интервалы, в которых прослои карбонатизированного песчаника расположены на одном гипсометрическом уровне, что указывает на их формирование уже после формирования ловушки (как, например, в случае ГНК).

Так или иначе, нет достоверных методов определения связности и стадийности формирования отдельных карбонатизированных прослоев песчаников. В этом смысле адаптация гидродинамической модели является одним из способов подтверждения проницаемости и связности/изолированности этих тел.

Выводы

Проведённые аналитические работы на исследуемом месторождении X показали следующие результаты:

1. По данным керн выделено два генетических типа цементации порового пространства карбонатными минералами — раннедиагенетическая и постседиментационная, определены 4 текстурных типа карбонатизации.

2. Установлено, что распространение карбонатизированных прослоев по латерали составляет не более первых десятков метров, при этом карбонатиза-

ция происходит в наилучших коллекторах, ухудшая их ФЭС.

3. Не выявлено взаимосвязи распространения участков карбонатизации и местоположения разрывных нарушений на изученном месторождении. Определена стадийность заполнения порового пространства: сначала карбонатсодержащими флюидами, затем углеводородами.

4. С точки зрения дальнейшего прогнозирования и выделения слабокарбонатизированных прослоев методами ГИС необходимо продолжить поиск новых методологических приёмов их обнаружения, т. к. наличие зон и участков карбонатизации в пределах продуктивных интервалов разрабатываемых нефтегазовых объектов является риском для прорыва флюидов как ввиду естественной трещиноватости, так и при применении гидравлического разрыва пласта.

5. Совместное изучение кернового материала и ГИС — приоритетное направление для определения генезиса, морфологии и прочностных свойств карбонатизированных терригенных интервалов.

В ООО «Тюменский нефтяной научный центр» продолжается исследование карбонатизации песчаников в качестве перспективного метода улучшения адаптации модели.

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за ценные замечания и рекомендации, позволившие расширить область исследования вопроса карбонатизации.

Литература / References

- Байков В. И., Жонин А. В., Коновалова С. И., Мартынова Ю. В., Михайлов С. П., Рыкус М. В. Петрофизическое моделирование сложнопостроенного терригенного коллектора // Территория «Нефтегаз». 2018. № 11. С. 34–38.
- Baikov V. A., Zhonin A. V., Konovalova S. I., Martynova Yu. V., Mikhailov S. P., Rykus M. V. Petrophysical modeling of complex terrigenous reservoirs. Oil and gas territory, 2018, No. 11, pp. 34–38. (in Russian)
- Грищенко М. А., Иванова И. В. Уточнение литологической модели пластов ВК1–3 в пределах Ем-Еговского лицензионного участка с учетом вторичных процессов карбонатизации коллекторов // Геология нефти и газа. 2021. № 2. С. 47–59. DOI: 10.31087/0016-7894-2021-2-47-59
- Grishchenko M. A., Ivanova I. V. Em-Egovsky License Area: update of ВК1–3 beds lithology model accounting for processes of secondary carbonatization. Geologiya nefi i gaza, 2021, No. 2, pp. 47–59. (in Russian)
- Закревский К. Е. и др. Геологическое моделирование прибрежно-морских отложений (на примере пласта АВ₁ (АВ₁¹⁺²+АВ₁³) Самотлорского месторождения). Тюмень: Вектор Бук, 2017. 314 с.
- Zakrevskiy K. E. et al. Geological modelling of coastal-marine sediments (using the example of the АВ₁ (АВ₁¹⁺²+АВ₁³) formation of the Samotlor deposit). Tyumen: Vector Buk, 2017, 314 p. (in Russian)
- Карнюшина Е. Е. Основные причины возникновения зон карбонатной цементации в толщах нефтегазоносных бассейнов // Вестник Московского университета. Серия 4, Геология. 2012. № 5. С. 47–49.
- Karnyushina E. E. The main reasons for the occurrence of carbonate cementation zones in the strata of oil and



- gas basins. Bulletin of the Moscow University, Series 4, Geology, 2012, No. 5, pp. 47–49. (in Russian)
- Касьянов И. В., Нежданов А. А. Роль процессов карбонатизации пород в формировании залежей углеводородов в Западной Сибири // Геология нефти и газа. 2020. № 1. С. 69–79. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-1-69-79
- Kasyanov I. V., Nezhdanov A. A. Role of rock carbonation in formation of hydrocarbon deposits in Western Siberia. Russian oil and gas geology, 2020, No. 1, pp. 69–79. (in Russian)
- Конторович А. Э., Ершов С. В., Казаненков В. А., Карогодин Ю. Н., Конторович В. А., Лебедева Н. К., Никитенко Б. Л., Попова Н. И., Шурьгин Б. Н. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в меловом периоде // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 5–6. С. 745–776
- Kontorovich A. E., Ershov S. V., Kazanenkov V. A., Karogodin Y. N., Kontorovich V. A., Lebedeva N. K., Nikitenko B. L., Popova N. I., Shurygin B. N. Cretaceous paleogeography of the western Siberian sedimentary basin. Russian Geology and Geophysics, 2014, 55, No. 5–6, pp. 582–609.
- Лопатина Е. С. Дифференциальная диагностика фаций приливо-отливной равнины и смежных обстановок // Геология нефти и газа. 2024. No 6. С. 31–43. DOI: 10.47148/0016-7894-2024-6-31-43
- Lopatina E. S. The differential diagnosis of tidal flat facies and adjacent depositional environments. Russian oil and gas geology, 2024, No. 6, pp. 31–43. (in Russian)
- Македонов А. В., Зарицкий П. В. Конкрециеобразование и стадийность литогенеза // Конкреции и конкреционный анализ. М.: Наука, 1977. С. 5–17.
- Makedonov A. V., Zaritskiy P. V. Nodule formation and stages of nodule lithogenesis, Nodules and nodular analysis. Moscow: Nauka, 1977, pp. 5–17. (in Russian)
- Нежданов А. А. Типы карбонатных конкреций и их роль в изучении нефтегазоносных толщ Западной Сибири // Конкреционный анализ углеродсодержащих формаций. Тюмень, 1995. Вып. 201. С. 95–102.
- Nezhdanov A. A. Types of carbon concretions and their role in oil and gas West Siberia layers studying. Nodular analysis of carbon-bearing formations. Tyumen, 1995, 201, pp. 95–102. (in Russian)
- Паняк С. Г., Иванова И. В. Учет влияния процессов карбонатизации на фильтрационно-емкостные свойства пласта ЮВ1 Бахилковского месторождения при создании модели литологии // Известия УГТУ. 2021. Вып. 3 (63). С. 68–79. DOI 10.21440/2307-2091-2021-3-68-79
- Panyak S. G., Ivanova I. V. Accounting for the influence of carbonatization processes on the reservoir properties of the Yuv1 formation of the Bakhilovsky deposit when creating a lithological column. News of the Ural State Mining University, 2021, 3(63), pp. 68–79. (in Russian)
- Поднебесных А. В. Закономерности размещения основных типов вторичных изменений коллекторов на территории Западно-Сибирской плиты // Нефтегазовое дело. 2019. Т.17 № 2. С. 6–13. DOI: 10.17122/ngdelo-2019-2-6-13
- Podnebesnykh A. V. Regularities of accommodation of main types of secondary changes of collectors in the territory of the West Siberian plate. Petroleum engineering, 2019, V. 17, No. 2, pp. 6–13. (in Russian)
- Пуртова И. П., Янкова Н. В., Кадочникова Л. М., Васильев В. И., Сытник Н. В. Моделирование сложнопостроенных залежей на примере юрских отложений месторождений Нижневартовского района // Интервал. 2006. № 7. С. 38–43
- Purtova I. P., Yankova N. V., Kadochnikova L. M., Vasiliev V. I., Sytnik N. V. Modelling of complex reservoirs using the example of Jurassic sediments of Nizhnevartovsky region fields. Interval, 2006, No. 7, pp. 38–43. (in Russian)
- Рыкус М. В. Карбонатная цементация в песчаных породах-коллекторах: обзор представлений // Нефтегазовое дело. 2020. Т. 18, № 5. С.15–26. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-5-15-26
- Rykus M. V. Carbonate cementation in sandstone reservoirs: an overview of views. Petroleum engineering, 18, No. 5, 2020, pp. 15–26. (in Russian)
- Сахибгареев Р. С. Вторичные изменения коллекторов в процессе формирования и разрушения нефтяных залежей. Л.: Недра, 1989. 260 с.
- Sakhibgareev R. S. Secondary reservoir changes in the process of formation and destruction of oil deposits. Leningrad: Nedra, 1989, 260 p. (in Russian)
- Стариков М. А., Киселев В. Л., Архипов В. Н., Грандов Д. В., Утяшев Ю. Н., Евдошук А. А. Влияние методических подходов моделирования плотных песчаников на точность оценки уровней добычи углеводородного сырья // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2020. № 10(346). С. 112–118. DOI: 10.30713/2413-5011-2020-10(346)-112-118
- Starikov M. A., Kiselev V. L., Arkhipov V. N., Grandov D. V., Utyashev Yu. N., Evdoshchuk A. A. The influence of methodological approaches to tight sandstones modelling on the estimation accuracy of hydrocarbons productions levels. Geology, geophysics and development of oil and gas fields, 2020, No. 10(346), pp. 112–118. (in Russian)
- Ян П. А., Вакуленко Л. Г., Ершов С. В., Николенко О. Д., Шестакова Н. И. Оценка масштабов карбонатизации терригенных пород-коллекторов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 2 № 1. С. 12–15.
- Yan P. A., Vakulenko L. G., Yershov S. V., Nikolenko O. D., Shestakova N. I. Assessment of the carbonatization extent of terrigenous reservoir rocks. Interexpo Geo-Siberia, 2019, V. 2, No. 1, pp. 12–15. (in Russian)
- Cui H., Zhu S., Gao Y. Hydrothermal activity near the Permian–Triassic transition in the south-western Ordos Basin, China: Evidence from carbonate cementation in Upper Permian sandstones // Sedimentology. August 2024. DOI:10.1111/sed.13232
- Gibbons K., Hellem T., Kjemperud A., Nio S.D., Veberstad K. Sequence Architecture, Facies Development and Carbonate Cemented Horizons in the Troll Field Reservoir, Offshore Norway // Geological Society, London, Special Publications. 1993. Vol. 69. P. 1–31. DOI: 10.1144/GSL.SP.1993.069.01.02.
- Taylor K. G., Gawthorpe R. L., Curtis C. D., Marshall J. D., Awwiller D. N. Carbonate Cementation in a Sequence Stratigraphic Framework: Upper Cretaceous Sandstones, Book Cliffs, Utah Colorado // Journal of Sedimentary Research. 2000. Vol. 70. P. 360–372. DOI: 10.1306/2DC40916-0E47-11D7-8643000102C1865D.
- Walderhaug O., Bjorkum P.A. Calcite Cement in Shallow Marine Sandstones: Growth Mechanisms and Geometry // Carbonate Cementation in Sandstones / Ed. S.Morad. Oxford: UK Blackwell Publishing. 1998. P. 179–192.