

Микроструктурные параметры емкостного пространства пород перспективных отложений Республики Калмыкия

В.А. Кузьмин*, Н.А. Скибицкая**

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва
E-mail: *kuzminva@mail.ru, **skibitchka@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены особенности строения емкостного пространства пород перспективных отложений Республики Калмыкия. Для этого проведены электронно-микроскопические исследования образцов из продуктивных пластов Восточно-Бирюзакской, Барьерной и Доланско-Эрдниевской площадей, охватывающих породы различных возрастов. Проведено сопоставление основных структурообразующих параметров порового пространства пород по перспективным стратиграфическим горизонтам. Дана микроструктурная характеристика и приведены усредненные значения микроструктурных параметров «цифрового ядра» для моделирования фильтрационных процессов.

Ключевые слова: растровый электронный микроскоп, катодолюминесценция, породы, поровое пространство, сеточная модель порового пространства.

Для цитирования: Кузьмин В.А., Скибицкая Н.А. Микроструктурные параметры емкостного пространства пород перспективных отложений республики Калмыкия // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 3(26). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-26.art8>

Введение

Одной из основных проблем, возникающих при оценке нефтяного потенциала залежи, является задача выделения коллекторов в разрезах скважин и определения зон их развития в межскважинном пространстве. Для этих целей в последние годы все более широко осуществляется цифровая модернизация исследовательского комплекса России [1–3]. В области изучения емкостного пространства пород цифровые технологии реализуются как в геофизике, так и при изучении ядра. Прогнозное выделение коллекторов для оценки запасов первоначально производится на основе емкостных характеристик, полученных лабораторными исследованиями ядра и геофизическим обследованием. На этом этапе производится оценка емкости коллектора, то есть определяется суммарный объем открытых пустот породы, связанных между собой в единую систему. Практически это понятие совпадает с величиной коэффициента открытой пористости ($K_{п.о.}$), которая является основной характеристикой, используемой при решении задач нефтегазопромысловой геологии, связанной с оценкой запасов углеводородов. Однако на современном этапе исследований применение новых методов изучения пород на микроуровне дает возможность более детальной характеристики

емкостного пространства, что позволяет проводить и более точное выделение коллекторов с учетом особенностей строения порового пространства. Одним из перспективных направлений исследований емкостного пространства коллекторов нефти и газа является применение цифровых технологий изучения порового пространства в растровом электронном микроскопе.

Целью настоящей статьи является изложение результатов исследования особенностей емкостного (порового) пространства перспективных отложений Калмыкии на основе цифровых данных микроструктурных параметров. Для этого методами электронной микроскопии были исследованы терригенные и карбонатные породы трех площадей – Восточно-Бирюзакской, Барьерной и Доланско-Эрдниевской.

Методика

Микроструктурные исследования проводились по ранее разработанным методикам изучения пород-коллекторов в растровом электронном микроскопе (РЭМ), которые изложены в работах [4–8].

Для детального анализа особенностей порового пространства пород были применены прямые количественные методы определения размеров пор на основе интегральной катодолюминесценции в РЭМ. В настоящей работе микроструктурные исследования проводили с помощью РЭМ SUPRA 50 VP (фирма Карл Цейс) с разрешением 1,0 нм, оборудованного энергодисперсионным спектрометром INCA Energy (фирма Oxford Instruments) для анализа элементного состава.

Определение средних значений микроструктурных параметров емкостного пространства проводилось на основе алгоритмов для программного анализа статистических данных по РЭМ-изображениям. Алгоритмы разработаны на основе сеточной модели порового пространства с элементами канал–пора, аналогично сеточным моделям Ромма (1985) [9]. На основе сеточной модели и электронно-микроскопических измерений были рассчитаны усредненные значения важнейших параметров емкостного пространства, влияющих на коэффициент извлечения углеводородов при разработке месторождения – характеристика строения ячейки сеточной модели порового пространства в виде усредненного координационного числа (число каналов, приходящихся на одну пору):

$$\beta_{кч} = N_k/N_n, \quad (1)$$

где N_k – число каналов, N_n – число пор, и усредненной величины отношения диаметра пор к диаметру каналов

$$p_{нк} = dn/dk, \quad (2)$$

где d_n – средний диаметр поры, d_k – средний диаметр канала.

Результаты и обсуждения

Микроструктурные исследования емкостного (порового) пространства были проведены для пород из наиболее перспективных отложений с учетом наличия керна. Образцы для исследований были отобраны из нижнемеловых, юрских и верхнетриасовых отложений Восточно–Бирюзакской площади, которая расположена в Лаганском районе республики Калмыкия. В пределах рассматриваемой территории пробурен ряд глубоких поисково-разведочных, параметрических и других скважин, которые вскрыли отложения меловой, юрской, триасовой, пермской, каменноугольной систем и позволили изучить основные черты строения геологического разреза. Перспективы структуры связываются с отложениями нижнего мела, верхней и средней юры [10–11].

По Барьерной площади, расположенной на юго-востоке республики, были исследованы породы из нижнетриасовых отложений. В геоморфологическом отношении площадь находится в южной части Прикаспийской низменности, в геологическом строении которой принимают участие породы от среднекаменноугольных отложений палеозоя до четвертичных включительно. Коллекция образцов для исследований емкостного пространства была отобрана из скважины №1-Барьерная, из нижнетриасовых отложений оленекского яруса (T_{10}).

Для Доланско-Эрдниевской площади, расположенной в юго-западной части Прикаспийской низменности, были проведены исследования образцов пород из девонских отложений фаменского яруса, в котором переслаиваются аргиллиты, кремнистые известняки и доломиты, а в нижней части исследуемого интервала распространены низкопористые карбонатно-кремнисто-глинистые породы.

В целом, по трем площадям отобранная коллекция образцов представлена как терригенными (песчаниками, алевролитами, кремнисто-карбонатными породами), так и карбонатными породами – разновидностями известняков и доломитов.

Интервалы отбора образцов, и их стратиграфическая принадлежность приведены в табл. 1.

На рис. 1–3 показаны примеры анализа морфологии емкостного пространства и в табл. 2 приведены микроструктурные параметры этих образцов.

Таблица 1

Стратиграфическая приуроченность исследованных образцов и глубина отбора

Площадь	№ скв.	Глубина керна, м		Стратиграфия
		Начало	Конец	
Восточно-Бирюзакская	1	2690,62	2699,7	K ₁
Восточно-Бирюзакская	1	2962,68	2977,72	J _{2a-b}
Восточно-Бирюзакская	1	3391,4	3396,27	T ₃
Барьерная	1П	5040,77	5066,53	T ₁₀
Доланско-Эрдниевская	1	6730,83	6732,14	D _{3fm}



Рис. 1. Образец 1В-Б/22, песчаник разномзернистый гравелитовый с карбонатным цементом, (Восточно –Бирюзакская площадь, J_{2a-b}), наличие пористости пелитизированных зерен, катодолюминесценция в РЭМ



Рис. 2. Обр. 1П/64, песчаник мелко-среднезернистый, микроструктурные особенности сечений поровых каналов (Барьерная площадь, T₁₀), катодолюминесценция в РЭМ



Рис. 3. Порода карбонатно-кремнистая, формирование очагов пор в кальцитизированных объемах образца 1Д-Э/6Ф (верхнедевонские отложения Доланско–Эрдниевской площади, D₃fm), катодолюминесценция в РЭМ

Таблица 2

Микроструктурные параметры образцов 1В-Б/22, 1П/64, 1Д-Э/6Ф

№ обр.	Сред. площадь пор и каналов, мкм ²	Сред. эквивалентный диаметр пор и каналов, мкм	Сред. периметр пор и каналов, мкм	Координационное число, $\nu_{кч} = N_k/N_p$	Средний диаметр каналов, мкм	Средний диаметр пор, мкм	Отношение $\rho_{пк} = dp/dk$
1В-Б/22	121,48	12,44	43,54	26,44	2,85	50,62	17,76
1П/64	212,96	6,48	57,09	2,01	4,1	13,56	3,31
1Д/6Ф	8,76	3,34	7,9	3,12	0,67	2,74	4,1

Аналогичные исследования в РЭМ были проведены для всей коллекции отобранных образцов. Полученные порометрические данные «цифрового керна» (табличные величины усредненных значений размеров пор, каналов, координационного числа, отношения диаметров пор и каналов и другие микроструктурные параметры) приведены в табл. 3.

Из таблиц видна отчетливая тенденция изменения микроструктурных параметров порового пространства от более ранних к более поздним отложениям. По мере увеличения глубины залегания и переходом к более поздним отложениям размер пор и каналов в целом уменьшается, уменьшается пористость, породы становятся более плотные. Также

Таблица 3

Усредненные значения микроструктурных параметров по отложениям

Площадь		Восточно-Бюрюзакская площадь (скв. № 1)			Барьерная площадь (скв. № 1П)	Доланско-Эрдниевская площадь (скв. № 1)
Возраст		Нижнемеловые отложения (K ₁)	Среднеюрские отложения (J _{2a-b})	Верхнетриасовые отложения (T ₃)	Нижнетриасовые отложения (T ₁₀)	Верхнедевонские отложения (D _{3fm})
Преобладающие породы		Песчаники	Песчаники, аргиллиты, карбонатно-глинисто-кремнистые породы	Песчаники, алевролиты, карбонатно-кремнистые породы	Аргиллиты, карбонатно-глинистые алевритистые породы	Известняки, доломиты, карбонатно-кремнистые породы
Усредненные значения микроструктурных параметров по отложениям	Открытая пористость K _{по} , %	9–12	6–21	1,3–1,7	0,98–6	<1
	Координационное число $\nu_{кч}$	5–70	2–50	2–31	2–16	2–8
	Координационное число, среднее $\nu_{кч}$	31	12,2	9	4,9	4,1
	Отношения диаметра пор к диаметру каналов $\rho_{пк}=d_{п}/d_{к}$	8–13	4–17	3–8	1,4–74	3,3–6,4
	Среднее значение $\rho_{пк}=d_{п}/d_{к}$	9,3	7,4	5	4,2	4,7

уменьшается координационное число, порово-канальное строение пустотного пространства переходит в канально-поровое, а затем в канально-четочное и четочное строение, с очень тонкими (близкими к субкапиллярным размерам) каналами и более крупными единичными порами (согласно классификации [12]). При этом величина отношения диаметров пор к диаметрам каналов имеет тенденцию к снижению.

Рассчитанные по результатам электронно-микроскопических измерений значения диаметров пор и каналов, а также данные лабораторных измерений коэффициентов остаточной газонасыщенности образцов были использованы для построения связи между величинами $K_{г.о.}$ и $p_{нк}$. Этот параметр определяет различия в величине коэффициента остаточного структурно заземленного газа при прямоточной капиллярной пропитке для пород с разной структурой порового пространства. Корреляционная связь между величинами $K_{г.о.}$ и $p_{нк}$ приведена на рис. 4 (без учета низкопористых пород Доланско-Эрдниевской площади).

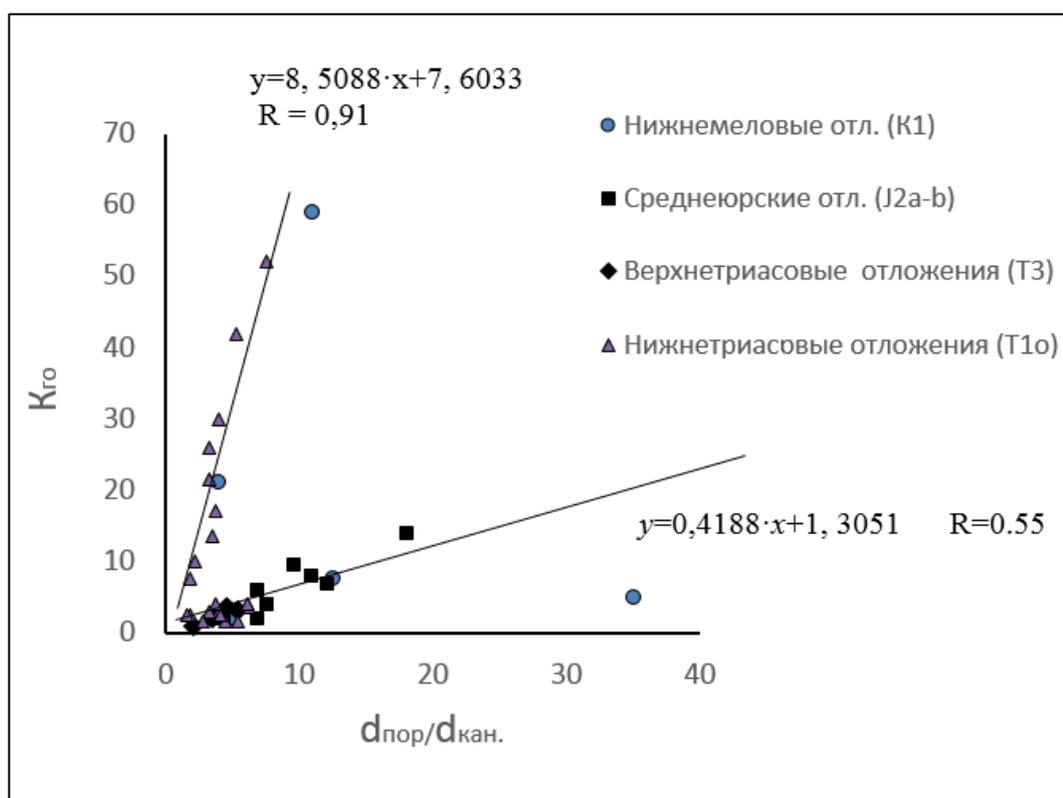


Рис. 4. Корреляционная связь коэффициента структурно заземленной газонасыщенности (нефтенасыщенности) $K_{г.о.}$ ($K_{н.о.}$) с отношением диаметров пор и каналов $p_{нк}$ в различных породах

Как видно на графике, все образцы разделились на две большие группы: первая – с трендом, имеющим линейное уравнение регрессии вида $y=8,5088x+7,6033$ (y – коэффициент $K_{г.о.}$, x – среднее отношение диаметра пор к диаметру каналов $p_{нк}$) с

величиной коэффициента корреляции $R = 0,91$; вторая – с более пологим трендом ($y=0,4188x+1,3051$) и с низкой величиной коэффициента корреляции $R = 0,55$.

Заключение

Исследования показали, что в изучаемых породах имеется существенное отличие морфологии поровых каналов и пространственного строения поровой системы. Наличие двух групп пород свидетельствует о разнонаправленности процессов изменения порового пространства или их различной интенсивности, которые по данным РЭМ-исследований наиболее вероятно связаны, в основном, с окремнением и карбонатизацией, а в карбонатных породах – со вторичной кальцитизацией и доломитизацией. Наличие разных трендов зависимости микроструктурных параметров и углеводородоотдачи обусловлено преимущественно разным литологическим типом пород и развитием в них различных вторичных процессов. В исследованных терригенных породах унаследованное поровое пространство в результате наложенных вторичных процессов может уменьшаться или увеличиваться в зависимости от интенсивности тех или иных процессов. Вид зависимости в терригенных породах во многом связан с развитием вторичных глинистых минералов (дисперсной фазы), заполняющих унаследованное поровое пространство, при этом отношение диаметров пор и каналов в высокопористых породах уменьшается. В низкопористых терригенных породах отношение диаметров пор и каналов увеличивается, так как в основном сужаются каналы. В карбонатных породах при развитии очаговой пористости, на первоначальной стадии катагенеза, происходит увеличение пористости за счет укрупнения размеров пор, при этом последовательно увеличивается средняя величина отношения размера диаметра поры к диаметру порового канала.

Приведенная корреляционная связь коэффициента структурно заземленной газонасыщенности (нефтенасыщенности) $K_{г.о.}$ ($K_{н.о.}$) с отношением диаметров пор и каналов $\beta_{кч}$ может использоваться при выборе МУН только как прогнозная. Более тесная связь может быть получена для отдельных литологических типов пород, в пределах более узких стратиграфических подразделений – отделов или ярусов.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема: «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).

Литература

1. Абукова Л.А., Дмитриевский А.Н., Еремин Н.А. Цифровая модернизация нефтегазового комплекса России // Нефтяное хозяйство. 2017. № 10. С. 2–6. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-10-54-58>
2. Дмитриевский А.Н., Еремин Н.А. Цифровое нефтегазовое производство // Нефть. Газ. Новации. 2017. № 5. С. 58–61.
3. Еремин Н.А., Сарданаивили О.Н. Инновационный потенциал цифровых технологий // Актуальные проблемы нефти и газа. 2017. Вып. 3(18). <http://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2017-18.art13>
4. Кузьмин В.А. Методика и основные результаты изучения пород-коллекторов сложного строения на растровом электронном микроскопе: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: МИНХ и ГП им. И.М. Губкина, 1984. 23 с.
5. Большаков М.Н., Скибицкая Н.А., Кузьмин В.А. Изучение структуры порового пространства в растровом электронном микроскопе (РЭМ) с помощью компьютерной программы «Коллектор» // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2007. № 8. С. 108–111.
6. Smart P., Tovey K. Election microscopy of soils and sediments. Techniques. Oxford: Clarendon Press, 1982. 264 p.
7. Корост Д.В., Надежкин Д.В., Ахманов Г.Г. Изучение пустотного пространства нефтематеринской породы при генерации углеводородов // Вестник Московского ун-та. Сер. 4. Геология. 2012. № 4. С. 32–37.
8. Pratt W.K. Digital image processing. N.Y.: John Willey and Sons, 1991. 720 p.
9. Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства горных пород. Л.: Недра, 1985. 240 с.
10. Геологическое строение и нефтегазоносность Калмыкии / Под ред. Л.Г. Кирюхина и И.Н. Эльвартынова. Элиста: Калмыцкое книжное изд-во, 1986. 155 с.
11. Куранов Ю.В. Современная оценка перспектив нефтегазоносности и ресурсной базы республики Калмыкия на основе новейших геолого-геофизических данных // Известия вузов. Северокавказский регион. Серия: Естественные науки. 2017. № 1. С. 101–109.
12. Кузьмин В.А., Скибицкая Н.А. Микроструктурная классификация коллекторов нефти и газа // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 3(22). <http://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art37>

Microstructural parameters of the capacitive space of the breeds of perspective strata of the Republic of Kalmykia

V.A. Kuzmin*, N.A. Skibitskaya**

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: *kuzminva@mail.ru, **skibitchka@mail.ru

Abstract. The paper considers the features of the structure of the capacitive space of the breeds of perspective deposits of the Republic of Kalmykia. Electronic and microscopic researches of the samples from the East Biryuzak, Barrier, and Dolan-Erdnievskiy productive layers of the areas covering breeds of various age are conducted for this purpose. Comparison of the key gel-forming parameters of the pore space of the breeds on the perspective stratigraphic horizons is carried out. Microstructural characteristic and average values of microstructural parameters of the «digital core» for model operation of filtrational processes are given.

Keywords: raster supermicroscope, cathodeluminescence, breeds, pore space, pore space mesh model.

Citation: Kuzmin V.A., Skibitskaya N.A. Microstructural parameters of the capacitive space of the breeds of perspective strata of the Republic of Kalmykia // Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Iss. 3(26). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-26.art8> (In Russ.)

References

1. Abukova L.A., Dmitrievskiy A.N., Eremin N.A. Digital modernization of Russian oil and gas complex // Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry. 2017. No. 10. P. 54–58. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-10-54-58> (In Russ.).
2. Dmitrievsky A.N., Eremin N.A. Digital oil and gas production // Oil. Gas. Innovations. 2017. № 5. P. 58–61. (In Russ.)
3. Eremin N.A., Sardanashvili O.N. The innovative potential of digital technologies // Actual Problems of Oil and Gas. 2017. Iss. 3(18). <http://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2017-18.art13> (In Russ.).
4. Kuzmin V.A. Methodology and main results of studying reservoir rocks of complex structure using a scanning electron microscope: Extended synopsis of PhD thesis. Moscow: Gubkin Institute of Petrochemical and Gas Industry, 1984. 23 p. (In Russ.).
5. Bolshakov M.N., Skibitskaya N.A., Kuzmin V.A. Study of the structure of the pore space in a scanning electron microscope (SEM) using the computer program Collector // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2007. Vol 1, No 4. P. 493–496. <https://doi.org/10.1134/S1027451007040222>

6. *Smart P., Tovev K.* Election microscopy of soils and sediments. Techniques. Oxford: Clarendon Press, 1982. 264 p.
7. *Korost D.V., Nadezhkin D.V., Akhmanov G.G.* Pore space in source rock during the generation of hydrocarbons // Moscow University Geology Bulletin. 2012. Vol. 67, No. 4. P. 240–246. <https://doi.org/10.3103/S0145875212040059>
8. *Pratt W.K.* Digital image processing. N.Y.: John Willey and Sons, 1991. 720 p.
9. *Romm E.S.* Structural models of rock pore volume. Leningrad: Nedra, 1985. 240 p.
10. Geological structure and oil and gas content of Kalmykia / Ed. L.G. Kiryukhin and I.N. Elvartynova. Elista: Kalmyk Book Publishing House, 1986. 155 p. (In Russ.).
11. *Kuranov Yu.V.* Modern assessment of the hydrocarbon potential and resource base of republic of Kalmykia, supplemented the newest geological and geophysical data // Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii Region. Natural Sciences. 2017. No. 1. P. 101–109. (In Russ.).
12. *Kuzmin V.A., Skibitskaya N.A.* Microstructural Classification of Collectors Oil and Gas // Actual Problems of Oil and Gas. 2018. Iss. 3(22). <http://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art37> (In Russ.).