

УДК 523.681+551.73

ЖЕЛЕЗО-НИКЕЛЕВЫЕ МИКРОЧАСТИЦЫ В ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ КАК ИНДИКАТОРЫ КОСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Р.Х. Сунгатуллин, А.И. Бахтин, В.А. Цельмович, Г.М. Сунгатуллина,
М.С. Глухов, Ю.Н. Осин, В.В. Воробьев*

Аннотация

Изучены микроструктура, химический и минеральный состав железо-никелевых микрочастиц из осадочных отложений Прикаспийской впадины. Установлено, что микросферы образовались в результате фракционной конденсации Fe–Ni-расплава и его кристаллизации на ранней стадии эволюции вещества протосолнечной туманности. Попадая в атмосферу Земли, данные микросферы претерпевают изменения, выражающиеся в частичном окислении магнетита до гематита, самородного никеля до окислов никеля, расплавлении легкоплавких металлов в ядерной части и их ухода в атмосферу под действием «пульверизаторного эффекта», в результате чего могут быть образованы микрочастицы железистого никеля самой разнообразной формы. Полученные данные, с большой вероятностью, подтверждают взнеземое происхождение Fe–Ni-микрочастиц и их связь с падениями космических тел на Землю в геологическом прошлом.

Ключевые слова: космическая пыль, осадочные породы, железо-никелевые микрочастицы, Прикаспийская впадина.

Введение

В течение миллиардов лет ежегодно на поверхность земного шара выпадает 1–2 млн т космического вещества, из них от 5 до 180 тыс. т/год приходится на космическую пыль [1], которая захороняется в виде мельчайших микрочастиц в осадках. С конца XIX в. по настоящее время частицы космической пыли обнаруживаются в различных геологических объектах ([2–8] и др.), таких как: глубоководные морские осадки, железо-марганцевые конкреции, льды Антарктиды и Арктики, ледниковые отложения, эвапориты, эоловые и пляжные пески, осадочные породы широкого стратиграфического диапазона (от четвертичного периода до докембрия), почвы вокруг метеоритных кратеров и др.

В последние годы повышенный интерес геологов к исследованию космической пыли в осадочных отложениях обусловлен тремя основными причинами [3]. Во-первых, данные микрочастицы несут информацию о минеральном и химическом составе космических тел, могут помочь в расшифровке происхождения Земли и других небесных тел [1]. Во-вторых, это изучение степени влияния космических процессов на Землю, вопросы возникновения жизни и биотических кризисов в продолжительной геологической истории [9]. И, в-третьих, с подобными объектами связывают перспективы проведения ультраточных стратиграфических корреляций глобального, регионального и местного уровней [2–4, 10–14] и возможности поиска полезных ископаемых в разнофациальных осадочных

комплексах [15]. Часто в этих объектах отмечается наличие железо-никелевых включений, которое рассматривается как один из главных критериев их космического происхождения ([5, 7, 16, 17] и др.).

Объекты исследования и методика работ

Настоящее сообщение посвящено результатам исследования железо-никелевых микрочастиц из неогеновых, каменноугольных и пермских отложений Прикаспийской впадины, а также сравнению полученных результатов с находками самородного никеля в сибирских траппах. Впервые приводятся данные о железо-никелевых микрочастицах (микросферы, пластинчатые и спиралевидные образования) размером от 0.1 до 2–3 мм, обнаруженных в керне скважин на глубинах от 100 м до 4.5 км (рис. 1–5); дано их морфологическое описание, анализ и сопоставление химических составов (табл. 1).

Металлические частицы и оксиды металлов исследовались в лаборатории сканирующей электронной микроскопии Междисциплинарного центра «Аналитическая микроскопия» Казанского федерального университета на автоматизированной системе минералогии QEMSCAN и автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе MERLIN (Carl Zeiss, Германия), оснащенном энергодисперсионным спектрометром AZTEC X-MAX (Oxford Instruments, Великобритания), а также на сканирующем электронном микроскопе Vega II (Tescan, Чехия), оснащенном энергодисперсионным спектрометром INCA ENERGY Dry Cool (Oxford Instruments, Великобритания) в Геофизической обсерватории «Борок» (Ярославская область, Россия). Анализ проводился при ускоряющем напряжении 20–25 КэВ, локальность зондирования составляла 1 мк, точность измерения – 0.1–1%.

Металлические микросферы представляют собой практически идеальные сферические образования диаметром 200–900 мкм (рис. 1–4). Очень часто поверхность микросфер покрыта табличками магнетита со специфической дендритовидной микроструктурой и с треугольными образованиями (рис. 3). В единичных случаях встречаются микросферы с растресканной внешней поверхностью и фрагментами магнетитовой корочки (рис. 4), а также разновидности с полой сердцевинной. Микросферы из Прикаспийской впадины очень близки по внешнему облику к частицам, обнаруженным в осадочных породах разного стратиграфического уровня в других регионах мира ([2–6] и др.). Отличие изученных нами объектов заключается в значительно более крупных размерах (в 5–10 раз крупнее), что возможно связано с различиями в методике отбора микрочастиц.

Все изученные нами микрочастицы имеют стально-серый цвет и металлический блеск, что, возможно, обусловлено наличием оксидной оболочки разной толщины – от первых [12] до десятков нанометров [6]. Оболочка, по-видимому, выступает в качестве «щита» для протокристалла, предохраняя его от изменений химической обстановки, происходящих в окружающей среде [18]. Если кристаллическое вещество оболочки имеет достаточно широкую область гомогенности или образует ряд твердых растворов с одним из компонентов протокристалла, то, изменяя уровень дефектности, оболочка может подстраиваться к химической обстановке в окружающей среде, оставляя неизменным состояние протокристалла.

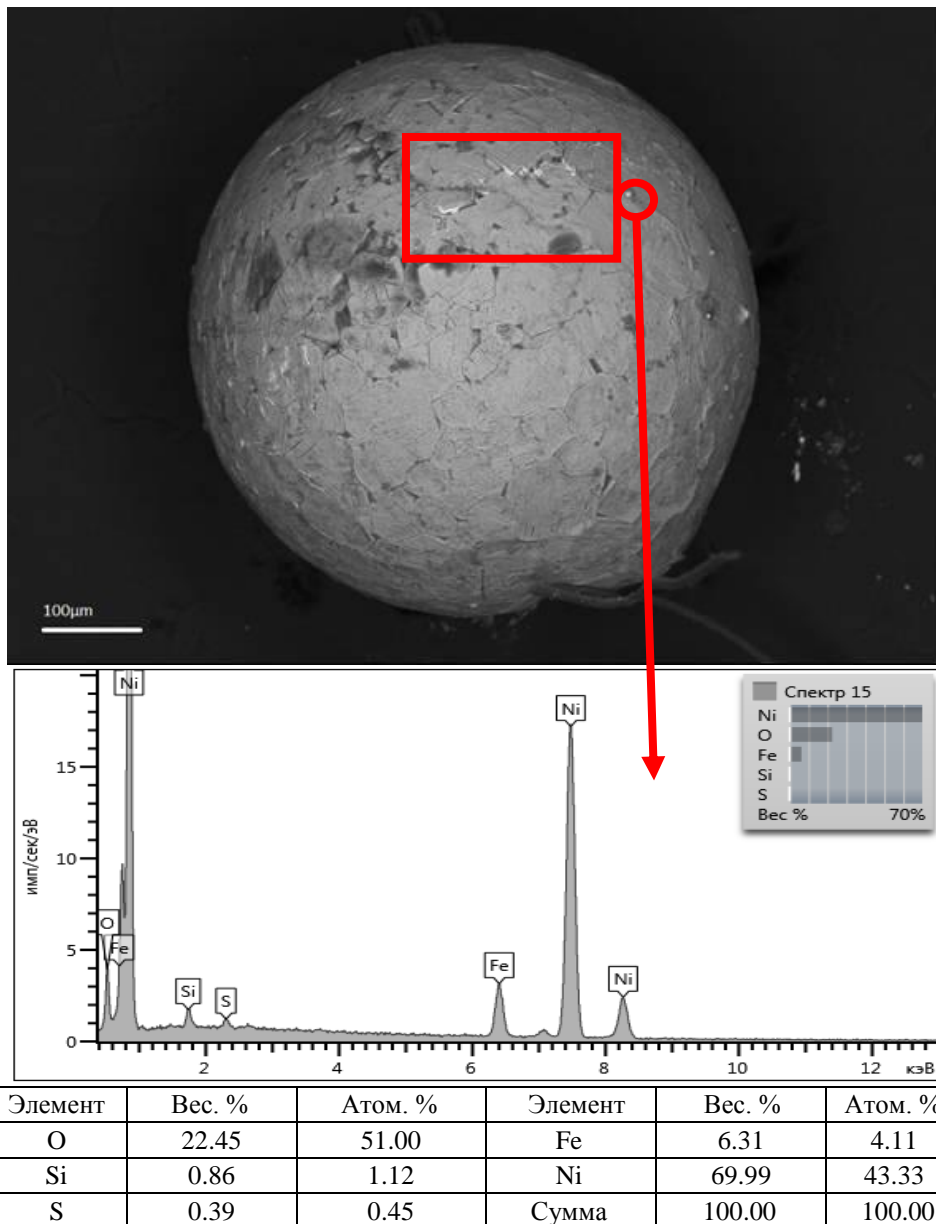


Рис. 1. Магнетитовая микросфера с микрократерами железо-никелевого состава. Внизу – спектр оксида никеля, обозначенного кружком. Прямоугольником выделен участок микросферы с анализом по элементам (см. рис. 2)

До сих пор труднообъяснимыми остаются факты сохранности микрочастиц самородных металлов в термодинамически неустойчивых земных условиях. По мнению В.В. Акимова [18], причина подобной устойчивости микрочастиц может заключаться в установлении равновесия в системе металл – оксид для некоторых элементов (Fe, Al, Cr и, возможно, Ni) с образованием соответствующей оксидной оболочки Fe_3O_4 , $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, Cr_2O_3 , NiO; при этом в состоянии равновесия с металлическим ядром могут находиться как тонкие, так и толстые оксидные пленки [18].

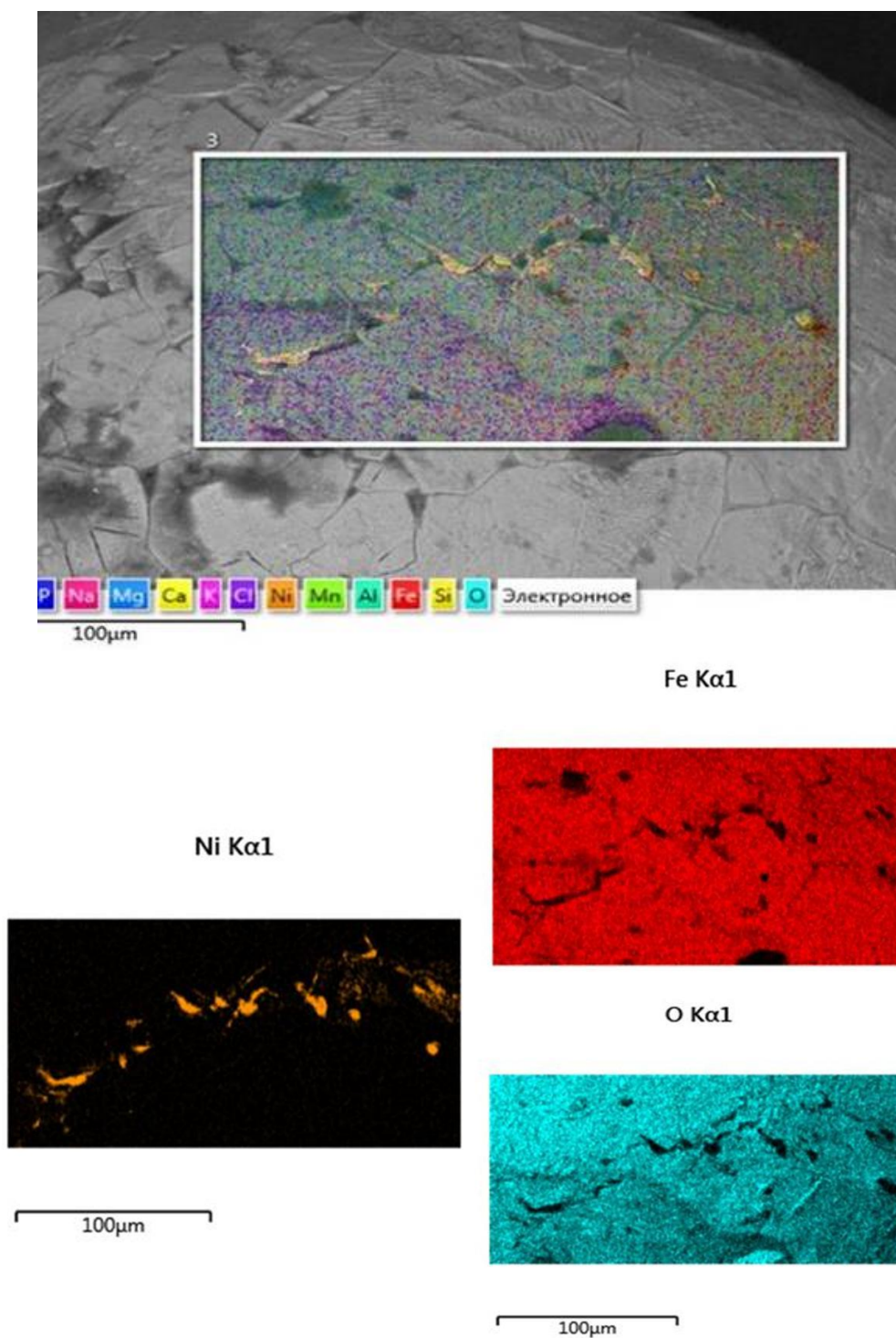


Рис. 2. Карта распределения в характеристическом рентгеновском излучении никеля, железа и кислорода для участка микросферы (см. рис. 1)

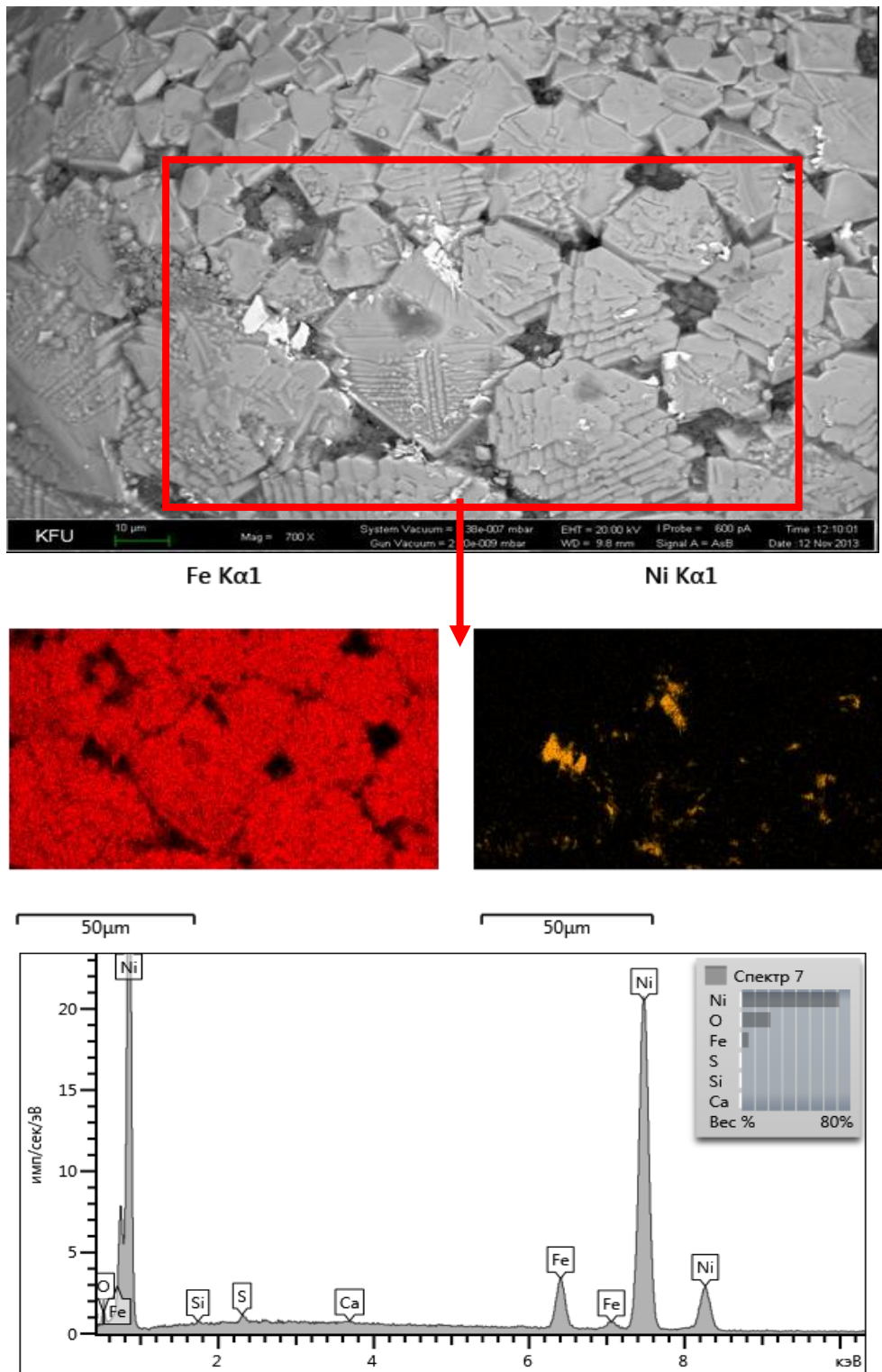


Рис. 3. Выделения никеля в интерстициях магнетитовых табличек микросфер. Показано распределение характеристического рентгеновского излучения никеля и железа (в центре) и спектр участка, выделенного прямоугольником (внизу)

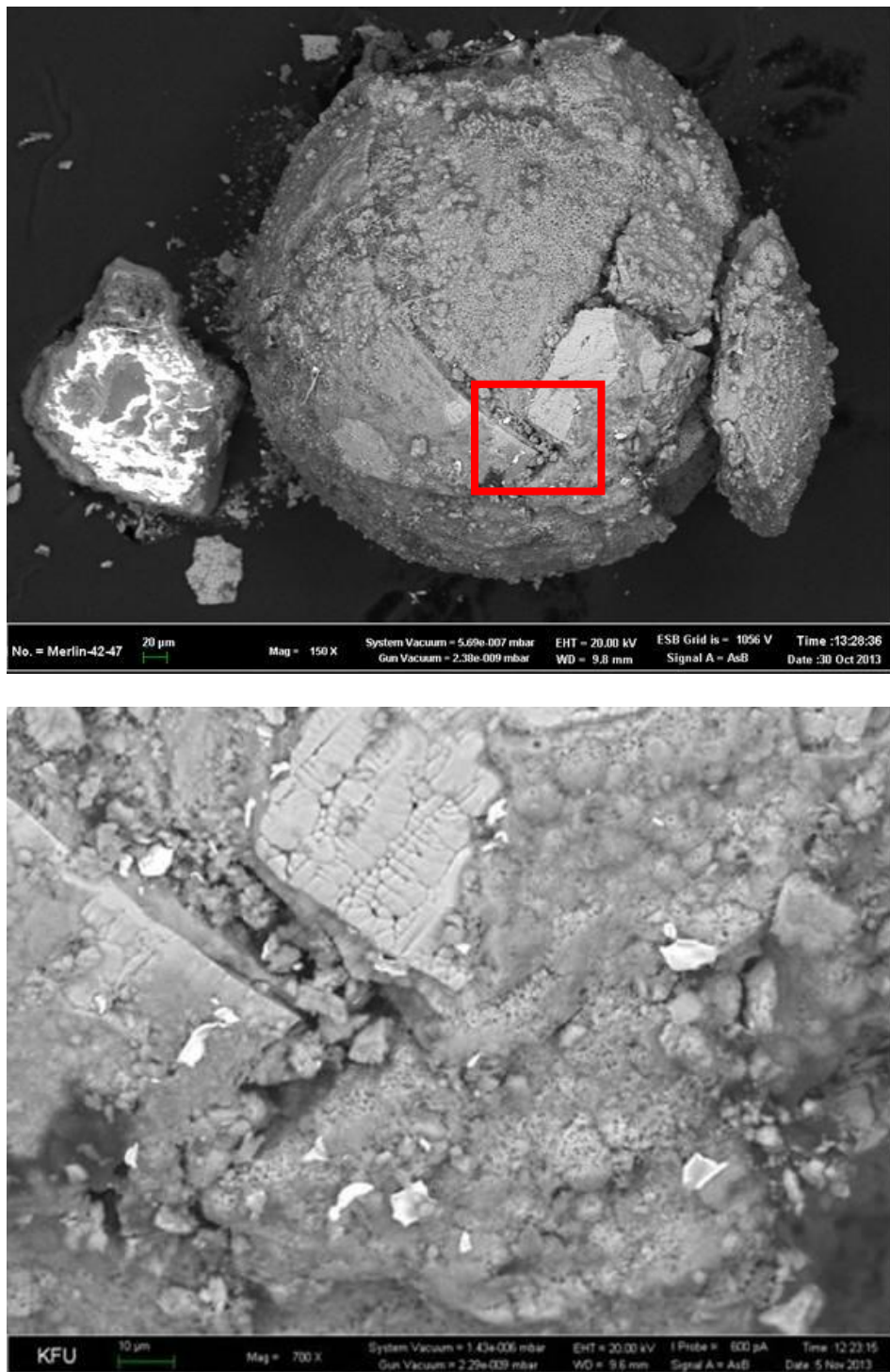
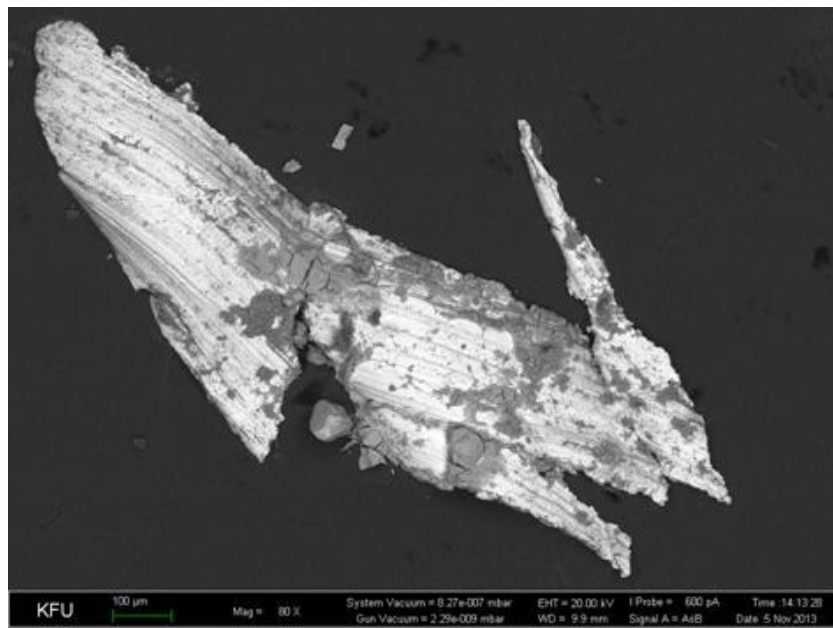


Рис. 4. Выделения никеля в магнетитовых микросферах (BSE-детектор), обр. 7 (см. табл. 1)



Ni Kα1

Fe Kα1

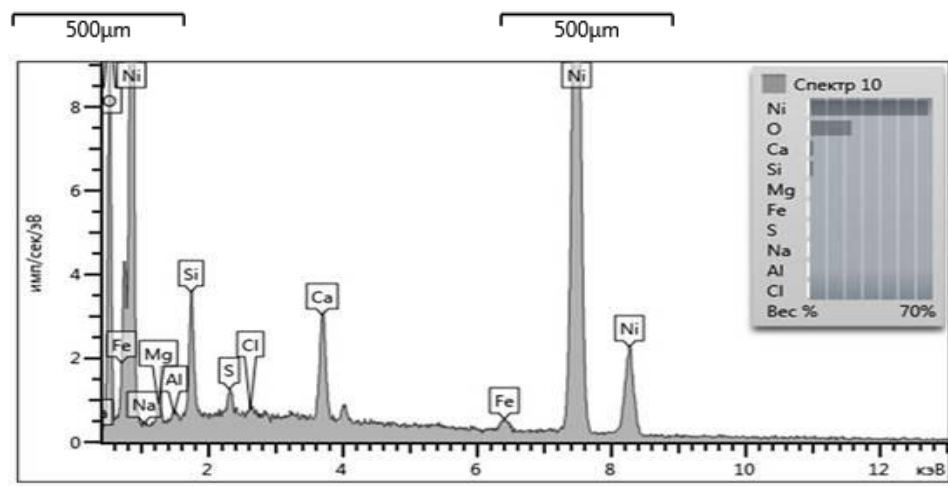
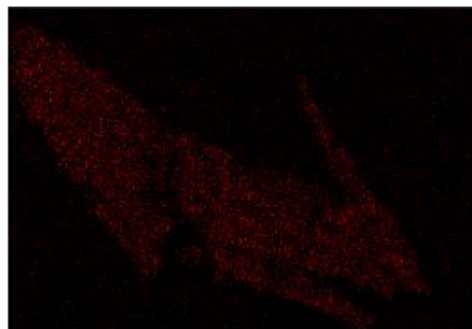
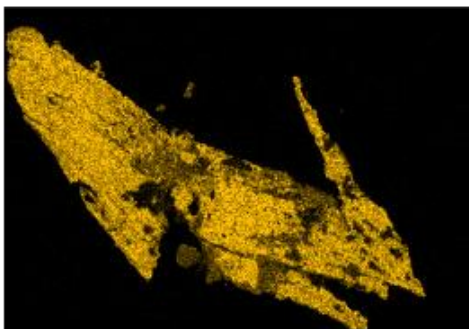


Рис. 5. Пластинчатое выделение никеля и распределение в характеристическом рентгеновском излучении никеля и железа. Образец 4. Состав см. табл. 1

Табл. 1

Состав железо-никелевых выделений в микросферах Прикаспийской впадины

Образец (возраст)	Элементы, вес. %						
	Fe	O	Ni	Si	Ca	S	Прочие
1 (N)	7.20	22.14	69.83	0.34	–	–	Al (0.14)
2 (N)	8.42	22.43	67.77	0.68	0.15	0.47	Al (0.16)
3 (N)	7.39	22.25	69.08	0.31	–	0.31	Mn (0.23), Mg (0.21)
4 (P)	0.61	24.35	67.52	2.75	2.91	0.47	Na (0.27), Al (0.23), Mg (0.70), Cl (0.18)
5 (C)	5.88	21.84	71.82	0.08	0.07	0.31	–
6 (C)	8.82	21.83	68.26	0.17	0.34	0.20	Mn (0.23), Cl (0.14)
7 (C)	11.17	22.00	64.12	0.20	0.91	0.26	Mg (0.52), Cl (0.81)

Примечание: прочерк – не обнаружено.

Среди изученных нами пластинчатых образований был обнаружен блестящий серебристо-белый самородный никель (рис. 5). Никель относится к инертным элементам и только при нагревании до температуры выше 800 °С металлический никель начинает реагировать с кислородом с образованием оксида (NiO). Так, в изученном образце 4 наряду с чистым никелем фиксируются участки с тонкой оксидной пленкой, которая, по-видимому, предохраняет никель от дальнейшего окисления. Химический состав данного образца следующий (в вес. %): NiO – 85.92; FeO – 0.79; CaO – 4.07; MgO – 1.17; SiO₂ – 5.89; Al₂O₃ – 0.44; Na₂O – 0.36; SO₃ – 1.19. Обращает внимание отсутствие хрома (см. табл. 1).

Результаты и их обсуждение

Ранее проведенный анализ химического состава микросфер показал [11], что они состоят преимущественно из поликристаллического агрегата магнетита (Fe₃O₄) и вюстита (FeO), возможно, присутствует и небольшая доля самородного железа. Подобный минеральный состав характерен для метеоритного вещества [19–21]. В окислах железа микросфер равномерно распределен марганец, содержание которого составляет 0.8–2%. В микросферах отсутствует титан, что подтверждает их внеземную природу [3, 4]. В них отмечается также незначительное присутствие Si, Al, Ca, K.

По данным [21], магнетитовые микросферы можно разделить на две группы: богатые никелем и богатые хромом. Исследованные нами образования практически не содержат Cr и Ni на поверхности микросфер [15]. При изучении железо-никелевых шариков в плейстоценовых отложениях Канады было сделано предположение [8], что сплавы Ni–Fe представляют собой ядра микросфер, образованных при абляции метеоритов, а внешняя оксидная оболочка их обеднена Ni. Образование подобных объектов включает в себя несколько основных этапов: абляция метеорита, образование микросферы, дифференциация ее на отдельные оболочки при остывании в атмосфере, окисление железа на поверхности сферы, образование кратера на микросфере за счет внутренних неоднородностей, выброс никеля или интерметаллического сплава Ni–Fe.

Почти идеальная шаровая форма изученных нами магнетитовых микросфер, а также аналогичных по составу микросфер, рассмотренных в работах других авторов [6], свидетельствует об их образовании в условиях невесомости, то есть в космическом пространстве. Если бы они образовались в атмосфере Земли, то должна была бы сказаться гравитационная сила земного притяжения и форма микрочастиц была бы каплевидной. Конечно, эти капли могли вращаться и сохранять сферическую внешнюю форму, но тогда создавалась бы закрученная их внутренняя структура, а не однородная, что наблюдается на самом деле.

Более того, магнетитовые микросферы часто имеют зональное строение. Наружная оболочка состоит из магнетита и вюститом [21], ядерная часть обычно обогащена никелем, вплоть до тэнита [6], а иногда хромом [21]. Подобная зональность указывает на то, что магнетитовые микросферы образовались в космосе, причем на ранней стадии эволюции вещества протосолнечной туманности, когда вещество будущих микросфер находилось в расплавленном состоянии. При этом остывание вещества происходило достаточно медленно, что способствовало его кристаллизационной дифференциации. Образование наружной магнетитовой оболочки легко объясняется более высокой температурой кристаллизации магнетита (1594 °С при Р 1 бар) по сравнению с металлическим железом (1535 °С) и никелем (1452 °С). Если бы эти подобные микросферы образовались в атмосфере Земли за счет абляции метеоритного вещества, то вряд ли расплав капелек успел бы продифференцироваться за столь короткое время (десятки секунд – первые часы). Более того, размер кристалликов магнетита в микросферах иногда достигает 10–20 мкм [6], что говорит о достаточно длительном времени кристаллизации расплава.

В центральных частях магнетитовых микросфер нередко отмечаются пустоты-каверны [6], что также свидетельствует о спокойных условиях раскристаллизации капель расплава в открытом космосе, а не в земной атмосфере. Раскристаллизация начиналась с образования твердой оболочки магнетита, которая далее росла от периферии сферы к жидкому центру. Объем расплава всегда больше, чем объем образованной из него кристаллической фазы. Поэтому внутри микросферы образуется пустота-каверна, аналогичная секрециям в земных условиях.

Четкая зональность, правильная внешняя и внутренняя сферические формы образований, а также наличие микрозондовых анализов в пределах отдельных микрозон (рис. 6) позволили нам произвести расчет отношения Fe/Ni. Величина данного отношения в микросферах составила 18.6 (рис. 6, а) и 16.9 (рис. 6, б). По данным [22], для Солнечной системы величина отношения Fe/Ni в метеоритном веществе составляет 17.9, а в целом она равна 18.8. Эти значения могут свидетельствовать в пользу образования Fe–Ni-микросфер в протосолнечной туманности в ранний этап аккреции ее вещества. Следует заметить, что магнетит отмечается лишь в углистых хондритах и отсутствует в других классах метеоритов. Поэтому вычисленная нами величина отношения Fe/Ni, по-видимому, может служить доказательством образования магнетитовых микросфер в протосолнечной туманности из вещества, отвечающего по составу углистым хондритам в одну из стадий его дифференциации и конденсации.

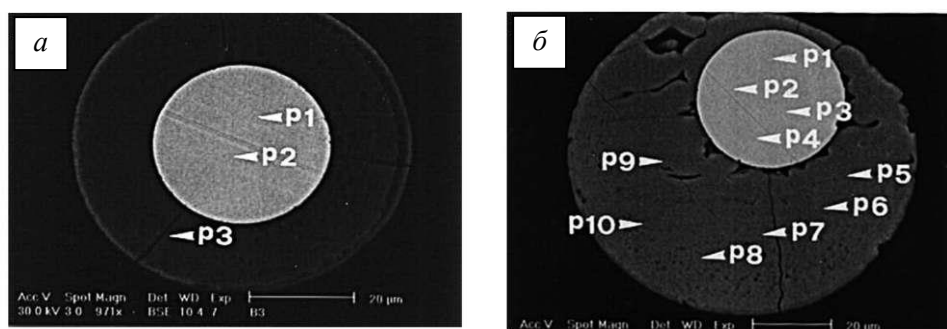


Рис. 6. Экваториальное сечение космических микросфер, сложенных внешней вюстит-магнетитовой оболочкой и внутренним Fe–Ni-ядром (тэнитом), расположенным по центру (а) и смещенным относительно центра (б). Отмечены места выполнения микрозондовых анализов, из [6]

Микросферы с кавернами почти не содержат никель; его содержание не превышает 0.2% [6]. Они сложены преимущественно магнетитом с примесью гематита. Отсюда возникает вопрос: откуда взялся гематит и где никель? Ответ на этот вопрос, по нашему мнению, можно связать с процессами, протекающими в микросферах при их пролете в атмосфере Земли. Кислород атмосферы частично окисляет магнетит до гематита. В результате разрушения материнского тела высвободившиеся микросферы сильно нагреваются. Так как металлический никель имеет самую низкую температуру плавления, он может перейти в расплавленное состояние. В такой неравновесной системе возникают избыточные напряжения, действие которых направлено на прорыв среды. Это приводит к повышению флюидного давления внутри микросферы, что, в свою очередь, будет способствовать просачиванию (протрузии) никелевого расплава к поверхности микросфер. В результате вязкостной инверсии никелевый расплав выжимается по направлению к областям с меньшим давлением, то есть к поверхности микросферы. Все это подтверждается обнаружением точечных, кратерообразных, пятнистых, сферических, пластинчатых выделений (выпотов) самородного никеля на границах кристаллических зерен магнетита на поверхности микросфер (рис. 1–4).

Раскрытие (разгерметизация) внутреннего железо-никелевого расплава микросфер в атмосфере Земли приводит к образованию «пультверизаторного эффекта», в результате чего весь расплав никеля может покинуть «материнскую» микросферу, образовав внутри пустотное пространство, что наблюдается очень часто в виде полых магнетитовых микросфер [23]. В результате этого процесса в атмосфере Земли образуются микрочастицы из преимущественно самородного никеля [13, 24, 25] или окислов никеля (рис. 4, 5). В определенных условиях при разрушении магнетитовой внешней оболочки в земных осадках могут накапливаться Fe–Ni-микросферы [5, 8].

Самородный никель и его сплавы, другие самородные металлы могут образовываться в самых различных процессах, поэтому крайне важно уметь отделять частицы космического и терригенного происхождения по сумме различных признаков, включающих состав и морфологию. Например, нами выделены частицы никеля (с примесью 0.5–1% железа) из образцов сибирских пермо-триасовых

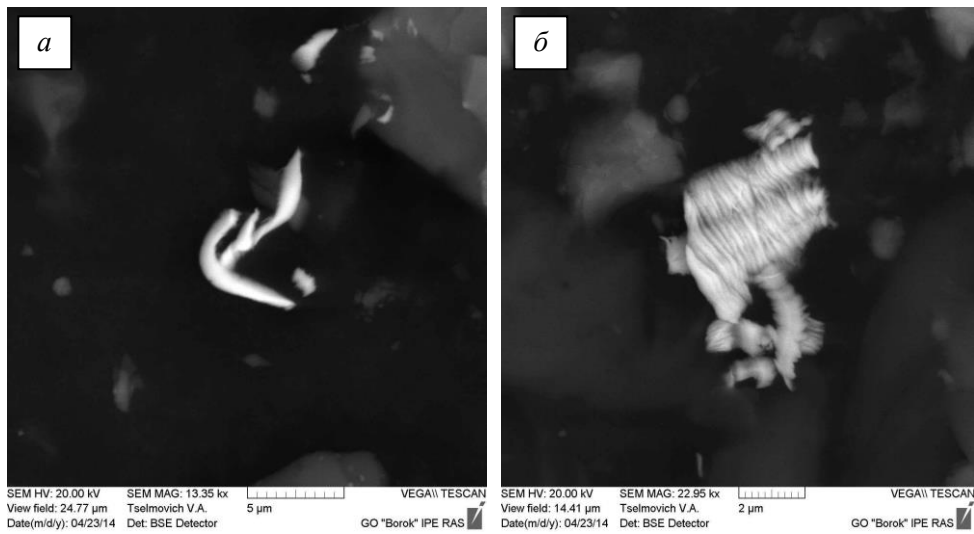


Рис. 7. Частицы самородного никеля из сибирских траппов: *а*) проволочной формы, *б*) чешуйки, возникшие при распаде пересыщенного раствора Ni–C

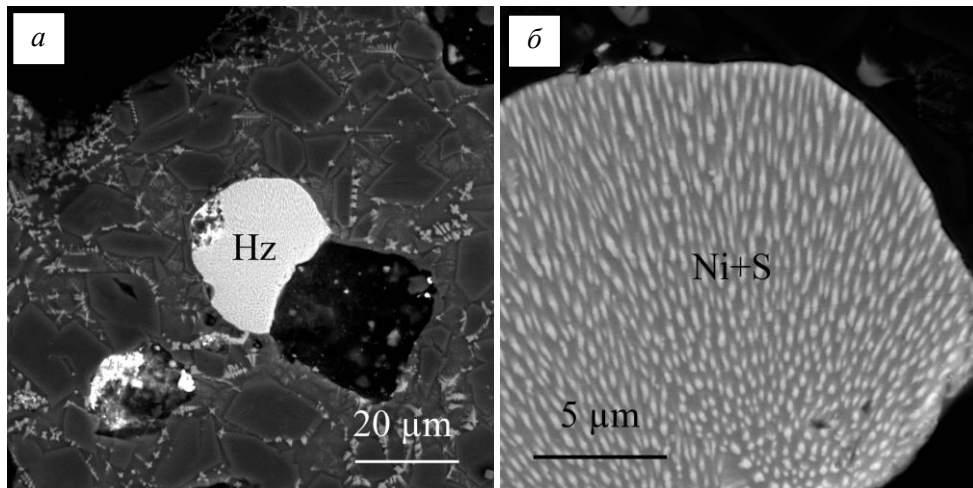


Рис. 8. Хизлевудит из коры плавления Челябинского метеорита: *а*) общий вид частицы хизлевудита, *б*) фрагмент частицы при большем увеличении, где хизлевудит распался на нанофазы, состоящие из серы и никеля, что при удалении серы в атмосфере могло привести к образованию пористого никеля

траппов (рис. 7). Их количество крайне мало, в силу чего по магнитным свойствам образцы считались парамагнитными. Такие частицы самородных металлов могли образоваться при прохождении лавовых потоков через угольные слои в результате восстановительных процессов. Однако сферических частиц, во множестве возникающих при импактных событиях, в этих слоях не обнаружено. Этот факт подчеркивает важность находок сферических структур для идентификации происхождения других частиц.

Большой интерес для понимания того, какие частицы попадают в осадочные породы при абляции метеоритов, представляет изучение их коры плавления, что

дает новые ориентиры для поиска частиц-индикаторов космического вещества. Подробное изучение коры плавления различных фрагментов Челябинского метеорита позволило обнаружить никелистые частицы, по валовому составу отвечающие редкому минералу хизлевудиту (рис. 8) низкотемпературной модификации Ni_3S_2 , устойчивой ниже $533\text{ }^\circ\text{C}$. Метеорит при падении подвергся нагреву и закалке, что привело к распаду изученной нами частицы хизлевудита на никель (светлая фаза на рис. 8, б) и серу (серая фаза). В атмосферных условиях сера могла окислиться, в результате чего остался чистый пористый никель. Находки пористого никеля редки, но нам он встречался в различных осадочных породах.

Заключение

Исходя из вышеизложенного, можно констатировать, что данные о микроструктуре, химическом и минеральном составе и другие особенности железо-никелевых микрочастиц, с большой вероятностью, подтверждают их внеземное происхождение и могут быть связаны с падениями метеоритов или интенсификацией поступления на Землю космической пыли в геологическом прошлом.

Изученные магнетитовые микросферы образовались в результате фракционной конденсации Fe–Ni-расплава и его кристаллизации на ранней стадии эволюции вещества протосолнечной туманности, отвечающего по составу углистым хондритам. Попадая в атмосферу Земли, данные микросферы претерпевают изменения, выражающиеся в частичном окислении магнетита до гематита, самородного никеля до окислов никеля, расплавлении легкоплавких металлов (Cu, Zn и др.) в ядерной части и их ухода в атмосферу под действием «пульверизаторного эффекта», в результате чего могут быть образованы микрочастицы самородного никеля и других металлов самой разнообразной формы, которые отличимы по морфологии от схожих по составу частиц, образовавшихся в земных условиях (например, сибирские траппы).

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, и при поддержке РФФИ (проект № 13-05-00348а).

Литература

1. Булат Е.С., Цельмович В.А., Пети Ж-Р., Гиндилис Л.М., Булат С.А. Снежный покров Центральной Восточной Антарктиды (станция Восток) как идеальный природный планшет для сбора космической пыли: предварительные результаты по выявлению микрометеоритов типа углистых хондритов // Лёд и Снег. – 2012. – № 4. – С. 146–152.
2. Акулов Н.И., Павлова Л.А., Антипин Е.В. Геохимические особенности микрометеоритов в донных отложениях озера Байкал // Докл. РАН. – 2014. – Т. 454, № 6. – С. 695–700.
3. Корчагин О.А. Присутствие металлических микросфер и микрочастиц в раннем сеномане Крыма – «космическое пылевое событие» // Докл. РАН. – 2010. – Т. 431, № 6. – С. 783–787.

4. Корчагин О.А., Цельмович В.А., Поспелов И.И., Цяньтао Бянь. Космические магнетитовые микросферы и металлические частицы вблизи границы пермь-триас в точке глобального стратотипа границы (слой 27, Мэйшань, Китай) // Докл. РАН. – 2010. – Т. 432, № 2. – С. 232–238.
5. Bi D., Morton R., Wang K. Cosmic Ni–Fe spherules from Pleistocene sediments, Alberta, Canada // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1993. – V. 57, No 16. – P. 4129–4136.
6. Dekov V.M., Molin G.M., Dimova M., Griggio C., Rajta I., Uzonyi I. Cosmic spherules from metalliferous sediments: A long journey to the seafloor // *N. Jb. Miner. Abh.* – 2007. – V. 183, No 3. – P. 269–282.
7. Fechtig H., Utech K. On the presence or absence of nickel in dark magnetite cosmic spherules and their mechanics of origin // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* – 1964. – V. 119, No 1. – P. 243–249.
8. Marvin U.B., Einaudi M.T. Black magnetic spherules from Pleistocene beach sand // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1967. – V. 31, No 10. – P. 1871–1884.
9. Ellwood B.B., MacDonald W.D., Wheeler C., Benois S.L. The K-T boundary in Oman: identified using magnetic susceptibility field measurements with geochemical confirmation // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2003. – V. 206, No 3–4. – P. 529–540.
10. Грачев А.Ф., Корчагин О.А., Цельмович В.А., Коллманн Х.А. Космическая пыль и микрометеориты в переходном слое глин на границе мела и палеогена в разрезе Гамс (Восточные Альпы): морфология и состав // *Физика Земли.* – 2008. – № 7. – С. 42–57.
11. Сунгатуллин Р.Х., Сунгатуллина Г.М., Осин Ю.Н., Трифонов А.А. Космическое вещество в нефтеносных отложениях Среднего Каспия // *Нефтяное хозяйство.* – 2014. – № 9. – С. 77–79.
12. Цельмович В.А., Куражковский А.Ю. Влияние условий осадконакопления на процесс обогащения отложений космогенными минералами // *Геохимия литогенеза: Материалы Всерос. совещ. с междунар. участием.* – Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. – С. 73–75.
13. Цельмович В.А., Гиндилис Л.М., Шевелев Г.Н. Анализ магнитной фракции в пылевой компоненте Челябинского метеорита // *Метеорит Челябинск – год на Земле: Материалы Всерос. науч. конф.* – Челябинск: Агентство СРП Челябинской ОУНБ, 2014. – С. 301–307.
14. Ma X.P., Bai S.L. Biological, depositional, microspherule, and geochemical records of the Frasnian/Famennian boundary beds, South China // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* – 2002. – V. 181, No 1–3. – P. 325–346.
15. 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.
16. Darby D.A. Mysterious iron-nickel-zinc arctic spherules // *Can. J. Earth Sci.* – 1998. – V. 35, No 1. – P. 23–29.
17. Zhang H., Shen S., Cao C., Zheng Q. Origins of microspherules from the Permian–Triassic boundary event layers in South China // *Lithos.* – 2014. – V. 204. – P. 246–257.
18. Акимов В.В. Физико-химический анализ структурно-несовершенных кристаллов: общая концепция, моделирование, приложения: Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. – Иркутск, 2007. – 42 с.
19. Адушкин В.В., Попель С.И. Мелкодисперсные частицы в природных и техногенных геосистемах // *Физика Земли.* – 2012. – № 3. – С. 81–92.
20. Грачев А.Ф. К вопросу о природе космической пыли в осадочных породах // *Физика Земли.* – 2010. – № 11. – С. 3–13.

21. *Liu Jiajun, Zheng M., Liu Jianming, Gu X., Zhou Yu., Feng C.* Mechanical transport of metallogenic materials in endogenic hydrothermal solutions: evidence from the microspherules in micro-disseminated gold deposits, northwestern Sichuan, China // *Ore Geol. Rev.* – 2002. – V. 22, No 1–2. – P. 1–16.
22. *Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г.* Справочник по геохимии. – М.: Недра, 1990. – 480 с.
23. *Цельмович В.А., Романовский А.В.* Космические магнитные минералы в осадках озера Плещеево // *Материалы Восьмой междунар. конф. «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле».* – М., 2007. – С. 141–143.
24. *Печерский Д.М., Нургалеев Д.К., Фомин В.А., Шаронова З.В., Гильманова Д.М.* Космическое железо в осадках мела-даниа // *Физика Земли.* – 2011. – № 5. – С. 12–34.
25. *Цельмович В.А., Печерский Д.М., Марков Д.П.* Отличительные характеристики магнитных минералов Челябинского метеорита // *Метеорит Челябинск – год на Земле: Материалы Всерос. науч. конф.* – Челябинск: Агентство СРП Челябинской ОУНБ, 2014. – С. 612–636.

Поступила в редакцию
31.03.15

Сунгатуллин Рафаэль Харисович – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры региональной геологии и полезных ископаемых, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: Rafael.Sungatullin@kpfu.ru

Бахтин Анатолий Иосифович – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры литологии и минералогии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: Anatoly.Bakhtin@kpfu.ru

Цельмович Владимир Анатольевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Ярославская область, п. Борок, Россия.

E-mail: tselm@mail.ru

Сунгатуллина Гузаль Марсовна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры палеонтологии и стратиграфии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: Guzel.Sungatullina@kpfu.ru

Глухов Михаил Сергеевич – студент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: gluhov.mihail2015@yandex

Осин Юрий Николаевич – директор Междисциплинарного центра «Аналитическая микроскопия», Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: yury.osin@gmail.com

Воробьев Вячеслав Валерьевич – инженер Междисциплинарного центра «Аналитическая микроскопия», Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: slavik.ksu@mail.ru

* * *

IRON-NICKEL MICROPARTICLES IN THE SEDIMENTARY ROCKS AS INDICATORS OF COSMIC PROCESSES

R.Kh. Sungatullin, A.I. Bakhtin, V.A. Tselmovich, G.M. Sungatullina,
M.S. Glukhov, Yu.N. Osin, V.V. Vorob'ev

Abstract

The microstructure, chemical and mineral composition of iron-nickel microparticles from the sedimentary deposits of the Peri-Caspian Depression were studied. It was found that the microspheres developed as a result of the fractional condensation of a Fe-Ni melt and its crystallization at the early stage of the evolution of the substance of the protosolar nebula. Upon reaching the atmosphere of the Earth, these microspheres undergo changes in terms of partial oxidation of magnetite to hematite and native nickel to nickel oxides, melting of fusible metals in the core part, and atmospheric entry under the influence of the "pulverization effect" resulting in the development of awaruite microparticles of various shapes. The obtained data are most likely to prove the extraterrestrial origin of Fe-Ni microparticles and their relation to the fallings of cosmic bodies on the Earth in the geological past.

Keywords: cosmic dust, sedimentary rocks, iron-nickel microparticles, Peri-Caspian Depression.

References

1. Bulat E.S., Tselmovich V.A., Peti Zh-R., Gindilis L.M., Bulat S.A. The snow cover in Central Eastern Antarctica (Vostok Station) as an ideal natural surveying panel for the collection of cosmic dust: preliminary results on the detection of micrometeorites of the chondrite carbonaceous type. *Led i Sneg*, 2012, no. 4, pp. 146–152. (In Russian)
2. Akulov N.I., Pavlova L.A., Antipin E.V. Geochemical peculiarities of micrometeorites in bottom sediments of Lake Baikal. *Dokl. Earth Sci.*, 2014, vol. 454, pt. 2, pp. 193–198.
3. Korchagin O.A. Metallic microspheres and microparticles in lower Cenomanian sediments of the Crimea: Evidence for the cosmic dust event. *Dokl. Earth Sci.*, 2010, vol. 431, pt. 2, pp. 441–444.
4. Korchagin O.A., Tselmovich V.A., Pospelov I.I., Bian Qiantao Cosmic magnetite microspherules and metallic particles near the Permian-Triassic boundary in a global stratotype section and point (Stratum 27, Meishan, China). *Dokl. Earth Sci.*, 2010, vol. 432, pt. 1, pp. 631–637.
5. Bi D., Morton R., Wang K. Cosmic Ni-Fe spherules from Pleistocene sediments, Alberta, Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, vol. 57, no. 16, pp. 4129–4136.
6. Dekov V.M., Molin G.M., Dimova M., Griggio C., Rajta I., Uzonyi I. Cosmic spherules from metaliferous sediments: A long journey to the seafloor. *N. Jb. Miner. Abh.*, 2007, vol. 183, no. 3, pp. 269–282.
7. Fechtig H., Utech K. On the presence or absence of nickel in dark magnetite cosmic spherules and their mechanics of origin. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 1964, vol. 119, no. 1, pp. 243–249.
8. Marvin U.B., Einaudi M.T. Black magnetic spherules from Pleistocene beach sand. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1967, vol. 31, no. 10, pp. 1871–1884.
9. Ellwood B.B., MacDonald W.D., Wheeler C., Benois S.L. The K-T boundary in Oman: identified using magnetic susceptibility field measurements with geochemical confirmation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, vol. 206, nos. 3–4, pp. 529–540.
10. Grachev A.F., Korchagin O.A., Tselmovich V.A., Kollmann H.A. Cosmic dust and micrometeorites in the transitional clay layer at the Cretaceous-Paleogene boundary in the Gams section (Eastern Alps): morphology and chemical composition. *Phys. Solid Earth (Engl. Transl.)*, 2008, vol. 44, no. 7, pp. 555–569.
11. Sungatullin R.Kh., Sungatullina G.M., Osin Yu.N., Trifonov A.A. Interstellar dust in the oil-bearing deposits of the Middle Caspian. *Neft. Khoz.*, 2014, no. 9, pp. 77–79. (In Russian)
12. Tselmovich V.A., Kurazhkovskii A.Yu. The influence of sedimentation conditions on the enrichment of deposits with cosmogenic minerals. *Geokhimiya litogeneza: Materialy Vseros. soveshch. s mezhdunar. uchastiem* [Geochemistry of Lithogenesis: Proc. All-Russ. Soveshch. Int. Participation]. Syktyvkar, IG Komi NTs UrO RAN, 2014, pp. 73–75. (In Russian)

13. Tselmovich V.A., Gindilis L.M., Shevelev G.N. Analysis of the magnetic fraction in the dust component of the Chelyabinsk meteorite. *Meteorit Chelyabinsk – god na Zemle: Materialy Vseros. nauch. konf.* [The Chelyabinsk Meteorite – One Year on the Earth: Proc. All-Russ. Sci. Conf.]. Chelyabinsk, Agentstvo CIP Chelyabinskoi OUNB, 2014, pp. 301–307. (In Russian)
14. Ma X.P., Bai S.L. Biological, depositional, microspherule, and geochemical records of the Frasnian/Famennian boundary beds, South China. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 2002, vol. 181, no. 1–3, pp. 325–346.
15. Sungatullin R.Kh., Sungatullina G.M., Glukhov M.S., Osin Yu.N., Vorob'ev V.V. Possibilities for the use of cosmic microspheres during the correlation of oil-and-gas bearing deposits. *Neft. Khoz.*, 2015, no. 2, pp. 16–19. (In Russian)
16. Darby D.A. Mysterious iron-nickel-zinc arctic spherules. *Can. J. Earth Sci.*, 1998, vol. 35, no. 1, pp. 23–29.
17. Zhang H., Shen S., Cao C., Zheng Q. Origins of microspherules from the Permian–Triassic boundary event layers in South China. *Lithos*, 2014, vol. 204, pp. 246–257.
18. Akimov V.V. Physicochemical analysis of structurally imperfect crystals: general concept, modeling, supplements. *Extended Abstract of Doctoral Diss.* Irkutsk, 2007. 42 p. (In Russian)
19. Adushkin V.V., Popel S.I. Fine-dispersed particles in the natural and anthropogenic geosystems. *Phys. Solid Earth (Engl. Transl.)*, 2012, vol. 48, no. 3, pp. 256–266.
20. Grachev A.F. To the problem of the nature of cosmic dust in sedimentary rocks. *Fiz. Zemli*, 2010, no. 11, pp. 3–13. (In Russian)
21. Liu Jiajun, Zheng M., Liu Jianming, Gu X., Zhou Yu., Feng C. Mechanical transport of metallogenic materials in endogenic hydrothermal solutions: evidence from the microspherules in microdisseminated gold deposits, northwestern Sichuan, China. *Ore Geol. Rev.*, 2002, vol. 22, nos. 1–2, pp. 1–16.
22. Voitkevich G.V., Kokin A.V., Miroshnikov A.E., Prokhorov V.G. Handbook of Geochemistry. Moscow, Nedra, 1990. 480 p. (In Russian)
23. Tselmovich V.A., Romanovskii A.V. Cosmic magnetic minerals in the sediments of Lake Pleshcheyevo. *Materialy Vos'moi Mezhdunar. Konf. "Fiziko-khimicheskie i petrofizicheskie issledovaniya v naukach o Zemle"* [Proc. 8th Int. Conf.: "Physicochemical and Petrophysical Research on Earth Sciences"]. Moscow, 2007, pp. 141–143. (In Russian)
24. Pechersky D.M., Nurgaliev D.K., Fomin V.A., Sharonova Z.V., Gil'manova D.M. Extraterrestrial iron in the Cretaceous-Danian sediments. *Phys. Solid Earth (Engl. Transl.)*, 2011, vol. 47, no. 5, pp. 379–401.
25. Tselmovich V.A., Pechersky D.M., Markov D.P. Distinctive characteristics of magnetic minerals of the Chelyabinsk meteorite. *Meteorit Chelyabinsk – god na Zemle: Materialy Vseros. nauch. konf.* [The Chelyabinsk Meteorite – One Year on the Earth: Proc. All-Russ. Sci. Conf.]. Chelyabinsk, Agentstvo CIP Chelyabinskoi OUNB, 2014, pp. 612–636. (In Russian)

Received
March 31, 2015

Sungatullin Rafael Kharisovich – Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Department of Regional Geology and Mineral Resources, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: Rafael.Sungatullin@kpfu.ru

Bakhtin Anatolii Iosifovich – Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Department of Mineralogy and Lithology, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: Anatoly.Bakhtin@kpfu.ru

Tselmovich Vladimir Anatol'evich – PhD in Physics and Mathematics, Leading Research Fellow, Borok Geophysical Observatory, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Borok, Yaroslavl Region, Russia.

E-mail: tselm@mail.ru

Sungatullina Guzel Marsovna – PhD in Geology and Mineralogy, Associate Professor, Department of Paleontology and Stratigraphy, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: Guzel.Sungatullina@kpfu.ru

Glukhov Mikhail Sergeevich – Student, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: *gluhov.mihail2015@yandex*

Osin Yurii Nikolaevich – Director of the Interdisciplinary Centre for Analytical Microscopy, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: *yury.osin@gmail.com*

Vorob'ev Vyacheslav Valerevich – Engineer of the Interdisciplinary Centre for Analytical Microscopy, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: *slavik.ksu@mail.ru*