

# ИЗМЕНЕНИЕ ПУСТОТНОГО ПРОСТРАНСТВА РАЗЛИЧНЫХ ЛИТОТИПОВ КЕРОГЕНОНАСЫЩЕННЫХ ПОРОД ДОМАНИКОВОЙ ФОРМАЦИИ ПРИ РАЗНЫХ СКОРОСТЯХ НАГРЕВА

Д.Р. Гафурова<sup>1\*</sup>, Д.В. Корост<sup>1</sup>, Е.В. Козлова<sup>2</sup>, А.Г. Калмыков<sup>1</sup>, Г.А. Калмыков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

В работе приведены результаты исследований изменения пустотного пространства в результате нагрева образцов пород доманиковой свиты при разной скорости нагрева. Метод микрофотографии позволил установить, что в результате нагрева в образцах могут происходить существенные изменения, образовываться крупные поры в форме линз, увеличиваться количество пор и возрастать их связанность. Установлено, что на изменение порового пространства оказывают влияние текстуры пород, количество органического вещества и его степень зрелости, причём все факторы надо рассматривать совместно. Скорость нагрева также влияет на изменения в поровом пространстве. Полученные результаты стоит учитывать при восстановлении процесса формирования естественных коллекторов.

**Ключевые слова:** доманиковая свита, поровое пространство, прогрев образцов, крекинг керогена

**DOI:** <https://doi.org/10.18599/grs.19.3.17>

**Для цитирования:** Гафурова Д.Р., Корост Д.В., Козлова Е.В., Калмыков А.Г., Калмыков Г.А. Изменение пустотного пространства различных литотипов керогенонасыщенных пород доманиковой формации при разных скоростях нагрева. *Георесурсы*. 2017. Т. 19. № 3. Ч. 2. С. 255-263. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.19.3.17>

## Введение

В настоящее время исследователи и нефтяные компании уделяют повышенное внимание нетрадиционным коллекторам нефти и газа, таким как баженовская и доманиковая свиты. Это обусловлено снижением количества традиционных запасов нефти и увеличением доли запасов, относящихся к высокоуглеродистым формациям. В то же время в отличие от традиционных коллекторов для нетрадиционных в настоящее время не известны закономерности распространения месторождений, многие пробуренные скважины оказываются сухими. Поэтому перед исследователями стоит задача поиска данных закономерностей и предсказания наиболее продуктивных территорий.

Одним из путей понимания строения и распространения интервалов с высокой пористостью является разработка теории формирования пор в высокоуглеродистых формациях. Работы, проводимые за рубежом, как правило посвящены выявлению закономерностей преобразования керогена в природных условиях для образования месторождений нефти и газа (Ishiwatary et al., 1979; Burnham et al., 1984; Behar et al., 1992). Однако данные работы рассматривают, в первую очередь, механизм и кинетику формирования углеводородов и не рассматривают изменений, происходящих в поровом пространстве за счёт преобразования органического вещества.

Основными факторами, влияющими на преобразование органического вещества нефтематеринской породы, приводящее к формированию новых пор и изменению проницаемости, являются температура, время и давление

(Баженова, 2000). В настоящее время проводится ряд экспериментов, в основном сводящихся к моделированию термического воздействия на породы и исследованию вопросов трансформации пустотного пространства (Jing Zhao et al., 2012; Kobchenko et al., 2011; Tisot, 1967; Корост и др., 2012; Tiwari et al., 2013 и др.). Однако данные работы не обобщены единой технологией, не рассматривают влияние скорости нагрева на моделирование и, в первую очередь, не рассматривают в качестве объекта доманиковую свиту, имеющую отличное от других исследуемых объектов строение и вызывающую повышенный интерес у российских геологов и представителей нефтяных компаний.

В данной работе мы рассмотрим изменение внутреннего строения пород, в частности пустотного пространства, в результате лабораторного моделирования генерации и первичной миграции углеводородов. Ранее авторами статьи был проделан ряд подобных экспериментов, в которых исследовались степень изменения порового пространства образцов в зависимости от текстурных особенностей пород и степени их насыщенности органическим веществом (Гилязетдинова, Корост, 2015). В основе описываемого эксперимента лежит опыт зарубежных и российских ученых (Табл. 1). Скорости прогрева в этих случаях подбирались среднестатистически: исходя из размеров образцов, температур прогрева и приборных возможностей и программ. При этом, именно скорость прогрева пород и их состав и текстура, по нашему мнению, могут играть значительную роль в степени изменения внутреннего строения пород. Это и определило основную задачу данной работы: характеристика и анализ степени изменения пород в результате различных режимов прогрева образцов и установка влияния скорости прогрева на трансформацию пустотного пространства различных образцов.

\*Ответственный автор: Дина Ринатовна Гафурова  
E-mail: [gilyazetdinova\\_91@mail.ru](mailto:gilyazetdinova_91@mail.ru)

Эксперимент	Формация	Сорг, %	Размеры, см	Температура, °С	Метод прогрева	Новообразованные элементы пустотного пространства
Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology (China), Jing zhao et al., 2012	Daqing	15,02	0,5x1	100, 200, 300, 400, 500, 600	При всех температурах удерживались по 30 мин.	Трещины, поры
	Yan'an	7,85	0,5x1			
Department of Chemical Engineering, University of Utah, Salt Lake City (United States), P. Tiwari et al., 2013	Green river	20,27	2,54x5,08	350, 425, 500	100°С/мин нагревались до определенной температуры и удерживались 24 часа	Трещины, поры
		10,33	2,54x5,08			
		0,1546	2,54x5,08			
Laramie Petroleum Research Center, Bureau of Mines, Department of the Interior, Laramie, Wyo. (United States) P. R. TISOT, 1967	Green river	0,006	1,9/3,175	510, 815	5°С/час до 399°С и удерживались 12 часов, потом прогрев до 510°С и удерживались 2 часа	Трещины
		3,9	1,9/3,175			
		8,1	1,9/3,175			
		15	1,9/3,175			
		18	1,9/3,175			
		35,1	1,9/3,175			
Геологический факультет МГУ, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых (Россия), Д.В. Корост, 2011	Domanic	13,08	0,3	300, 400, 470, 510	10°С/мин потом удерживались 5 мин, при темп. 470, 510 2°С/мин и 5 мин держали	Трещины
Physics of Geological Processes, University of Oslo, Oslo, (Norway), Maya Kobchenko et al., 2011	Green river	9,92	0,5x0,5	400	1°С/мин	Трещины

Табл. 1. Сравнение режимов нагрева пород в экспериментах российских и зарубежных ученых

### Методики исследования пород

С целью изучения строения и состава пород, выбранных для эксперимента, был проведен комплекс исследований, включающий рентгеновскую дифрактометрию на установке Ultima-IV фирмы Rigaku (Япония), изучение шлифов на оптическом лабораторном микроскопе Leica DM EP, микронзондирование на базе растрового (сканирующего) электронного микроскопа (РЭМ) «Jeol JSM-6480LV» с комбинированной системой рентгено-спектрального микроанализа. Растровые электронные изображения получены во вторичных электронах (морфология поверхности).

Следующий этап исследования заключался в сканировании цилиндрических образцов диаметром 3 мм на компьютерном рентгеновском микротомографе (микроКТ) SkyScan-1172. Съемка проводилась с пространственным разрешением около 1,5 мкм, на фильтре Al 0,5 mm при напряжении источника 70 kV и силе тока 129 µA. На получаемых рентгеновских сечениях образца более темному цвету соответствует меньшая рентгеновская плотность среды, а более светлому – большая плотность (Stock, 2009).

Геохимические характеристики органического вещества (ОВ) были получены на пиролизаторе Rock-Eval-6 (Espitalie, 1984; Тиссо, Вельте, 1981; Лопатин, Емец, 1987).

### Коллекция образцов

Для эксперимента была подобрана коллекция образцов пород керогеносыщенной доманиковой формации Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна (НГБ) с различными параметрами, включающими содержание органического вещества, степень зрелости, текстурные характеристики (Гилязетдинова, Корост, 2015). Среди пород доманикового типа с высоким содержанием керогена и битумоида были выбраны кремнисто-карбонатные породы Южно-Татарского свода (семилюкского и мендымского горизонтов, франского яруса верхнедевонского возраста) из-за низкого содержания в них пирита, искажающего рентгеновские плотностные срезы (как, например, в породах баженовской свиты Западно-Сибирского НГБ).

Образцы характеризуются различным содержанием в них органического вещества (от 5,66% до 30,23%), разными текстурами и минеральным составом. Состав пород преимущественно кремнисто-карбонатный. По составу образцы отличаются, прежде всего, содержанием кремнистой составляющей (Табл. 2).

Образец 1 (Рис. 1) характеризуется слоистой текстурой, которая фиксируется за счет наличия карбонатного детрита. Матрикс состоит из кремнистого материала, который хорошо выделяется на рентгеноплотностных микроКТ срезах и имеет слабовыраженную собственную



№	Название породы	Минеральный состав, Гл./ Кремн./Карб., %	Текстура	ТОС, %	Степень преобразованности
1	Керогеново-кремнисто-карбонатная	4/20/37	Слоистая	30	ПКЗ
2	Карбонатная порода с керогеном	4/0/89	Слоистая	6	МК2
3	Керогеново-кремнисто-карбонатная	2/17/64	Массивная	13	ПКЗ

Табл. 2. Общие литологические и геохимические характеристики образцов

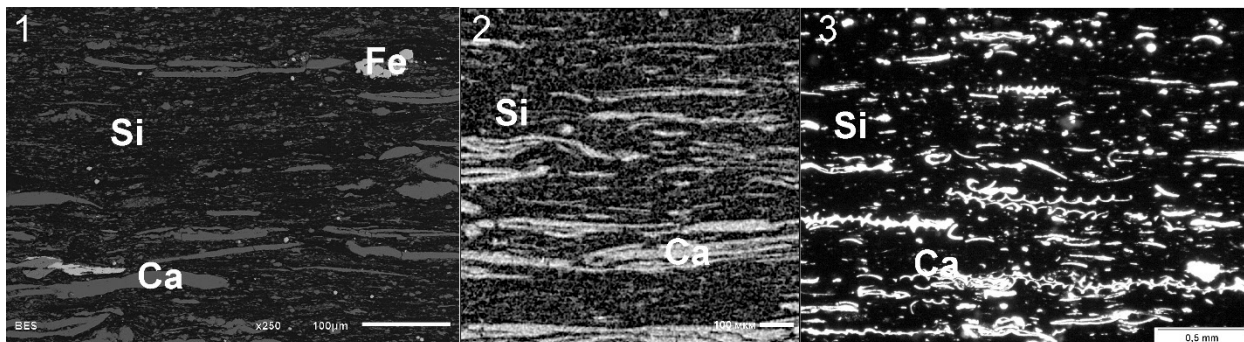


Рис. 1. Образец 1: 1 – РЭМ снимок, 2 – микроКТ срез, 3 – фотография шлифа в скрещенных николях

слоистую микротекстуру. Содержание органического углерода в образце достигает 30%.

Образец 2 (Рис. 2) характеризуется минимальными среди выбранных образцов значениями содержания органического углерода (6%). В составе породы присутствуют органические прослойки в карбонатной матрице. Основная масса породы представлена массивным карбонатным материалом, на фоне которого отмечаются тонкие (до 30 мкм) прослойки, насыщенные органическим веществом.

Образец 3 (Рис. 3) имеет массивную текстуру. В составе породы выделяются биокласты, сцементированные кремнистым веществом, при этом в породе можно предположить наличие слоистости. Содержание органического углерода в породе равно 13%.

### Методика эксперимента

Лабораторный эксперимент заключался в моделировании образования порового пространства за счет генерации УВ в ненарушенном образце породы (микроцилиндр диаметром около 3 мм и высотой 3-5 мм) путем нагрева в атмосфере азота по заданной температурной программе и наблюдениях за изменениями в структуре порового пространства. Эксперименты основывались на изменениях, происходящих в трех дублирующих цилиндрах одного образца, помещённых в пиролизатор RockEval 6 и нагретых с различными скоростями нагрева. При температуре 300°C образцы выдерживались в течение 5 минут, при этом фиксировался пик S1, характеризующий собой содержание легких углеводородов.

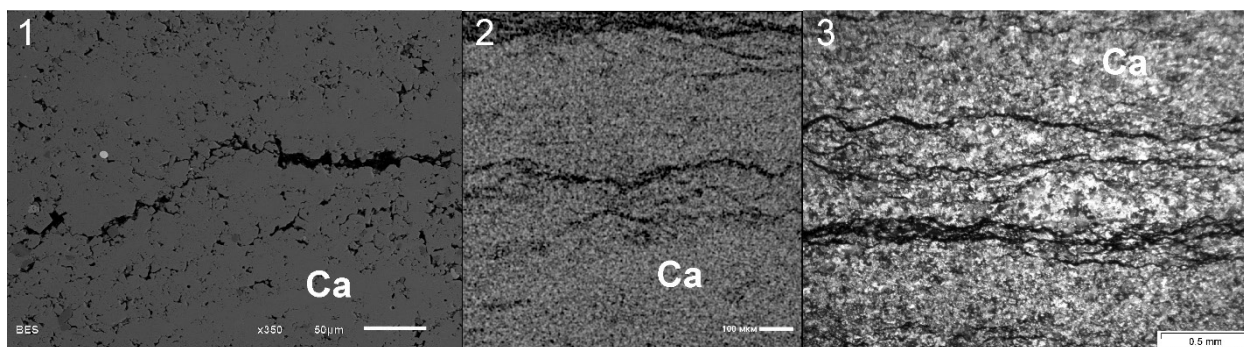


Рис. 2. Образец 2: 1 – РЭМ снимок, 2 – микроКТ срез, 3 – фотография шлифа в скрещенных николях

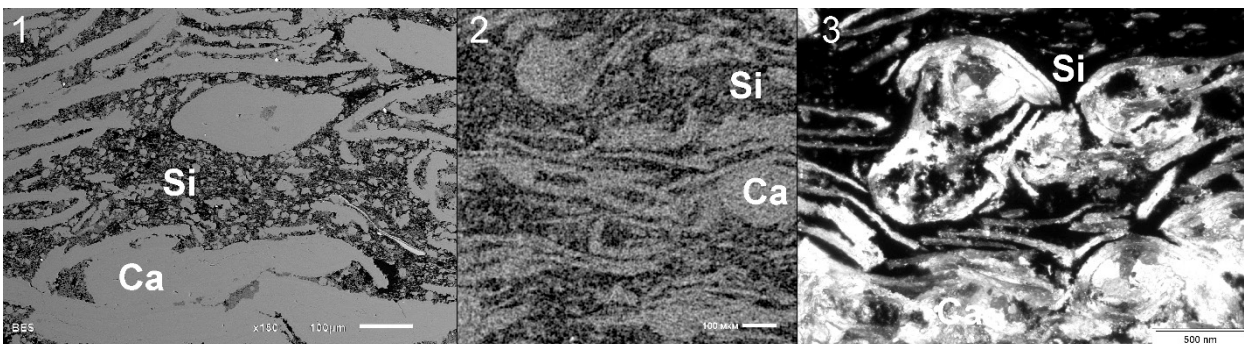


Рис. 3. Образец 3: 1 – РЭМ снимок, 2 – микроКТ срез, 3 – фотография шлифа в скрещенных николях



Далее происходил нагрев со скоростями 2, 10 и 30 °С/мин с 300° до 500°С. Температура 500°С была выбрана на основе предварительных экспериментов на порошках, для которых был определён параметр S2 (выделение углеводородов в температурном интервале 300-650°С) и выбрана температура окончания пика выделения.

Для наблюдений за изменениями в строении, структуре горной породы и порового пространства использовался компьютерный микротомограф. Цвет фазы, получаемый на рентгеноплотностных срезах образца, характеризует рентгеновское поглощение. Рентгеновское поглощение зависит от плотности минеральных и неминеральных компонентов пород. Так, для органического вещества рентгеновское поглощение будет минимальным, за счет низкой плотности керогеновой составляющей породы. Учитывая тот факт, что в изучаемых породах пустотное пространство как таковое практически отсутствует (заполнено ОВ), весь объем, соответствующий межминеральной фазе породы, то есть пустотному пространству, с минимальным рентгеновским поглощением принимается за ОВ.

На основании данных микроКТ для всех образцов при прочих равных условиях была выполнена оценка содержания ОВ в объеме в неизменных образцах, а также ОВ и новообразованных пор в прогретых. Оценка ОВ/пористости проводилась с помощью компьютерного анализа: разделения рентгено-контрастных фаз на основании характерных для них яркостей (градациях серого). По выделенной яркости, соответствующей поровому пространству пород, был произведен объемный расчет фазы. Для оценки трансформации пустотного пространства образца, в том числе, были оценены расчетные объемы связанности пор. Параметр «связанность» характеризует степень соединенности выделяемых элементов пустотного пространства

в объеме образца. Данный анализ позволяет рассчитать количество и размер каждого отдельного объекта (поры). На основе статистического анализа оценивается объемная доля самого большого кластера, который и характеризует связанность элемента (в данном случае пустот) в объеме породы (Рис. 4). Параметр «связанность» позволяет оценить степень изменения пустотного пространства, так как в процессе прогрева пород поры, линзы и прослои видоизменяются и зачастую соединяются в единую систему.

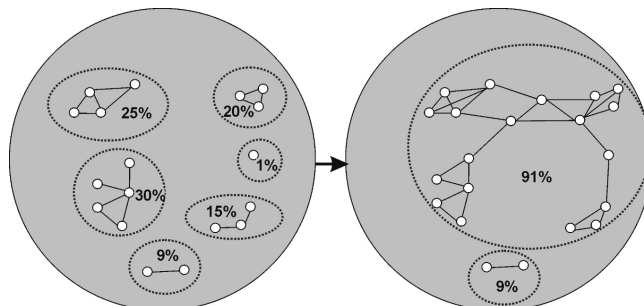


Рис. 4. Схема изменения связанности пустотного пространства в результате прогрева образца

### Результаты исследований

В результате прогрева на разных скоростях в образце 1 произошли значительные изменения в матрице породы. Появились линзообразные пустоты раскрытостью до 0,3-0,4 мм (Рис. 5). При этом скорость нагрева не влияет на потерю веса образцов, изменение веса было постоянным и составило около 27%. Также постоянной независимо от скорости нагрева является связанность объектов, которая составила 99%. Однако разная скорость нагрева оказала существенное влияние на изменение пористости, количество объектов в образце и раскрытость

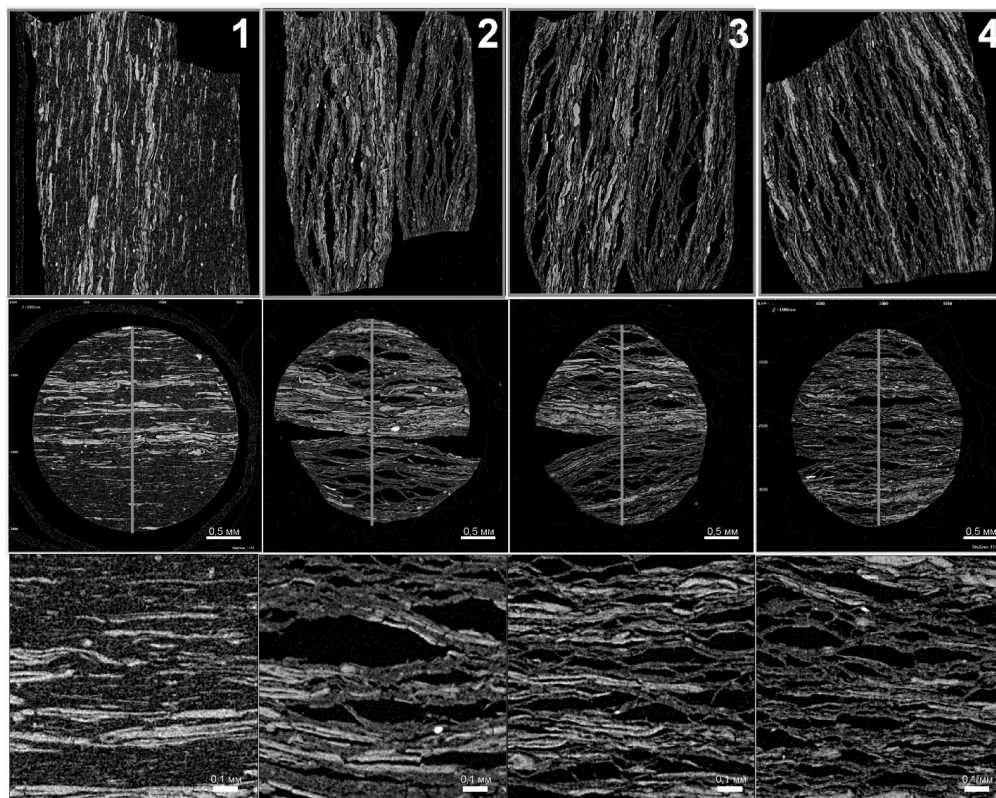


Рис. 5. Рентгеноплотностные срезы образца 1 (ребро куба 1 мм): 1 – неизменный образец, 2 – 2°С/мин, 3 – 10°С/мин, 4 – 30°С/мин

Скорость прогрева	ТОС, %	S1, мгУВ/г	S2, мгУВ/г	Изменение пористости, %	Связанность, %	Количество объектов (пор)	Изменение (потеря) веса, %
raw	30	10,26	198,64	23,4	99,1	5930	26,69
2°С/мин		5,32	102,5		96,48	16408	
raw	30	10,26	198,64	54,49	98,9	7050	27,81
10°С/мин		5,11	120		99,1	8151	
raw	30	10,26	198,64	60,51	99,3	6023	28,57
30°С/мин		3,93	97,86		99,48	9886	

Табл. 3. Результаты прогрева образца 1

линз. Так, расчетные значения пористости изменились в зависимости от скорости прогрева 2°С/мин, 10°С/мин и 30°С/мин на 23%, 54% и 61%, соответственно. При этом визуально максимальная мощность новообразованных пустот приходится на образец, прогретый со скоростью 2°С/мин, и равна 0,4 мм (Рис. 5). В этом образце также наблюдалось наибольшее (трехкратное) изменение количества элементов пустотного пространства – микропустот, образованных в результате преобразования ОВ. Результаты изменения характеристик в результате нагрева приведены в таблице 3.

В строении образца 2, характеризующимся минимальным содержанием органического вещества, произошли наименьшие изменения (Рис. 6). Связанность пор осталась прежней и составила 30-35%, потери веса для всех образцов равнялась около 4%, а количество объектов пустотного пространства увеличилось примерно на 20% (Табл. 4).

Стоит отметить, что также как и в первом образце, тенденция изменения расчетных значений пористости в зависимости от скорости прогрева оказалась похожей и составила на 27%, 55% и 55%.

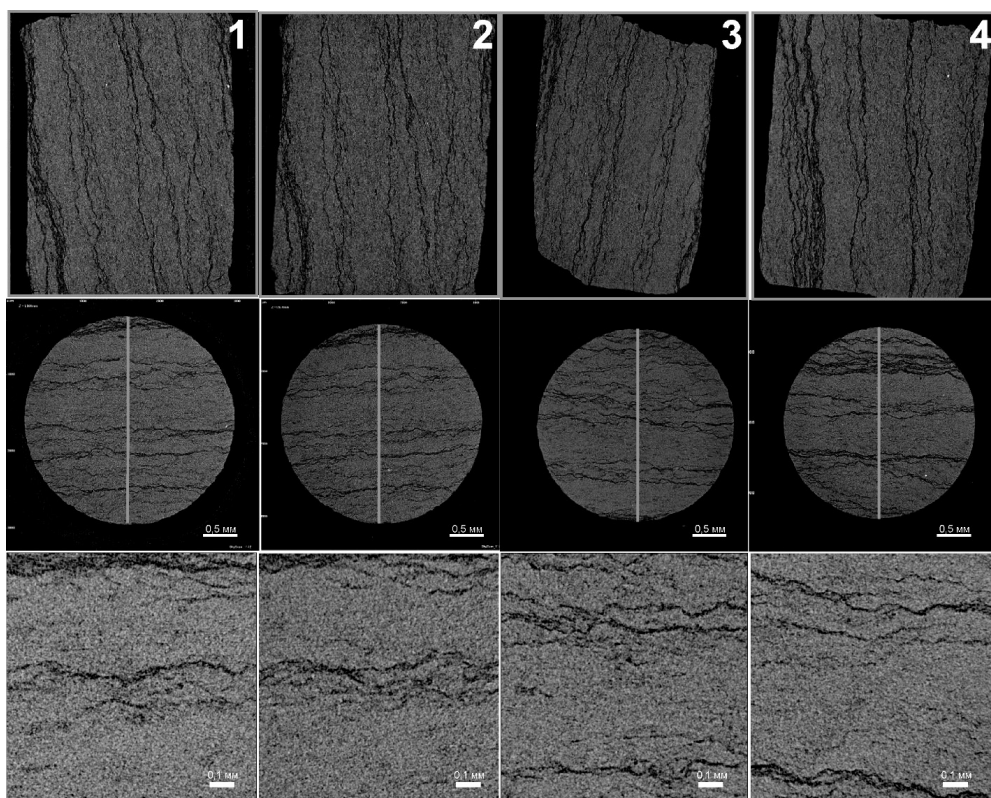


Рис. 6. Рентгеноплотностные срезы образца 2 (ребро куба 1 мм): 1 – неизменный образец, 2 – 2°С/мин, 3 – 10°С/мин, 4 – 30°С/мин

Скорость прогрева	ТОС, %	S1, мгУВ/г	S2, мгУВ/г	Изменение пористости, %	Связанность, %	Количество объектов (пор)	Изменение (потеря) веса, %
raw	6	2,48	32,78	27,35	32,06	20542	3,85
2°С/мин		1,44	17,29		32,32	25832	
raw	6	2,48	32,78	54,55	30,65	23502	3,04
10°С/мин		1,56	18,53		35,2	25614	
raw	6	2,48	32,78	54,71	39,6	19138	4,82
30°С/мин		1,51	19,32		39,27	23038	

Табл. 4. Результаты прогрева образца 2



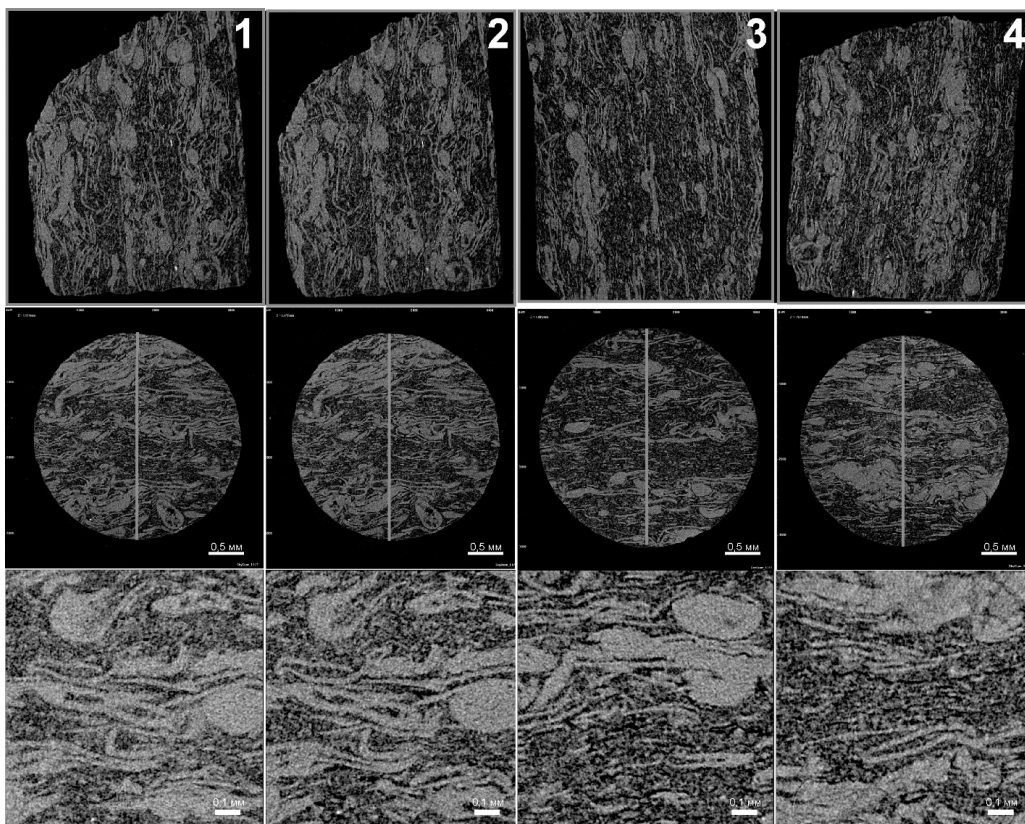


Рис. 7. Рентгеноплотностные срезы образца 3 (ребро куба 1 мм): 1 – неизменный образец, 2 – 2°С/мин, 3 – 10°С/мин, 4 – 30°С/мин

Скорость прогрева	ТОС, %	S1, мгУВ/г	S2, мгУВ/г	Изменение пористости, %	Связанность %	Количество объектов (пор)	Изменение (потеря) веса, %
raw	13	5,35	82,81	116,72	18,68	35439	9,62
2°С/мин		1,77	28,18		84,85	16767	
raw	13	5,35	82,81	98,83	75,69	75997	9,58
10°С/мин		2,91	45,63		94,52	37177	
raw	13	5,35	82,81	76,22	37,42	85844	8,45
30°С/мин		2,16	37,29		84,46	17130	

Табл. 5. Результаты прогрева образца 3

В образце 3 с массивной текстурой наблюдался другой характер изменений. В данном образце не произошло существенного расширения прослоев, заполненных органическим веществом, однако пустотное пространство трансформировалось за счет образования новых пор и каналов, связывающих первоначальные элементы пустотного пространства породы (Рис. 7). Связанность пор в образцах выросла до 85-95%, а изменение пористости при одинаковой потере веса составило 117%, 99% и 76% (Табл. 5). При этом количество отдельно стоящих элементов пустотного пространства уменьшилось не менее чем в 2 раза.

### Обсуждение результатов

В результате проведенных экспериментов наблюдалось существенное изменение порового пространства в зависимости от количества органического вещества. Вероятно, образование крупных линз в образце 1 (Рис. 5) связано с возрастанием порового давления в прослоях, насыщенных органическим веществом, в процессе генерации новых углеводородов. Учитывая

содержание органического вещества в породе и его низкую зрелость, образование новых углеводородов приводит к аномально высокому поровому давлению и, как следствие, к разрыву прослоев, образованию крупных линзообразных пустот.

Другая картина наблюдается в образце 2: изначальные тонкие прослои, насыщенные органическим веществом, сохранили свою форму, видимых крупных деформаций в породе не произошло. Низкое содержание органического вещества и его частичная преобразованность не приводят к образованию крупных видимых пустот. Вероятно, новообразованные углеводороды в малом объеме мигрируют в уже имеющихся прослоях, тем самым высвобождая пустоты, ранее заполненные битумом. Объем новообразованных углеводородов настолько мал, что этого недостаточно для того, чтобы в порах возникло высокое поровое давление и привело к разрыву связей. Стоит отметить, что во втором образце органическое вещество имело большую зрелость, меньший генерационный потенциал (параметр S2 значительно ниже), что может определять меньший объем образовавшегося порового

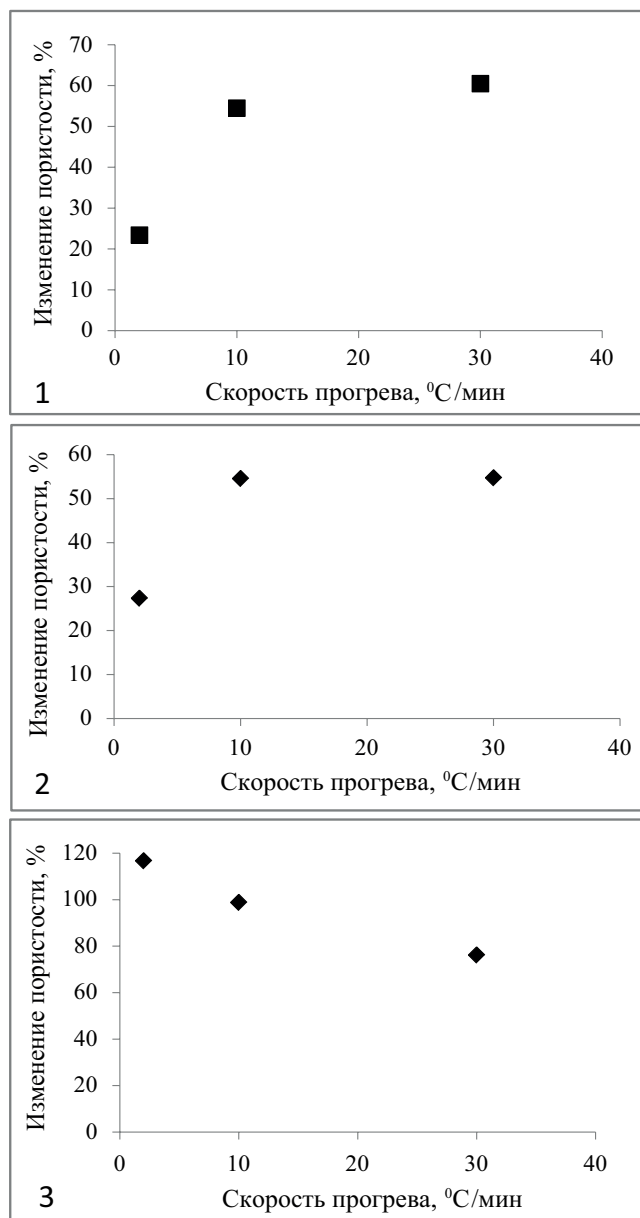


Рис. 8. Графики зависимости  $\Delta K_{пСТ}$  (изменение пористости) от скорости прогрева пород: 1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3

пространства. Таким образом, можно сделать вывод, что на преобразование пустот оказывают влияние одновременно количество органического вещества и его стадия катагенеза (Гилязетдинова, Корост, 2015).

Как было показано выше, характер изменения пористости для образцов 1 и 2 одинаков и имеет вид возрастающей функции, выходящей на плато, в то время как для образца 3 наблюдается плавное уменьшение изменения пористости с увеличением скорости нагрева (Рис. 8). При этом наблюдаемые закономерности не связаны со стадией зрелости, так как образцы 1 и 2 находятся на разных стадиях катагенеза, а также не имеют прямой зависимости от состава образцов, поскольку в образце 3 среднее содержание карбонатов, органического вещества и кремнезема по сравнению с двумя другими. Вероятнее всего такое различие объясняется морфологией образца 3; возможно, карбонатные биокласты препятствуют расширению пор, в связи с чем пластовое давление не может создать линз.

Другим вариантом является возможная ингибирующая способность таких биокластов. Тем не менее, по результатам исследований можно сделать следующий вывод: текстура породы является важным фактором, оказывающим влияние на процесс образования пористой структуры и, вероятно, влияющим на степень преобразованности органического вещества (Гилязетдинова, Корост, 2015).

Таким образом, на основании проделанной работы можно сделать следующие выводы.

Скорости прогрева играют довольно большую роль в степени трансформации порового пространства пород. Однако эти изменения в разных типах пород проходят по-разному. Необходимо провести дополнительные эксперименты на породах с различным составом и текстурой, чтобы выявить прямые зависимости влияния различных компонентов и их взаимного расположения на процесс формирования пористой структуры. Тем не менее, полученные результаты являются важными при моделировании процесса; необходимо учитывать данные факторы при моделировании формирования коллекторов в доманиковых отложениях.

Степень катагенетической преобразованности также необходимо учитывать при моделировании. Однако прямого влияния на изменение порового пространства замечено не было. В то же время очевидно, что при одинаковых условиях из менее зрелого органического вещества образуется больше углеводов, что приведет к формированию большего пространства. Дальнейшие исследования также должны учитывать данный фактор.

Подобранные корректно режим прогрева и условия эксперимента позволят смоделировать длительный процесс формирования порового пространства в доманиковой свите в рамках лабораторного эксперимента. Полученный результат может оказаться ключевым при поиске новых месторождений и закономерностей распространения естественных коллекторов.

## Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-35-00576.

## Литература

- Баженова О.К., Бурлин Ю.К., Соколов Б.А., Хаин В.Е. Геология и геохимия нефти и газа. М: МГУ. 2000. 384 с.
- Гилязетдинова Д.Р., Корост Д.В. Трансформация пустотного пространства при моделировании генерации углеводородных флюидов на примере доманикового горизонта южно-татарского свода. *Вестник Московского Университета. Геология*. 2015. №5. С. 78-86.
- Корост Д.В., Надежкин Д.В., Ахманов Г.Г. Пустотное пространство нефтематеринской породы при генерации углеводородов: лабораторный эксперимент. *Вестник Московского Университета. Геология*. 2012. №4. С. 32-37.
- Лопатин Н.П., Емец Т.П. Пиролиз в нефтегазовой геологии. М: Наука. 1987. 143
- Тиссо Б., Вельте Д. Образование и распространение нефти. М: Мир. 1981. 501 с.
- Behar F., Kressmann S., Rudkiewicz J.L., Vandenbroucke M. Experimental simulation in a confined system and kinetic modeling of kerogen and oil cracking. *Org. Geochem*. 1992. V. 19. No. 1-3. Pp. 173-189.
- Behar F., Roy S., Jarvie D. Artificial maturation of a Type I kerogen in closed system: Mass balance and kinetic modeling. *Organic Geochemistry*. 2010. V. 41. Pp. 1235-1247.
- Burnham A.K., Happe J.A. On the mechanism of kerogen pyrolysis. *Fuel*. 1984. V. 63. Pp. 1353-1356.

Espitalie J., Bordenave M.L. Rock-Eval pyrolysis. In: M.L. Bordenave (Editor) Applied Petroleum Geochemistry. Technip ed., Paris. 1993. Pp. 237-361.

Ishiwatary R., Fukushima K. Generation of unsaturated and aromatic hydrocarbons by thermal alteration of young kerogen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1979. V. 43. Pp. 1343-1349.

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. No. 4. Pp. 357-367. doi: 10.3176/oil.2012.4.06

Kobchenko, M., H. Panahi, F. Renard, D. K. Dysthe, A. Malthe-Sørenssen, A. Mazzini, J. Scheibert, B. Jamtveit, and P. Meakin. 4D imaging of fracturing in organic-rich shales during heating. *J. Geophys. Res.*, 116. B12201. doi:10.1029/2011JB008565.

Stuart R. Stock, Microcomputed Tomography, methodology and applications. Taylor & Francis Group. 2009.

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. 107. Pp. 547-554.

Tisot P.R. Alterations in Structure and Physical Properties of Green River Oil Shale by Thermal Treatment. *Journal of chemical and engineering data*. 1967. 12. Pp. 405-422.

### Сведения об авторах

*Дина Ринатовна Гафурова* – аспирант, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, геологический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, 1  
e-mail: gilyazetdinova\_91@mail.ru

*Дмитрий Вячеславович Корост* – научный сотрудник, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, геологический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, 1  
e-mail: dkorost@mail.ru

*Елена Владимировна Козлова* – старший научный сотрудник, Центр добычи углеводородов, Сколковский институт науки и технологий

e-mail: e.kozlova@skoltech.ru

*Антон Георгиевич Калмыков* – инженер, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, геологический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, 1  
e-mail: a.g.kalmykov@gmail.com

*Георгий Александрович Калмыков* – ведущий научный сотрудник, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, геологический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, 1  
e-mail: gera64@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.07.2017;

Принята к публикации 05.09.2017; Опубликовано 15.10.2017

IN ENGLISH

## Pore Space Change of Various Lithotypes of the Kerogen Domanic Rocks at Different Heating Rates

*D.R. Gafurova<sup>1\*</sup>, D.V. Korost<sup>1</sup>, E.V. Kozlova<sup>2</sup>, A.G. Kalmykov<sup>1</sup>, G.A. Kalmykov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

\*Corresponding author: Dina R. Gafurova, e-mail: gilyazetdinova\_91@mail.ru

**Abstract.** The results of pore space changes as a result of heating Domanik Formation rock samples at different heating rates are shown. Microtomography method revealed that after heating in significant changes may arise, lens-like large pores can be formed, the number of pores and their coherence increase. It was found that changes in the pore space depend on the texture of rocks, the amount of organic matter and its degree of maturity, with all the factors must be considered together. Heating rate also influences the change in the pore space. The results should be considered in the retrieving of the natural reservoirs formation.

**Keywords:** Domanik Formation, pore space, samples heating, kerogen cracking

**For citation:** Gafurova D.R., Korost D.V., Kozlova E.V., Kalmykov A.G., Kalmykov G.A. Pore Space Change of Various Lithotypes of the Kerogen Domanic Rocks at Different Heating Rates. *Georesursy = Georesources*. 2017. V. 19. No. 3. Part 2. Pp. 255-263. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.19.3.17>

### References

Bazhenova O.K., Burlin Yu.K., Sokolov B.A., Khain V.E. *Geologiya i geokhimiya nefii i gaza* [Geology and geochemistry of oil and gas]. Moscow: MGU. 2000. 384 p. (In Russ.)

Behar F., Kressmann S., Rudkiewicz J.L., Vandenbroucke M. Experimental simulation in a confined system and kinetic modeling of kerogen and oil cracking. *Org. Geochem*. 1992. V. 19. No. 1-3. Pp. 173-189.

Behar F., Roy S., Jarvie D. Artificial maturation of a Type I kerogen in closed system: Mass balance and kinetic modeling. *Organic Geochemistry*. 2010. V. 41. Pp. 1235-1247.

Burnham A.K., Happe J.A. On the mechanism of kerogen pyrolysis. *Fuel*. 1984. V. 63. Pp. 1353-1356.

Espitalie J., Bordenave M.L. Rock-Eval pyrolysis. In: M.L. Bordenave (Editor) Applied Petroleum Geochemistry. Technip ed., Paris. 1993. Pp. 237-361.

Gilyazetdinova D.R., Korost D.V. Transformation of void space in the simulation of the generation of hydrocarbon fluids in the example domanic horizon of the Souf-Tatar arch. *Moscow University Geology Bulletin*. 2015. No.5. Pp. 78-86. (In Russ.)

Ishiwatary R., Fukushima K. Generation of unsaturated and aromatic hydrocarbons by thermal alteration of young kerogen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1979. V. 43. Pp. 1343-1349.

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. No. 4. Pp. 357-367. doi: 10.3176/oil.2012.4.06

Kobchenko, M., H. Panahi, F. Renard, D. K. Dysthe, A. Malthe-Sørenssen, A. Mazzini, J. Scheibert, B. Jamtveit, and P. Meakin, 4D imaging of fracturing in organic-rich shales during heating. *J. Geophys. Res.* 116. B12201. doi:10.1029/2011JB008565.

Korost D.V., Nadezhkin D.V., Akhmanov G.G. Void space of oil-source rock during the generation of hydrocarbons: laboratory experiment. *Moscow University Geology Bulletin*. 2012. No.4. Pp. 32-37. (In Russ.)



Lopatin N.P., Emets T.P. Piroлиз v neftegazovoy geologii [Pyrolysis in oil and gas geology]. Moscow: Nauka. 1987. 143 p. (In Russ.)

Stuart R. Stock, Microcomputed Tomography, methodology and applications. Taylor & Francis Group. 2009.

Tisso B., Vel'te D. Obrazovanie i rasprostranenie nefti [Generation and distribution of oil]. Moscow: Mir. 1981. 501 p. (In Russ.)

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. 107. Pp. 547-554.

Tisot P.R. Alterations in Structure and Physical Properties of Green River Oil Shale by Thermal Treatment. *Journal of chemical and engineering data*. 1967. 12. Pp. 405-422.

#### About the Authors

*Dina R. Gafurova* – PhD student, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University  
Russia, 119234, Moscow, Leninskie gory, 1  
e-mail: gilyazetdinova\_91@mail.ru

*Dmitry V. Korost* – Researcher, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University  
Russia, 119234, Moscow, Leninskie gory, 1  
e-mail: dkorost@mail.ru

*Elena V. Kozlova* – PhD in Geology and Mineralogy, Senior Researcher, Hydrocarbons Production Centre Skolkovo Institute of Science and Technology  
Russia, 143026, Moscow, Nobel St., 3  
e-mail: e.kozlova@skoltech.ru

*Anton G. Kalmykov* – Engineer of the Petroleum Geology Department  
Lomonosov Moscow State University  
Russia, 119234, Moscow, Leninskie gory, 1  
e-mail: a.g.kalmykov@gmail.com

*Georgii A. Kalmykov* – Leading Researcher, Petroleum Geology Department  
Lomonosov Moscow State University  
Russia, 119234, Moscow, Leninskie gory, 1  
e-mail: gera64@mail.ru

*Manuscript received 28 July 2017;*

*Accepted 05 September 2017;*

*Published 15 October 2017*