

2D фрактальный и мультифрактальный анализ пустотно-пористого пространства карбонатных коллекторов нефти

2D fractal and multifractal analysis of porous space in carbonate oil reservoir

R.I. Kadyrov, T.R. Zakirov
(Kazan (Volga Region) Federal University, RF, Kazan)

E-mail: Rail7777@gmail.com

Key words: limestone, carbonates, reservoir, porosity, fractal dimension, multifractal analysis

This article describes a method of fractal and multifractal analysis of porous space on the basis of microphotographs of carbonate rocks thin sections. The results of measurements of porosity in the image, the fractal dimension D_{bc} , informational dimension D_1 and variation index of fractal properties $\Delta\alpha$ are shown. The direct positive relationship between the fractal dimension D_{bc} and porosity is found. Maximal values of informational dimension D_1 correspond to bioclastic-phytozoogenic and bioclastic-zoogenic limestones in which there is irregular arrangement of the very large voids on the background of fine pores. Minimal values correspond to the bioclastic phytogenic limestones with a relatively uniform distribution of small pores. High levels of variation index of fractal properties $\Delta\alpha > 1$ characterize bioclastic phytogenic and partly bioclastic phytozoogenic limestone. The biggest bulk of the sample is concentrated within variation index of fractal properties $\Delta\alpha$ from 0.2 to 0.7 and has a similar geometry and reservoir properties.

**Р.И. Кадыров, К.Г.-М.Н.,
Т.Р. Закиров, К.Ф.-М.Н.**
(Казанский (Приволжский)
федеральный университет)

Адрес для связи: Rail7777@gmail.com

Ключевые слова: известняк, карбонаты, коллектор, пористость, фрактальная размерность, мультифрактальный анализ

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Более половины мировых запасов углеводородов добывается из карбонатных коллекторов. Пористость, наличие специфических типов пустот, их распределение в породе существенно влияют на добычу углеводородов, поэтому численное описание сетевой структуры пористой среды имеет большое значение для прогнозирования свойств коллектора и может быть использовано для прогнозирования нефтеотдачи и моделирования фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллекторов. Одним из способов определения характеристики пористой системы является использование геометрических параметров, таких как фрактальная размерность [1]. Целью данной работы является выявление связи ФЕС и литологических особенностей карбонатов с двумерными фрактальными и мультифрактальными параметрами пустотно-пористого пространства карбонатных коллекторов одного из месторождений нефти Республики Татарстан.

Фракталы широко распространены в природе, но в основном представлены случайными, а не регулярными разновидностями [2]. Случайные фракталы отличаются от регулярных тем, что свойства самоподобия справедливы только после соответствующего усреднения по всем статистически независимым реализациям объекта, их свойства исследуются с помощью мультифрактального анализа. Одной из геометрических характеристик объекта является фрактальная размерность: мера его слож-

ности, дробное измерение, которое описывает степенное соотношение между линейным масштабом и типом объекта [3]. Ранее было показано, что увеличение фрактальной размерности в породах может указывать на увеличение сложности сетевой структуры, пористости или площади трещин, доли мелких зерен, а также неравномерности фрактальных объектов. В современной научной практике принято использовать два геометрических параметра и более, чтобы получить представление о природе пористого пространства, поэтому в качестве методов в данной работе выбраны фрактальный и мультифрактальный способы анализа [1].

Объектом исследования являются карбонатные породы турнейского яруса месторождения нефти, расположенного на юго-востоке Республики Татарстан. Разрез турнейского яруса в основном сложен известняками биокластово-зоогенными (ИБЗ) (малевский и упинский горизонты, верхняя часть кизеловского горизонта), биокластово-фитозоогенными (ИБФЗ) (нижняя часть кизеловского горизонта) и биокластово-фитогенными (ИБФ) (черепетский горизонт и кровельная часть кизеловского горизонта) [4].

Для изучения геометрии пустотно-пористого пространства карбонатных коллекторов нефти предварительно было изготовлено 60 шлифов. Далее с помощью поляризационного микроскопа ПОЛАМ-Р211М и цифровой фотокамеры Genius G-Shot DV-1110 для каждого шлифа

были получены три микрофотографии: в естественном, поляризованном и в поляризованном с поворотом шлифа вдоль оси свете. Поворот шлифа вдоль оси необходим для изменения цвета и яркости сильно осветленных минеральных зерен. Поскольку данные, полученные на основе микроснимков, предполагалось сравнивать между собой, особое внимание уделялось качеству съемки, условия которой были единообразными. В результате получено более 300 фотографий, из них отобрано 180.

Для последующего анализа (с целью устранения затемнения на краях снимка) из центральной хорошо освещенной части вырезалась прямоугольная область размером 1290×910 пикселей. На следующем этапе в программном пакете Corel Photo-Paint проводилось выделение пор на основе порога яркости микроснимков шлифов в поляризованном свете (см. рисунок, а). На этих микрофотографиях поры имеют темный цвет, которому соответствуют минимальные значения яркости. Изображение в параллельных николях в полупрозрачном виде накладывалось сверху с целью контроля границ пор, а снимок в поляризованном свете с поворотом шлифа вдоль оси использовался для контроля зерен, оказавшихся затемненными или чрезмерно осветленными.

Далее изображение переводилось в черно-белый монохромный формат и сохранялось в виде tiff-файла (см. рисунок, б). Несмотря на все усилия, на части микроснимков поры не удалось корректно распознать из-за остаточной нефтенасыщенности. В итоге получено 42 черно-белых изображения. На следующем шаге для измерения пористости изображения импортировались в программный пакет ArcGis. Коэффициент пористости определялся как отношение площади изображения, занимаемого порами, к общей площади изображения. Для анализа использова-

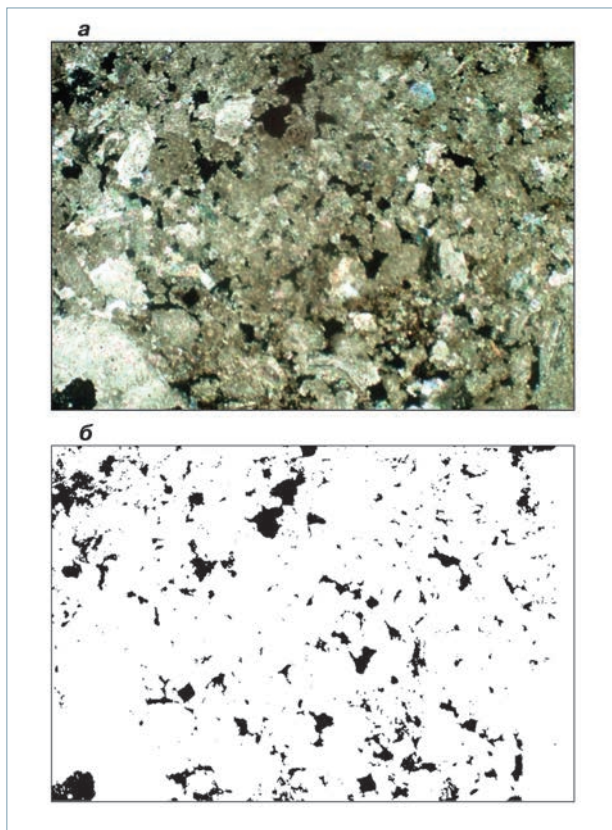
лась программа Fractalyse, позволяющая рассчитать фрактальную размерность и мультифрактальные параметры на основе черно-белых изображений.

Несмотря на то что, пористость, определенная по микроснимкам, является общей, характеризует более локальную область и содержит некоторую долю ошибок, полученных в процессе ее измерения, значения пористости оказались довольно близки к значениям, установленным методом капиллярной пропитки (см. таблицу). Коэффициент корреляции равен 0,85, что свидетельствует о хорошей статистической связи между измеряемыми параметрами и возможности применения микрофотографии для определения геометрических свойств пустотно-пористого пространства.

Для исследования свойств самоподобия пористого пространства использовался метод box counting. Минимальное значение D_{bc} пустотного пространства двумерного микроснимка шлифа, определенное этим методом, составило 1,33 для образца ИБФ, максимальное – 1,66 для образца ИБЗ (см. таблицу). Коэффициент корреляции между значениями пористости и фрактальной размерности D_{bc} в изученных образцах равен 0,93, что свидетельствует о прямой положительной зависимости между параметрами и соответствует одному из главных свойств фрактальной размерности, показывающей степень заполнения порового пространства. Однако пористость не является единственным параметром, определяющим фрактальную размерность. Например, если рассмотреть в качестве модели породы регулярный фрактал «Ковер Серпинского», то с каждым шагом итерации пористость изображения будет бесконечно возрастать, но теоретическая фрактальная размерность остается равной 1,89 [2]. Таким образом, фрактальная размерность зависит не только от степени заполнения пустотного пространства, но и отражает его геометрические параметры: форму, уплотненность и связность.

По результатам мультифрактального анализа оценены показатели D_1 и $\Delta\alpha$. Первый показатель представляет собой энтропию фрактального множества, его повышение характеризует рост беспорядка в системе [3]. Максимальные значения D_1 характерны для ИБФЗ и ИБЗ: для тех образцов известняков, в которых наблюдается неравномерное расположение очень крупных пустот на фоне мелких пор. Минимальные значения D_1 соответствуют ИБФ с относительно равномерным распределением мелких пор. Показатель $\Delta\alpha$ представляет собой разницу пределов α_{\max} и α_{\min} функции мультифрактального спектра $f(\alpha)$ и отражает контраст вероятности заполнения ячеек изображения. Чем выше $\Delta\alpha$, тем больше разброс фрактальных свойств, тем менее проявлена мультифрактальная структура, т.е. поры распределены в пространстве и по размерам менее случайно [3]. По результатам исследования значения $\Delta\alpha > 1$ характерны для ИБФ и части ИБФЗ. Основная часть образцов сосредоточена в пределах $\Delta\alpha = 0,2-0,7$ и обладает сходными геометрическими и фильтрационно-емкостными характеристиками.

Таким образом, параметр фрактальной размерности D_{bc} пористо-пустотного пространства породы тесно связан с ее пористостью и отражает ее геометрические свойства (связность пор, их сгруппированность, однородность распределения в пространстве и др.). Мультифрактальный параметр информационной размерности D_1 характеризует неравномерное распределение крупных пустот на фоне



Процесс распознавания пор на микроснимках:
а – микроснимок в поляризованном свете; б – итоговое черно-белое изображение

Номер образца	Глубина отбора, м	Тип известняка	Пористость, %		D_{bc}	D_1	$\Delta\alpha$
			эффективная	по изображению			
107	1269,8	ИБЗ	12,81	9,15	1,54	1,44	0,24
108	1271,2	ИБЗ	11,21	8,39	1,56	1,52	0,53
109	1271,4	ИБФЗ	3,86	4,05	1,40	1,35	0,35
111	1271,8	ИБФЗ	12,74	14,79	1,63	1,55	0,86
112	1272,2	ИБФЗ	11,26	10,78	1,56	1,51	0,59
113	1272,4	ИБЗ	12,63	11,63	1,59	1,53	0,57
119	1273,8	ИБФЗ	8,00	8,14	1,51	1,62	1,03
121	1274,4	ИБЗ	9,54	10,36	1,58	1,50	0,61
122	1274,6	ИБФЗ	4,86	7,93	1,54	1,50	1,12
123	1274,8	ИБФЗ	10,66	7,81	1,50	1,63	0,73
124	1275,2	ИБЗ	11,23	9,42	1,56	1,51	0,50
125	1275,5	ИБФЗ	9,40	8,76	1,57	1,52	0,57
126	1276,2	ИБЗ	11,23	10,44	1,56	1,53	0,46
128	1276,6	ИБЗ	11,48	9,47	1,55	1,49	0,47
130	1277,2	ИБФЗ	9,68	8,81	1,55	1,55	0,24
131	1277,4	ИБЗ	13,79	16,74	1,66	1,61	0,96
132	1277,6	ИБЗ	12,38	13,28	1,60	1,54	0,18
133	1277,9	ИБЗ	15,29	12,50	1,60	1,51	0,90
134	1278,2	ИБЗ	11,87	14,21	1,64	1,60	0,68
137	1278,8	ИБЗ	12,98	15,53	1,63	1,70	0,50
138	1279,2	ИБФЗ	9,67	11,14	1,60	1,57	0,37
139	1279,4	ИБЗ	11,55	12,72	1,61	1,71	0,50
140	1279,6	ИБФЗ	8,79	9,50	1,57	1,56	0,27
141	1279,8	ИБЗ	9,41	8,40	1,56	1,48	0,95
142	1280,2	ИБФЗ	8,39	10,45	1,59	1,55	0,50
144	1280,6	ИБФЗ	10,12	11,46	1,61	1,60	0,53
145	1280,9	ИБФЗ	10,59	8,63	1,55	1,51	0,41
146	1281,1	ИБЗ	5,62	5,59	1,48	1,5	0,45
149	1281,85	ИБФЗ	9,82	8,86	1,55	1,52	1,50
150	1282,1	ИБФЗ	7,98	7,59	1,52	1,40	0,52
151	1282,35	ИБФЗ	9,23	8,14	1,54	1,49	0,46
152	1282,7	ИБФ	4,11	2,10	1,33	1,17	1,43
154	1283,1	ИБФЗ	11,28	10,19	1,54	1,60	0,35
155	1283,35	ИБЗ	12,69	12,26	1,60	1,56	0,81
159	1284,45	ИБФЗ	10,11	8,91	1,55	1,64	0,35
160	1284,7	ИБЗ	11,81	12,23	1,62	1,59	0,60
164	1285,6	ИБФЗ	6,39	6,19	1,47	1,61	1,06
166	1286,2	ИБФЗ	8,71	9,29	1,55	1,73	1,22
167	1286,4	ИБФЗ	12,29	12,38	1,61	1,53	0,58
168	1286,6	ИБФЗ	9,11	10,21	1,58	1,51	0,45
169	1286,8	ИБФЗ	16,73	14,21	1,59	1,73	1,33
176	1288,6	ИБФЗ	4,89	4,82	1,47	1,36	0,63

Примечание: D_{bc} – параметр фрактальной размерности, D_1 – мультифрактальный параметр информационной размерности, $\Delta\alpha$ – показатель разброса фрактальных свойств.

более мелких, его высокие значения свойственны образцам с высокой проницаемостью биокластово-фитозоогенного и биокластово-зоогенного типов. Высокие показатели $\Delta\alpha$, вероятно, указывают на единственность основного фактора формирования пористой структуры, преимущественно однородной по распределению в пространстве и размерам пор. Результаты работы могут использоваться в качестве статистических параметров при цифровом моделировании характеристик коллектора, когда отсутствует возможность вербального описания геометрии пористой структуры, а также в трехмерном фрактальном и мультифрактальном анализе пород.

Список литературы

1. Lee B.H., Lee S.K. Effects of specific surface area and porosity on cube counting fractal dimension, lacunarity, configurational entropy, and permeability of model porous networks: Random packing simulations and NMR micro-imaging study//Journal of Hydrology. – 2013. – № 496. – P. 122–141.

2. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. – New York: Freeman and Co, 1982. – 468 p.

3. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.

4. Морозов В.П. Седиментогенез и постседиментационные изменения палеозойских карбонатных отложений востока Восточно-европейской платформы: дисс. на соиск. уч. степ. д-ра геол.-мин. наук. – Казань, 2009. – 283 с.

References

1. Lee B.H., Lee S.K., *Effects of specific surface area and porosity on cube counting fractal dimension, lacunarity, configurational entropy, and permeability of model porous networks: Random packing simulations and NMR micro-imaging study*, Journal of Hydrology, 2013, V. 496, pp. 122–141.

2. Mandelbrot B.B., *The fractal geometry of nature*, New York: Freeman, 1982, 468 p.

3. Bozhokin S.V., Parshin D.A., *Fraktaly i multifraktaly* (Fractals and multifractals), Izhevsk: Publ. of Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika, 2001, 128 p.

4. Morozov V.P., *Sedimentogenez i postsedimentatsionnye izmeneniya paleozoyikh karbonatnykh otlozheniy vostoka Vostochno-Evropeyskoy platformy* (Sedimentogenesis and postsedimentary changes of Paleozoic carbonate deposits of the East European platform): thesis of doctor of geological and mineralogical science, Kazan', 2009, 283 p.