

УДК 537.533.35;621.382

ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЕ РЭМ ИССЛЕДОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ МИКРОСТРУКТУР КАРБОНАТНЫХ ПОРОД

© 2022 г. Н. А. Скибицкая^а, *, В. А. Кузьмин^а

^аИнститут проблем нефти и газа РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: skibitchka@mail.ru

Поступила в редакцию 06.02.2020 г.

После доработки 22.04.2021 г.

Принята к публикации 27.04.2021 г.

Методами электронной микроскопии изучены процессы фазовых преобразований в карбонатных породах нижнепермских, верхне- и средне-карбоновых отложений из параметрической скважины 1-ВМС Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения. На примере Оренбургского нефтегазового месторождения показано, что в нефтегазоматеринских карбонатных системах порода постоянно находится в состоянии фазовых преобразований, изменяющих коллекторские свойства породы. Показано, что карбонатное породообразующее вещество находится в отдельных зонах залежи в различных фазовых состояниях: от первичного полимерного кристаллического до коллоидного и далее до вторичного кристаллического. Процессы преобразования органического вещества, приводящие на последующих этапах к формированию и преобразованию пористости на начальных этапах, идут в объеме первичных карбонатно-органических полимерных кристаллов и по мере созревания до керогена приводят к микритизации этих кристаллов. И далее (по мере преобразования керогена до углеводородов нефтяного ряда) инициируют процессы перекристаллизации, приводящие к формированию все более крупнокристаллического крупнопорозового коллектора. Изучен генезис компонентов матричных нефтей и показан механизм их накопления в поровом пространстве. Проведенные исследования являются важным этапом изучения генезиса матричной нефти – трудноизвлекаемой нефти газонасыщенных нефтегазоконденсатных месторождений.

Ключевые слова: высокоразрешающая растровая электронная микроскопия, геобиополимеры, карбонатно-органический полимер, микроструктура, органическое вещество, микростроение, перекристаллизация, карбонатные породы, матричная нефть.

DOI: 10.31857/S1028096022020157

ВВЕДЕНИЕ

Применение высокоразрешающей растровой электронной микроскопии (ВРЭМ) для исследования органического вещества в карбонатных породах открыли новые возможности для детального микроструктурного анализа коллекторов нефти и газа и позволили подтвердить “геобиополимерную” концепцию строения карбонатной породы [1–6]. Согласно этой концепции, карбонатные породы нефтяных и газовых месторождений представляют собой минерально-органический полимер, сформированный в придонных морских илах в анаэробной среде в карбонатно-органические молекулы (соли органических кислот) на основе катион-анионного взаимодействия карбонатных катионов кальция, магния, железа и органических кислот. Физико-химическое и химическое старение во времени сформированной придонной карбонатно-органической коллоидной системы в результате внутримолекулярных и межмолекулярных процессов химического и физико-

химического взаимодействия в ее органической (анионной) составляющей приводит к микроглобуляции органических анионов, полимеризации, поликонденсации, уплотнению последней. В результате сближения катионов (неорганических головок карбонатно-органических молекул), инициирующему катионное взаимодействие и последовательный процесс формирования кристаллоидов, формируются первичные морфоструктуры нефтегазоматеринской карбонатно-органической матрицы.

Сформированная таким образом в седиментогенезе и литогенезе многокомпонентная метастабильная карбонатно-органическая нефтегазоматеринская полимерная система концентрирует в себе не только огромный нефтегазогенерационный, но и литогенетический потенциал. Этот потенциал реализуется в процессе преобразования его органической составляющей в объеме кристалла, формируя на ранней стадии интенсивной газогенерации кероген и далее (в процессе его по-

следовательного преобразования) на стадиях нефтегенерации в компоненты матричной нефти: асфальтены, смолы тяжелые спиртобензольные, смолы легкие бензольные, масла, углеводороды нефтяного ряда [7, 8].

Стадии, следовательно, и степень фазовых преобразований карбонатной матрицы, сопровождающиеся процессами микритизации ее первичных структурных форм и последующей перекристаллизации, закономерно определяют процентное содержание и компонентный состав генерированных матричных нефтей в карбонатных отложениях, а также приуроченность отдельных компонентов матричной нефти к определенным структурным формам емкостных объемов в породах.

В связи с этим вопрос дальнейшего исследования на микроуровне высокомолекулярных компонентов матричной нефти методами электронной микроскопии является чрезвычайно актуальным для понимания генезиса матричных нефтей и закономерностей их преобразования.

В настоящей работе на основе электронно-микроскопических методик детально изучены карбонатные породы на различных стадиях фазовых преобразований и дается анализ их микроструктурных особенностей. Также приведены результаты исследований морфологических особенностей высокомолекулярных компонентов (ВМС) “матричной нефти” в нижнепермских, верхне- и средне-карбонатовых отложениях Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения (ОНГКМ).

МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Подготовка образцов пород заключалась в следующем: из керна были приготовлены свежие сколы, поверхность которых исследовали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) при различных увеличениях. Для устранения поверхностного заряда, возникающего под действием электронного зонда, образцы напыляли металлом по стандартной методике [9, 10].

Исследование коллоидных форм органического вещества в породах (коллекторах нефти и газа) с помощью растрового электронного микроскопа требует применения определенных методических приемов [10–12]. В настоящей работе для изучения образцов пород использовался растровый электронный микроскоп Leo Supra 50 V. Для получения информации о топографии микроструктурных элементов в образцах пород применялся классический детектор Эверхарта–Торнли (SE2), который регистрирует вторичные электроны с энергиями <math>< 500 \text{ эВ}</math> при ускоряющем напряжении ~10–15 кВ. Микроскоп был также оснащен высокочувствительным полупроводниковым детектором обратно-отраженных электронов высоких

энергий QBSD, который регистрирует обратно-отраженные электроны высоких энергий (5–20 кэВ). С помощью этого детектора выделялись участки с различным химическим (минеральным) контрастом (ζ -контраст) в изучаемых породах. Опыт работы в этом режиме показал высокую эффективность при изучении различных форм органического вещества, а также при выделении литологического типа пород. Например, кальцит CaCO_3 (в сравнении с кремнеземом SiO_2) отличается более светлым оттенком. А доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ по сравнению с кальцитом имеет более темный оттенок. Микрочастицы органического вещества, содержащего (в сравнении с породой) наиболее легкие элементы, при исследовании в обратно-отраженных электронах имеют наиболее темный оттенок на фоне различных литологических типов породообразующих минералов (рис. 1). Это позволяет предварительно идентифицировать микростроения органического вещества в образце породы при исследовании, а затем детально изучать микростроение частиц органического вещества при больших увеличениях во вторичных электронах [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения генезиса матричных нефтей и особенностей микростроения в процессе преобразования пород были изучены образцы карбонатных пород нижнепермских, верхне- и средне-карбонатовых отложений из параметрической скважины 1-ВМС Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения. Проведенные электронно-микроскопические исследования, а также лабораторные данные изучения карбонатных пород из разных зон месторождения показали, что карбонатное породообразующее вещество находится в отдельных зонах залежи (на микроуровне) и в объеме образца (на макроуровне) в различных фазовых состояниях: от первичного полимерного кристаллического до коллоидного и далее до вторичного кристаллического. Во всех случаях на молекулярном уровне карбонатная матрица имеет для отдельных элементов глобулярные (иногда фибриллярные) надмолекулярные структуры, характерные для органических полимеров и битумов.

Микроструктурные исследования пород из газовой части продуктивных отложений скважины 1-ВМС ОНГКМ показали, что процесс преобразования карбонатной матрицы на первоначальном этапе идет в объеме первичного кристалла с последующим объединением первичных (строющих первичный кристалл) надмолекулярных глобул в более крупные образования надмолекулярных фибриллярных структур. В качестве примера на рис. 1 представлена поверхность скола полимерного карбонатно-органического кристалла с размерами элементов надмолекулярных структур

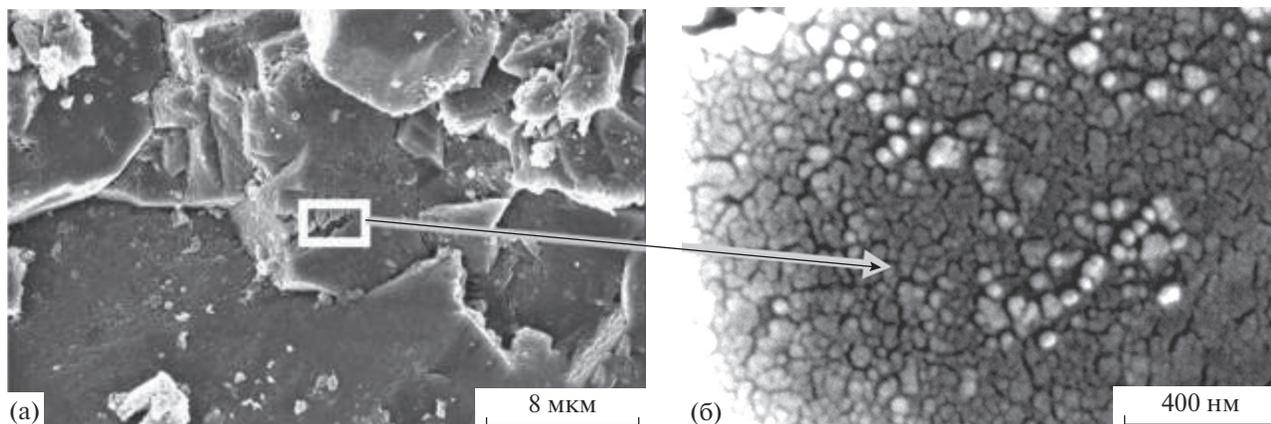


Рис. 1. Образование укрупненных надмолекулярных структур в известняке. Скважина 1-ВМС ОНГКМ, глубина отбора 1653.67 м. Среднекаменноугольные отложения.

от 20–30 до 100 нанометров. Концентрация высокомолекулярных компонентов в породе (битумоидов ХБА) составляет 0.006%.

Первичное кристаллическое состояние карбонатно–органического полимера, который и представляет собой породообразующую матрицу в нефтегазоматеринских карбонатных системах на определенном этапе самоорганизации ее метастабильной органической составляющей, является промежуточным фазовым состоянием системы. В этом состоянии, как показал метод РЭМ, порода представляет собой неколлектор с плотной матрицей и относительно крупными первичными кристаллами. Такая матрица характеризуется наличием небольшой межкристаллической пористости. В преобразованных породах, которые, как правило, находятся на промежуточных этапах процессов фазовых преобразований и перекристаллизации, такое микростроение наблюдается в виде так называемых останцов – еще не перекристаллизованных участков в перекристаллизованной массе. Объемное содержание таких зон в образцах различно и зависит от стадий и степени катагенетических преобразований в очагах и в зонах, к которым они относятся.

На рис. 2 показано одно из начальных состояний плотной крупнокристаллической породообразующей матрицы, формирующей собой породо-неколлектора.

Изученная поверхность скола образца породы проходит в основном по контактным поверхностям малоизмененных, неперекристаллизованных кристаллов с различной ориентировкой и преимущественным размером 50–300 мкм. На кристаллах наблюдается характерная штриховка и ступенчатые сколы, что указывает на наличие спаянности. Как видно на изображении, кристаллы плотно примыкают друг к другу, практически не образуя свободного порового пространства.

Наличие слоистой микроструктуры, характерной для полимерного строения таких кристаллов, изучалось при больших увеличениях. На рис. 3 показано микростроение кристаллов кальцита при больших увеличениях (до $\times 150000$ крат) для образца, который представляет собой известняк серого цвета, мелкозернистый, по шлифам – первично мелкоорганогенно-детритовый, с включениями макрофауны. Концентрация высокомолекулярных соединений $C_{\text{ВМС}}$ составляет 0.041%. На РЭМ-изображениях выглядит как плотный.

При больших увеличениях ($\times 150000$ крат) на многих кристаллах, имеющих сколы, можно наблюдать внутреннюю слоистую текстуру с толщиной “монослоев” 5–10 нанометров и глобулярно-фибрилярным полимерным строением самих монокристаллов. Такое микростроение определенно указывает на полимерную природу первич-

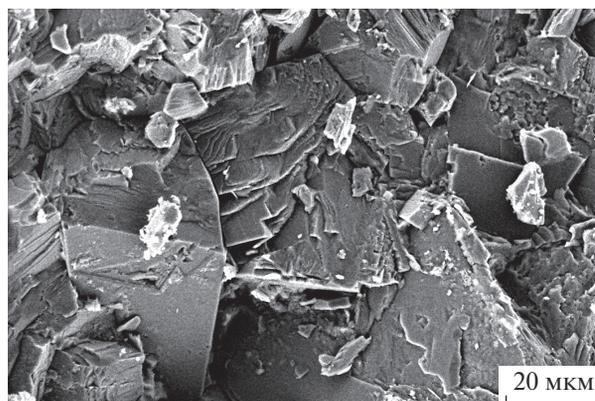


Рис. 2. РЭМ-изображение карбонатной матрицы в виде плотноупакованных первичных полимерных (карбонатно-органических) поликристаллов известняка. Скважина 1-ВМС ОНГКМ, интервал отбора 1653.61–1656.7 м. Московский ярус среднекаменноугольных отложений.

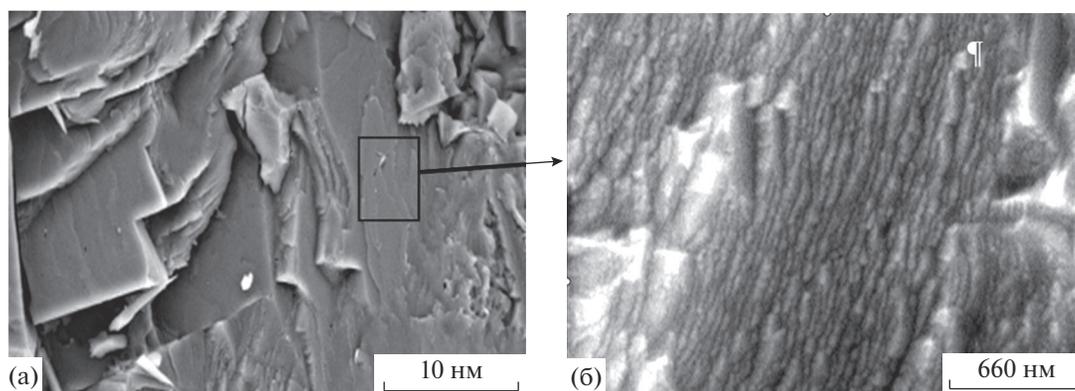


Рис. 3. Глобулярно-фибрилярная слоистая текстура карбонатных минерально-органических кристаллов породообразующей матрицы. Обр. 358-7. Скважина 1-ВМС ОНГКМ, глубина отбора 1656.18 м. Среднекаменноугольные отложения.

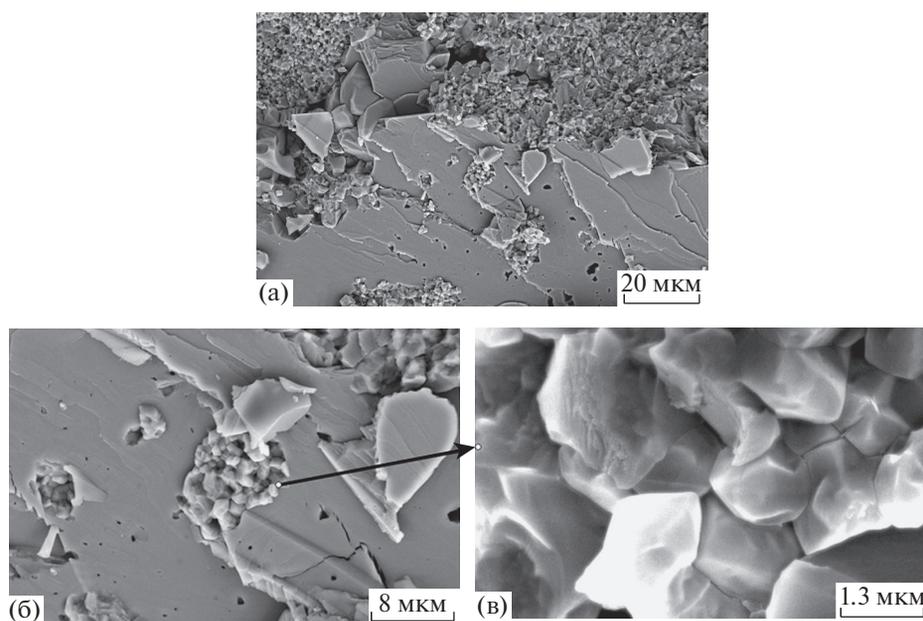


Рис. 4. Возникновение и развитие очагов перекристаллизации в объеме первичного карбонатного кристалла в известняке. Скважина 1-ВМС ОНГКМ, глубина отбора 1663.87 м. Московский ярус среднекаменноугольных отложений.

ных монокристаллов, на основе которых формируются поликристаллы.

Результаты РЭМ-исследований указывают на закономерность развития процессов фазовых преобразований в породах, сопровождающихся процессами перекристаллизации (даже на уровне отдельного кристалла) с образованием более мелких кристаллов и формированием субкапиллярной пористости (рис. 4).

Таким образом, увеличение пористости породообразующей матрицы в диапазоне субкапиллярной пористости связано с начальным этапом процесса перекристаллизации первичных зерен карбонатной породы: их коллоидизацией, деструк-

цией, грануляцией, пелитизацией, микритизацией с последующим формированием неравновесных микрокристаллических образований скаленоэдрической формы. При этом в процессе совершенствования степени кристалличности образующихся микрокристаллов происходит их “очищение” от битумоидных компонентов. Происходит отторжение битумоидных компонентов в образующиеся при этом субкапиллярнопоровые объемы микритизированной матрицы. Необходимо отметить, что инициатором вышеописанного процесса преобразования полимерной матрицы является ее органическая составляющая. Процессы химического “старения”, уплотнения, поликонденсации в органической матрице приводят к

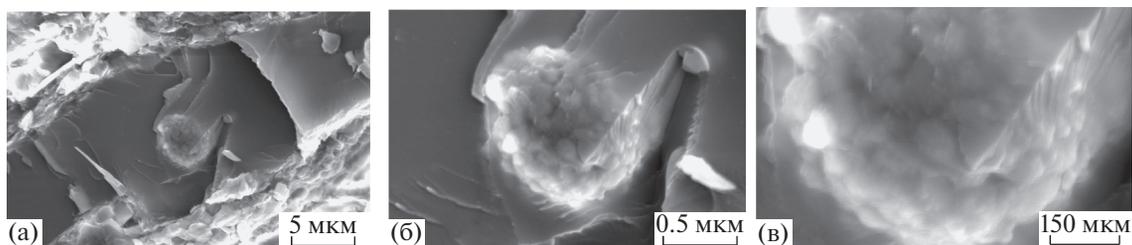


Рис. 5. Известняк доломитизированный. Высокая степень коллоидизации карбонатной матрицы. Сквжина 1-ВМ-СОНГКМ, глубина привязки 1656.75 м.

генерации (сбрасыванию) внутри нее низкомолекулярных углеводородных и неуглеводородных компонентов газового и конденсатного (C_5-C_{10}) ряда, которые тут же сорбируются, растворяются и накапливаются как в самом объеме органического полимера, так и в образующихся в полимере битумоидных компонентах: смолах, асфальтенах, твердых парафинах, маслах. При этом (по мере накопления газа и конденсата в объеме органической составляющей карбонатно-органического полимера и одновременного зарождения в ней битумоидных компонентов) породообразующая матрица переходит из состояния твердокристаллического коллоида в набухшее (в ряде случаев, до студнеобразного коллоида) максимально неравновесное состояние. На рис. 5 показан пример такого фазового состояния первичных кристаллов матрицы в доломитизированном известняке из скважины 1-ВМС с пористостью $K_p = 1.48\%$ и концентрацией высокомолекулярных соединений $C_{ВМС(ХБА)} = 0.444\%$.

Такое неравновесное состояние является критическим и приводит к разделению первичных кристаллических элементов матрицы на промежуточные микритизированные кристаллоидные образования, кероген и битуминозные (битумоидные) компоненты в его объеме, набухшие в компонентах газа и конденсата.

На рис. 6а, 6б показана структура известняка доломитизированного с высокой степенью микритизации коллоидизированной карбонатно-органической матрицы с выходом керогена (накопленного высокого нефтегенерационного потенциала) в свободную фазу между микритовыми частицами. Начальные стадии реализации нефтегенерационного потенциала – процессы последовательного преобразования керогена в битумоиды. Концентрация высокомолекулярных компонентов в породе $C_{ВМС(ХБА)} = 2.812$ масс. %, Асф. – 41.42 масс. %, ССБ – 5.97 масс. %, СБ – 19.03 масс. %, М – 33.58 масс. %.

На рис. 7 приведено РЭМ-изображение скола образца карбонатной породы, отвечающей вышеописанному фазовому и химическому состоянию. Показаны области, в которых был опреде-

лен элементный состав с помощью метода рентгеноспектрального микроанализа (использовали энергодисперсионную приставку к растровому электронному микроскопу).

Результаты элементного анализа для образца скважины 1-ВМС ОНГКМ, (РЭМ-изображение на рис. 7) в ат. % приведены в табл. 1.

Результаты анализа показывают, что микроструктурные элементы, морфологически соответствующие керогеновой стадии, содержат до 93.69 ат. % углерода при отсутствии кальция и магния.

Микроструктурные исследования методом РЭМ показали, что на площади или в объеме од-

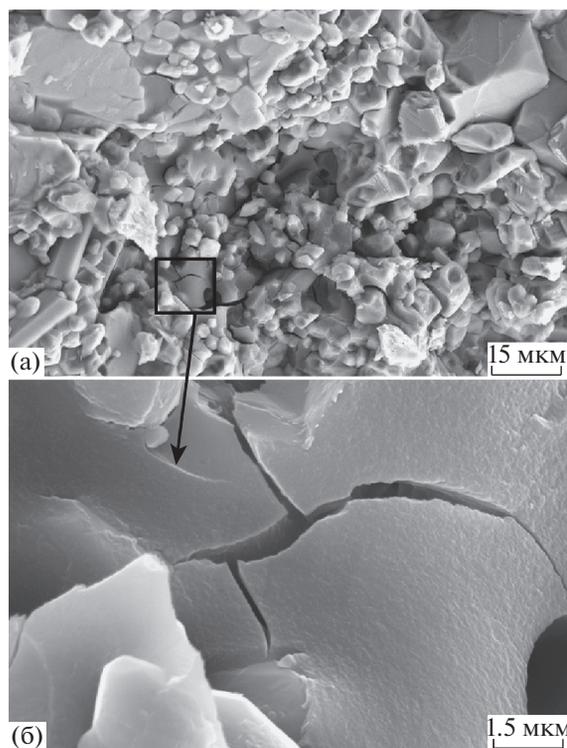


Рис. 6. Известняк доломитизированный. Начальные стадии реализации нефтегенерационного потенциала – процессы последовательного преобразования керогена в битумоиды. Сквжина 1-ВМС ОНГКМ.

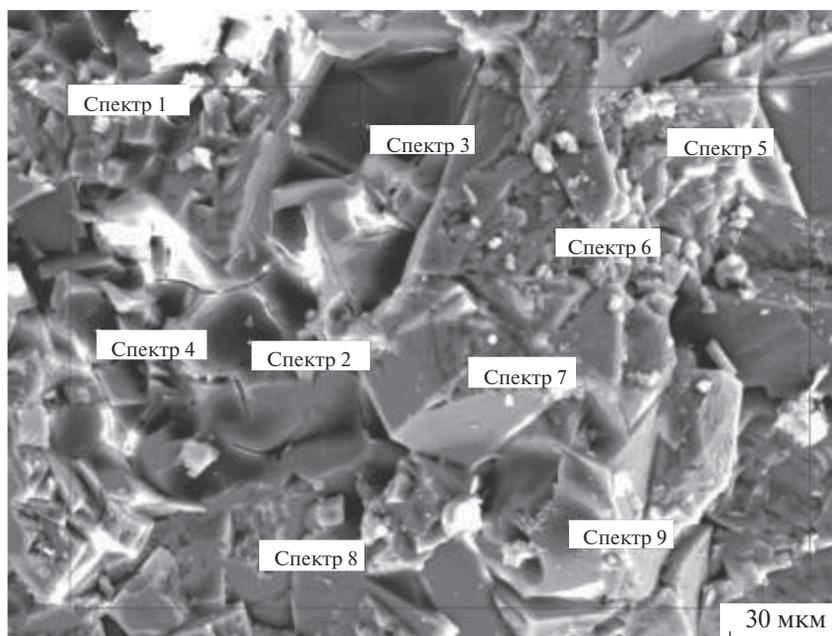


Рис. 7. Известняк. Показаны области, в которых был определен элементный состав с помощью метода рентгеноспектрального микроанализа. Московский ярус среднекаменноугольных отложений. Глубина привязки 1656.75 м, скважина 1-ВМС ОНГКМ.

ного микроучастка в карбонатных породах можно проследить весь процесс: от микритизации первичных кристаллических форм до перекристаллизации в процессе преобразования от керогена до углеводородов нефтяного ряда, вышедшего в свободную фазу органического вещества. Поровое пространство при этом изменяется от субкапиллярнопорового мелкозернистого до крупнопорового крупнокристаллического (рис. 8).

Таблица 1. Результаты элементного анализа (в ат. %) образца 359-2, скважина 1-ВМС ОНГКМ

Спектр	C	O	Mg	S	Ca
Спектр 1	54.45	38.63	2.69	0.51	3.71
Спектр 2	92.01	4.24	0.65	2.04	1.06
Спектр 3	94.38	4.09	—	1.48	0.06
Спектр 4	71.78	15.92	0.79	8.7	2.81
Спектр 5	19.26	61.44	8.22	—	11.08
Спектр 6	20.34	62.34	6.96	—	10.35
Спектр 7	22.27	60.69	8.23	—	8.82
Спектр 8	24.67	63.62	6.4	—	5.31
Спектр 9	93.69	4.68	—	1.54	0.09
Максимальное значение	94.38	63.62	8.23	8.7	11.08
Минимальное значение	19.26	4.09	0	0	0.06

Процесс преобразования первичных крупнокристаллических форм во вторичные крупнокристаллические проходит следующие стадии:

1. Переход в коллоидное состояние первичных кристаллических карбонатно-органических форм (элементов первичной породообразующей матрицы породы-неколлектора) в результате разрыва катионно-анионных связей между карбонатной и органической составляющими в процессе преобразования органического вещества до керогена в составе породообразующего карбонатно-органического полимерной матрицы.

2. Микритизация первичных морфоструктурных карбонатных форм в результате созревания керогена и, как следствие, в результате разрыва химических связей между органической составляющей (органическими анионами) первичного карбонатно-органического полимера и его неорганической составляющей карбонатными катионами, например, кальция, преобладающего по концентрации в системе породообразующих твердых карбонатно-органических полимерных растворов.

3. Образование вторичных крупнокристаллических морфоструктур через процессы перекристаллизации в результате постепенного очищения и слияния микритовых частиц при последовательной реализации нефтегенерационного потенциала, сконцентрированного в керогене и компонентах последовательного преобразования до асфальтенов. Образование тяжелых спиртобензольных смол, далее — легких бен-

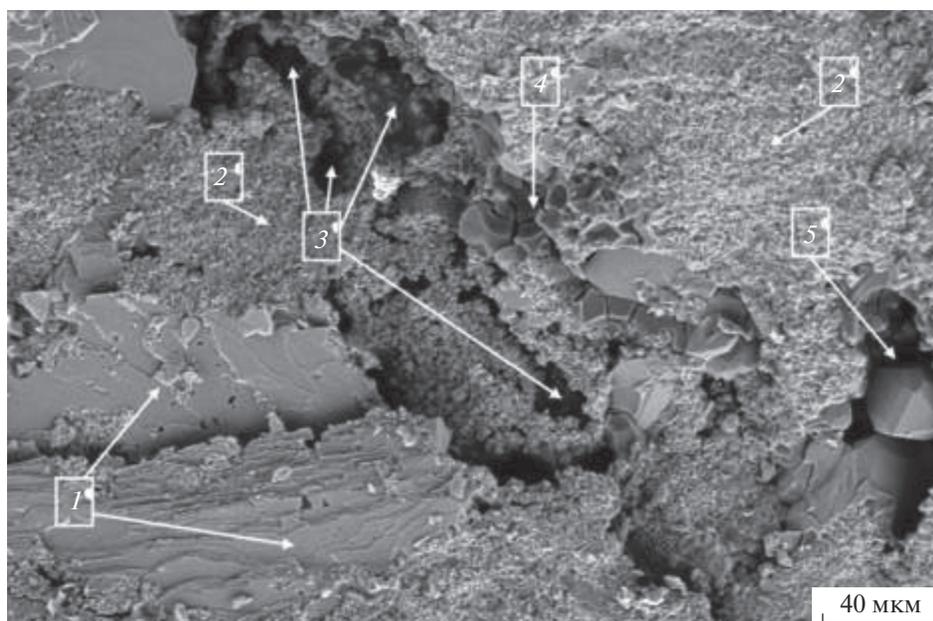


Рис. 8. Стадии процесса перекристаллизации на микроучастке образца (известняк): 1 – начальная стадия, 2 – промежуточная стадия – микритизация, 3 – промежуточная стадия перекристаллизации, 4 – завершающая стадия перекристаллизации, 5 – аутигенный кристалл кальцита.

зольных смол, масел и, наконец, углеводородов нефтяного ряда.

4. Образование вторичных (также вторичных по концентрации в исходной системе твердых карбонатно-органических полимерных растворов) крупнокристаллических морфоструктур, формирующих крупнопоровую крупнокристаллическую высокопроницаемую матрицу высокопористых крупнопоровых пород-коллекторов.

Анализ большого объема исследований методом РЭМ образцов карбонатных пород Оренбургского НГКМ, отобранных по всему продуктивному разрезу из скважины 1-ВМС, из других скважин и зон месторождения, подтверждает тесную связь микростроения карбонатных пород с этапами преобразования в породах органического вещества.

Необходимо остановиться на выявленных свойствах вновь образованной вторичной породообразующей крупнопоровой, крупнокристаллической карбонатно-органической матрицы. Как показывают исследования, образованная в результате вышеописанных процессов вторичная карбонатно-органическая матрица также представляет собой карбонатно-органический полимер, но, по-видимому, с другим составом органического анионного вещества. Его концентрация в системе коллоидных форм карбонатно-органических илов была вторичной по концентрации.

В органической составляющей нового минерально-органического полимера, то есть в органической матрице, на основе которой построен

новый породообразующий кристалл, продолжается (свойственный органическим формам) процесс химических преобразований как во времени (процесс “старения”), так и под влиянием меняющихся условий: давления, температуры, физико-химической обстановки (еН, рН). В результате этих изменений, инициируется подобный первому, новый процесс фазовых преобразований или второй цикл перекристаллизации новой породообразующей матрицы.

Были проведены эксперименты по изучению характера распределения органической составляющей в объеме и на поверхности совершенных кристаллов – конечных продуктов процессов перекристаллизации, в которых глубина преобразования органической составляющей в составе карбонатно-органического полимера еще не привела к стадии коллоидизации самого кристалла. Для этого дополнительно использовался детектор вторичных электронов “In lens”, которым снабжен используемый нами растровый электронный микроскоп. Конструктивной особенностью этого детектора является размещение его таким образом, что он может использовать магнитное поле объективной линзы для фокусировки вторичных электронов, что позволяет получать контраст изображения при изучении органических компонентов в породе.

На рис. 9а показано микростроение породы, в которой прослеживаются выделенные этим методом конденсированные темные зоны более концентрированного и менее плотного состава

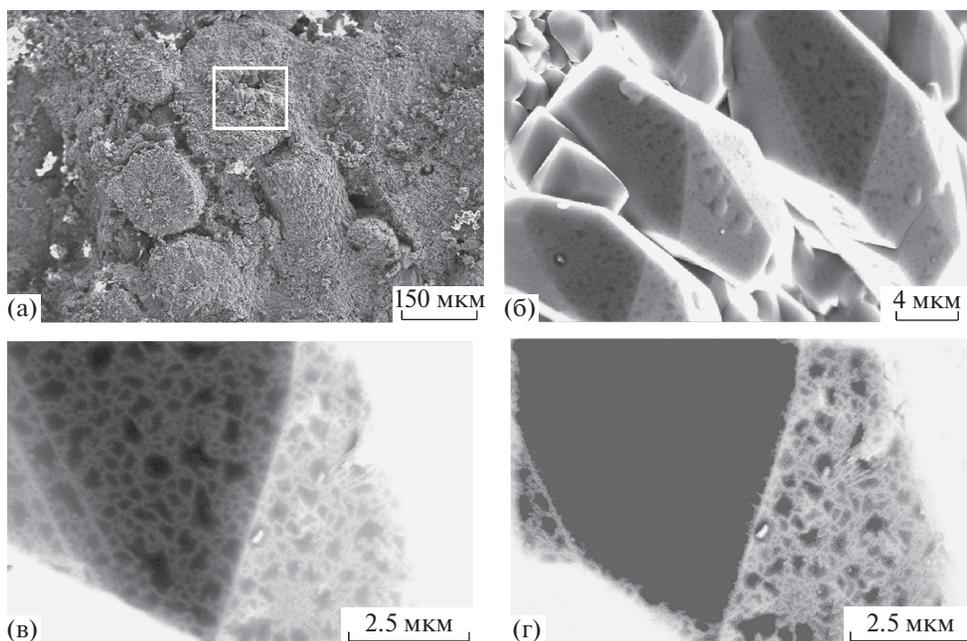


Рис. 9. Распределение карбонатной и органической составляющих в карбонатно-органическом полимерном кристалле известняка с глубины 1612.31 м, скважины 1-ВМС ОНГКМ.

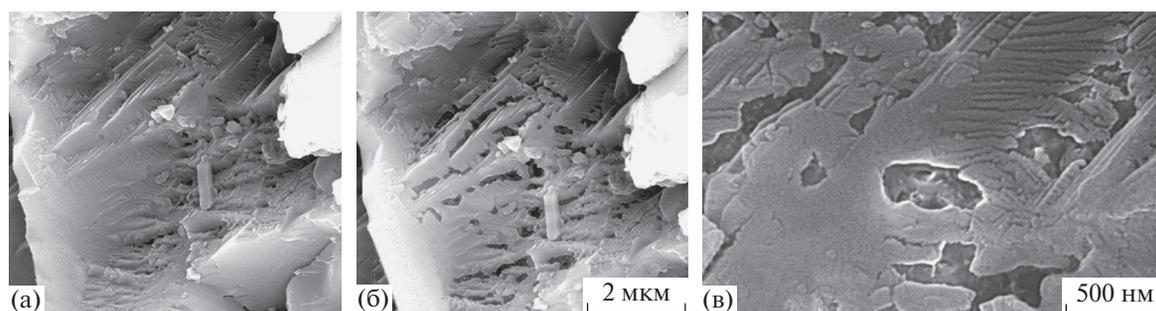


Рис. 10. Эффект удаления из карбонатного кристалла во времени (порядка 1–2 мин) органического вещества в потоке электронов с энергией 20 кэВ (образец известняка, глубина привязки 1387.52 м, скважина 1-ВМС, ОНГКМ).

(рис. 9б–9г), определяющие распределение органической составляющей в объеме скаленоэдрических кристаллов карбонатно-органического полимера, проявившего себя как второй литогенетический тип (образец из скв. 1-ВМС ОНГКМ с глубины 1612.31). Светлые (белые) узорчатые зоны определяют фрактально-кластерное распределение более плотной минеральной составляющей этого карбонатно-органического полимерного кристалла.

Возникновение контраста основано на различии элементного состава. Легкие элементы с более низким коэффициентом вторичной эмиссии (органическое вещество) выглядят более темными зонами при использовании детектора вторичных электронов “In lens”

Подтверждением наличия органической составляющей в темных зонах кристаллов служит эффект удаления из карбонатного кристалла во времени (порядка 1–2 мин) органического вещества при воздействии потоком электронов с ускоряющим напряжением 20 кВ, а также эффект формирования узорчатого распределения более плотного карбонатного материала (рис. 10а, 10б).

Необходимо отметить, что органическое вещество, преобразованное до керогеноподобного органического полимера в растворе электронного микроскопа под действием пучка электронов, не разрушается (рис. 6а, 6б). На основании чего можно сделать вывод, что в объеме карбонатно-органических морфоструктур с достаточно выраженными кристаллическими характеристиками органическая составляющая находится в

менее преобразованном, менее конденсированном состоянии, не дошедшем до фазового состояния керогена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ проведенных микроструктурных исследований карбонатных пород из нефтяного месторождения позволил установить стадийность фазовых процессов преобразований карбонатной матрицы. Из полученных данных следует, что в нефтегазоматеринских карбонатных системах порода постоянно находится в состоянии фазовых преобразований, изменяющих коллекторские свойства породы. Процесс преобразования карбонатной матрицы на первоначальном этапе в диагнезе идет в объеме первичных карбонатно-органических полимерных кристаллов и по мере развития процессов перекристаллизации захватывает все больший объем породы. Формирование коллектора за счет изменения фазового состояния матрицы происходит по следующей схеме:

1. Начальная стадия. Образование непроницаемой матрицы из первичных кристаллов с плотной упаковкой.

2. Промежуточная стадия. Микритизация первичных карбонатных кристаллов. Образование субкапиллярнопоровой непроницаемой и низкопроницаемой микритизированной матрицы. Субкапиллярнопоровые объемы заполнены вышедшим в самостоятельную фазу керогеном, в объеме которого зарождаются и развиваются (охватываемая кероген в полном объеме) очаги последовательного преобразования керогена в асфальтены и тяжелые смолы с физико-химически связанным и растворенным в них пластовым газом.

3. Промежуточная стадия. Начальная стадия перекристаллизации – преобразование тяжелых смол в осмоленные углеводородные компоненты (масла, легкие углеводороды нефтяного ряда), способствующее последовательному очищению от керогена и взаимодействию между собой карбонатных микритовых форм, приводящему к формированию вторичных карбонатных минералов;

4. Завершающая стадия перекристаллизации. Образование крупнопоровой высокопроницаемой крупнокристаллической карбонатной матрицы, насыщенной свободным газом с высоким газоконденсатным фактором и легкой нефтью.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам “Прогноз состояния ресурсной базы нефтегазового комплекса России на основе системных исследований перспектив нефтегазоносности природных резервуаров в карбонатных, терригенных и сланцевых формациях”, № АААА-А19-119030690047-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скибицкая Н.А., Яковлева О.П., Григорьев Г.А., Доманова Е.Г., Ингерова Т.В., Кузьмин В.А. Новые представления о породообразующем карбонатном веществе (геобиополимере) залежей углеводородов // Сб. Фундаментальные проблемы нефти и газа: Тр. Всерос. конф. Москва: Институт проблем нефти и газа, 1996. Т. 4. С. 48.
2. Дмитриевский Н.А., Скибицкая Н.А., Зекель Л.А., Навроцкий О.К., Краснобаева Н.В., Доманова Е.Г. // Химия твердого топлива. 2010. № 3. С. 67.
3. Дмитриевский Н.А., Скибицкая Н.А., Зекель Л.А., Навроцкий О.К., Краснобаева Н.В., Пуго Т.А. // Химия твердого топлива. 2011. № 3. С. 61.
4. Дмитриевский А.Н., Скибицкая Н.А., Политыкина М.А., Карнаухов С.М. // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2005. № 6. С. 33.
5. Скибицкая Н.А., Яковлева О.П., Григорьев Г.А., Доманова Е.Г., Ингерова Т.В., Кузьмин В.А. // Геология нефти и газа. 1997. № 12. С. 13.
6. Дмитриевский А.Н., Скибицкая Н.А., Яковлева О.П., Кузьмин В.А., Зекель Л.А., Прибылов А.А. Увеличение ресурсного потенциала газоконденсатных месторождений. Фундаментальные проблемы геологии и геохимии нефти и газа и развития нефтегазового комплекса России. Москва: ГЕОС, 2007. С. 360.
7. Дмитриевский А.Н., Скибицкая Н.А., Яковлева О.П. Матричная нефть – дополнительный сырьевой ресурс нефтегазоконденсатных месторождений // Сб. Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности. Теоретические и прикладные аспекты. Тез. докл. Всероссийской конференции. Москва: ГЕОС, 2007. С. 80.
8. Скибицкая Н.А., Яковлева О.П. Эволюция карбонатного вещества месторождений углеводородов // Сб. Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности. М.: Наука, 2000. С. 142.
9. Практическая растровая электронная микроскопия // Под ред. Гоулдстейна Дж. и Яковица Х. Москва: Мир, 1978. 656 с.
10. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Э. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. Пер. с англ. / Под ред. Петрова В.И. В 2-х книгах. Т. 1. М.: Мир, 1984. 303 с.
11. Кузьмин В.А., Скибицкая Н.А., Гаршев А.Б. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2008. № 11. С. 1567.
12. Скибицкая Н.А., Кузьмин В.А., Судьин В.В. Электронно-микроскопические исследования ОВ в карбонатных породах-коллекторах нефти и газа // Сб. XXVI Российской конференции по электронной микроскопии (30 мая–3 июня 2016 г.). М., Зеленоград: ИПТМ РАН, 2016. Т. 1. С. 636.
13. Скибицкая Н.А., Кузьмин В.А., Судьин В.В. // Сб. XXVII Российской конференции “Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях органических, неорганических наноструктур и нано-биоматериалов”. Черноголовка (28–30 августа 2018 г.): Изд-во “Богородский печатник”, 2018. Т. 2. С. 205

High-Resolution SEM Studies of Organic Microstructures Carbonate Rocks

N. A. Skibitskaya¹, * and V. A. Kuzmin¹

¹*Institute of Oil and Gas Problems RAS, Moscow, 11933 Russia*

**e-mail: skibitchka@mail.ru*

The processes of phase transformation in carbonate rocks of the Lower Permian, Upper and Middle Carboniferous deposits from the parametric well 1-VMS of the Orenburg oil and gas condensate field have been studied by means of electron microscopy. On the example of the Orenburg oil and gas field, it is shown that in the oil and gas source carbonate systems, the rock is constantly in a state of phase transformations that change the reservoir properties of the rock. It is shown that the carbonate rock-forming substance is in separate zones of the deposit in different phase states: – from primary polymer crystalline to colloidal and further to secondary crystalline. The formation of porosity at the initial stage in diagenesis first occurs in the volume of primary carbonate-organic polymer crystals and as the recrystallization processes develop, it captures an increasing volume of rock, creating a reservoir. The conducted research is an important stage in the study of the genesis of matrix oils – a new unconventional type of hydrocarbon feedstock of oil and gas condensate fields.

Keywords: high-resolution scanning electron microscopy, geobilpolymers, microstructure, organic matter, microstructure, recrystallization, carbonate rocks, matrix oil.