

но, выделился несколько позднее, т. к. не обладает идиоморфными очертаниями и наиболее крупные зерна содержат включения оливина. Магнетит был образован в результате серпентинизации, когда часть освободившегося железа из оливина и пироксенов сформировала собственную фазу.

Литература

Савельев Д. Е., Белогуб Е. В., Блинов И. А., Кожевников Д. А., Котляров В. А. Петрологические свидетельства синдеформационной сегрегации вещества при образовании дунитов (на примере офиолитов Крака, Южный Урал) // *Минералогия*. 2016. № 4. С. 56–77.

М. С. Глухов

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань
gluhov.mixail2015@yandex.ru*

Применение прецизионных методов для идентификации металлических микрочастиц в осадочных породах разреза Усолка, Предуральский прогиб (научный руководитель проф. Р. Х. Сунгатуллин)

Геологический разрез Усолка приурочен к осевой части Бельской впадины Предуральского краевого прогиба и характеризуется непрерывностью седиментации, хорошей обнаженностью и обилием конодонтовой фауны. Разрез относится к флишевым образованиям конденсированного типа и сложен сериями отложений карбонатно-глинисто-кремнистого состава с прослоями вулканических туфов. Он детально изучен с точки зрения биостратиграфии и литологии [Чувашов и др., 1990; Сунгатуллин и др., 2015] и предлагается в качестве эталонного стратиграфического объекта для переходных пермо-карбоновых отложений. В породах разреза обнаружены магнетитовые микросферы и каплевидные частицы, а также металлические образования пластинчатой, стружко- и проволоковидной форм разнообразного химического состава. Микросферы обладают разнообразной рельефной поверхностью (такры, таблички, выступы, микрократеры, треугольные впадины и др.), что, наряду с почти идеальной сферичностью, считается одним из определяющих критериев космогенности подобных объектов [Корчагин, 2010; Глухов, Сунгатуллин, 2015]. Нахождение металлических микрочастиц в осадочных толщах может выступить новым инструментом для региональной стратиграфической корреляции разрезов, привести к пересмотру моделей биотических кризисов, а также использоваться как индикатор импактных событий.

В исследованной части разреза мощностью 12 м ранее было отобрано 70 проб, в 20 из которых обнаружены микросферы и металлические частицы в количестве от 1–2 до 20 шт. и более; в двух пробах встречены каплевидные образования [Сунгатуллин и др., 2017]. При изучении внутреннего строения в шлифах выявлены цельные и полые микросферы диаметром 85–200 мкм при среднем значении 135 мкм.

В данной работе исследован химический состав 133 микрочастиц с помощью микрозондового анализа, который проводился на приборе MERLIN Carl Zeiss, оснащенном энергодисперсионным спектрометром «AZTEC» X-MAX Oxford Instruments при ускоряющем напряжении 20–25 кэВ и рабочем отрезке 10–24 мм. Глубина зондирования составляла 1 мкм, точность измерения 0.1–1 %. Для определения магнитных минералов и самородного железа проведен дифференциальный термомагнитный анализ (ДТМА) 42 проб разреза (напряженность магнитного поля 400 мТл, объем пробы $\sim 8 \times 10^{-6}$ м³, что соответствует весу 0.09–0.13 г, интервал температур 20–800 °С, скорость непрерывного нагревания пробы 100 °С/мин). После первого нагрева до 800 °С проба остывала до 20 °С без индуцированного внешнего магнитного поля. Для каждого образца проводилось два последовательных нагрева, что позволило сделать более точной диагностику соединений железа. Все исследования выполнены в лабораториях Казанского федерального университета.

Результаты геохимического исследования микросфер показали, что основными элементами в них являются Fe и O, а примесь других элементов незначительна (табл. 1). Соотношение между Fe и O свидетельствует о магнетитовом составе микросфер. В микросферах отсутствует титан и иногда присутствует железистый никель, что подтверждает их внеземную природу [Глухов, Сунгатуллин, 2015]. Небольшие содержания Si, Al, Ca и K указывает на их формирование в результате абляции каменных метеоритов [Глухов, 2016].

Статистическая обработка (корреляционный, факторный и кластерный анализы) результатов геохимического профилирования в шлифах сферических образований показала, что железо не связано с другими элементами (рис.). Оно имеет отрицательную связь с кислородом (коэффициент парной корреляции -0.64 , $n = 23$), что указывает на дифференциацию вещества микросфер. При этом от центра к периферии микросфер уменьшается содержание железа и происходит смена самородного железа (в ядре) железо-никелевым интерметаллидом (аваруит), далее – вюститом (между ядром и поверхностью микросферы), а на поверхности сфер – магнетитом и гематитом.

Таблица 1

Химический состав магнетитовых микросфер из разреза Усолка, мас. %

Элемент	Номер образца			
	8.5-1	8.5-2	9.8	12.5
Fe	76.17	76.95	75.81	76.31
O	22.65	22.39	22.77	22.64
Mn	0.34	0.13	н. о.	0.28
Cr	0.14	н. о.	0.08	н. о.
Al	0.28	н. о.	0.19	0.14
Si	0.34	0.19	0.41	0.40
Ca	0.08	0.04	0.09	0.08
K	н. о.	н. о.	0.14	н. о.

Элемент	Номер образца			
	8.5-1	8.5-2	9.8	12.5
Na	н. о.	0.18	0.27	н. о.
Mg	н. о.	н. о.	н. о.	0.11
Cl	н. о.	0.05	0.08	н. о.
Zn	н. о.	н. о.	н. о.	0.02
P	н. о.	н. о.	0.09	н. о.
Ni	н. о.	0.07	н. о.	0.02
S	н. о.	н. о.	0.07	н. о.
Сумма	100	100	100	100

Примечание. Здесь и в таблице 2, н. о. – не обнаружено.

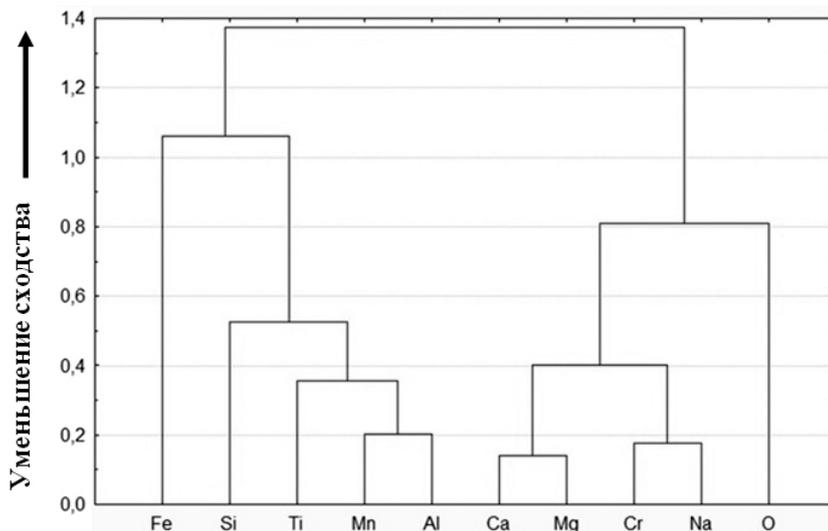


Рис. Результаты кластерного анализа геохимического профилирования шлифов сферичных образований.

Результаты микронзондового анализа пластинчатых частиц показали, что данные объекты имеют разный химический состав (табл. 2). Наиболее часто встречаются пластинки с субпараллельными бороздами и зазубренными краями с преобладанием Fe и Cr, реже – самородный никель.

В связи с тем, что минеральный состав изученных микрочастиц определялся путем пересчета химического состава на нормативные минералы (миналы), нами исполь-

Таблица 2

Состав пластинчатых микрочастиц разреза Усолка, мас. %

Номер образца	Элементы										
	Fe	O	Cr	Ni	Si	Ca	S	Al	Mg	K	Сумма
Высокохромистый магнетит											
10.75 ¹	61.17	24.75	12.21	0.17	1.00	0.13	0.03	0.09	0.19	н.о.	100.01
8.35-16 ²	62.03	24.18	12.44	0.24	0.33	н.о.	н.о.	0.08	н.о.	0.12	100
7.95-3 ³	58.74	24.61	15.00	н.о.	0.28	0.08	0.06	н.о.	н.о.	н.о.	99.92
7.20-1 ⁴	60.68	24.82	12.64	0.24	1.00	0.04	0.03	0.24	0.10	н.о.	99.99
У-35 ⁵	60.34	24.33	12.07	н.о.	0.39	0.16	0.09	н.о.	н.о.	0.43	100.50
Самородный никель											
7.95-2	0.82	21.60	0.12	77.29	н.о.	н.о.	0.17	н.о.	н.о.		100

Примечание. В минералах также определены (мас. %): ¹ – Zn 0.19, V 0.08, ² – Na 0.38, Cl 0.20, ³ – Cu 0.30, V 0.08, Mn 0.77, ⁴ – Cu 0.20, ⁵ – Na 1.34, P 0.20, Cl 0.64.

зовался метод ДТМА, который позволяет получить дополнительную информацию о железосодержащих минералах. На кривых ДТМА зависимости индуктивной намагниченности от температуры выделяется магнетитовая фаза с точкой Кюри в районе 570 °С. В большинстве образцов отмечается наличие сидеритовой фазы, рост намагниченности начинается при температурах ~420 °С и прерывается из-за перехода сидерита в магнетит. На некоторых кривых отмечается небольшой вклад в намагниченность железо-никелевого сплава с точкой Кюри ~750 °С.

Полученные результаты ДТМА подтверждают данные микрозондового исследования, особенно для слоев, содержащих максимальное количество магнетитовых микросфер и железо-никелевых микрочастиц. Так, например, это четко проявлено в нижней части разреза Усолка в слоях 13 (карбонатно-глинисто-кремнистый) и 15 (глинистый), где обнаружены микросферы с аваруитом (Ni₃Fe) и пластинки самородного никеля. Все это, возможно, свидетельствует о локальной космической бомбардировке на границе московского и касимовского ярусов [Сунгатуллин и др., 2017].

Из вышеизложенного следует, что в разрезе Усолка металлические микрочастицы различаются по форме и составу. Среди пластинчатых микрочастиц встречается самородный никель, который, наряду с магнетитовыми микросферами без титана, подтверждает их космический генезис. Не исключается, что некоторые металлические микрочастицы могут иметь земное природное (вулканическое) или техногенное происхождение. Статистическая обработка микрозондовых анализов показала, что железо не связано с другими элементами, а уменьшение содержания железа от центра к периферии подтверждает дифференциацию вещества в микросферах. Данные ДТМА дополняют нормативные пересчеты результатов микрозондовых исследований, поэтому совместное использование нескольких прецизионных методов позволяет получить более полную информацию о минеральном составе металлических микрочастиц из осадочных пород.

Литература

Глухов М. С. Томографические и микрозондовые исследования внутреннего строения магнетитовых микросфер // *Металлогения древних и современных океанов–2016. От минера-генеза к месторождениям*. Миасс: ИМин УрО РАН, 2016. С. 274–276.

Глухов М. С., Сунгатуллин Р. Х. Космические микросферы в палеозойских породах Предуральского прогиба // *Мат. XII междунар. конф. «Новые идеи в науках о Земле»*. М.: МГРИ–РГГРУ. 2015. С. 40–41.

Корчагин О. А. Присутствие металлических микросфер и микрочастиц в раннем сеномане Крыма – «космическое пылевое событие» // *Доклады академии наук*. 2010. Т. 431. № 6. С. 783–787.

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. № 2. С. 16–19.

Сунгатуллин Р. Х., Сунгатуллина Г. М., Закиров М. И., Цельмович В. А., Глухов М. С., Бахтин А. И., Осин Ю. Н., Воробьев В. В. Микросферы космического происхождения в каменноугольных породах разреза Усолка, Предуральский прогиб // *Геология и геофизика*. 2017. Т. 58. № 1. С. 74–85.

Чувашиов Б. И., Дюпина Г. В., Мизенс Г. А., Черных В. В. Опорные разрезы верхнего карбона и нижней перми западного склона Урала и Приуралья. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 402 с.