

УДК 553.983

Д.Р. Гилязетдинова¹, Д.В. Корост²

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПУСТОТНОГО ПРОСТРАНСТВА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ГЕНЕРАЦИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ФЛЮИДОВ НА ПРИМЕРЕ ДОМАНИКОВОГО ГОРИЗОНТА ЮЖНО-ТАТАРСКОГО СВОДА

Основная цель работы — изучение факторов, контролирующих изменение строения породы в ходе катагенетических преобразований органического вещества (ОВ), содержащегося в ней.

Генерация и первичная миграция углеводородов в природе контролируется такими параметрами, как температура, давление, состав вещества, содержание органики и др. Безусловно, влияние большинства из них уже давно изучено и хорошо продемонстрировано экспериментально. Но работ, посвященных изучению влияния текстурных признаков пород, а также количественного содержания органического вещества на трансформацию порового пространства пород, мало. Поэтому эти параметры представляют наибольший интерес при изучении процессов первичной миграции.

В результате эксперимента выявлено, что пустотное пространство пород после каждой стадии прогрева преобразуется путем формирования новых пустот и каналов, связывающих уже существующие поры. Образец с относительно низким содержанием органического вещества подвергся меньшим изменениям, в отличие от породы, интенсивно насыщенной органикой. Результаты работы также показали, что изменение морфологии пустотного пространства зависит от первичной текстуры породы. Основные изменения в структуре порового пространства отмечены при прогреве породы на этапе 260–430 °С, этому температурному интервалу также соответствует наиболее интенсивное образование углеводородов.

Ключевые слова: первичная миграция, пиролиз, рентгеновская томография, органическое вещество, доманиковые отложения.

The main objective of this paper is to study the factors controlling changes in rock structure during catagenetic transformation of organic matter. Hydrocarbon generation and primary migration can be controlled by numerous parameters; the most important are temperature, pressure, hydrocarbon composition, and organic matter type and content. Several experimental studies focused on the influence of these main parameters. However few dedicated works investigated how the primary structure characteristic and organic matter content affects the pore space transformation of rocks. For this purpose we simulated the primary migration processes in laboratory conditions (pyrolyses and CT scanning) in order to observe the dynamics of pore space transformation.

Our experiments demonstrate that after each stage of heating the rocks change their original morphology with the formation of new pores and conduits connecting the primary voids. The samples with relatively low content in organic matter revealed fewer changes in pore space morphology, in contrast to rocks rich in organic content. Our results also highlight that the newly formed pore structures are directly related with the original structure of the unaltered rocks and the primary connectivity of the organics. Most of the structural changes were observed during the sequential heating between 260–430 °С; within this interval also occur the most intense reactions for hydrocarbons formation.

Key words: primary migration, pyrolysis, CT scanning, organic matter, Domanic formation.

Введение. Процессы, связанные с первичной миграцией углеводородов (УВ) из материнских пород, особенно те, которые провоцируют начало такого движения, до сих пор мало изучены. Исследование таких процессов возможно при создании условий, схожих с пластовыми. Поэтому большинство работ, посвященных изучению пер-

вично-миграционных процессов, носят чисто экспериментальный характер.

В связи с возросшим интересом к изучению строения, состава и нефтегазосного потенциала нетрадиционных источников углеводородов работы по изучению трансформации пустотного

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, аспирантка; *e-mail*: gilyazetdinova_91@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, науч. с., канд. геол.-минерал. н.; *e-mail*: dkorost@mail.ru

пространства пород в процессе генерации углеводородных флюидов вновь стали актуальны.

На сегодняшний день запасы традиционных УВ уменьшаются. В связи с этим возникает необходимость разработки новых нетрадиционных источников углеводородного сырья. Один из примеров такого источника — доманиковая нефтематеринская толща, в которой сосредоточено огромное количество еще не сгенерированной углеводородной массы. Изучение условий и процессов генерации УВ, формирования и трансформации пустотного пространства в этих породах необходимо для понимания механизмов нефтеобразования и определения оптимальных и рентабельных способов их промышленной разработки.

Генерация и первичная миграция углеводородов в природе контролируются множеством параметров — температурой, давлением, составом вещества, содержанием органики. Безусловно, влияние большинства этих параметров уже давно изучено и хорошо продемонстрировано экспериментальными работами [Белецкая, 1990, 2007; Tisot, 1967; Rudkiewicz et al., 1994; Lafargue et al., 1993; Kobchenko et al., 2011]. Тем не менее работ, посвященных изучению влияния текстурных признаков пород, а также количественного содержания ОВ на трансформацию порового пространства, немного. Поэтому именно эти параметры выбраны нами для изучения процессов первичной миграции.

Материалы и методы исследования. К потенциальным источникам УВ на территории Волго-Уральской нефтегазоносной провинции относят высокобитуминозные породы, известные как доманикиты или доманикоиды, содержащие рассеянное органическое вещество (ОВ) сапропелевого типа ($C_{орг}=5\pm 20\%$).

Доманикиты представлены глинистыми, глинисто-карбонатными, кремнисто-глинисто-карбонатными и кремнистыми разностями пород. На востоке Восточно-Европейской платформы доманикиты развиты в Пермской, Самарской областях, Татарстане и Башкортостане.

Доманикиты выделяются в объеме от саргаевского горизонта среднефранского подъяруса верхнего девона до кизеловского горизонта турнейского яруса нижнего карбона и образуют битуминозную кремнисто-глинисто-карбонатную формацию [Ананьев и др., 2007].

Доманикоидные отложения формировались в недокомпенсированных осадках впадинах и прогибах, возникавших на тех этапах геологического развития бассейна, когда скорость тектонических опусканий превышала темп осадкообразования. Такая обстановка сложилась на востоке Русской плиты в семилукское (доманиковое) время с образованием обширной незагруженной палеовпадины, занявшей почти всю территорию современной

Волжско-Камской антеклизы. В позднем девоне—турне размеры впадины постепенно сократились до относительно узких прогибов Камско-Кинельской системы. Доманиковый бассейн представлял собой эпиконтинентальный морской водоем глубиной 100–300 м с нормальной соленостью. Высокое содержание ОВ связано с обогащением вод впадины зоопланктоном.

Первичная обогащенность зоопланктона липидами способствовала повышенному накоплению УВ. Свободный кремнезем поступал, по-видимому, с востока, со стороны Уральской геосинклинали, где в девоне активно проявлялись вулканизм и гидротермальная деятельность. Пелитовый материал привносился с расположенной на северо-западе суши [Зайдельсон и др., 1990].

Особое место в разрезе доманиковой формации занимают отложения доманикового и мандымского горизонтов верхнего девона, с которыми связывают основной генерационный потенциал в разрезе доманикитов.

Методика лабораторных исследований. Для изучения строения и состава пород доманикового горизонта коллекция отобранных образцов исследована рядом методов.

Для определения количественного состава пород проводилась рентгеновская дифрактометрия на установке «Ultima-IV» (фирма «Rigaku», Япония). Рабочий режим — 40 кВ, 40 мА, медное излучение, никелевый фильтр, диапазон измерений $3,6-65^\circ 2\theta$, шаг по углу сканирования $0,02^\circ 2\theta$, фиксированная система фокусирующих щелей. Для ускорения съемки и повышения качества экспериментальных данных использовался полупроводниковый детектор нового поколения DTex/Ultra, скорость сканирования $5^\circ 2\theta/\text{мин}$.

Диагностика минерального состава проводилась методом сопоставления экспериментального и эталонных спектров из базы данных PDF-2 в программном пакете PDXL (фирма «Rigaku»). Количественный анализ проводили методом полнопрофильной обработки рентгеновских картин от неориентированных препаратов [Пушаровский, 2000] в программном продукте RockJock [Eberl, 2003].

Литологическое изучение пород проводилось на оптическом лабораторном микроскопе «Leica DM EP» и микронзондовом комплексе на базе растрового (сканирующего) электронного микроскопа «Jeol JSM-6480LV» с комбинированной системой рентгеноспектрального микроанализа. Растровые электронные изображения получены во вторичных электронах (морфология поверхности) [Калин и др., 2008].

Следующий этап исследования заключался в томографическом сканировании цилиндрических ($\mu\text{КТ}$) образцов диаметром 3 мм. Изучение образцов методом компьютерной рентгеновской микротомографии проводили с помощью компьютерного

микротомографа «SkyScan-1172». Принцип работы системы основан на получении множественных рентгеновских теневых изображений объекта с разных углов, что обеспечивается движением объекта на высокоточном предметном столике. Из этих теневых изображений реконструируются изображения в поперечном сечении объекта при помощи модифицированного алгоритма конусного излучения Фелдкампа, посредством которого создается изображение внутренней микроструктуры и плотности по выбранной высоте в трансмиссионных изображениях. На получаемых рентгеновских сечениях образца более темному цвету соответствует меньшая рентгеновская плотность среды, а светлому — большая плотность [Stock, 2009].

Геохимические характеристики вещества получены на пиролизаторе «RockEval-6», который является новейшей модификацией прибора Rock-Eval. Методика пиролиза на аппаратуре Rock-Eval разработана во Французском институте нефти [Espitalie, 1984].

Таким образом, подробно изучив состав и строение каждого образца, мы установили, что такие параметры, как минеральный состав, тип ОВ, зрелость ОВ, состав УВ, для большинства пород в пределах выбранной коллекции идентичны (табл. 1).

Таблица 1

Основные характеристики образцов

Номер образца	ОВ, %	T _{max} , °C, стадия катагенеза	Состав	Текстура
1	4,59	429, протокатагенез	кремнисто-карбонатный	Слоистая
2	12,67	431, мезокатагенез	— “ —	— “ —
3	10,6	430, протомезокатагенез	глинисто-кремнисто-карбонатный	— “ —
4.1	0,7	424, протокатагенез	карбонатный	Пятнистая
4.2	2,41	420, протокатагенез	глинисто-карбонатный	Слоистая
4.3	3,44	423, протокатагенез	кремнисто-карбонатный	Пятнистая
4.4	5,98	423, протокатагенез	карбонатный	Массивная
5.1	3,92	427, протокатагенез	кремнисто-карбонатный	Слоистая
5.2	1,27	420, протокатагенез	карбонатно-кремнистый	Массивная
5.3	0,57	433, мезокатагенез	карбонатный	— “ —

Однако отмечено, что текстурные признаки пород, а также содержание ОВ отличаются. Учитывая установленные особенности строения и состава коллекции, эксперимент был разделен на две части: 1) изучение влияния содержания ОВ на морфологию породы в процессе термического воздействия; 2) изучение влияния текстур на

первично-миграционные процессы при одинаковом содержании ОВ. Кроме того, проведен дополнительный эксперимент по изучению динамики изменения структуры пустотного пространства в процессе генерации углеводородных флюидов.

Эксперимент. Для решения поставленных выше задач выполнена серия экспериментов по изучению пустотного пространства нефтематеринской породы при генерации углеводородов, в основу которых легли экспериментальные работы сотрудников кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, выполненные в 2010 г. [Корост и др., 2012].

Лабораторный эксперимент заключался в моделировании генерации УВ в ненарушенном образце породы путем нагрева в атмосфере азота по заданной температурной программе, а также в наблюдениях за изменениями в структуре порового пространства. Моделирование генерации УВ проводилось на пиролизаторе «RockEval-6».

В результате эксперимента установлено, что углеводороды, уже имеющиеся в породе в свободном состоянии или сорбированные, выходят в первую очередь под воздействием постоянной температуры 300 °C (пик S1). Затем прибор фиксирует УВ, получившиеся в результате крекинга керогена и тяжелой смолисто-асфальтеновой фракции битумоида (пик S2) (в температурном интервале 300–650 °C, скорость нагрева 25 °C/мин) (рис. 1, 2). Общее содержание органического углерода (C_{орг}) вычисляется с учетом того, что углерод составляет 83% в элементном составе выделившихся УВ.

Наблюдения за соответствующими изменениями в структуре горной породы проводили с помощью компьютерного микротомографа. Цвет фазы, получаемый на рентгеновских сечениях образца, характеризует рентгеновское поглощение. Рентгеновское поглощение зависит от плотности минеральных и неминеральных компонентов пород. Так, для ОВ рентгеновское поглощение будет минимальным за счет низкой плотности керогеновой составляющей породы. Учитывая тот факт, что в изучаемых породах пустотное пространство минимально (заполнено ОВ), все вещество, соответствующее межминеральной фазе породы, т.е. пустотному пространству, с минимальным рентгеновским поглощением принимается за ОВ. С помощью данных компьютерной томографии удалось рассчитать содержание ОВ в объеме неизмененных образцах, а также ОВ и новообразованные поры в прогретых образцах. Оценка ОВ (пористости) выполнена на основе компьютерного анализа (разделение рентгеноконтрастных фаз по яркости). По выделенной яркости, соответствующей поровому пространству пород, рассчитан объем фазы. Для оценки трансформации пустотного пространства образца были рассчитаны значения объема связанных пор. Этот параметр характери-

зует степень связанности пустот в объеме, который достигается путем математического анализа. Такой анализ позволяет рассчитать количество и параметры каждого объекта (поры). На основе анализа можно оценить объемную долю наиболее большого кластера, который характеризует наиболее высокую связанность пустот в породе. Параметр связанности в свою очередь позволяет оценить степень трансформации, так как в процессе прогрева пород поры, линзы и прослойки образуют единую систему.

Эксперимент проводился в два этапа. Первый этап заключался в прогреве цилиндров диаметром 4 мм до температуры 500 °С. Основная задача на этом этапе — анализ влияния текстуры и содержания ОВ на изменение морфологии породы при моделировании генерации УВ.

На втором этапе анализировали динамику изменений в структуре породы при ее последовательном прогреве и ее связь с генерацией УВ. В результате серии тестов, проделанных на породах доманиковского горизонта, определены оптимальные параметры прогрева пород, идентичные параметрам проведенного ранее эксперимента.

Температурный интервал каждой серии опытов должен был отвечать этапу генерации УВ нефтематеринской породой: 100–300 °С — выход свободных и адсорбированных УВ и воды; 300–400 °С — начальная стадия образования углеводородов за счет высокотемпературного пиролиза твердого органического вещества, выход химически связанной воды; 400–470 °С — температурный интервал, соответствующий наиболее интенсивной стадии образования углеводородов; 470–510 °С — конечная стадия образования УВ. Максимальный нагрев образца в ходе эксперимента определялся температурой начала активного термического разложения карбонатов, т.е., по сути, необратимой метаморфизации породы.

Влияние содержания органического вещества и текстурных признаков на развитие изучаемых процессов. Эксперимент проводился для 5 об-

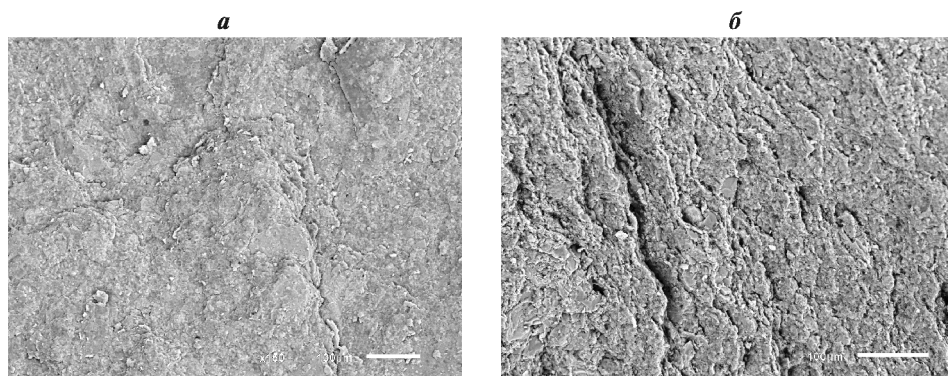


Рис. 1. Данные РЭМ-исследования образца 3: а — исходная порода; б — порода, прогретая до 500 °С

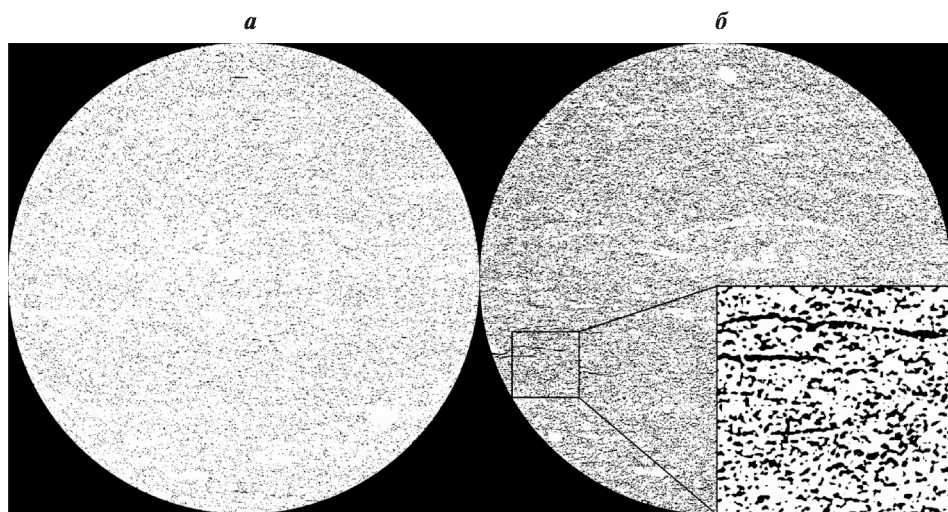


Рис. 2. Рентгеновские бинарные срезы (черный цвет — пустотное пространство). Изменения в структуре породы по данным мКТ-съемки образца 3: а — исходный образец; б — образец, прогретый до 500 °С

разцов, удовлетворяющих двум определенным ранее критериям: 1) разное содержание ОВ; 2) одинаковая текстура пород. Породы прогревались в один этап до 500 °С. Томографические данные позволили проанализировать изменение пустотного пространства пород в результате их прогрева (табл. 2).

Таблица 2

Рассчитанные значения связанности и пористости до и после прогрева образцов

Номер образца	Рассчитанная связанность до прогрева, %	Рассчитанная связанность после прогрева, %	Рассчитанная пористость до прогрева, %	Рассчитанная пористость после прогрева, %
1	4,25	62	4,8	7,7
2	18,2	72,6	8,3	15,4
3	13,3	94	5,5	19,9
4.2	8,7	15	4,2	5,7
5.1	86	94,3	17,7	20,1
4.3	34	59,1	9,7	13,8

После первого этапа эксперимента установлено, что изменения в структуре пустотного

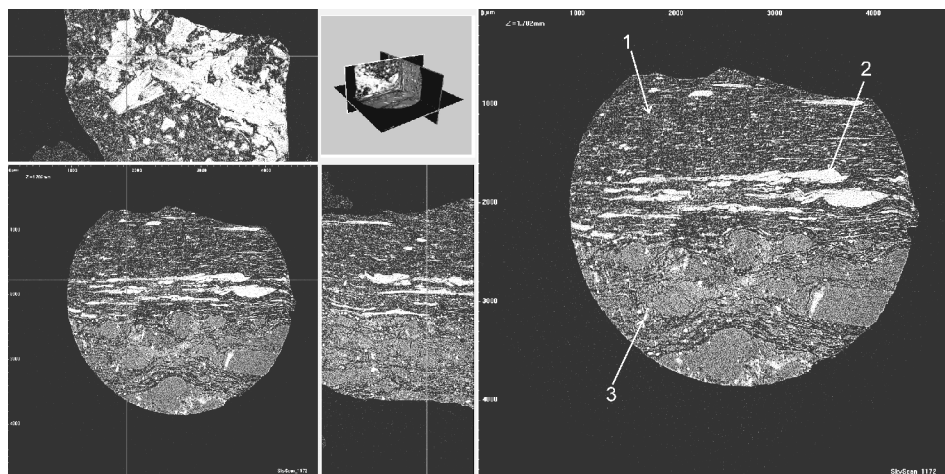


Рис. 3. Рентгеновские плотностные срезы исходного образца: 1 — карбонатная микритовая масса, насыщенная ОВ; 2 — карбонатные биогенные прослои; 3 — тяжелые минералы

пространства во всех образцах оказались разными. В 3 из 5 образцов наблюдалось образование новых трещин, ориентированных по напластованию породы. Трещины могли сформироваться за счет разгрузки новообразованных УВ. Генерация новых УВ вызвала повышение порового давления, результатом чего стало образование трещин. Слоистая текстура этих пород тоже сыграла свою роль. Избыточное давление, повлекшее за собой образование трещин, может быть связано с изолированностью прослоев, к которым приурочены трещины (рис. 1, 2).

На втором этапе исследований образцы, характеризующиеся разной текстурой (массивной и пятнистой), были прогреты до температуры 500 °С. Данные о содержании ОВ и результаты компьютерной томографии позволили сравнить породы, характеризующиеся разной текстурой, и породы с одинаковым содержанием ОВ.

Выяснилось, что степень преобразованности пустотного пространства породы напрямую зависит от связанности пор, что также контролируется текстурными признаками. Слоистые образцы подверглись большому изменению за счет изолированности порового пространства, тогда как породы, обладающие пятнистой или массивной текстурой, при равном количестве ОВ трансформировались в меньшей степени за счет высокой связанности пустот. Высокая связанность порового пространства, заполненного ОВ, обеспечивает интенсивную миграцию УВ и быструю разгрузку, поэтому аномально высокое поровое давление (АВПД) не возникает, и матрица породы не трансформируется.

Динамика изменения пустотного пространства в процессе генерации углеводородных флюидов. В задачи следующего лабораторного эксперимента по моделированию генерации УВ в ненарушенном образце породы путем последовательного нагрева в атмосфере азота по заданной температурной программе и наблюдения за изменениями в структуре порового пространства входил анализ динамики

таких изменений и их связи с генерацией УВ.

Образец характеризовался высоким содержанием ОВ (23,81%) и низким значением $T_{\max} = 410$ °С. Исходная неизменная порода имела многочисленные мелкие поры (размер пор до 0,02 мм) (табл. 3).

После прогрева этого образца до 140 °С, значительных изменений в пустотном пространстве породы не произошло. Рентгеновское поглощение в прослоях, насыщенных ОВ, уменьшилось за счет

частичного выхода свободных УВ, что фиксируется на пирограмме относительно резким пиком, соответствующим повышению количества выходящих УВ (рис. 2).

Таблица 3

Рассчитанные значения связанности и пористости, потери массы в результате каждого этапа прогрева породы

Прогрев, °С	Рассчитанная связанность, %	Рассчитанная пористость, %	Потери, мг
0	97,4	20,6	0
140	99,2	31,8	2,855
260	99,4	34	0,381
430	99,6	50,5	5,562
500	99,6	58,3	0,264

При следующем этапе нагрева до 260 °С морфология породы практически не изменилась, что, вероятно, свидетельствует о том, что основной выход свободных и адсорбированных УВ и воды произошел до 140 °С (рис. 3).

Существенные преобразования в структуре пустотного пространства сформировались при прогреве породы от 260 до 430 °С. Этот температурный интервал соответствует наиболее интенсивной стадии образования УВ. Прослои, насыщенные ОВ, преобразовались в ярко выраженные линзообразные морфоформы протяженностью до 1,4 мм и толщиной до 0,09 мм, ориентированные параллельно напластованию (рис. 4–6). Такая морфология породы, по-видимому, может быть связана с постепенным нарастанием внутривыводного давления по мере генерации новых порций углеводородных флюидов.

При прогреве породы до 500 °С морфология и количество линзообразных форм не изменились. Также не отмечено никакого существенного дополнительного выхода УВ из образца по данным Rock-Eval. Деструкция карбонатного материала при такой температуре не наблюдалась (рис. 5).

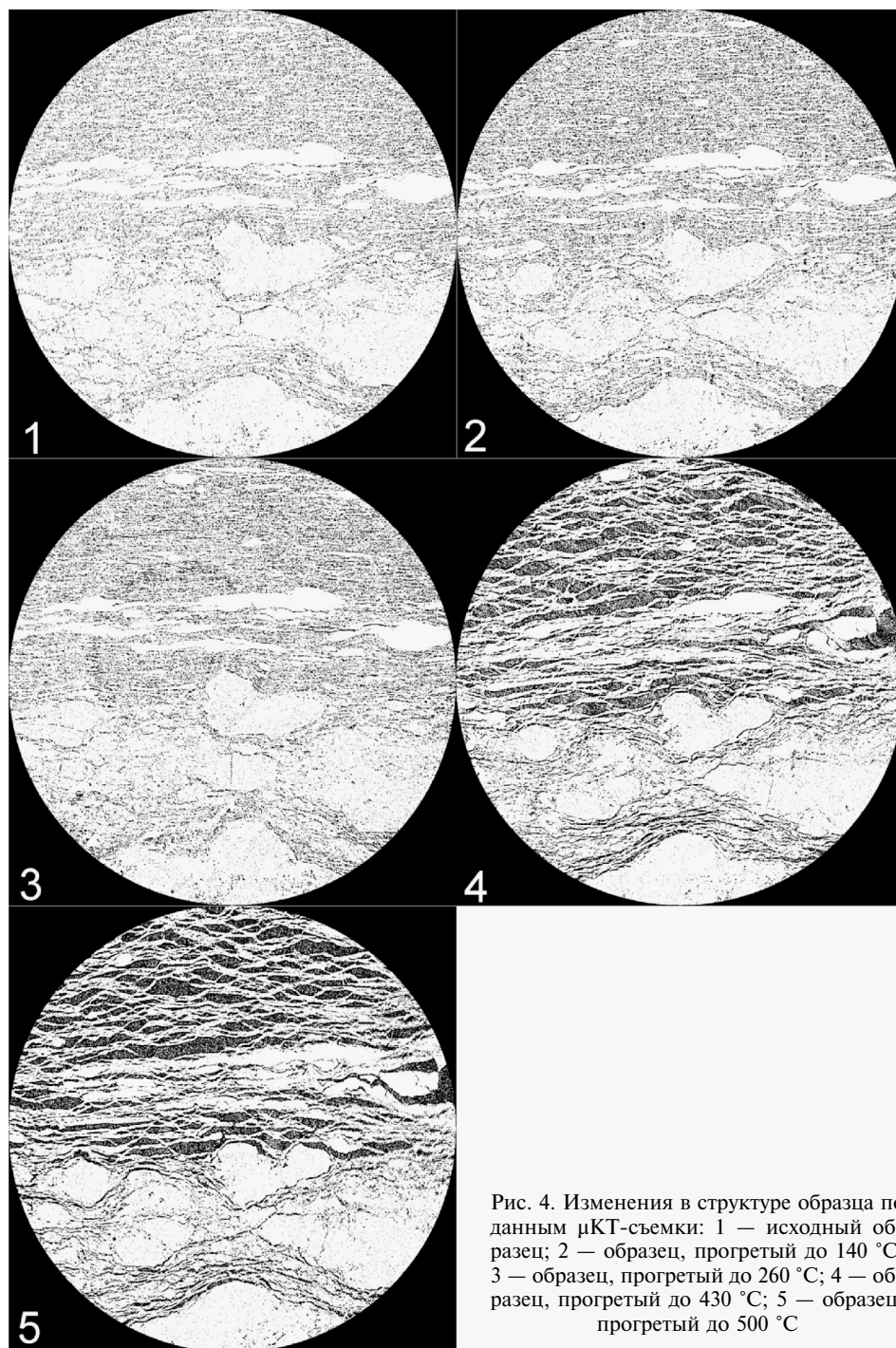


Рис. 4. Изменения в структуре образца по данным мКТ-съемки: 1 — исходный образец; 2 — образец, прогретый до 140 °С; 3 — образец, прогретый до 260 °С; 4 — образец, прогретый до 430 °С; 5 — образец, прогретый до 500 °С

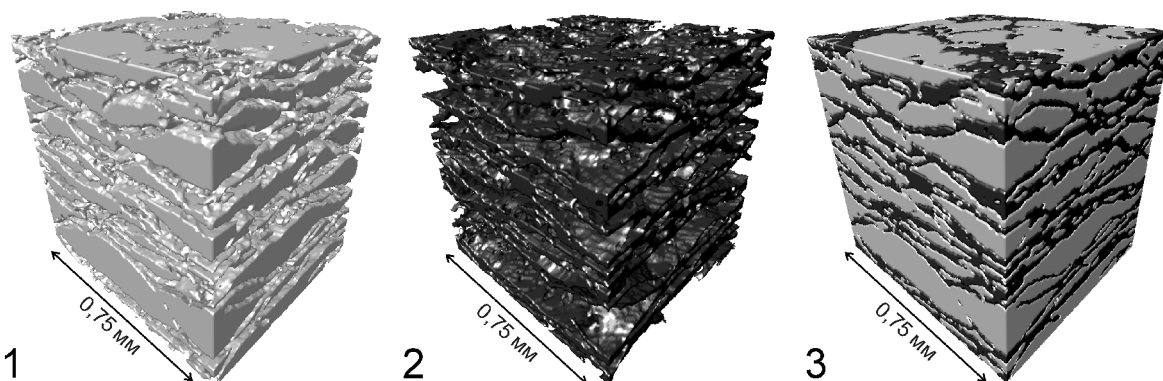


Рис. 5. 3D-модели распределения фаз породы, прогретой до 500 °С: 1 — модель распределения линзообразных форм; 2 — модель распределения матрикса породы; 3 — совмещенные модели линзообразных форм и матрикса

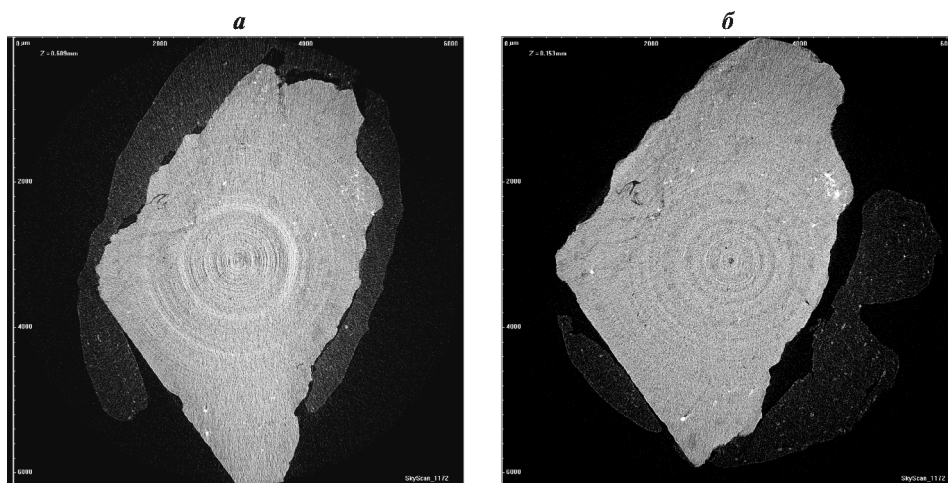


Рис. 6. Рентгеновские плотностные срезы образца с преобразованным ОВ: *a* — исходный образец; *б* — образец, прогретый до 500 °С

Таким образом, результаты эксперимента наглядно демонстрируют связь между этапами выхода УВ и изменениями в структуре образца при последовательном (пошаговом) прогреве породы до определенной температуры.

Безусловно, один из важнейших вопросов, возникающих при проведении подобных экспериментов, — термическое расширение матрицы. Чтобы оценить влияние термической трансформации матрицы на структуру породы, выполнили следующие исследования.

Съемка проводилась на породе из доминанного горизонта. Образец характеризовался относительно низким содержанием $C_{орг}$ (1,06%), генерационный потенциал равен 3,92 мг УВ/г породы. Степень катагенетической преобразованности ОВ, согласно значениям пиролитического параметра ($T_{max}=442$ °С), соответствовала середине «нефтяного окна». Несмотря на то что исследуемая порода находится на стадии катагенеза МК₂, ОВ в этой породе интенсивно преобразованное (Е.В. Козлова, устное сообщение).

Образец одноэтапно прогревали до 500 °С. В результате прогрева структурные изменения в породе не наблюдались, это подтверждает то, что ОВ, содержащееся в этой породе, сильно преобразовано и не способно генерировать новые УВ. Кроме того, такой результат наглядно демонстрирует отсутствие температурного расширения матрицы породы, по крайней мере его результирующего и существенного влияния на трансформацию структуры породы. Этот факт дает основание полагать, что объемное расширение образцов связано с разгрузкой новообразованных УВ, вызвавших критическое увеличение порового давления.

Заключение. В результате прогрева морфология пустотного пространства всех пород, характеризующихся сходными характеристиками, так или иначе подверглась трансформации. Морфология всех измененных пород характеризуется образованием новых пор и каналов, связывающих первич-

ные пустоты. В 3-х из 5-ти образцов (помимо вышеописанных изменений) отмечено формирование трещин. Такие изменения при одинаковых характеристиках пород произошли из-за разных текстурно-морфологических особенностей. Образцы 4.2 и 5.1, обладавшие относительно низкими значениями ТОС (total organic carbon) (2,41 и 3,92% соответственно), изменились меньше, чем образцы 1, 2 и 3 с более высокими значениями ТОС (4,59, 12,67, 10,46% соответственно).

Таким образом, можно сделать заключение, что содержание ОВ в породе играет большую роль в преобразованиях пустотного пространства при погружении породы на глубину, соответствующую температуре генерации УВ. Полученные результаты на данном этапе исследований согласуются с данными предшественников [Lafargue et al., 1993; Tisot, 1967; Tiwary et al., 2013; Kobchenko et al., 2011; Zhao et al., 2012].

Тектурные признаки, как и количество ОВ в породе, играют значительную роль в трансформации пустотного пространства. Пустотное пространство пород, обладающих слоистой текстурой, как отмечалось раньше, при прогреве преобразуется в трещины; это, вероятно, связано с высокой концентрацией ОВ в прослоях, при нагреве которых генерация новых УВ приводит к образованию трещин. Формирование такого типа нарушений происходит под действием избыточного порового давления, которое не может возникнуть в относительно связанной системе пустот. Для образования трещин необходима изолированность прослоев, насыщенных ОВ. Иначе обстоит дело с породами массивной текстуры. За счет равномерного распределения ОВ в породе трещины не образуются, так как новообразованные порции углеводородных флюидов мигрируют в открытой системе пор.

Вторая часть эксперимента была посвящена динамике изменения пустотного пространства в процессе последовательного нагрева породы. На этапе прогрева образца до 430 °С произошел максимальный выход новообразованных углеводородов, что фиксируется на пирограмме максимальным пиком из приуроченных к температурным интервалам. Этот факт подтверждает предположение о том, что максимальная генерация УВ происходит до 430 °С. Это наблюдение хорошо согласуется с данными работ [Kobchenko et al., 2011; Tisot, 1967; Ben Chanaa et al., 1994].

Результаты прогрева образца с преобразованным ОВ позволили исключить расширение матрицы породы в качестве значимого фактора, влияющего на структуру пустотного пространства в процессе температурного воздействия на породу.

Эксперимент, описанный нами, максимально отвечал условиям катагенетического преобразования ОВ, однако, безусловно, существует ряд допущений, имевших место при выполнении работы. Такие факторы, как внутрислоевое давление, слоевые жидкости и газы, способные также вли-

ять на генерационные и первично-миграционные процессы углеводородных флюидов, не были учтены из-за отсутствия оборудования, способного создать абсолютно корректные свойства модели.

В процессе исследований изучены факторы, контролируемые изменение строения породы в ходе катагенетических преобразований ОВ, а также исследованы параметры, влияющие на первично-миграционные процессы и трансформацию пустотного пространства при лабораторном моделировании генерации углеводородных флюидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьев В.В., Смелков В.М., Пронин Н.В.* Прогнозная оценка ресурсной базы манды-доманиковых отложений как основного источника углеводородного сырья центральных районов Волго-Уральской нефтегазонасыщенной провинции // Геология нефти и газа. 2007. № 1. С. 50–73.
- Баженова О.К., Бурлин Ю.К., Соколов Б.А., Хаин В.Е.* Геология и геохимия нефти и газа. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 384 с.
- Белецкая С.Н.* Первичная миграция нефти. М.: Недра, 1990. 288 с.
- Белецкая С.Н.* Механизмы и факторы первичной миграции нефти. Моделирование первично-миграционных процессов // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. № 2. С. 12–17.
- Зайдельсон М.И., Суриков Е.Я., Казьмин Л.Л.* и др. Особенности генерации, миграции и аккумуляции УВ доманикоидных формаций // Геология нефти и газа. 1990. № 6. С. 56–60.
- Калин Б.А., Волков Н.В., Польский В.И.* Растровая электронная микроскопия. Лабораторная работа. М.: МИФИ, 2008. 56 с.
- Корост Д.В., Надежкин Д.В., Ахманов Г.Г.* Пустотное пространство нефтематеринской породы при генерации углеводородов: лабораторный эксперимент // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2012. № 4. С. 32–37.
- Пушаровский Д.Ю.* Рентгенография минералов. М.: Геоинформмарк, 2000. 292 с.
- Eberl D.D.* User's guide to RockJock — A program for determining quantitative mineralogy from powder X-ray diffraction data // U.S. Geol. Surv. Open-File Rep. 2003. Vol. 78. 47 p.
- Espitalie J., Bordenave M.L.* Rock-Eval Pyrolysis // Applied Petroleum Geochemistry. Ch. II.2 «Screening Techniques for Source Rock Evaluation». 1993.
- Ben Chanaa M., Lallemand M., Mokhlisse A.* Pyrolysis of timahdit, Morocco, oil shales under microwave field // Fuel. 1994. Vol. 73, N 10. P. 68–79.
- Jing Zhao, Dong Yang, Zhiqin Kang, Zengchao Feng.* A micro-ct-study of changes in the internal structure of Daqing and Yan'an oil shales at high temperatures // Oil Shale. 2012. Vol. 29, N 4. P. 357–367. doi: 10.3176/oil.2012.4.06
- Kobchenko M., Panahi H., Renard F.* et al. 4D imaging of fracturing in organic-rich shales during heating // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116. doi:10.1029/2011JB008565.
- Lafargue E., Espitalie I.J., Broks T.M., Nyland B.* Experimental simulation of primary migration // Advances in Organic Geochemistry. 1993. Vol. 22. P. 575–586.
- Rudkiewicz J.L., Brevart O., Connan J., Montel F.* Primary migration behaviour of hydrocarbons: from laboratory experiments to geological situations through fluid flow models // Advances in Organic Geochemistry. Org. Geochem. 1994. Vol. 22, N 3–5. P. 631–639.
- Stock Stuart R.* Microcomputed tomography, methodology and applications // Geol. Soc. Taylor & Francis Group, 2009.
- Tisot P.R.* Alterations in structure and physical properties of Green River oil shale by Thermal Treatment // J. Chemical and Engineering Data. 1967. Vol. 12, N 3. P. 405–411.
- Tiwari P., Deo M., Lin C.L., Miller J.D.* Characterization of oil shale pore structure before and after pyrolysis by using X-ray micro CT // Fuel. 2013. Vol. 107. P. 547–554.

Поступила в редакцию
23.03.2015