

## ДИАГНОСТИКА 3D МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ МАГНИТНЫХ МИКРОСФЕРУЛ

Глухов М.С.

*Казанский федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казань, Россия, gluhov.mixail2015@yandex.ru*

Более 150 лет исследований, посвященных магнитным микросферулам (ММ), размером менее 1 мм, космогенной, магматической и техногенной природы, позволили перенять опыт оригинальных подходов к изучению их строения, состава и идентификации генезиса. Изучение данных объектов позволяет получить дополнительные сведения о процессах минералообразования в различных природных средах [Глухов, 2022а]. Особый интерес исследователей привлекает изучение ММ из осадочных пород [Kadyrov et al., 2020; Глухов, 2022а], что объясняется перспективностью их использования как дополнительного инструмента для корреляции разнофациальных осадочных толщ [Сунгатуллин и др., 2015; Глухов, 2022а] и поиска древних метеоритных кратеров [Сунгатуллин и др., 2016; Глухов, 2022а]. Определение генезиса ММ – частый предмет научных дискуссий. Для идентификации ММ необходимо использовать комплекс диагностических признаков [Глухов, 2022а].

Целью данной работы является дополнение диагностических характеристик магнитных микросферул различной природы 3D морфологическими при-

знаками. В задачи исследования входила морфометрия ММ с помощью рентгеновской компьютерной микротомографии и программы для пост-обработки томографических изображений.

Объекты исследования представлены набором из 25 ММ, где 11 сферул из осадочных пород, 2 из антарктического снега, 3 из импактитов; 5 из золуноса ТЭС, 4 из металлургических шлаков. Строение и состав всех приведенных ММ ранее были хорошо изучены [Глухов, 2022а,б]. ММ из природных объектов имеют характерные дендритовый, скелетный и мозаичный типы микроструктуры, однородную текстуру и магнетитовый состав. Техногенные ММ имеют пористую текстуру, бугристую поверхность. Микроструктура представлена микропорфировым, скелетным и мозаичным типами. Минеральный состав представлен магнетитом, ферришпинелидами и стеклом [Глухов, 2022а,б].

Съемка ММ проводилась на рентгеновском микротомографе Phoenix V|tome|X S 240 (КФУ, оператор Е.О. Стаценко), для пост-обработки томографических данных использовалась программа Avizo.

Таблица 1. 3D морфологические признаки из [Kadyrov et al., 2020]

Объем 3D (мкм <sup>3</sup> )	Объем объекта
Длина 3D (мкм)	Максимальный из диаметров Фере (диаметр Фере: расстояние между двумя параллельными плоскостями, которое ограничивает объект перпендикулярно этому направлению).
Ширина 3D (мкм)	Минимальный из диаметров Фере.
Высота 3D (мкм)	Наибольшее расстояние между двумя параллельными линиями, которые касаются элемента, но не пересекают его и расположены в плоскости, ортогональной наибольшему диаметру 3D-объекта.
Толщина 3D (мкм)	Наибольший сегмент, соприкасающийся с объектом своими концами и расположенный в плоскости, перпендикулярной как максимальному диаметру Фере, так и ширине 3D-диаметра.
Эквивалентный диаметр (мкм)	Диаметр сферы, имеющей тот же объем, равен эквивалентному диаметру.
Площадь 3D (мкм <sup>2</sup> )	Площадь граничной поверхности объекта.
Форм-фактор 3D	Коэффициент формы описывает значение, на которое влияет форма объекта, но не зависит от его размера. Определяется как $\left(\frac{\text{Площадь } 3D^3}{36 * \pi * (\text{Объем } 3D)^2}\right)$ . Оно равно 1 для идеальной сферы, тогда как большие значения указывают на менее компактные объекты. Значения меньше 1 могут быть получены для объектов, состоящих всего из нескольких вокселей. Такие маленькие объекты не следует рассматривать для анализа формы.
Анизотропия	1 минус отношение наименьшего к наибольшему собственному значению ковариационной матрицы. Измеряет отклонение области от сферической формы.

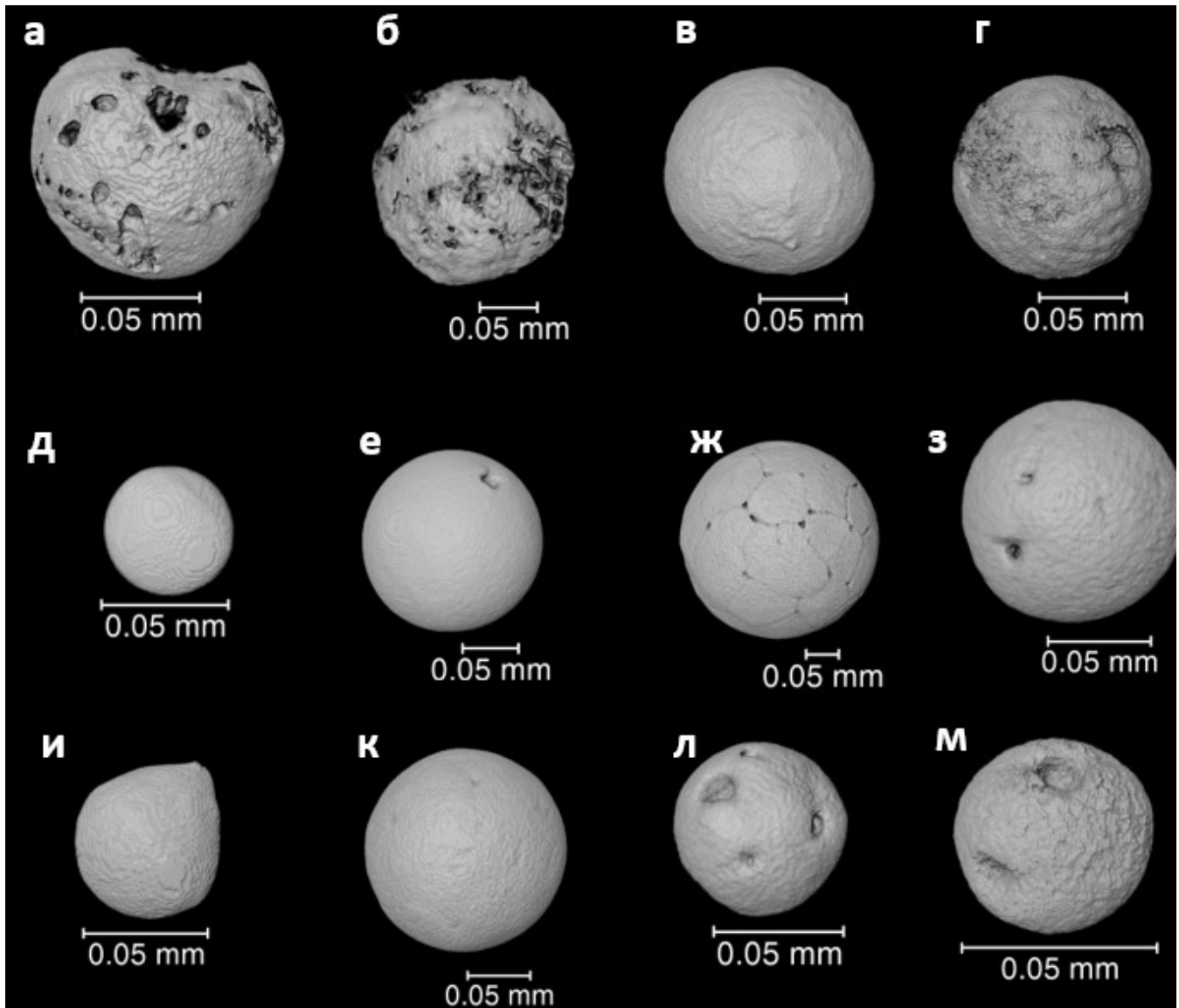


Рис. 1. Томографические 3D снимки магнитных микросферул: а, б – из зол-уноса ТЭС; в, г – из металлургических шлаков; д–з – из осадочных пород; и, к – из импактитов кратеров Рис (и) и Попигай (к); л, м – из антарктического снега

Основные искомые параметры представлены в таблице 1. Определение и терминология параметров заимствованы из [Kadyrov et al., 2020].

Основными результатами исследований являются трехмерные изображения ММ (рис. 1), на которых визуально различимы неровности форм ММ. Главными признаками, описывающими поверхность изученных сферул, являются форм-фактор 3D и анизотропия. Наибольшими показателями форм-фактора отличились техногенные ММ из зол-уноса (табл. 2) 62.63-373.83. ММ из природных объектов и металлургических шлаков имеют близкие показатели.

Аналогичным образом отличились ММ из зол-уноса ТЭС и по коэффициенту анизотропии, их значения превышают 0.25, тогда как анизотропия ММ из природных объектов не превышает 0.21. При

этом большинство из них не превышает 0.1. Важно отметить, что образцы ММ из природных объектов, имеющие значения анизотропии близкие к 0.2 и выше, имеют каплевидную, несколько вытянутую форму. Например, такой формой обладает сферула из кратера Попигай (рис. 1 к). Исследователями предполагается, что такая форма характерна для абляционных ММ [Krinov, 1964; Iwahashi, 1991; Глухов, 2022a]. Значения анизотропии ММ из металлургических шлаков близки к ММ из природных объектов, кроме образца № 23 (табл. 2).

Ранее в наших исследованиях для оценки степени сферичности был использован термин «коэффициент сферичности» (отношению максимального диаметра ММ к минимальному). Расчет этого коэффициента был применен к 2D изображениям. Доказано, что

Таблица 2. Морфометрия магнитных микросферул

№ п/п	Объем 3D (мкм <sup>3</sup> )	Длина 3D (мкм)	Ширина 3D (мкм)	Толщина 3D (мкм)	Размах 3D (мкм)	Эквивалентный диаметр (мкм)	Площадь 3D (мкм <sup>2</sup> )	Форма 3D	Анизотропия
1.	1010.8·10 <sup>4</sup>	298.1	293.21	295.28	295.764	268.26	38.54·10 <sup>4</sup>	4.95	0.03
2.	7.86·10 <sup>4</sup>	55.90	53.00	53.42	54.70	53.14	0.92·10 <sup>4</sup>	1.13	0.09
3.	2.74·10 <sup>4</sup>	40.04	39.63	39.50	39.61	37.39	0.70·10 <sup>4</sup>	4.07	0.05
4.	197.62·10 <sup>4</sup>	161.70	160.06	159.87	160.71	155.70	10.67·10 <sup>4</sup>	2.75	0.02
5.	8.46·10 <sup>4</sup>	61.55	53.80	56.37	58.88	54.47	1.19·10 <sup>4</sup>	2.10	0.19
6.	5.7·10 <sup>4</sup>	50.39	48.78	48.89	49.59	47.75	0.92·10 <sup>4</sup>	2.12	0.04
7.	5.95·10 <sup>4</sup>	51.14	48.66	49.09	49.48	48.42	0.74·10 <sup>4</sup>	1.02	0.04
8.	3.83·10 <sup>4</sup>	44.27	40.86	42.53	43.69	41.80	0.62·10 <sup>4</sup>	1.46	0.13
9.	11.03·10 <sup>4</sup>	62.74	60.41	60.75	61.53	59.50	1.26·10 <sup>4</sup>	1.44	0.05
10.	2762.3·10 <sup>4</sup>	467.57	430.98	438.40	445.84	375.05	102.77·10 <sup>4</sup>	12.58	0.12
11.	60.68·10 <sup>4</sup>	108.80	106.73	107.60	107.90	105.04	4.07·10 <sup>4</sup>	1.62	0.06
12.	12.39·10 <sup>4</sup>	65.95	61.73	62.99	63.68	61.86	1.29·10 <sup>4</sup>	1.22	0.07
13.	6.05·10 <sup>4</sup>	51.76	48.21	49.81	50.85	48.71	0.87·10 <sup>4</sup>	1.59	0.14
14.	2069·10 <sup>4</sup>	359.48	332.73	332.80	356.95	340.65	52·10 <sup>4</sup>	2.90	0.17
15.	161.18·10 <sup>4</sup>	161.39	159.03	158.29	160.44	145.47	11.32·10 <sup>4</sup>	4.94	0.08
16.	10.69·10 <sup>4</sup>	69.44	58.73	59.94	62.44	58.89	1.46·10 <sup>4</sup>	2.40	0.21
17.	42.95·10 <sup>4</sup>	174.77	147.39	151.52	163.96	93.61	15.92·10 <sup>4</sup>	193.39	0.28
18.	17.25·10 <sup>4</sup>	101.45	90.21	86.81	96.30	69.07	5.95·10 <sup>4</sup>	62.63	0.25
19.	30.69·10 <sup>4</sup>	132.83	111.28	117.96	119.87	83.69	11.36·10 <sup>4</sup>	137.57	0.33
20.	106.61·10 <sup>4</sup>	205.63	167.50	173.06	182.46	126.75	36.36·10 <sup>4</sup>	373.83	0.27
21.	16.7·10 <sup>4</sup>	111.55	93.38	98.12	100.58	68.32	6.69·10 <sup>4</sup>	94.92	0.33
22.	89.52·10 <sup>4</sup>	126.80	119.69	119.75	122.63	119.57	6.51·10 <sup>4</sup>	3.05	0.11
23.	104.7·10 <sup>4</sup>	160.43	124.92	122.90	131.10	125.99	7.07·10 <sup>4</sup>	2.85	0.40
24.	62.83·10 <sup>4</sup>	111.30	106.53	106.31	110.02	106.26	4.7·10 <sup>4</sup>	2.32	0.08
25.	99.59·10 <sup>4</sup>	125.95	124.62	124.63	125.23	123.90	5.44·10 <sup>4</sup>	1.43	0.02

Примечание. 1–11 – ММ из осадочных пород; 12, 13 – ММ из антарктического снега; 14–16 – ММ из импактитов; 17–21 – ММ из зол-уноса ТЭС; 22–25 – ММ из металлургических шлаков.

ММ из природных объектов более сферичны [Глухов, 2022а]. Приведенные выше результаты также подтверждают, что форма ММ из природных объектов более сферичная. Напротив, некоторые ММ техногенной природы также могут обладать высокой степенью сферичности. Это еще раз доказывает факт необходимости использования комплекса методов при идентификации происхождения ММ [Глухов, 2022а].

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Использование современных неинвазивных методов, таких как рентгеновская компьютерная томография, позволяет выявлять дополнительные диагностические характеристики ММ;

2. Результаты использования приведенного метода еще раз доказывают большую степень сферичности ММ из природных объектов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Глухов М.С. Магнитные микросферулы: морфология, состав, принципы классификации: дис... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.05. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2022а. 202 с.
2. Глухов М.С. Компьютерная обработка томографических снимков магнитных микросферул // Металлогения древних и современных океанов – 2022. От вещественного состава к моделям и прогнозированию месторождений. 2022б. С. 212–215.
3. Сунгатуллин Р.Х., Сунгатуллина Г.М., Глухов М.С., Осин Ю.Н., Воробьев В.В. Возможности использования космических микросфер при корреляции нефтегазоносных отложений // Нефтяное хозяйство. 2015. Т. 2. С. 16–19.

4. Сунгатуллин Р.Х., Цельмович В.А., Вафин Р.А., Сунгатуллина Г.М. Геоморфологические и геолого-минералогические признаки импактного происхождения озерной котловины Рабига Куль, Республика Татарстан // Геоморфология. 2016. Т. 1. С. 64–72.
5. Iwahashi J. Shape and Surface Structure of the Magnetic Micro-Spherules from Permian and Triassic Bedded Chert // Journal of Geosciences. 1991. V. 34(2). P. 55–73.
6. Kadyrov R., Glukhov M., Statsenko E., Galiullin B. Enigma of Ferruginous Inclusions in Evaporites // Arabian Journal of Geosciences. 2020. V. 13(20). P. 1058.
7. Krinov E.L. Scattered meteoritic matter in the area of fall of the Sikhote-Alin iron meteorite // Annals of the New York Academy of Sciences. 1964. V. 119(1). P. 224–234.