

УДК 552.578.2.061.42:552.089

DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-2-198-206

Особенности преобразования кварцевых песчаников визейского яруса под влиянием водонефтяных флюидов

Э. А. Королев¹, А. Н. Кольчугин¹, А. И. Бахтин¹, А. А. Ескин¹,
Л. В. Музалевская¹, Э. Р. Бариева²

¹Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 19, e-mail: Anton.Kolchugin@kpfu.ru

²Казанский государственный энергетический университет, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51

Поступила в редакцию 02.07.2020 г., принята к печати 30.11.2020 г.

Объекты исследования. На примере тульско-бобриковских нефтенасыщенных кварцевых песчаников Демкинского нефтяного месторождения юго-востока Татарстана разобраны особенности вторичных преобразований кварцевых зерен в условиях влияния на породы водонефтяных флюидов. **Материалы и методы исследования.** Основными методами исследования были оптико-микроскопический и рентгенографический анализы, дополненные результатами электронного парамагнитного резонанса. **Результаты.** Установлено, что в процессе формирования нефтяных залежей в терригенных коллекторах осуществлялось пространственное перераспределение кремнезема. Кварцевые зерна в подошве и средней части песчаного пласта-коллектора растворялись и в виде халцедона отлагались в его кровельной части. Выявлено, что растворению кварцевых зерен способствовали сконцентрированные по их периферии микродефекты, вызванные пластическими деформациями минералов на контактах, а также повышение щелочности поровой среды до pH = 9–10. В зависимости от точки нуклеации кремнеземистого вещества и его концентрации в поровых растворах в одних случаях в межзерновом пространстве нефтеносных песчаников образовывались единичные сферолитовые агрегаты халцедона, в других – агатоподобные агрегаты. Так, по данным ЭПР исследований, выявленные аутигенные халцедоны обладают повышенным содержанием парамагнитных E'-центров. Это вызвано дефицитом кислорода в минералообразующей среде в процессе их формирования. **Выводы.** Процесс образования халцедона сопровождался кислой средой реакции, что обусловило протекание в кровле песчаного пласта кремнекислотного метасоматоза. Это, в свою очередь, приводило к замещению пластинок мусковита волокнистым халцедоном. Метасоматоз затронул как пластинки обломочного мусковита, так и мусковит, находящийся в виде включений внутри кварцевых зерен, что указывает на проявление как поверхностной, так и объемной диффузии кремнезема, затрагивающей все аллотигенные компоненты породы.

Ключевые слова: визейский ярус, песчаники кварцевые, нефтяной коллектор, флюидный литогенез, окремнение

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-77-00019

Features of the transformation of Visean quartz sandstones under the influence of water-oil fluids

Eduard A. Korolev¹, Anton N. Kolchugin¹, Anatoly I. Bakhtin¹, Aleksey A. Eskin¹,
Lilya V. Muzalevskaya¹, Enza R. Barieva²

¹Kazan Federal University, 18 Kremlevskaya st., Kazan 420008, Russia, e-mail: Anton.Kolchugin@kpfu.ru

²Kazan State Power Engineering University, 51 Krasnoselskaya st., Kazan 420066, Russia

Received 02.07.2020, accepted 30.11.2020

Research subject. This article analyses specific features of secondary transformations of quartz grains under the influence of water-oil fluids on the example of the Tulskey and Bobrikovsky oil-saturated quartz sandstones of the Demkinskoye oil deposit in the south-east of Tatarstan. **Materials and methods.** The research was carried out using the methods of optical microscopy, x-ray diffraction and electron paramagnetic resonance (EPR). **Results.** On the example of the Tulskey and Bobrikovsky oil-saturated Visean quartz sandstones, we analysed the influence of water-oil fluids on rocks and features of

Для цитирования: Королев Э.А., Кольчугин А.Н., Бахтин А.И., Ескин А.А., Музалевская Л.В., Бариева Э.Р. (2021) Особенности преобразования кварцевых песчаников визейского яруса под влиянием водонефтяных флюидов. *Литосфера*, 21(2), 198–206. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-2-198-206

For citation: Korolev E.A., Kolchugin A.N., Bakhtin A.I., Eskin A.A., Muzalevskaya L.V., Barieva E.R. (2021) Features of the transformation of Visean quartz sandstones under the influence of water-oil fluids. *Lithosphere*, 21(2), 198–206. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-2-198-206

© Э.А. Королев, А.Н. Кольчугин, А.И. Бахтин, А.А. Ескин, Л.В. Музалевская, Э.Р. Бариева, 2021

the secondary transformations of quartz grains in the Demkinsky oil field in the southeast of Tatarstan Republic. In the oil-charge stage, the spatial redistribution of silica was realized. Quartz grains dissolved in the sole and middle part of the reservoir, precipitating in the form of chalcedony in the top part of the reservoir. The dissolution of quartz grains was promoted by micro defects concentrated on their periphery. The dissolution was triggered by both plastic deformations of minerals at the contacts and an increase in the alkalinity in the pore space up to pH = 9–10. Chalcedony aggregates were formed in the intergranular space of oil-saturated sandstones. Depending on the nucleation point of the siliceous substance and silica concentration in pore fluids, either single spherulitic or agate-type aggregates were formed. According to EPR, the studied chalcedony aggregates have a high content of paramagnetic E^{\cdot} -centres. This was caused by a deficiency of oxygen in the mineral-forming fluid during chalcedony precipitation. *Conclusions.* Chalcedony precipitation underwent in acidic conditions, which led to silica-type metasomatism in the top part of the reservoir followed by substitution of muscovite grains by morphological fibrous chalcedony. Metasomatism affected the grains of both detrital muscovite and muscovite present as inclusions inside quartz grains. This process indicates the manifestation of surface and bulk diffusion of silica, affecting all clastic components.

Keywords: Visean, quartz sandstone, oil reservoir, fluid lithogenesis, silica cementation

Funding information

Research was supported by the Russian Science Foundation, project No. 19-77-00019

ВВЕДЕНИЕ

В пределах Волго-Уральской нефтеносной области терригенный комплекс визейского яруса является одним из перспективных объектов нефтедобычи. По предварительным подсчетам, в отложениях яруса сосредоточено около 30% извлекаемых запасов углеводородов (Кагарманова и др., 2014). При этом наиболее продуктивными выступают нефтеносные песчаные коллекторы тульско-бобриковского возраста. Однако, несмотря на практическую значимость тульско-бобриковских песчаников, процессы формирования в них нефтяных залежей рассмотрены в недостаточной степени. Хорошо изучены фациальные условия формирования и влияние седиментационных факторов на коллекторские свойства песчаных пород (Ларочкина и др., 2009; Астаркин и др., 2013; Королев и др., 2016). Тем не менее влияние постседиментационных процессов на формирование коллекторов в песчаниках разобрано лишь в отдельных работах (Королев, 2014). Изучением постседиментационных преобразований терригенных комплексов и, в частности, песчаных пород занималось значительное число исследователей. Заслуживают внимания труды И.М. Симановича с соавторами (Симанович и др., 2004; Симанович, 2007), крупная монография А.В. Копелиовича (1965), работы О.В. Япаскурта с соавторами (Япаскурт и др., 1999, 2003) и многие другие. Следует отметить публикации, посвященные исследованию кварцевых зерен песчаных пород в пределах нефтяных резервуаров на примере залежей нефти Литвы и Калининградской области (Сахибгареев, 1989).

В некоторых работах на примере терригенных пород тульско-бобриковского горизонта юго-востока Татарстана отмечают выщелачивание карбонатного цемента внутри залежи и его переотложение в зоне водонефтяного контакта (Э.М. Юл-

барисов, И.М. Юлбарисов, 2012). Однако изменения кварца под влиянием водонефтяных флюидов, по сведениям авторов, до настоящего времени не рассматривались. Основной причиной этого является мономинеральный кварцевый состав песчаников, устойчивый к изменениям в широком диапазоне меняющихся физико-химических параметров среды. Данное исследование призвано показать, что, несмотря на высокую химическую устойчивость кварца, он, по сравнению с другими также химически устойчивыми силикатными минералами, наиболее активно вовлекается в процесс перераспределения минерального вещества при формировании песчаных коллекторов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенности перераспределения кремнезема в кварцевых песчаниках изучались на нефтяных залежах Демкинского поднятия, расположенного в пределах восточного борта Мелекесской впадины. Здесь песчаный пласт бобриковского горизонта залегает непосредственно на эродированной поверхности известняков турнейского яруса. Кровлей песчаника являются глинистые алевролиты, переходящие выше по разрезу в аргиллиты (рис. 1). Согласно данным углепетрографических исследований углей визейских отложений (Хасанов, Гафуров и др., 2016), тульско-бобриковские отложения залегают на границе протокатагенез–мезокатагенез (ранний–средний катагенез). Интервал глубин залегания изученных толщ по абсолютным отметкам составляет 1096–1103 м.

Выщелоченные известняки кизеловского горизонта (C_1kz) турнейского яруса совместно с бобриковскими песчаниками визейского яруса (C_1bb) образуют единый нефтеносный резервуар, крышкой для которого являются плотные алевролиты и аргиллиты вышележащих тульских отложений (C_1tl) визейского яруса. Карбонатная часть резер-

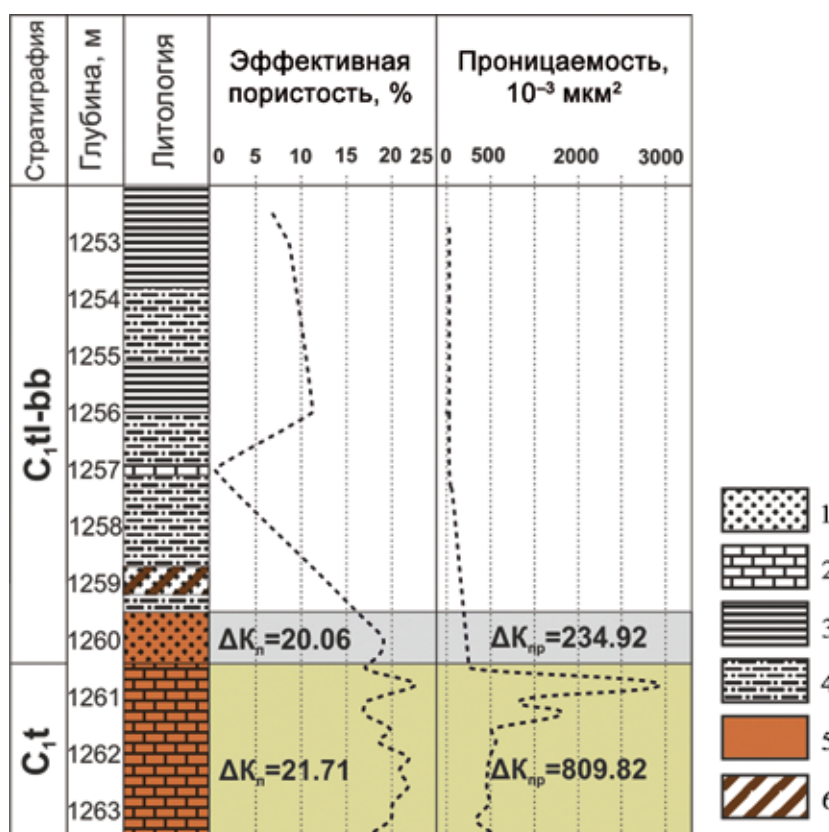


Рис. 1. Схематичный разрез нижнекаменноугольных отложений Демкинской структуры, Демкинского месторождения нефти.

1 – песчаник, 2 – известняк, 3 – аргиллит, 4 – алевролит, 5 – равномерная нефтенасыщенность, 6 – пятнисто-полосчатая нефтенасыщенность.

Fig. 1. Schematic section of the Lower Carboniferous strata of the Demkinsky structure, Demkinskoye oil deposit.

1 – sandstone, 2 – limestone, 3 – mudstone, 4 – siltstone, 5 – uniform oil saturation, 6 – patchy-banded oil saturation.

вуара имеет мощность 7.0 м, терригенная – 1.5 м. Относительно небольшие толщины терригенной части коллектора исключают возможность широкого рассеяния в пространстве растворенных элементов, образующихся при воздействии на минеральную компоненту пласта водонефтяных флюидов. Поэтому здесь высока вероятность обнаружения аутигенных силикатных минералов, осаждаемых из флюидных растворов.

Сам песчаный коллектор характеризуется неравномерным распределением углеводородов. Если в подошве и средней части пласта нефтенасыщенность породы равномерная, придающая песчанику однородную темно-коричневую окраску, то в кровле – пятнисто-полосчатая за счет наличия темно-серых уплотненных участков. Песчаник по составу кварцевый, по структуре мелкозернистый, алевролитистый, в кровельной части интервала – глинистый, неравномерно известковистый сильно разуплотненный, вследствие чего легко крошится при слабом механическом воздействии.

По данным оптико-микроскопических исследований, песчаник на 85–90% сложен обломочной компонентой, на 10–15% – цементирующим обломки материалом. Обломочная часть представлена зернами кварца (99%), а также редкими чешуйками мусковита и зернами полевых шпатов (1%). Размер зерен варьирует от 0.05 до 0.50 (в основном 0.10–0.25) мм. Зерна, преимущественно полуокатанные, характеризуются изометричным и удлиненным обликом, плотно упакованы в объеме породы, соприкасаются краями. Преобладают выпукло-вогнутые, конформные контакты взаимного приспособления. Цемент по составу карбонатно-глинистый, карбонатная часть представлена кальцитом, глинистая – каолинитом. По типу является прожилково-сгустковым и неравномерно распределен в объеме породы, образуя слойки и прожилки мощностью до 0.25 мм. По структуре глинистый цемент пелитовый, карбонатный – тонко-мелкозернистый. Участками в верхней части разреза в кровле пластов песчаников развивается кремнистый цемент. Класси-

ческий регенерационный цемент в виде оторочек по периферии кварцевых зерен практически не отмечается, однако участками наблюдаются процессы трансформации точечных контактов на границе кварцевых зерен в протяженные выпукло-вогнутые контакты взаимного приспособления, что в определенной степени можно назвать признаком регенерации зерен.

Песчаный коллектор, по данным прямых определений фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС), характеризуется неравномерной пористостью. В подошве и средней части пористость составляет 18–22%, проницаемость по напластованию – 56.8–123.5 миллидарси (мД), перпендикулярно напластованию – 51.2–110.6 мД. В кровле нефтяного пласта пористость – 10–15%, проницаемость по напластованию – 0.69–68.3 мД, перпендикулярно напластованию – 0.47–58.6 мД. Поры по типу межзерновые, сообщающиеся, их средний размер – 0.1 мм.

Анализ распределения пористости и проницаемости по разрезу в целом указывает на снижение ФЕС от подошвы к кровле песчаного коллектора. Учитывая относительно однородный состав песчаника, подобную тенденцию можно трактовать как “затухание” процессов растворения снизу вверх по разрезу. В пользу такой интерпретации свидетельствует и постепенное повышение карбонатности песчаных пород от подошвы к кровле нефтяного пласта бобриковского горизонта (C₁bb).

Детальное изучение песчаников под микроскопом при 400-кратном увеличении позволило выявить особенности изменения периферийной структуры минеральных зерен в различных частях песчаного коллектора. В подошве и средней части пласта кварцевые зерна обладают ровной, сглаженной поверхностью со слабыми следами коррозии, наростов аутигенных минералов не наблюдается. По периферии кварцевых зерен в областях плотно соприкасающихся контактов фиксируются следы пластических деформаций в виде параллельных микротрещин. Эти трещины разбивают поверхность кварца на серию субмикроскопических пластинок, в результате чего в областях контактов зерна приобретают волнистое погасание. По периферии многих кварцевых зерен отмечаются полоски Бема в виде параллельных цепочек газово-жидких и пылеватых микровключений. Согласно работе В.А. Баранова (2014), “бемовская штриховка” представляет собой плоскости скольжения в минералах, возникающие вследствие микродвигов и содержащие включения минералообразующей среды. Подобные включения, только менее выраженные, встречаются и в местах срастания близко расположенных кварцевых зерен, образующих кластерные агрегаты с однородным погасанием. По-видимому, срастание отдельных минеральных индивидов также сопровождается захватом компонентов из минералообразующей среды. Чешуйки мусковита, в отличие

от таковых кварца, несут незначительные следы постседиментационных деформаций. Морфология поверхности большей части из них ровная, толщина пластинок выдержанная, лишь к краям наблюдается ступенчатое утонение. Относительно крупные пластинки, попавшие на стык кварцевых зерен, слабо изогнуты под действием неравномерной нагрузки. Расщепления мусковитовых чешуек по периферии не наблюдается.

В кровле песчаного пласта морфогенетическая структура минерального скелета породы несколько меняется. В первую очередь это обусловлено развитием здесь интенсивной аутигенной кремнистой минерализации. Практически во всех порых отмечаются различные по размерам агрегаты халцедона (рис. 2). Центрами кристаллизации агрегатов являются зоны контактов кварцевых зерен. Фактически рост халцедона начинается в области выхода на поверхность границы соприкосновения между двумя соседними зернами кварца. При этом хорошо прослеживается зависимость между протяженностью границы срастания и морфологией агрегатов халцедона.

В случае незначительных размеров области соприкосновения между срастающимися зернами кварца образуется острый угол, из вершины которого развиваются радиально-лучистые щеточки халцедона. В силу геометрического отбора игольчатые кристаллы формируют узкие пучки сростков, которые постепенно веерообразно расширяются по мере удаления от центра роста. Длина игольчатых кристаллов халцедона не превышает 0.1 мм. Судя по особенностям волнистого погасания кристаллов в агрегатах, все они спирально закручены вдоль оси удлинения (L₂). Перерывов в их росте не наблюдается.

В случае протяженной границы срастания между кварцевыми зернами образуется тупой угол. Зарождающийся здесь агрегат халцедона получает возможность развиваться не только по нормали к поверхности затравки, но и в боковые стороны. Площадка роста включает в себя не только область контакта срастания, но и прилегающие к нему участки поверхностей кварцевых зерен. За счет этого размеры халцедоновых агрегатов доходят до 0.2 мм. Агрегаты имеют более сложное строение, обусловленное стадийностью поступления минерального вещества. В их основании, как правило, находится один крупный радиально-лучистый сросток из игольчатых кристаллов халцедона. Этот сросток является первой генерацией аутигенной кремнеземистой минерализации. Поверх него нарастают несколько других радиально-лучистых агрегатов, которые, срастаясь, образуют следующий внутренний слой халцедонов второй генерации. Аналогичным образом формируется и периферийный слой. Таким образом, за счет последовательного нарастания новых агрегатов халце-

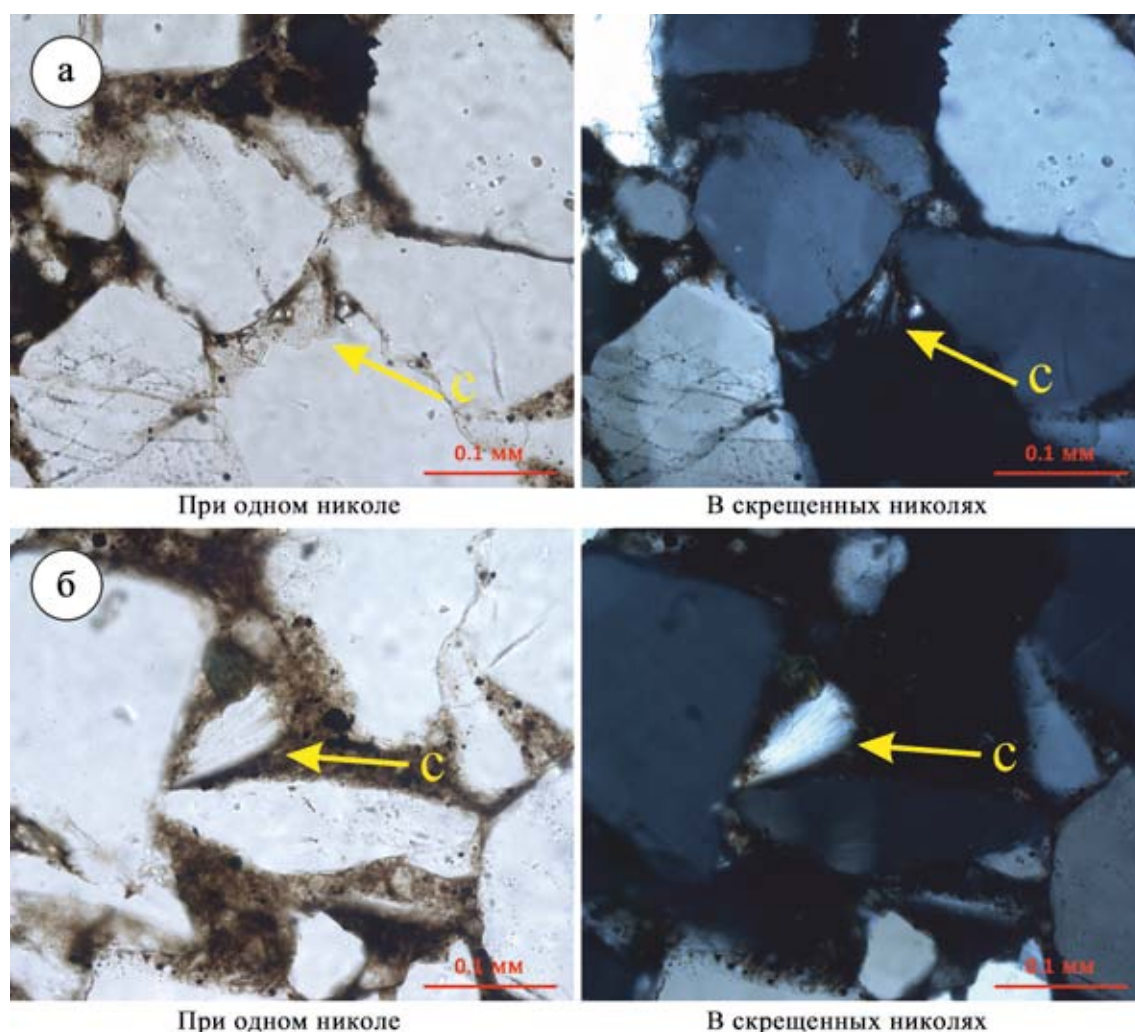


Рис. 2. Фото шлифов песчаников, в поровом пространстве которых развиваются радиально-лучистые агрегаты халцедона.

Сферолитовые агрегаты: а – широкие, б – узкие.

Fig. 2. Photos of sandstone thin sections, in the pore space are radial chalcedony aggregates.

Spherulitic aggregates: а – wide, б – narrow.

дон увеличивается в размерах. В единичных случаях халцедон, развивающийся в относительно крупных порах, полностью залечивает полость, формируя агатоподобный агрегат, состоящий из нескольких слоев роста кремнистых минералов. При этом глинистый цемент постепенно отжимается от стенок поры к ее центральной части.

Помимо образования халцедона в кровле нефтяного пласта песчаника фиксируются процессы метасоматического замещения кремнеземом исходных аллотигенных минералов. Это наиболее заметно на пластинках мусковита. Многие из них несут следы частичного преобразования в кварц-халцедон. Преобразование затронуты лишь краевые части мусковитовых пластинок, центральные,

как правило, не изменены. Это хорошо видно по характеру поляризационной окраски минералов: яркой пестрой – в центрах чешуйчатых пластинок и светлосерой – по их периферии (рис. 3а). В процессе кремнистого метасоматоза вторичный кварц-халцедон наследует морфологию первичного мусковита, сохраняя трещинки спайности. Контакты окремнелых участков с неизмененным мусковитом резкие, часто зазубренные. Окремнению часто предшествует расщепление мусковитовых пластинок с торцов за счет отделения чешуек друг от друга вдоль плоскостей спайности. При последующем их замещении халцедоном по периферии мусковита образуются своеобразные кремнистые агрегаты наподобие “конского хвоста”. Помимо аллоти-

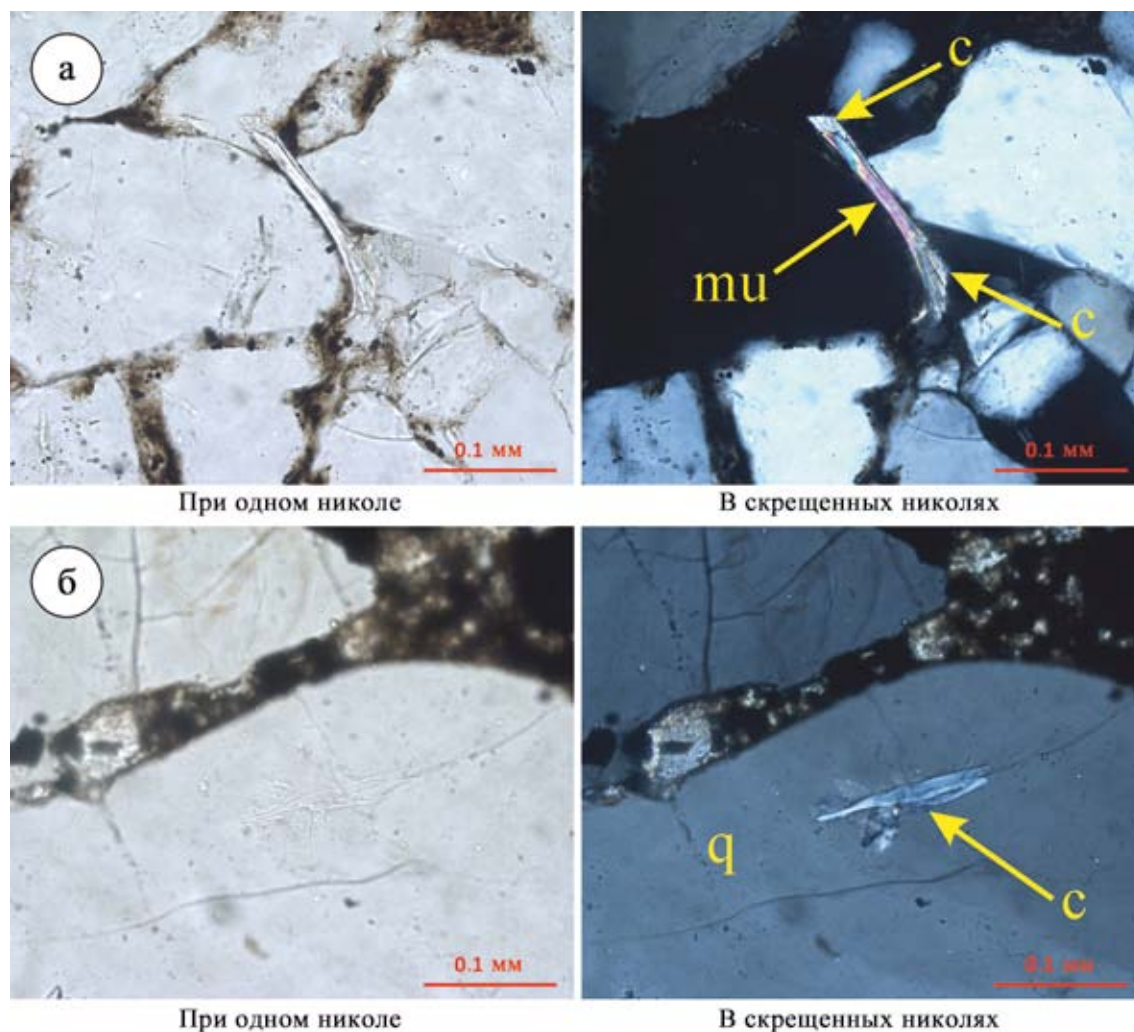


Рис. 3. Фото шлифов песчаников, в которых мусковит (mu) замещается халцедоном (с).

а – мусковитовая пластинка с пестрой интерференционной окраской по периферии замещена светло-серым халцедоном; б – мусковитовая пластинка, заключенная в зерно кварца (q), полностью замещена светло-серым халцедоном.

Fig. 3. Photos of sandstone thin sections where muscovite (mu) is replaced by chalcedony (c).

а – a muscovite grains with variegated interference coloring along the periphery is replaced by light gray chalcedony; б – a muscovite grains enclosed in a quartz grain (q), completely replaced by a light gray chalcedony.

генных пластинок мусковита метасоматическому замещению кварц-халцедоном подверглись и мусковитовые чешуйки, заключенные в зернах кварца, особенно те из них, которые расположены в периферийной, наиболее дефектной и трещиноватой, части зерен. Линии двойникования и микротрещины, являясь наиболее ослабленными зонами кварца, очевидно, служили путями миграции растворимых соединений кремния. При наличии в канале миграции или поблизости от него чешуек мусковита происходило полное метасоматическое замещение слюды кварцем-халцедоном с унаследованием структурно-морфологических признаков первичного минерала (рис. 3б). Другие микровключения мусковита в кварце, находящиеся вне дефек-

тных областей монокристаллов, остались в неизменном виде.

ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности распределения пор и аутигенной минерализации в разрезе песчаного коллектора свидетельствуют о дифференцированности протекания в нем эпигенетических процессов. В нижней и средней частях преобладали процессы растворения, в верхней – вторичная аутигенная минерализация.

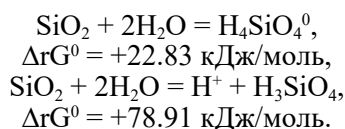
Несмотря на то что кварц в слабокислой среде обладает низкой растворимостью, геологический период делает возможным постепенное обогаще-

ние поровых растворов кремниевой кислотой согласно следующей реакции:



В немалой степени этому способствует дефектность кварцевых зерен, приобретенная на стадии уплотнения песчаника. Микротрещины и плоскости скольжения, концентрирующиеся вдоль структурных границ зерен, в зоне рекристаллизационно-бластического замещения, способствуют увеличению удельной поверхности кварцевых индивидов. На таких раздробленных поверхностях кремнезем легче подвергается растворению, поставляя в окружающую среду соединения кремниевой кислоты (Симанович, 1978). Косвенно на растворение кварцевых зерен указывают данные электронного парамагнитного резонанса, показывающие относительно низкие концентрации радиационных парамагнитных центров в песчаниках зоны растворения ($E' = 30.4\text{--}35.3$ у. е.). Для сравнения: в бобриковских кварцевых песчаниках и алевролитах, изолированных от воздействия водонефтяных флюидов аргиллитовыми пластами, концентрация E' -центров составляет $55.7\text{--}119.0$ у. е. По-видимому, в нижней и средней частях нефтеносного песчаного пласта за счет процессов растворения кварцевые индивиды очищались от микродефектов, приобретая более совершенную кристаллическую структуру.

При стандартных условиях свободная энергия Гиббса реакции растворения кварца составляет в молекулярной форме $\Delta_r G^0 = +22.83$ кДж/моль, в ионной форме $-\Delta_r G^0 = +78.91$ кДж/моль:



В природе молекулярная растворимость является фоновой независимо от pH среды. Ее величина составляет 62 мг/л. Ионная растворимость проявляется лишь в щелочной среде при $\text{pH} > 9$. При увеличении pH до 9.8 достигается равновесие по реакции



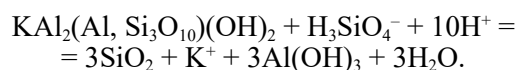
которая в стандартных условиях не протекает, так как ее свободная энергия Гиббса составляет $\Delta_r G^0 = +56.08$ кДж/моль. При $\text{pH} = 10$ ионная растворимость кварца доходит до 95 мг/л.

Таким образом, для растворения зерен кварца в песчанике необходимым условием являлось создание в поровых растворах щелочной среды. Растворенное кремнийсодержащее вещество, поступая к кровле пласта песчаника, выпадало в осадок. По-видимому, процессу осаждения кремнезема в какой-то степени способствовало повышенное содержание здесь глинистого материала. Если допустить, что основной формой миграции кремнезема

являлись ионные формы, то становится понятной роль глинистых агрегатов. Все они, обладая высокими сорбционными свойствами, играли роль фиксатора кремнеземистых соединений. При достижении в поровых растворах определенной концентрации растворенного кремнезема в системе начнут образовываться сложные радикалы поликремневых солей (Чукин, 2008), которые в дальнейшем и будут служить основой для формирования халцедоновых агрегатов. Как видно в шлифах, первичные центры кристаллизации халцедонов совпадают с областями линейных и вогнуто-выпуклых контактов кварцевых зерен. Это обусловлено несколькими причинами: более высокой поверхностной активностью кварца за счет микродефектов, химическим родством и одинаковым строением кремнекислородных тетраэдров кварца и халцедона, меньшим содержанием глинистого материала.

Судя по текстуре кремнеземистых агрегатов, в пределах кровли песчаного пласта процессы образования халцедона в каждой поре шли индивидуально. В одних порах из-за относительно слабого насыщения раствора кремнеземом весь материал шел на формирование единичных агрегатов, состоящих из многочисленных скрученных волокон халцедона, веерообразно расходящихся по мере удаления от центра кристаллизации (рис. 4а, б). В других порах, где создавались условия для периодических флуктуаций в растворе концентраций H_4SiO_4 , образовывались халцедоновые сферолиты, срастающиеся в агатоподобные агрегаты (рис. 4в). Каждый слой в агате является следствием очередного повышения содержания кремниевой кислоты в условиях полуизолированной поры. Учитывая относительно высокие концентрации кислородных вакансий ($E' = 130\text{--}135$ у. е.) в структуре минералов кремнезема, слагающих кровлю песчаного пласта, можно предположить, что халцедон формировался в условиях дефицита кислорода. Влияние природной радиации нефтяной залежи на образование E' -центров в халцедоне не приведет к подобному эффекту, поскольку по гамма-каротажу естественная радиоактивность нефти составляет всего $1.24\text{--}1.52$ мкР/ч. Для сравнения: глинистые породы бобриковского терригенного комплекса показывают значения естественной радиоактивности в $5.29\text{--}7.65$ мкР/ч. Однако в зернах кварца, находящихся в аргиллитах, содержание E' -центров не превышает 120 у. е.

Метасоматоз халцедона по мусковиту указывает на то, что в кровле песчаного пласта в период отложения кремнезема создавалась кислая среда. Только при низких значениях pH из структуры мусковита будут удаляться межслоевые катионы калия, а затем и алюминия по реакции



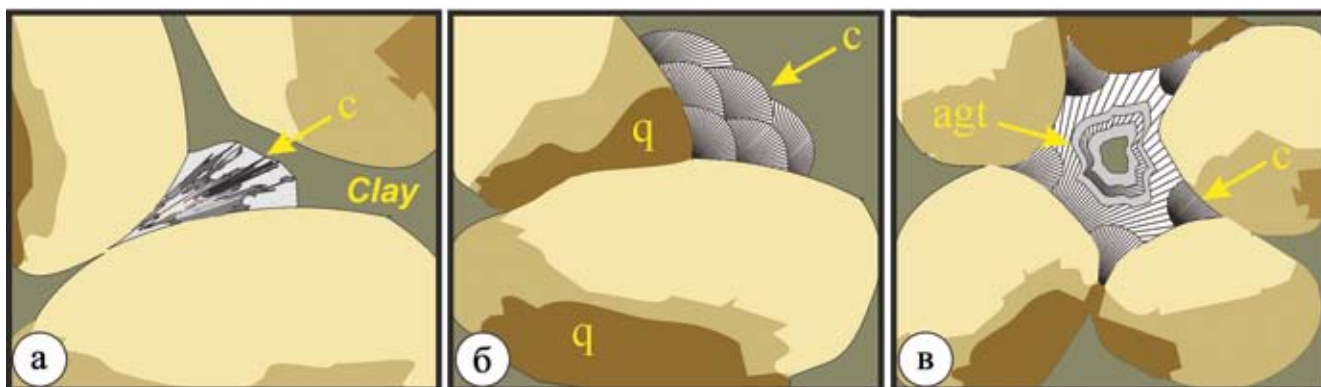


Рис. 4. Различные формы халцедоновых агрегатов (с) в поровом пространстве кварцевых песчаников Демкинского месторождения нефти.

а – узкий сферолитовый агрегат, б – широкие сферолитовые агрегаты, в – агатоподобные агрегаты (agt). Clay – глинистый материал.

Fig. 4. Different forms of chalcedony aggregates (c) in the pore space of quartz sandstones of the Demkinskoye deposit.

а – narrow spherulitic aggregates, б – wide spherulitic aggregates, в – agate-like aggregates (agt). Clay – clay material.

Термодинамические расчеты показали выгоду протекания подобной реакции с выигрышем свободной энергии Гиббса в $\Delta rG^0 = -174.75$ кДж/моль. Другие варианты разложения мусковита, согласно расчетам, оказались несостоятельными, поскольку их энергия Гиббса имела положительные значения.

С учетом ΔrG^0 предполагаемой реакции был проведен расчет рН среды, при котором возможен процесс замещения мусковита халцедоном:

$$\lg a_{(H^+)} \geq \frac{-174.75}{57.079} \geq 3.06.$$

Согласно полученным данным, приведенная реакция метасоматического преобразования может протекать только при рН около 3.0. Лишь при этой кислотности среды из кристаллической структуры мусковита возможен вынос ионов K^+ и Al^{3+} с последующим выпадением алюминия в виде гиббсита. Диффузионное преобразование мусковита в халцедон шло фронтом, в виде “волны кислотности”. В результате этого в мусковитовых пластинках между первичным и вторичным минералами сформировалась резкая граница. Судя по замещению халцедоном мусковитовых чешуек, заключенных в кварцевых зернах, диффузия кремнезема шла не только на поверхности, но и внутри зерен песчаников. По-видимому, микротрещины, нарушающие целостность структуры минеральных зерен, служили путями миграции производимой кремниевой кислоты. Вблизи от микродефектов мусковитовые чешуйки полностью замещались халцедоном.

ВЫВОДЫ

Учитывая полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. В песчаных коллекторах бобриковского горизонта формирование нефтяных залежей сопровождалось перераспределением кремнезема за счет растворения кварцевых зерен в подошве и средней части пласта и отложения халцедона в его кровле.

2. Растворению кварцевых зерен способствовали сконцентрированные по их периферии микродефекты, вызванные пластическими деформациями минералов на контактах, и повышение щелочности поровой среды до рН = 9–10.

3. Процессы образования халцедона, протекающие в кровле песчаного пласта, характеризуются пространственной неоднородностью, обусловленной неравномерным поступлением в поровое пространство породы минерального вещества. Неоднородность среды кристаллизации за счет градиентов концентраций способствовала образованию в одних порах единичных сферолитов, в других – агатоподобных агрегатов.

4. Аутигенные халцедоны в кровле песчаного пласта обладают повышенным содержанием парамагнитных E' -центров, вызванных дефицитом кислорода в минералообразующей среде, в процессе формирования.

5. Процесс образования халцедона сопровождался кислой средой реакции, при рН около 3.0, что обусловило протекание в кровле песчаного пласта кремнекислотного метасоматоза, выразившегося в замещении пластинок мусковита минералами кремнезема. Метасоматоз затронул как пластин-

ки обломочного мусковита, так и мусковит, находящийся в виде включений внутри кварцевых зерен. В данном случае проявлялась как поверхностная, так и объемная диффузия кремнезема, затрагивающая все аллотигенные компоненты породы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астаркин С.В., Гончаренко О.П., Пименов М.В. (2013) Обстановки осадконакопления в бобриковское время в пределах юго-востока Русской плиты. *Изв. Саратов. ун-та. Новая серия. Науки о Земле*, **13**(1), 57-62.
- Баранов В.А. (2014) Микродеформации кварца карбоновых песчаников Донбаса. *Вестн. ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*, **12**, 75-86.
- Кагарманова Е.В., Котенев Ю.А., Чибисов А.В. (2014) Особенности проектирования и разработки мелких нефтяных месторождений Татарстана. *Нефтегазовые технологии и новые материалы. Проблемы и решения: сб. науч. тр.*, **3**(8), 166-173.
- Копелиович А.В. (1965) Эпигенез древних толщ юго-запада Русской платформы. *Тр. ГИН АН СССР*, **121**. М.: Наука, 312 с.
- Королев Э.А. (2014) Этапность преобразования песчаных коллекторов тульско-бобриковского возраста в эрозионных врезках на территории Татарстана. *Уч. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки*, **156**(3), 87-97.
- Коралев Э.А., Нургалиева Н.Г., Смелков В.М., Ескин А.А., Кальчева А.В. (2016) Литолого-петрофизические характеристики нефтеносных отложений бобриковского горизонта южного склона Южно-Татарского свода. *Нефтяное хозяйство*, (10), 17-19.
- Ларочкина И.А., Ганиев Р.Р., Капкова Т.А. (2009) Типизация залежей нефти в продуктивных бобриковских отложениях и закономерности их развития – основа проектирования бурения скважин. *Георесурсы*, (4), 19-21.
- Сахибгареев Р.С. (1989) Вторичные изменения коллекторов в процессе формирования и разрушения нефтяных залежей. Л.: Недра, 260 с.
- Симанович И.М. (1978) Кварц песчаных пород. М.: Наука, 156 с.
- Симанович И.М. (2007) Постседиментационный литогенез терригенных комплексов в складчатых областях: структуры пород и кливаж. *Литология и полез. ископаемые*, (1), 84-92.
- Симанович И.М., Головин Д.И., Буякайте М.И., Виноградов В.И., Сахаров Б.А., Мацапулин В.У., Соколова А.Л., Покровская Е.В. (2004) О влиянии геодинамических факторов на постседиментационный литогенез юрских терригенных комплексов Кавказа (южный Дагестан). *Литология и полез. ископаемые*, **6**, 638-650.
- Чукин Г.Д. (2008) Химия поверхности и строения дисперсного кремнезема. М.: Тип. Паладин; Принта, 172 с.
- Юлбарисов Э.М., Юлбарисов И.М. (2012) Сколько месторождений, столько же должно быть и методов увеличения нефтеотдачи. *Георесурсы*, (6), 75-79.
- Япаскерт О.В., Парфенова О.В., Косоруков В.Л., Сухов А.В. (1999) Генезис и стадийные преобразования слюд и хлоритов в разных геодинамических условиях литогенеза. *Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология*, (5), 3-12.
- Япаскерт О.В., Ростовцева Ю.В., Карпова Е.В. (2003) Постседиментационный литогенез терригенных комплексов и палеотектоника. *Литосфера*, (1), 39-53.

REFERENCES

- Astarkin S.V., Goncharenko O.P., Pimenov M.V. (2013) Sedimentation settings during the Bobrikov time within the southeast of the Russian plate. *Izv. Saratov Univ. Nov. Ser. Nauki o Zemle*, **13**(1), 57-62. (In Russian)
- Baranov V.A. (2014) Microdeformations of quartz in Carboniferous sandstones of Donbas. *Vestn. PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i Gornoe Delo*, **12**, 75-86. (In Russian)
- Kagarmanova E.V., Kotenov E.V., Chibisov A.V. (2014) Features of the design and development of small oil fields in Tatarstan. *Problemy i Resheniya: Sbornik Nauch. Tr.*, **3**(8), 166-173. (In Russian)
- Kopeliovich A.V. (1965) Epigenesis of ancient strata of the south-west of the Russian platform. *Tr. GIN AN SSSR*, **121**, 312 p. (In Russian)
- Korolev E.A. (2014). Stages of transformation of sandy reservoirs of the Tula-Bobrikov age in erosion cuts in the territory of Tatarstan. *Uch. Zap. Kazan. Univ. Ser. Estestv. Nauki*, **156**(3), 87-97. (In Russian)
- Korolev E.A., Nurgalieva N.G., Smelkov V.M., Eskin A.A., Kalcheva A.V. (2016) Lithological and petrophysical characteristics oil-saturated deposits of Bobrikovsky horizon on the southern slope of the South-Tatarian arc. *Neftyanoe Khozyaistvo*, **10**, 17-19. (In Russian)
- Larochkina I.A., Ganiev R.R., Kapkova T.A. (2009) Development of types of oil deposits in working out bobrikovsky adjournments and mechanism of its development – the base of designing of wells boring. *Georesursy*, **4**(32), 19-21. (In Russian)
- Sakhibgarayev R.S. (1989) Secondary reservoir changes during the formation and destruction of oil deposits. Leningrad, Nedra Publ., 260 p. (In Russian)
- Simanovich I.M. (1978) Quartz of sandy rocks. Moscow, Nauka Publ., 156 p. (In Russian)
- Simanovich I.M. (2007) Postsedimentary lithogenesis of terrigenous complexes in folded areas: rock structures and cleavages. *Lithol. Polezn. Iskop.*, (1), 84-92. (In Russian)
- Simanovich I.M., Golovin D.I., Buyakaite M.I., Vinogradov V.I., Sakharov B.A., Matsapuln V.U., Sokolova A.L., Pokrovskaya E.V. (2004) On the influence of geodynamic factors on the postsedimentary lithogenesis of the Jurassic terrigenous complexes of the Caucasus (southern Dagestan). *Lithol. Polezn. Iskop.*, (6), 638-650. (In Russian)
- Chukin G.D. (2008) Surface chemistry and structure of dispersed silica. Moscow, Paladin Printing House, 172 p. (In Russian)
- Yapaskurt O.V., Parfenova O.V., Kosorukov V.L., Sukhov A.V. (1999) Genesis and staged transformations of micas and chlorites in different geodynamic conditions of lithogenesis. *Vestn. MGU. Ser. 4. Geologiya*, (5), 3-12. (In Russian)
- Yapaskurt O.V., Rostovtseva Yu.V., Karpova E.V. (2003) Postsedimentary lithogenesis of terrigenous complexes and paleotectonics. *Litosfera*, **1**, 39-53. (In Russian)
- Yulbarisov E.M., Yulbarisov I.M. (2012) Enhanced oil recovery methods should be equal to oil fields quantity. *Georesursy*, **6**(48), 75-79. (In Russian)