

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*



**ГЛУХОВ МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ**

**МАГНИТНЫЕ МИКРОСФЕРУЛЫ:  
МОРФОЛОГИЯ, СОСТАВ, ПРИНЦИПЫ КЛАССИФИКАЦИИ**

Специальность 25.00.05 – Минералогия, кристаллография

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук, доцент

Сунгатуллин Рафаэль Харисович

Казань – 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>1. ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ МИКРОСФЕРУЛ И ГИПОТЕЗЫ ИХ ПРОИСХОЖДЕНИЯ .....</b>	<b>10</b>
1.1. История изучения магнитных микросферул.....	10
1.2. Гипотезы происхождения и классификации магнитных микросферул .....	14
<b>2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ МАГНИТНЫХ МИКРОСФЕРУЛ.....</b>	<b>36</b>
<b>3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ .....</b>	<b>45</b>
3.1. Магнитные микросферулы из осадочных пород.....	47
3.2. Магнитные микросферулы из импактитов.....	56
3.3. Магнитные микросферулы из техногенных образований .....	58
<b>4. МОРФОЛОГИЯ И СОСТАВ МАГНИТНЫХ МИКРОСФЕРУЛ.....</b>	<b>62</b>
4.1. Морфологические особенности магнитных микросферул.....	62
4.2. Результаты рентгеновской компьютерной томографии .....	69
4.3. Минеральный и химический составы магнитных микросферул .....	74
<b>5. ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ МИКРОСФЕРУЛ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ.....</b>	<b>92</b>
5.1. Импакт-стратиграфическая шкала фанерозоя .....	92
5.2. Маркирующие горизонты с магнитными микросферулами и корреляция осадочных толщ.....	101
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>115</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....</b>	<b>117</b>
<b>СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ.....</b>	<b>118</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>120</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Атлас магнитных микросферул....</b>	<b>154</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Химический состав магнитных микросферул.....</b>	<b>173</b>

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.**

Магнитные микросферулы (ММ) нередко встречаются в горных породах и техногенных образованиях. Их диаметр составляет менее 1 мм, они обладают сферической формой, оплавленной поверхностью и магнитными свойствами. С момента первых находок ММ во второй половине XIX столетия во льдах Арктики и глубоководных красных глинах Тихого океана [180, 214, 251, 252, 257–259, 309] интерес к данным образованиям неуклонно растет как со стороны минералогов, геохимиков, астрономов, экологов, так и специалистов, занимающихся техногенными месторождениями. Весьма похожие по морфологии и свойствам ММ обнаружены в местах падения древних и современных метеоритов [3, 28, 31, 76, 123, 124, 151, 187, 270, 273, 286, 288, 291, 292, 298 и др.], в вулканических породах [27, 45, 75, 78, 79, 81, 87, 99, 102, 112, 130, 202, 236, 250 и др.] и техногенных образованиях [38, 46, 49, 73, 90, 98 и др.].

В настоящее время детально изучены отдельные морфологические и минералого-геохимические признаки ММ [27, 46, 49, 55, 73, 88, 90, 98, 99, 164, 292 и др.]. Однако это не всегда позволяет исследователям установить источник происхождения ММ, так как практически отсутствуют публикации по их сравнительной диагностике. Поэтому расширение сфер использования ММ и поиск критериев их разделения по генезису приобрели важное значение в начале XXI века.

Учитывая близость морфологических и минералого-геохимических характеристик ММ, актуальным является разработка дополнительных диагностических критериев их разделения современными методами высокого разрешения для создания универсальной генетической классификации [48, 96] магнитных микросферул.

**Цель работы** – выявление с помощью современных методов высокого разрешения морфологических, микроструктурных, минералогических и геохимических признаков магнитных микросферул для обоснования критериев их происхождения и принципов классификации.

**Задачи работы:**

1. Проанализировать отечественную и зарубежную научную литературу по теме диссертационной работы для определения степени ее изученности.
2. Произвести отбор магнитных микросферул из осадочных пород, импактитов и техногенных образований.
3. Разработать методику изучения внешнего и внутреннего строения ММ с помощью комплекса традиционных и высокоразрешающих физико-химических методов.
4. Исследовать морфологические признаки и микроструктурные особенности ММ.
5. Дать минералого-геохимическую характеристику ММ.
6. Выявить набор диагностических признаков ММ для генетического классифицирования.
7. Использовать ММ для корреляции разнофациальных и немых осадочных толщ.

**Научная новизна.**

1. В ходе проведенных исследований автором разработан алгоритм методических приемов диагностики морфологических и минералого-геохимических признаков ММ для определения их происхождения.
2. Для обнаружения магнитных микросферул в породах и изучения их внутреннего строения впервые в России применен неразрушающий метод – рентгеновская компьютерная микротомография.
3. Создан наиболее полный атлас электронно-микроскопических снимков ММ, включающий типичные изображения микросферул из разных объектов.
4. Впервые ММ использованы для корреляции полифациальных осадочных толщ.

**Теоретическая и практическая значимость.** С учетом полученных характеристик предложены новые диагностические критерии, позволяющие идентифицировать генезис ММ. Обнаружение абляционных и импактных ММ позволяет выделять маркирующие горизонты с ними в стратифицируемых комплексах, что можно использовать как дополнительный инструмент корреляции разнофациальных и немых осадочных пород. Магнитные микросферулы из техногенных отвалов представляют потенциальный источник минерального сырья, требующий для его дальнейшей переработки поиска новых минералого-технологических решений с возможностью использования авторской методики изучения ММ.

**Методология и методы исследования.** Основой диссертационной работы являются подходы по поиску ММ, изучению их свойств, анализу процессов минералообразования, описанных в трудах российских и зарубежных ученых. На первом (начальном) этапе исследования изучалась литература, проводились полевые работы с отбором образцов. Второй (основной) этап включал лабораторные работы с применением традиционных и современных аналитических методов: поиск ММ в образцах с применением рентгеновской компьютерной микротомографии; извлечение ММ магнитной сепарацией; проведение исследований методами высокого разрешения (оптическая и электронная микроскопии, микротомография, рамановская и энергодисперсионная спектроскопии). Подобный набор минералого-геохимических методов позволил провести всестороннее и детальное изучение поверхности и внутреннего строения ММ. Третий (заключительный) этап включал статистическую обработку и интерпретацию полученных результатов, построение графиков и диаграмм, написание научных статей и тезисов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

**1.** Методика изучения магнитных сферул дополнена рентгеновской компьютерной микротомографией, позволяющей без разрушения исходного образца выявить природные микросферулы *in situ*, провести их целевой отбор,

морфологическое описание поверхности и 3D-визуализацию внутреннего пространства.

**2.** Форма, размер, структура, пустотное пространство и минеральный состав являются типоморфными диагностическими признаками происхождения магнитных микросферул. Космогенные объекты состоят преимущественно из магнетита, обладают высокой степенью сферичности, низким (до 10 %) содержанием изоморфных примесей, из которых наиболее распространен никель. Объекты магматического и техногенного происхождения менее сферичны, состоят из шпинелидов, гематита, стекла и содержат более 10 % элементов-примесей.

**3.** Магнитные микросферулы, образованные при абляции метеороидов в земной атмосфере, обладают диаметром более 100 мкм, мозаичной структурной поверхностью, одной субсферичной полостью и содержат интерметаллиды никелистого железа. Маркирующие горизонты в осадочных толщах с абляционными микросферулами от первых десятков до сотен штук указывают на крупные импактные события в геологической истории.

**Фактический материал и личный вклад автора.** Диссертационная работа основана на материалах, собранных и обработанных автором при выполнении полевых и лабораторных работ с 2013 по 2021 гг. в качестве студента, аспиранта, младшего научного сотрудника лаборатории рентгеновской компьютерной томографии и ассистента кафедры региональной геологии и полезных ископаемых Казанского (Приволжского) федерального университета (далее – КФУ). Исследование морфологических, микротекстурных и минералогическо-геохимических признаков проводилось по 570 образцам ММ из различных природных и техногенных образований.

Все материалы исследований, положенные в основу работы, включая анализ литературных источников, постановку цели и задач исследования, полевые наблюдения, отбор и подготовку образцов к экспериментам, выполнение некоторых видов анализов (в том числе с помощью оригинальных методических подходов), интерпретацию результатов, получены автором лично. Из научных

трудов, опубликованных в соавторстве, в диссертации изложены только те положения и идеи, которые являются результатом личной работы соискателя.

**Степень достоверности и апробация результатов.** В работе представлены результаты, полученные с помощью сертифицированного лабораторного оборудования: бинокулярный микроскоп ЛОМО, поляризационный микроскоп Leica dm2700m, рентгеновский компьютерный томограф Phoenix V|tome|X S 240, рамановские спектрометры inViaQontor (Renishaw) и LabRAM HR800 Evolution (Horiba), электронные микроскопы Merlin, Phillips XL-30, Tescan Vega, энергодисперсионные рентгеновские спектрометры X-Max, ESEM и SBU. Результаты работы согласуются с фактами, описанными в опубликованных независимых источниках по данной тематике другими исследователями. Полученные результаты обработаны автором с применением методов математической статистики.

Защищаемые положения, ключевые аспекты и практические результаты диссертационной работы докладывались на научно-практических конференциях международного и всероссийского уровней: LXXXI Международном метеоритном конгрессе (Москва, 2018); молодежной научной школе «Металлогения древних и современных океанов» (Миасс, 2016–2021); V, VII, X, XI и XII Всероссийских молодежных конференциях «Минералы: строение, свойства, методы исследования» (Екатеринбург, 2013–2021); Всероссийской научно-практической молодежной конференции «Уральская минералогическая школа – 2020» (Екатеринбург, 2020); Всероссийской научно-практической молодежной конференции «Современные исследования в геологии» (С.-Петербург, 2015, 2016); IV и V Международных научно-практических конференциях молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (С.-Петербург, 2015, 2017); XII Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, 2015); Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире» (Пермь, 2016, 2018–2020); Международной молодежной

конференции им. Н.А. Головкинского (Казань, 2019, 2020); Итоговых конференциях студентов и сотрудников КФУ (Казань, 2014–2021).

**Публикации.** Результаты исследований по теме диссертации изложены в 55 научных работах, опубликованных соискателем, в том числе в 5 статьях в журналах из перечня Высшей аттестационной комиссии РФ, и в 10 публикациях, входящих в международные системы цитирования Scopus, WoS.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения и двух приложений. Общий объем работы составляет 202 страницы, включает 71 рисунок, 8 таблиц. Список литературы насчитывает 311 источников.

### **Благодарности**

Автор выражает искреннюю признательность и глубокую благодарность научному руководителю профессору, д.г.-м.н. Р. Х. Сунгатуллину за научные консультации и всестороннюю помощь на всех этапах выполнения работы. Особая благодарность за предоставленный материал для исследований магнитных микросферул – профессору Уральского государственного горного университета, д.г.-м.н. А. Б. Макарову, доценту КФУ, к.г.-м.н. Г. М. Сунгатуллиной, ведущему научному сотруднику геофизической обсерватории «Борок» Института физики Земли РАН, к.ф.-м.н. В. А. Цельмовичу, ведущему геологу ТГРУ ПАО «Татнефть», к.г.-м.н. А. Н. Тюрину, главному геологу ОАО «Камско-Устьинский гипсовый рудник» Ю. А. Евдокимову, научному сотруднику ГЕОХИ РАН А. В. Корочанцеву, главному геотехнологу АО «ЦНИИгеолнеруд», к.г.-м.н. А. К. Вишнякову и научному сотруднику М. С. Вафиной. Автор также признателен за помощь при выполнении и обработке аналитических исследований старшему научному сотруднику, к.г.-м.н. Д. М. Кузиной, Б. М. Галиуллину, О. Е. Стаценко, А. В. Низамовой, В. В. Воробьеву (КФУ); за ценные консультации – научному сотруднику Южно-Уральского ФНЦ минералогии и геоэкологии УрО РАН, к.г.-м.н. И. А. Блинову, младшему научному сотруднику Института геологии и геохимии УрО РАН Е. А. Панкрушиной, а также сотрудникам КФУ – доценту, к.г.-м.н.



Р. И. Кадырову, доценту, к.г.-м.н. О. П. Шиловскому и другим коллегам, кто не остался безучастным и помогал в реализации поставленной цели.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения Государственного задания в сфере научной деятельности (Проект № 0671-2020-0048 Государственного задания № 075-00216-20-05 от 04.06.2020 (Часть II, Раздел 1)).

# 1. ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ МИКРОСФЕРУЛ И ГИПОТЕЗЫ ИХ ПРОИСХОЖДЕНИЯ

## 1.1. История изучения магнитных микросферул

В конце 60-х годов XIX столетия голландский полярный исследователь Норденшельд (А. Е. Nordenskjöld) на льду Гренландии впервые обнаружил ММ. С помощью оптического микроскопа в порошкообразном веществе были найдены темные мелкие сферулы, предположительно, космического происхождения [257–259]. Позднее упоминания о подобных объектах в арктических районах стали появляться в работах других исследователей [180, 214, 309].

Экспедиция на судне «Челленджер» в середине 70-х годов XIX века позволила Д. Муррею и А. Ренару (J. Murray & A. Renard) собрать коллекцию ММ из глубоководных красных глин Тихого океана и провести первое систематическое описание «космических пришельцев» [251]. В красных глинах также были встречены редкие частицы самородного железа несферической формы, которые, по мнению данных исследователей, могли являться материалом вулканических извержений [251, 252]. Основным инструментом исследования ММ с конца XIX века вплоть до середины XX века являлась оптическая микроскопия.

В России в 30–40-е годы прошлого века весомый вклад в развитие исследований о космическом веществе внес В. И. Вернадский. В частности, им выдвинута гипотеза о пылевой природе Тунгусского метеорита и предложена идея изучения «Ямальской мглы» – облака космической пыли, выпавшего в 1938 г. По рекомендации ученого начали осуществлять сбор космического вещества с помощью специальных ловушек, в результате чего были получены наиболее

достоверные сведения о морфологии космической пыли на тот период времени [7, 8]. Эти исследования позволили начать поиск космического вещества в удаленных от индустриальных центров районах, например, на северном и южном полюсах планеты [13].

К середине XX столетия были изобретены приборы для улавливания частиц космической пыли и ММ из атмосферы, а также разработаны методы изучения их строения и состава [177, 222, 239, 241, 281]. Все это позволило собрать и проанализировать материал на высотах до 300 км от поверхности Земли и получить новые данные о ММ [65, 151, 181, 196, 197, 202, 218, 224–226, 259, 267–269 и др.]. Было установлено, что торф, арктические и антарктические льды, снежники высокогорных районов являются идеальными планшетами для сбора космической пыли, что способствовало количественной оценке ее выпадения в четвертичный период [55, 60, 62, 67, 68, 112, 118, 120, 122, 193, 224, 235].

Во второй половине XX века произошел значительный прогресс в технических методах, что привело к резкому увеличению количества работ, посвященных исследованию микрообъектов, включая ММ. С появлением полуколичественного спектрального, рентгеноструктурного анализов и радиационной химии [177, 222, 239, 241, 281] стало возможным изучение минерального и химического состава ММ. Растровая электронная микроскопия позволила начать изучение морфологии и структурных особенностей поверхности объектов, обладающих размером в первые десятки микрометров [150, 181, 197–199, 203, 219, 224–226, 260, 267–269].

Однако прежде, чем использовать высокоточные методы, исследователю необходимо сначала обнаружить ММ, а затем извлечь их из вмещающих пород и осадков. Примечательно, что зачастую нахождение ММ носило случайный характер. Например, первые исследователи подобных объектов J. Murray и A. F. Renard с помощью микроскопа обнаружили микросферулы в глубоководных океанических осадках, отбравшихся цилиндрическими снарядами-ловушками [251]. Затем магнитность микросферул стала важнейшим свойством, имевшим значение при их поиске, а методом для их сбора явилась магнитная сепарация [43,

127, 128, 148, 226, 253-255, 292]. К примеру, в середине XX века для поисков ММ на батиалях и в абиссали использовались «магнитные грабли» – устройство, состоящее из длинной деревянной шпалы с прикрепленными к ее поверхности постоянными магнитами [148]. Данный метод применяется и в настоящее время [266].

Широкий набор исследуемых планшетов (осадочные, вулканические и магматические породы, метеориты, импактиты, лед, снег, почвы, торф, техногенные отложения, атмосфера и др.) требует использования оригинальных подходов для поисков ММ. Например, в целях извлечения из древних солей магнитной фракции, включая ММ, Т. А. Mutch применил обычное растворение в воде и перегон жидкости из одного сосуда в другой с использованием электромагнита [253]. Данная конструкция напоминает песочные часы (Рисунок 1.1). Для выделения магнитной фракции из снега и льда применяют растапливание с просеиванием [106, 158, 232, 287, 288, 313] и/или сепарацию с применением постоянного магнита [43, 127, 128, 226, 292]. Для отбора микросферул из техногенных отложений чаще всего применяется магнитная сепарация [73, 90, 98]. При исследовании карбонатных и карбонатно-глинистых пород применяют дробление, просеивание, растворение в кислотах с последующим отбором нерастворимого остатка [60, 79, 287] и его магнитной сепарацией [13, 54, 181, 159, 251, 290].

Следующим этапом после отбора ММ является изучение их основных параметров и свойств: формы, блеска, цвета, текстуры и структуры, плотности, минерального состава и др. Для этого в большинстве случаев используют оптические микроскопы, которые также позволяют исследовать внутреннее строение и состав полированных срезов ММ [60, 79, 232, 251, 252, 301]. Нередко увеличительные способности оптического микроскопа не позволяют детально изучить морфологию внешней и внутренней поверхности ММ (особенно для объектов менее 50 мкм), а поляризационный микроскоп не позволяет точно определить минеральный состав. Поэтому для детальных исследований строения и состава ММ с целью установления их генезиса необходимо

применение современных физико-химических методов высокого разрешения, к которым относятся сканирующая электронная микроскопия и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, рентгенофлуоресцентная и рамановская спектроскопии, рентгенофазовый анализ, рентгеновская компьютерная микротомография.

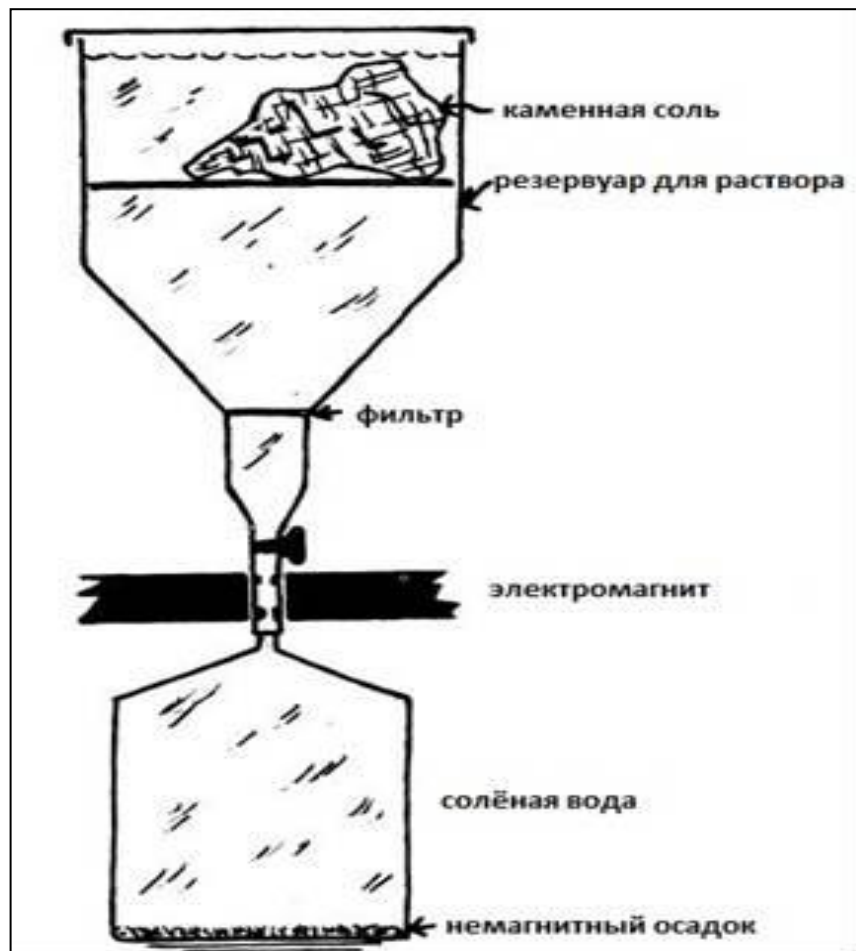


Рисунок 1.1. Установка для электромагнитной сепарации солей, из [254]

Рост уровня аналитической приборной базы в конце XX – начале XXI столетий открыл новые возможности для исследования микрообъектов. Сканирующий электронный микроскоп стал широко применяться для получения изображений с высоким разрешением ММ, изучения их морфологии и текстурных особенностей. Совмещение электронной микроскопии с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией позволило определять химический состав ММ в отдельных точках. В режиме обратно рассеянных

электронов появилась возможность изучать площадное распределение химических элементов с проведением элементного картирования, что оказывало значительную помощь для интерпретации минеральных фаз ММ [55, 98, 127, 128, 193, 244, 206, 226, 292]. Кроме того, для решения минералогическо-геохимических задач стали применяться другие физико-химические методы: рентгенофлуоресцентная [244] и рамановская спектроскопии [81, 139, 287], рентгенофазовый анализ [100]. В последнее время значительную помощь в исследовании внутреннего строения ММ привнесла рентгеновская компьютерная томография [166, 209].

Использование методов высокого разрешения позволило детально изучать ММ разного происхождения и осуществлять их типизацию [38, 98, 292]. До настоящего времени одной из главных проблем при исследованиях ММ является установление характерных признаков разных генетических типов изучаемых объектов. Поэтому ниже рассмотрены основные гипотезы происхождения ММ и используемые сегодня диагностические критерии для расшифровки их генезиса.

## **1.2. Гипотезы происхождения и классификации магнитных микросферул**

Как уже отмечалось, происхождение ММ вызывает споры в научном сообществе. Начиная с первых находок, исследователи [251, 252] столкнулись с проблемой разделения сферул космического и вулканического происхождения. Например, ряд ученых [9, 10, 148, 167] разделял их по плотности. Затем исследователей ждала новая проблема – идентификация техногенных ММ, среди которых встречаются объекты, аналогичные природным по морфологии и химизму [12].

Сегодня основными гипотезами образования ММ являются следующие: космическая (космическая пыль, абляция метеороида, импактный взрыв), магматическая (продукты вулканических извержений, флюидальные потоки и др.), биогенная (деятельность организмов) и техногенная (промышленная деятельность человека).

**Космическая гипотеза.** Образование ММ часто связывают с выпадением космической пыли (КП) на Землю. В XIX веке к КП относили самые мелкие метеорные тела, движущиеся в пределах Солнечной системы, которые по современной терминологии выделяются как межпланетная пыль. В настоящее время под термином «космическая пыль» понимается любое твердое мелкодисперсное космическое вещество (включая микросферулы). Это и пыль межзвездная (межпланетная), и пыль метеорная, и пыль метеороидная и др. Поэтому исследование ММ как разновидности КП актуально в связи с изучением пылевой материи в Солнечной системе. Сюда же относится часть КП, попадающая в атмосферу Земли и частицы пыли, образующиеся за счет дезинтеграции и абляции метеороидов, дробления метеоритов, а также при импактных событиях. В первой половине XX века заметное влияние на развитие данного направления в науках о Земле оказали идеи В. И. Вернадского. Им детально обоснована программа поиска и сбора КП на поверхности Земли для решения ряда задач пространственного и временного распределения выпадения метеорной пыли на Землю и ее воздействия на земные процессы и биосферу. Наиболее перспективными объектами он считал снеговые и ледниковые покровы высокогорий и арктических областей. Наряду с В. И. Вернадским, существенный вклад в учение о космическом веществе в XX веке внесли Е. Л. Кринов, К. П. Флоренский, В. Л. Масайтис, В. Г. Фесенков, И. С. Астапович, С. Hoffmeister, E. J. Örik и другие исследователи. Преобладающее количество ученых считает космические процессы и явления важнейшими из факторов, влияющих на изменения климата на Земле, появление жизни и массовые вымирания биоты, изменение рельефа и тектонические события, образование новых минералов и месторождений полезных ископаемых [4, 5, 13, 37, 55, 77, 93, 131, 136].

XX век позволил обнаружить многочисленные ММ в земных породах и осадках, а также собрать космическое вещество вдали от населенных пунктов и промышленных предприятий. Основными планшетами для находок ММ явились: а) глубоководные морские отложения [143, 147, 210, 221, 267, 275];

б) снег высокогорий, ледники, льды Антарктиды и Арктики [9, 29, 134, 135, 155, 196, 218, 227, 225, 311]; в) пустыни [181, 209]; г) торфяные болота [13, 43, 62, 118, 120, 121, 122]; д) древние осадочные породы [39, 165, 169, 212, 232, 253-255, 290]; е) почвы [63, 144].

Мониторинг поступления космического вещества на Землю на площадях, удаленных от источников техногенного загрязнения на сотни и тысячи километров, обнаружил существенные вариации концентрации КП [13, 193]. По данным исследователей прошлого века [13, 120, 121] приток сфероидов из космоса на Землю равен 2000–4000 т/год, а в целом КП –  $1,5 \cdot 10^9$  т/год [62]. По современным оценкам КП, полученным из анализов колонок льда [224, 235], приток значительно ниже и составляет  $0,02–1,5 \cdot 10^5$  т/год. Находки ММ среди внеземных частиц на нашей планете составляют около 1 % или  $0,2–15 \cdot 10^2$  т/год [55, 219, 287, 291]. Они имеют преимущественно магнетитовый состав [171, 183, 295], и поэтому обладают магнитными свойствами. Некоторые микросферулы состоят из стекла с включениями магнетита [171, 183, 292]. В большинстве случаев ММ обладают сферической формой; реже встречаются каплевидные разности и еще реже – слипшиеся сферулы. Поверхность ММ черного цвета с металлическим блеском и хорошо различимыми структурами закалки [155, 212, 219]. Формирование космических ММ происходило при температуре не менее  $1350^{\circ}\text{C}$  и очень быстром охлаждении [13, 146, 193, 260, 261, 292, 303].

С середины XX века в лабораториях создаются модели [193, 303] образования ММ при движении и нагревании микрометеоритов размером 200–400 мкм в атмосфере Земли (Рисунок 1.2). С учетом теоретических гипотез [142, 146] и экспериментальных данных доказано, что высокожелезистые сферулы образуются при полном плавлении космического вещества с последующей кристаллизацией магнетита [183]. После нагревания на поверхности всех типов метеоритов (железные, каменные и железокаменные) образовывались магнетитовые микросферулы (Рисунок 1.3).



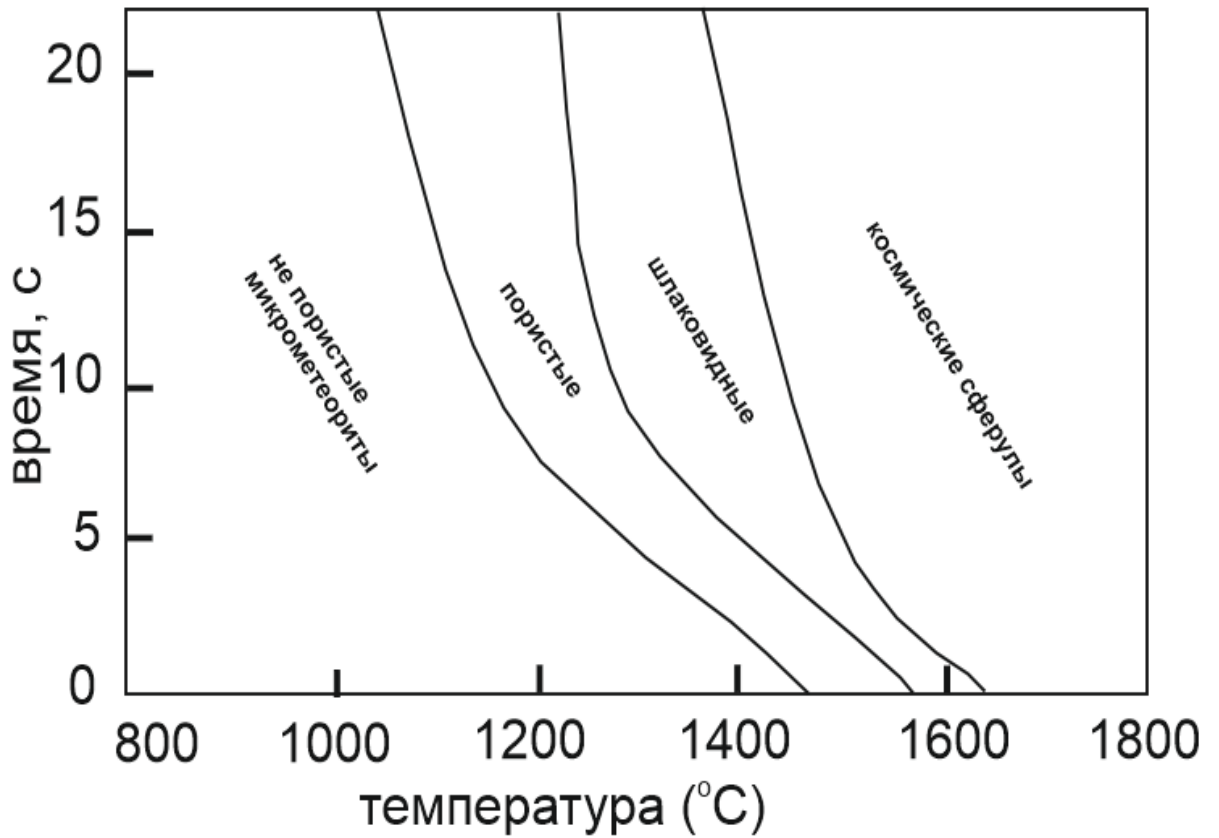


Рисунок 1.2. Параметры образования ММ при нагреве микрометеоритов, из [303]

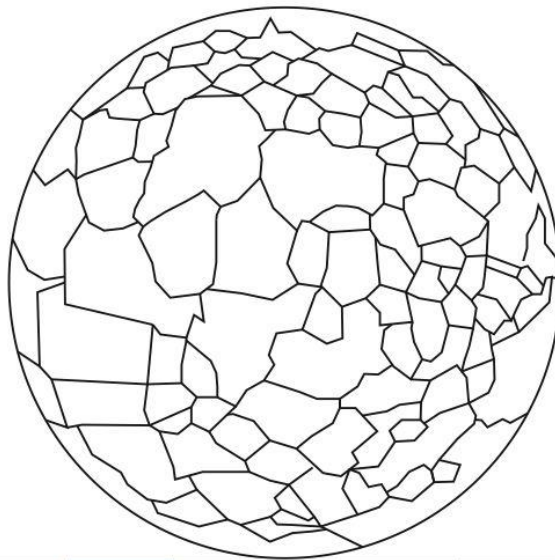


Рисунок 1.3. Схематическое изображение структуры поверхности ММ, образовавшейся после плавления метеорита, по [193]

Нерасплавленные разности микрометеоритов характеризовались только оплавленной корочкой [183]. Таким образом, экспериментальное моделирование позволило определить зависимость особенностей микрочастиц от температуры и времени их образования.

В настоящее время внеземные ММ делятся на следующие классы:

- *микрометеориты (космические микросферулы)*, которые образуются при дезинтеграции метеороидов и плавлении частиц метеорных тел размером первые мм при их входе в атмосферу на высотах около 80 км [3, 21, 292];
- *метеоритные абляционные сферулы (МАС)*, образующиеся при плавлении в земной атмосфере метеороидов [3, 195, 292];
- *микротектиты* – частицы, конденсированные из пара или отделенные от ударного расплава, образовавшегося при столкновении астероидов и комет с Землей [188, 292].

Рассмотрим более подробно данные классы космогенных ММ.

К микрометеоритам относят оплавленные ММ размером 5–50 мкм и редко до 100 мкм [55, 291] с дендритовой или скелетной структурой (Рисунок 1.4), представленной дендритами оксидов железа в матрице из силикатного стекла [171, 184, 287, 292]. Микрометеориты входят в атмосферу при скорости 11–72 км/с и, тормозясь, начинают плавиться при температурах более 1350<sup>0</sup>С в течение нескольких секунд [193, 303]. Полностью расплавленные частицы силами поверхностного натяжения формируются в шарообразные микрочастицы – космические ММ [52, 291, 295]. Согласно [146], образование сфероидов в земной атмосфере при нагревании частицы микрометеорита размером 0,5 мм включает несколько стадий (Рисунок 1.5). Так, например, в исходной микрочастице углистого хондрита с примесью силикатных зерен (стадия «а») при нагревании разрушается и частично плавится матрица с увеличением объема из-за образования пузырьков (стадия «б»). На стадии «в» происходит уход летучих компонентов (Н, О, СО, S), что приводит к наибольшей пузырчатости частицы.

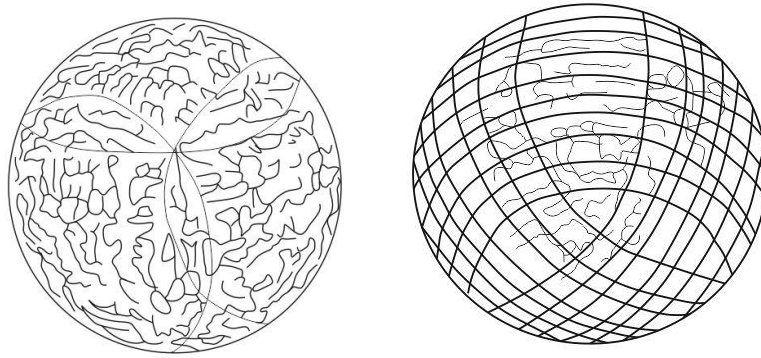


Рисунок 1.4. Дендритовая (слева) и скелетная (справа) структуры поверхности микрометеоритных ММ, по [184, 287]

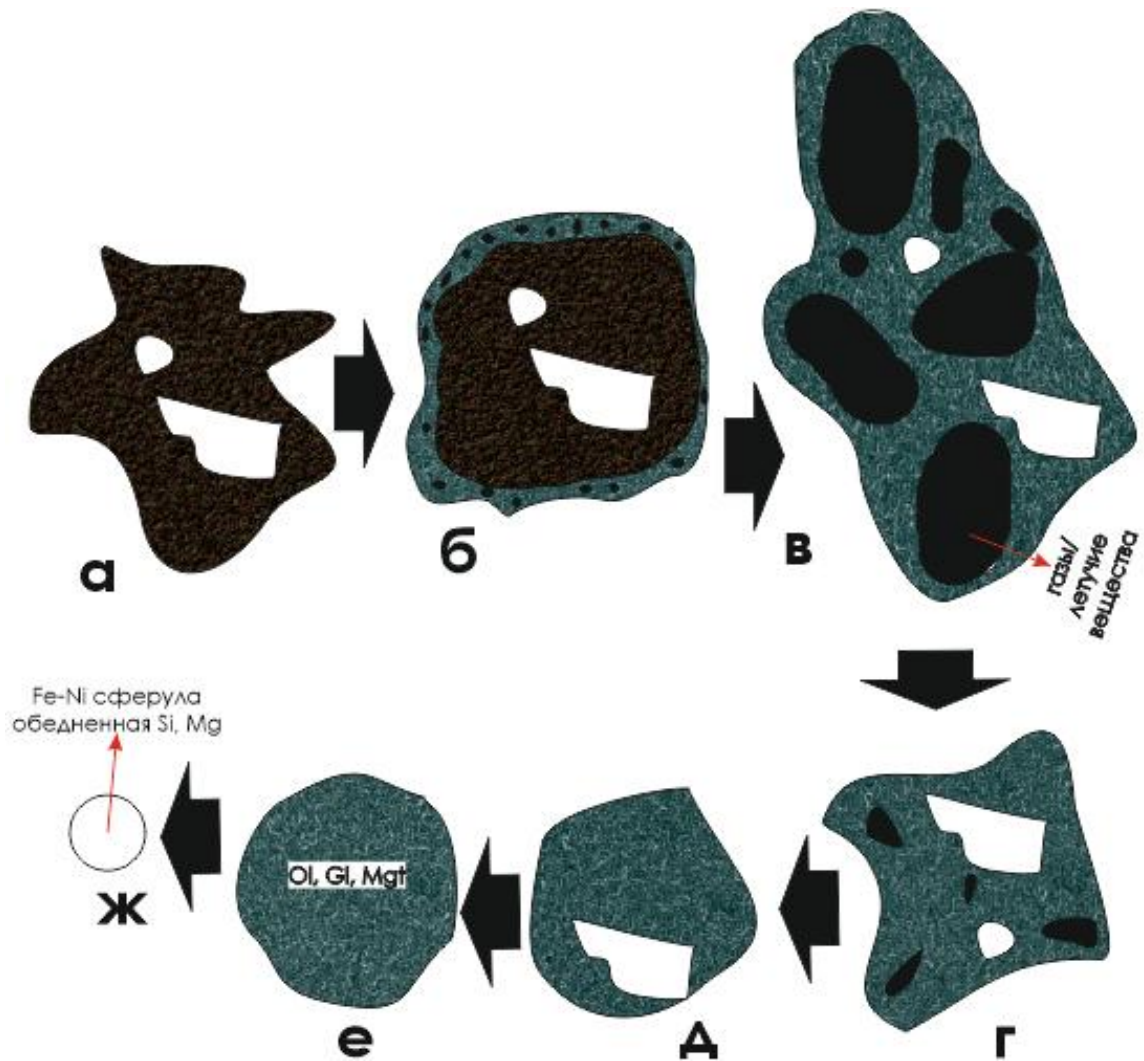


Рисунок 1.5. Стадии изменения углистого хондрита при нагреве, по [146].

Пояснения см. в тексте

В стадиях «б» и «в» образуется металлическое железо за счет восстановления силикатов и/или разложения сульфидов. При дальнейшем нагревании (стадии «г», «д» и «е») постепенно исчезают все летучие вещества и образуется сферическая частица (стадия «ж»), состоящая из оливина, стекла и магнетита [145, 146]. На заключительной стадии «ж» при полном плавлении происходит гомогенизация расплава, что способствует образованию железооксидных микросферул с дендритовой или скелетной структурой [212, 292] и небольшой (менее 1 %) примесью никеля [208]. Подобные микрочастицы выделяют в класс высокожелезистых ММ I-типа [55, 164, 208, 292].

На стадии «ж» образуются также микросферулы со слабыми магнитными свойствами, которые в данной работе не рассматриваются.

Метеоритные абляционные сферулы (МАС) – это разновидность метеоритной пыли представленная оплавленными микрообъектами (полые и пористые магнетитовые микросферулы, капли и колбочки), образовавшимися при абляции метеороида (разогрев, испарение, окисление вещества и сдвиг расплава набегающим атмосферным потоком с поверхности) в атмосфере Земли. При этом химический состав МАС будет близок к составу родительского тела [292]. Внутреннее строение МАС отвечает процессу ликвации с разделением на никелевое (Ni), никель-железистое (Ni-Fe) или железоникелевое (Fe-Ni) ядро [3, 142] и железооксидную оболочку (Рисунки 1.6, 1.7). Последняя может отделяться от ядра при прохождении микросферул через атмосферу и высоких температурах [142].

Разница температур испарения железа и никеля (температура кипения Fe составляет 2750°C, Ni – 2732°C) объясняет отсутствие на поверхности МАС Ni или его низкое (1–3 %) содержание [174, 194, 217, 238]. Стекло в составе МАС часто отсутствует, в отличие от состава некоторых типов ММ микрометеоритного происхождения [292].

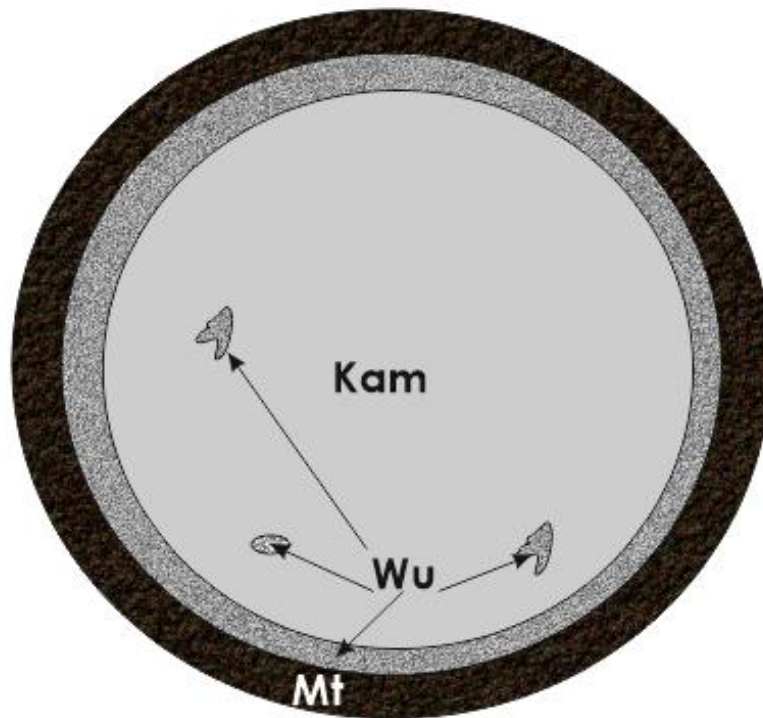


Рисунок 1.6. МАС метеорита Сихотэ-Алинь, по [3]

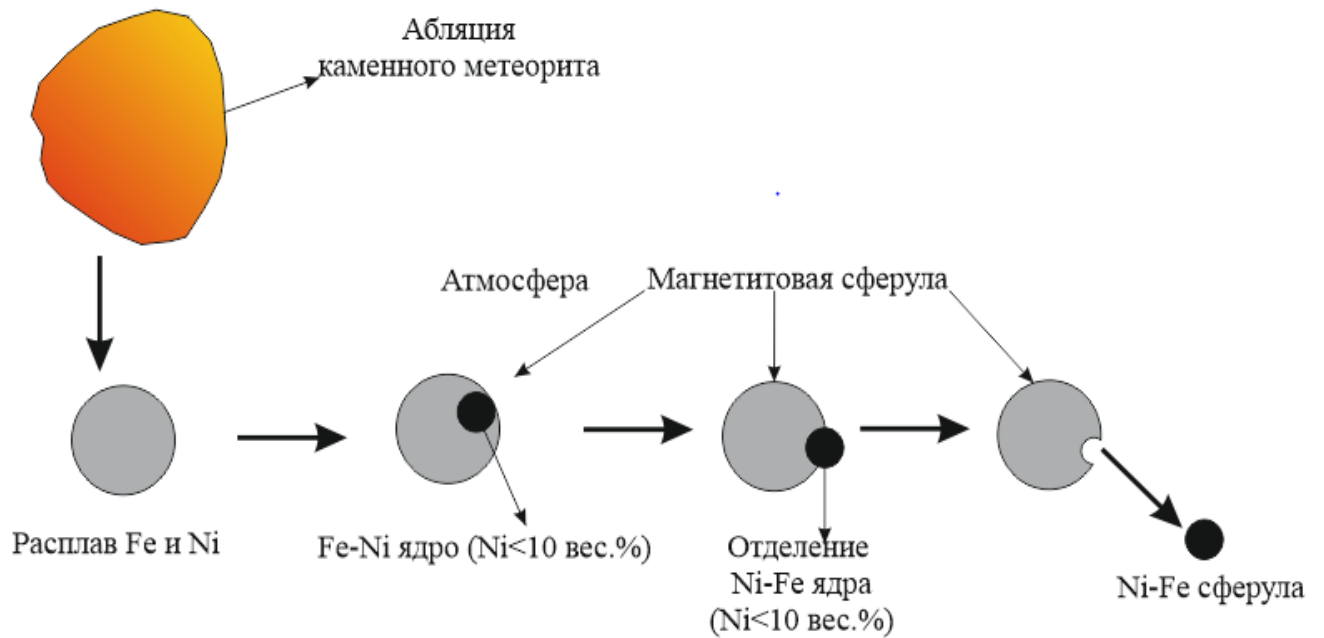


Рисунок 1.7. Модель генерации шариков из сплава Ni-Fe, по [142]

Вышеописанный процесс образования ММ (Рисунок 1.7) предполагает формирование, кроме цельных зональных, также полых (пустотелых) микросферул с железооксидными оболочками [142], которые часто встречаются в земных породах; диаметр подобных сферул может превышать 100 мкм [55, 164, 287]. Исследователи отмечают, что количество полых микросферул может достигать 90 % от общего количества микросферул. Поскольку растворимость кислорода в расплавленном железе повышается [208], то повышется и скорость окисления частиц, богатых Fe. Когда частицы остывают, растворимость кислорода уменьшается, а его избыток выделяется из жидкости в виде пузырьков, которые движутся в сторону уменьшения давления, поэтому нередко исследователями обнаруживаются ММ со смещенной от центра округлой полостью [3, 142, 287]. Существует также точка зрения, что образование округлых полостей в ММ возможно связано с коррозией никеля [172, 177].

К традиционным объектам с многочисленными находками ММ относятся импактиты, которые отражают наиболее явную связь между космическим веществом и земными отложениями [121, 151, 183, 187, 194, 273, 277]. ММ разного размера обнаруживаются как в импактном кратере, так и за его пределами на расстоянии от первых до нескольких тысяч километров [182, 194, 272, 286]. Метеоритный материал присутствует в импактитах в 3-х формах: 1) обломки метеорита и МАС; 2) продукты плавления метеоритного вещества в виде сферул, микротектитов; 3) прожилки и частицы неправильной формы [117, 119 и др.]. Присутствие обломков метеоритного вещества в импактных кратерах не позволяет сомневаться в их происхождении [119]. Любой импактный процесс предполагает смешение материала ударника и мишени, и поэтому связанные с импактным процессом ММ будут совместно содержать земные и космические минералого-геохимические метки (маркеры).

Для импактных процессов характерны аномальные P-T условия: в точке удара давление может составлять первые сотни ГПа, а температура превышать  $10\,000^{\circ}\text{C}$  [75, 119]. Образование микросферул при этом связано с энергией, которой достаточно для плавления и испарения падающего тела (ударника) и

пород мишени [238]. Пары химических элементов поднимаются взрывом на высоту до десятков километров, где они кристаллизуются в сферулы разного состава [60, 208]. Стекловатые сферулы относятся к микротектитам; здесь же образуются железистые сферулы [188, 292]. Имеются доказательства, что среди тектитов в импактитах могут встречаться и ММ [117, 144]. Например, в филиппинитах, индошинитах и иргизитах [117, 153, 188, 273], а шрейберзит-троилит-камаситовые микросферулы обнаружены в импактитах Вабар и Аризонского метеоритного кратера [153, 273].

Оксидное железо в тектитовом расплаве восстанавливается при декомпрессии по следующему механизму: чем выше температура и соотношение  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  в исходном расплаве, тем более значительным может быть его восстановление на заключительных этапах [69], что объясняет, в частности, обнаружение вюстита в составе микросферул [175]. После остывания поверхность импактита с захваченными частицами ударника покрывается тонкой (от 100 нм до первых мкм) стеклянной конденсатной пленкой [50, 51], которая максимально защищает объекты, включая ММ, от дальнейших экзогенных преобразований.

Диаметр ММ из тектитов достаточно крупный и составляет от 100 до 350 мкм [187, 238, 298]. Они черного или серого цвета с металлическим блеском. Поверхность ММ представлена мозаичной микроструктурой с фигурами травления. Скелетные кристаллы магнетита на поверхности указывают на их рост при быстром охлаждении и высоком температурном градиенте [187, 238, 298]. Согласно описаниям микросферул импактного происхождения, их форма, диаметр, микроструктура поверхности и состав очень близки к таковым для МАС. Важным отличительным критерием является обнаружение импактных сферул внутри тектитов и других пород из метеоритных кратеров [23, 187, 233], а также структуры травления [298].

При абляции метеороидов образуются не только ММ, но и каплевидные частицы, а также слипшиеся сфероиды [155, 212, 219, 275]. Так, Т. Sasaki (1983) обнаружил каплевидные и колбообразные металлические частицы в глубоководных отложениях. Несколько каплевидных магнитных микрочастиц

найденно в одном из кратеров места падения Сихотэ-Алинского железного метеорита [219]. Подобные микрочастицы формируются при очень быстрой потере скорости, отрыве и застывании расплавленного вещества в виде капли. Изучение поверхностных структур каплевидных частиц (Рисунок 1.8, а, б) показало, что они образуются при более низких температурах, чем МАС [211, 277, 218]. Магнетитовые микрочастицы в виде слипшихся сферул (Рисунок 1.8, г) образуются за счет аккреции при абляции метеороида [155, 212, 219, 275].

Таким образом, космические микросферулы и МАС имеют общий механизм образования – это высокая температура (более  $1350^{\circ}\text{C}$ ), связанная с нагревом при вхождении в атмосферу материнского метеороида, плавление и испарение

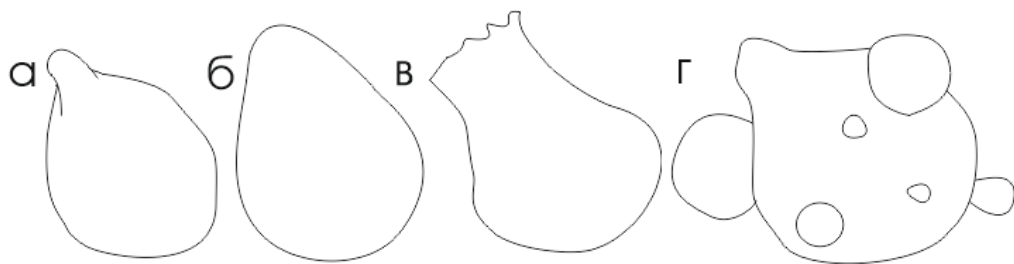


Рисунок 1.8. Каплевидные (а, б), колбообразные (в) и гроздевидные (г) формы ММ, по [155, 212, 219, 275]

вещества, свободное падение [142, 146, 234 и др.]. Однако малые размеры микрометеоритов приводят их к полному плавлению, в отличие от метеоритов. Поэтому для ММ, образованных из микрометеоритов, свойственны идеальная сферическая форма, небольшой диаметр (преимущественно менее 50 мкм, редко 100 мкм), дендритовая и скелетная микроструктуры поверхности, преобладание среди минеральных фаз магнетита и отсутствие внутреннего ядра. МАС более крупные (100 мкм) и образуют, наряду со сферическими, каплевидные и слипшиеся формы [3, 206, 208, 212, 219, 292]. Мозаичные микроструктуры МАС разделяются на несколько типов (Рисунок 1.9): перьевидный (а), чешуйчатый (б), трещиноватый (в). Внутри микросферул может находиться железо-никелевое



ядро или субсферическая полость (Рисунок 1.9, г). Во внешней оболочке МАС редко встречается примесь никеля [194, 217].

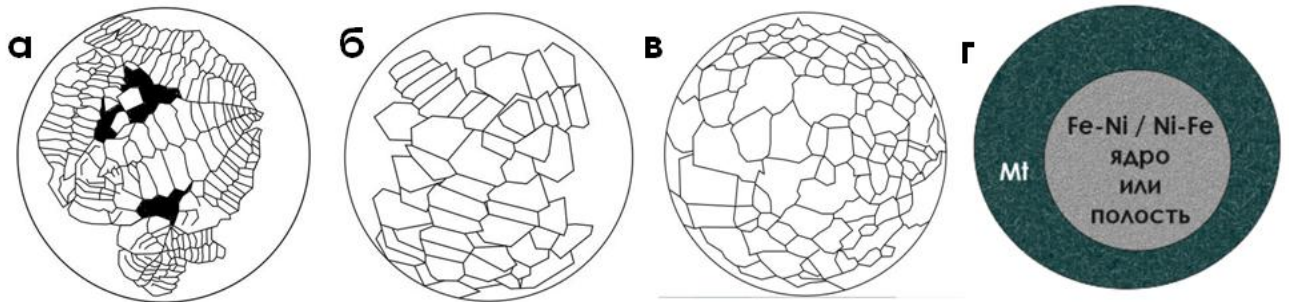


Рисунок 1.9. Морфология МАС, по [3, 142, 208, 212, 287].

Пояснения см. в тексте

**Магматическая гипотеза.** Образование железоксидных сфероидов и ММ может быть связано с эндогенными процессами на Земле, например, с извержениями вулканов [45, 103, 236, 250 и др.]. Широкая приуроченность ММ к пирокластическим отложениям свидетельствует об их магматическом происхождении и связи с эксплозивными процессами. В последние десятилетия, благодаря развитию высокоразрешающих физико-химических методов, ММ обнаружены в разнообразных магматических породах. Это сибирские траппы [102], ультрабазиты [75, 77, 280], гидротермально измененные вулканы [100], вишериты – интрузивные пирокластиты [81, 82, 99, 130], гранитоиды [87], игнимбриты [27], карбонатиты [79] и др.

Образование ММ происходит во флюидно-магматических системах в результате быстро протекающих газотранспортных реакций, которые способствуют разделению вещества на несмешивающиеся рудные, рудно-силикатные или силикатные сферулы [103]. За 50-летний период исследований ММ магматического происхождения установлено, что они нередко состоят из кристаллов ферришпинелидов в матрице из стекла. Особенно это проявлено в вулканических породах, в которых стекло составляет значительную часть [201, 202]. Характерно, что частицы с содержанием железа более 5 % встречаются вблизи вулканов лишь в каждой шестой пробе, т. е. наиболее распространенными

среди вулканических микросферул являются именно силикатные. Из-за выпадения крупных ММ вблизи аппаратов извержения, на удалении от вулканов обнаруживаются лишь самые мелкие и легкие (полые) сферические частицы [201, 202]. Это существенно отличает их от импактных сферул, которые в тонких прослоях могут сохраняться в пределах крупных регионов и даже в глобальном масштабе вне зависимости от состава вмещающих их пород [298].

Редко частицы среди вулкаников имеют сфероидальную форму и, в основном, они встречаются в породах вулканического потока. Частицы на удалении от вулканов, чаще всего, обладают эродированной поверхностью, субсферической формой (глобулярная, каплевидные, эллипсоидные, гроздьевидные и др.) и размером более 1 мкм [103]. Пористые и полые микросферулы фиксируют повышенную газонасыщенность, что наблюдается при извержениях вулканов или вскипании флюидизированной магмы [103, 130]. Рудные капли могут осаждаться из высокотемпературной газовой среды при остывании температуры с  $1550^{\circ}\text{C}$  до  $183^{\circ}\text{C}$  [102] на стенках пор, например, при кавитации [86], в глубинных гидротермах [96] и образовании игнимбритов [27].

В последние годы исследователями внутри магматических микросферул установлено наличие ядра из чистого железа или ядра с небольшой примесью Ni (до 2 %) и Cu (до 0,3 %) (Рисунок 1.10). Внутри железных ядер и сферул иногда отмечаются участки окисления [103]. Микросферулы магматического происхождения являются полиминеральными природными образованиями, состоящими из самородного железа, магнетита, гематита, ульвошпинели, ильменита, а также стекла, в котором рудные минералы часто образуют вкрапленники или каркасные структуры. Для магматических ММ характерны скелетные, сноповидные, эвтектоидные и решётчатые микроструктуры роста и распада (Рисунок 1.11), которые встречаются как на поверхности, так и во внутренней части микросферул. Только бугристый тип структуры характерен для поверхности ММ (Рисунок 1.12).

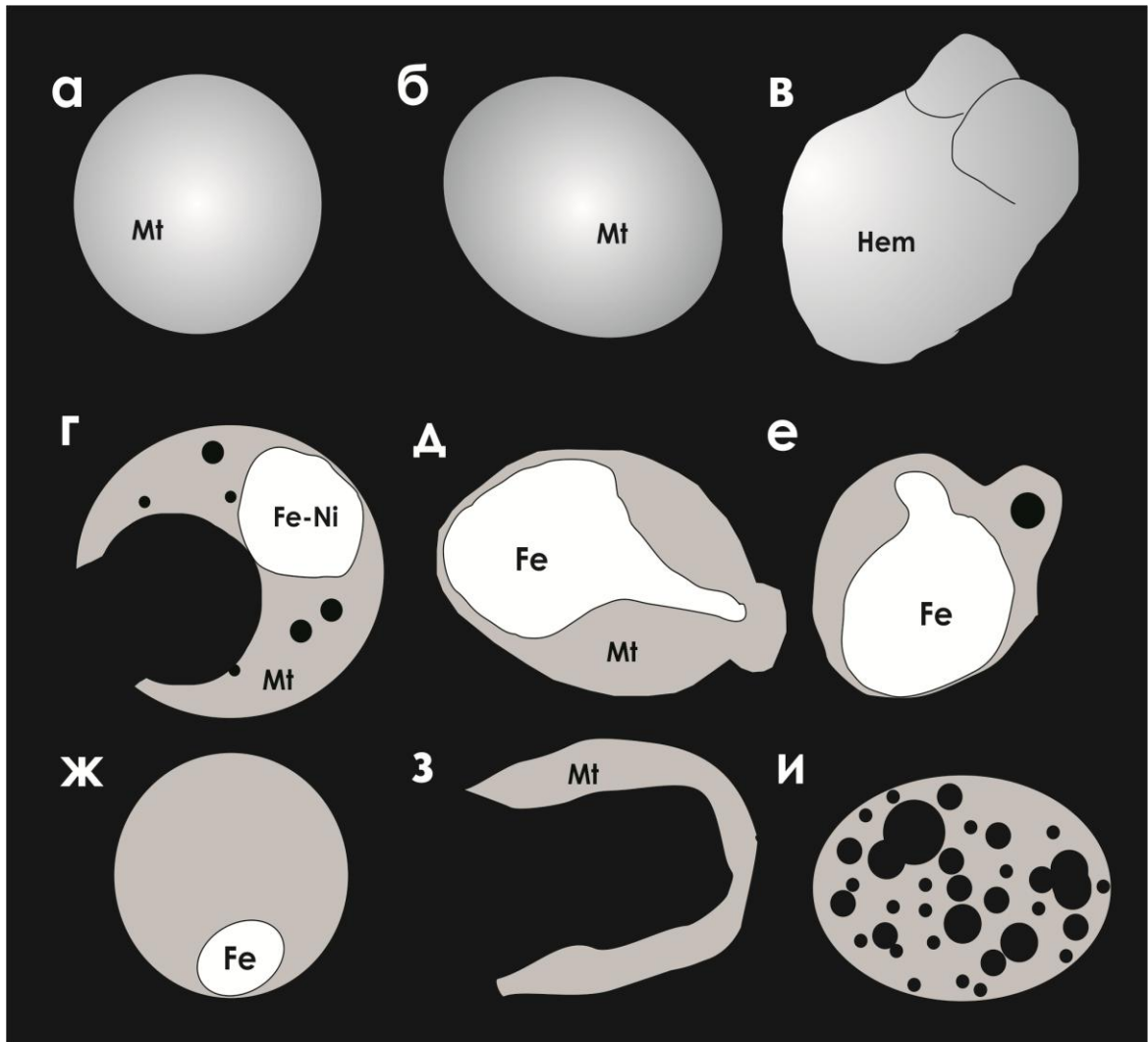


Рисунок 1.10. Формы ММ магматического генезиса

*а-в – поверхность; г-и – в срезе, по [27, 103]*

Минеральный состав ММ из вулканических пород представлен самородным железом и различными оксидами: вюстит ( $\text{FeO}$ ), магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), манганоильменит ( $(\text{Fe},\text{Mn})\text{TiO}_3$ ), марганцевая ульвошпинель ( $(\text{Fe},\text{Mn})_2\text{TiO}_4$ ), армоколлит ( $\text{FeMgTi}_4\text{O}_{10}$ ), ильменит-пирофанит ( $\text{FeTiO}_3$ -  $\text{MnTiO}_3$ ) и титанистый гранат шорломит ( $\text{Ca}_3(\text{Fe},\text{Ti})_2(\text{Si},\text{Ti})_3\text{O}_{12}$ ) [27, 35, 78, 100, 103].

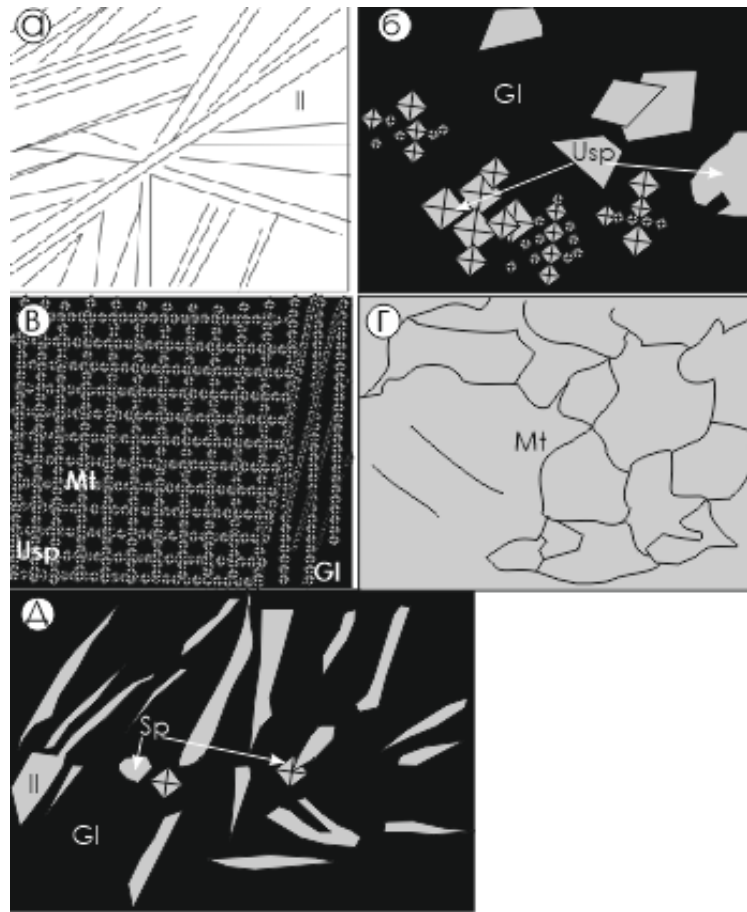


Рисунок 1.11. Структуры магматических ММ, по [103]

*а – сноповидная; б, в – скелетная; г – мозаичная; д – структура раскristализации*

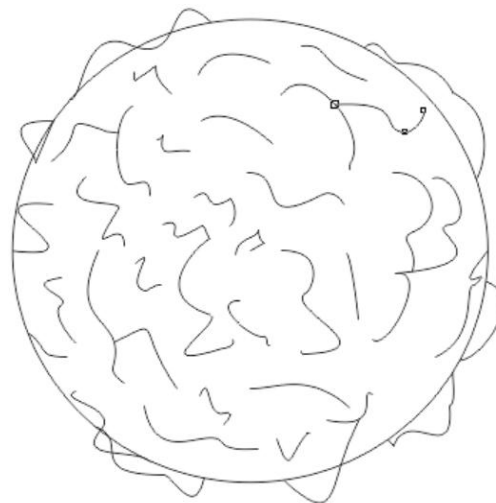


Рисунок 1.12. Поверхностная бугристая структура ММ, по [79, 100]

Ряд исследователей [81, 82] ММ из вулканических образований объединяет в 3 минеральные парагенетические ассоциации: 1) *магнетитовую*  $\text{Fe}_8 (\text{Fe}_{14.80-15.84} \text{Ti}_{0.16-0.48} \text{Al}_{0-0.72})_{16} \text{O}_{32}$  (магнетит 90–91, ульвит 2–6, купрошпинель 0–7; яacobсит 0–2); 2) *купрошпинель-магнезиоферрит-магнетитовую*  $(\text{Fe}_{5.76-6.96} \text{Mg}_{0.80-1.04} \text{Cu}_{0.24-0.96} \text{Mn}_{0-0.24})_8 (\text{Fe}_{15.76-16} \text{Ti}_{0-0.24})_{16} \text{O}_{32}$  (магнетит 72–87, магнезиоферрит 10–13, купрошпинель 3–12, яacobсит 0–3); 3) *ульвит-магнезиоферрит-магнетитовую*  $(\text{Fe}_{5.68-6.56} \text{Mg}_{1.20-1.84} \text{Cu}_{0-0.32} \text{Mn}_{0.16-0.24})_8 (\text{Fe}_{14.88} \text{Ti}_{0.48-1.12} \text{Al}_{0-0.64})_{16} \text{O}_{32}$ .

Средний химический состав ММ из магматических эксплозивных образований следующий (вес. %): Fe – 31, Si – 15, Al – 7, Ca – 3, Ti – 7 [200, 201].

Т. А. Mutch установил (1964), что существенной минеральной фазой вулканических пеплов является ильменит, и поэтому в ММ магматического происхождения присутствует титан. Иногда содержание последнего достигает 36 % [200, 201], что подтверждается и современными исследователями [45, 100, 103].

**Биогенная гипотеза.** Биогенные микрочастицы сфероидной формы связаны с деятельностью современных и древних бактерий (Рисунок 1.13). Например, субсферичные железистые микрочастицы размером до 10 мкм часто обнаруживаются во внутренней части костей тетрапод [139, 245, 278], почвенном покрове [32, 33], джеспилитах [6, 91], бокситах [20] и других осадочных и метаморфических породах. Форма данных микрочастиц, чаще всего, полиэдрическая и глобулярная, редко – сферическая (Рисунок 1.13). Главным признаком биогенных ММ являются их массовые скопления на отдельных участках. Отличительным критерием биогенных микросферул выступает отсутствие микроструктур закалки, что свидетельствует об их образовании в приповерхностных земных условиях при температурах значительно ниже  $1300^{\circ}\text{C}$  [20, 33, 91, 139, 278].

Минеральный состав биогенных ММ достаточно разнообразен, представлен ферри- и парамагнетиками: гематит, лимонит, мартит, магнетит, сидерит [6, 20, 33, 91, 139]. Поэтому, несмотря на сходство минерального состава с ММ другого происхождения, вышеуказанные признаки биогенных ММ позволяют нам не рассматривать данные объекты в настоящей работе.

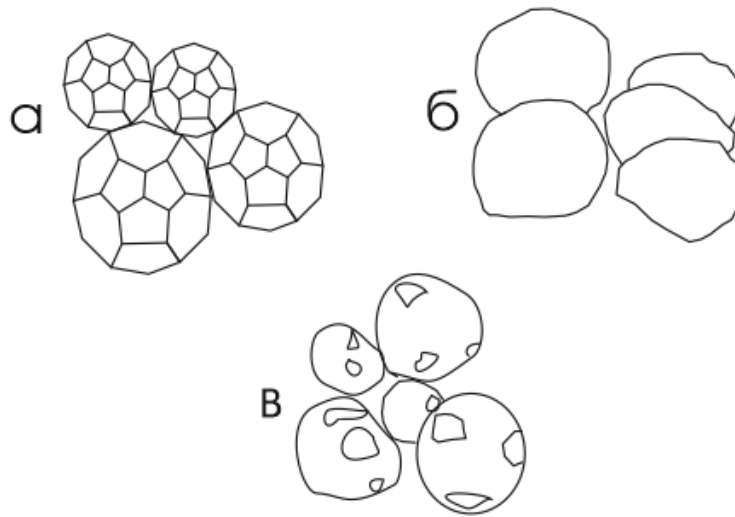


Рисунок 1.13. Формы биогенных железистых сфероидов  
*a – полиэдрическая; б, в – глобулярная, по [6, 20, 33, 91, 139, 278]*

**Техногенная гипотеза.** ММ могут являться продуктом различных видов промышленной деятельности человека, связанных с разнообразными высокотемпературными технологическими процессами: сварочное и литейное производство, выбросы металлургических заводов, сжигание угля на тепловых электростанциях, транспорт и др. [23, 73, 98, 162, 176 и др.]. Техногенные ММ являются продуктом распада исходного расплава на мельчайшие капли, приобретающие сферическую форму под действием сил поверхностного натяжения. Резкое понижение температуры приводит к их кристаллизации и образованию разнообразных твердых композиций, включающих магнетит, маггемит, гематит, магнезиоферрит, яacobсит, ферриты Са, стекло [38, 46, 49, 73, 98, 107 и др.].

Специальное изучение морфологии техногенных ММ показало [282], что значительная их часть (до 25 %) обладает сферичностью, остальные встречаются в виде глобулей и сдвоенных (слипшихся) агрегатов. По соотношению стекла и рудной фазы [13, 98, 107, 292] среди техногенных ММ различают рудные и рудно-силикатные сферулы, обладающие скелетной и мозаичной структурой (Рисунок 1.14), которые, в свою очередь, очень похожи на микрометеоритные ММ. Нередко среди техногенных ММ обнаруживаются сферулы с бугристой поверхностной структурой [73].

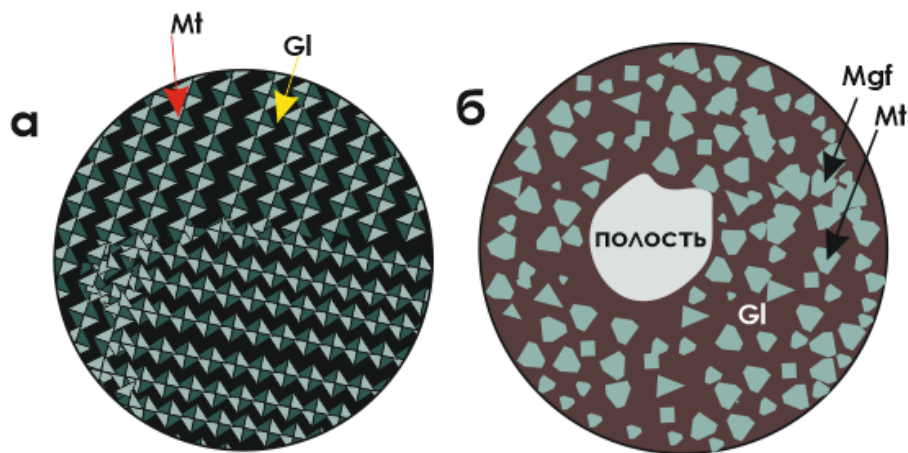


Рисунок 1.14. Микроструктуры техногенных ММ

*а – скелетная; б – мозаичная*

Размеры техногенных микросферул определяются плотностью расплава и подъемной силой потока, поэтому максимальным (до 500 мкм) диаметром обладают легкие (полые) силикатные разности, а минимальным (10–30 мкм) – тяжелые рудные [98]. Если силы поверхностного натяжения оказываются меньше внутреннего давления газа, то сферулу разрывает. Если жидкость до момента заделки успевает принять сферическую форму, то образуются сплошные микросферулы диаметром до 30 мкм. Рудно-силикатные ММ обладают низкой вязкостью, а движение газа в таких средах сходно его продвижению через металлургический шлак. Поэтому сохранение газовых пузырей в микросферулах данного типа происходит значительно реже [38, 107].

Химический состав техногенных ММ разнообразен, что связано с широким диапазоном исходного минерального сырья и различными технологиями его переработки. В ходе экспериментальных исследований установлено, что наиболее вариабельны по минеральному составу высокожелезистые расплавы (1000–1300<sup>0</sup>С). Источниками железного расплава здесь могут быть железистые карбонаты, загрязненные пелитовым материалом, различные эвтектические жидкости и ликвационные расплавы [107]. Большинство техногенных рудных ММ [38, 46, 107] сложено железистыми шпинелидами (ферритами) и силикатным

стеклом, что сближает их с космогенными и вулканическими ММ [81, 82, 212]. Изучение техногенных микросферул из зол уноса угольных теплоэлектростанций показало [107], что капли расплавов, которые формируют микросферулы, образованы в процессе плавления отдельных микрочастиц минеральных компонентов органического топлива.

Степень «загрязнения» техногенными ММ природных объектов зависит от расстояния до населенных пунктов и промышленных объектов. Размеры техногенных и вулканических ММ близки: чем дальше объект-планшет удален от источника индустриальной пыли, тем меньше размер обнаруживаемых ММ [269]. Например, в окрестностях обсерватории Йельского университета на площадь 1 см<sup>2</sup> выпадало до 100 шариков диаметром более 5 мкм за 1 день [200, 201]. В выходные дни количество микросферул уменьшалось в 2 раза, а на расстоянии 15–20 км – в 4 раза. Таким образом, было доказано, что вдали от промышленно-урбанизированных районов загрязнение возможно только мелкими техногенными микросферулами.

Между техногенными и космогенными ММ существуют некоторые отличительные признаки. Большинство техногенных ММ представлено рудно-силикатными сферулами с преобладанием рудной фазы. Космогенные ММ практически не имеют силикатную матрицу, поэтому зарубежные исследователи относят их к высокожелезистому типу [164, 292]. В техногенных ММ отсутствуют четко выраженное ядро и крупные субсферические пустоты внутри сферулы, что характерно для МАС. Некоторыми исследователями в техногенных ММ отмечается наличие нескольких минеральных фаз, представленных ферритами [98], тогда как состав космических ММ чаще всего примитивный одноминеральный (магнетит и/или вюстит). Кроме того, количество обнаруживаемых ММ в техногенных образованиях обычно превышает находки ММ космического происхождения в 100 и более раз.

С учетом анализа данных предшествующих исследователей ММ, нами составлена таблица диагностических критериев для космогенных, магматических и техногенных ММ (Таблица 1.1).



Таблица 1.1 – Диагностические критерии разделения ММ по данным предшествующих исследователей

Критерии		Космическая группа			Магматическая группа	Техногенная группа
		Микрометеориты	МАС	Импактные	Эксплозивные	Золы уноса, металлургические шлаки
Места находок		Древние осадочные породы, места, удаленные от техногенного воздействия (лед и снег Арктики/Антарктики, пустыни, торфяники)	Кора плавления метеорита, осадки по траектории его падения и вблизи от места падения, древние осадочные породы	Импактиты, осадки вблизи ударного кратера	Вулканические, субвулканические, плутонические тела	Урбанизированные территории, терриконы, отвалы, хвостохранилища и др.
Встречаемость в пробе 100 г, шт.		$10^0 - n 10^2$				$10^2 - 10^5$
Внешние критерии	Морфология	Сферическая	Сферическая, субсферическая, каплевидная, гроздевидная	Сферическая, субсферическая	Субсферическая, каплевидная, гроздевидная	Сферическая, субсферическая
	Диаметр, мкм	5–100	более 100			10–1000

Критерий		Космическая группа			Магматическая группа	Техногенная группа
		Микрометеориты	МАС	Импактные	Эксплозивные	Золуноса, металлургические шлаки
Внешние критерии	Структура	Дендритовая, скелетная	Мозаичная	Мозаичная	Скелетная, мозаичная, сноповидная, бугристая, раскристаллизации	Скелетная, мозаичная, бугристая
Внутренние критерии	Ядро	Отсутствие ядра	Отсутствует или присутствует Fe-Ni ядро (до 10 %)	Отсутствие ядра	Отсутствует или присутствует ядро из самородного Fe, Fe-Ni, Fe-Cu	Отсутствие ядра
Минеральный состав		Магнетит, вюстит	Магнетит, вюстит, тэнит, камасит, троилит	Магнетит, шрейберзит, троилит, камасит	Магнетит, ульвит, купрошпинель; яkobсит, магнезиоферрит, стекло, шорломит	Магнетит, вюстит, маггемит, гематит, магнезиоферрит, яkobсит, ферриты Ca, стекло
Химические примеси		Содержание NiO до 1 %	Отсутствие NiO в поверхностной корке; редко NiO до 3 %	Нет данных	Содержание TiO <sub>2</sub> до 24 %	Разнообразный набор примесей

Примечание: при составлении Таблицы использованы материалы из [3, 26, 53, 72, 98–100, 103, 104, 130, 206, 295 и др.]

**Выводы.** Из анализа проведенных за полтора века исследований ММ следует, что до сих пор сохраняются нерешенные вопросы их объективной идентификации. К настоящему времени по условиям происхождения ММ можно разделить на 3 группы (Таблица 1.1): космогенные, магматические и техногенные. Данные группы, несмотря на отдельные общие признаки, обнаруживают и явные различия, что позволяет провести их классификацию. Космогенные ММ делятся на МАС, микрометеориты и импактные сферулы. Среди техногенных ММ выделяются 2 подгруппы: металлургические шлаки и золы уноса ТЭС и ГРЭС. Отметим, что классификация техногенных ММ будет существенно дополняться из-за увеличения и расширения техногенного пресса на природную среду. Среди ММ магматической природы наиболее распространены ММ вулканического (эксплозивного) происхождения, поэтому именно они чаще всего становятся предметом изучения. Некоторые из подобных ММ могут переноситься на значительные (более 1000 км) расстояния, также как космогенные и техногенные ММ [27, 34, 99, 100, 103, 104, 209]. Исходя из этого, в работе именно вулканические ММ использованы для сравнения типоморфных характеристик с ММ из осадочных отложений, импактитов и техногенных образований.

Таким образом, современные физико-химические методы и уровень развития лабораторной техники позволяют преимущественно на количественном уровне фиксировать диагностические критерии для создания генетической классификации ММ. Широкое внедрение в данную область исследования в XXI веке электронной микроскопии высокого разрешения, рентгеновской микротомографии, рамановской спектроскопии и других методов способствует комплексному и всестороннему исследованию таких необычных микрообъектов как магнитные микросферулы, приближая нас к решению вопросов их идентификации и происхождения.

## 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ МАГНИТНЫХ МИКРОСФЕРУЛ

Раздел посвящен методике и методам, использованным при проведении диссертационного исследования. В ходе достаточно продолжительного (2013–2021 гг.) изучения автором ММ из осадочных пород, импактитов, техногенных объектов, а также учитывая доступность и распространенность методов высокого разрешения, разработан алгоритм лабораторных исследований для данных микрообъектов (Рисунок 2.1). Ниже рассмотрены основные физико-химические методы высокого разрешения (высокой локальности) и некоторые оригинальные подходы по обнаружению, извлечению и изучению ММ.

В настоящей работе исследовались природные образцы пород, отобранные из естественных обнажений, керн скважин, а также техногенные образования (металлургические шлаки, золы уноса и сварочные шлаки). Для предварительного обнаружения в отобранных природных образцах ММ нами применен метод рентгеновской компьютерной томографии.

**Метод рентгеновской компьютерной микротомографии (микро-КТ)** проводился для выявления микровключений (как объектов предполагаемых ММ) с высоким коэффициентом поглощения рентгеновского излучения. ММ, в основном, состоят из железоксидных минералов (см. раздел 1) и поэтому, согласно базе данных «MuCalcTool» [256], данный коэффициент у них значительно выше (Рисунок 2.2), чем вмещающих их осадочных пород. Все это позволяет использовать для целенаправленного поиска ММ метод микро-КТ, который фиксирует включения с высоким рентгенопоглощением в первичном (нераздробленном, нерастворенном) образце *in situ* до начала специальной обработки по извлечению ММ из вмещающей породы.

Микро-КТ является неразрушающим методом для изучения внутреннего строения микрообъектов, что особенно важно при необходимости сохранения



## Методы изучения внутренней и внешней частей ММ

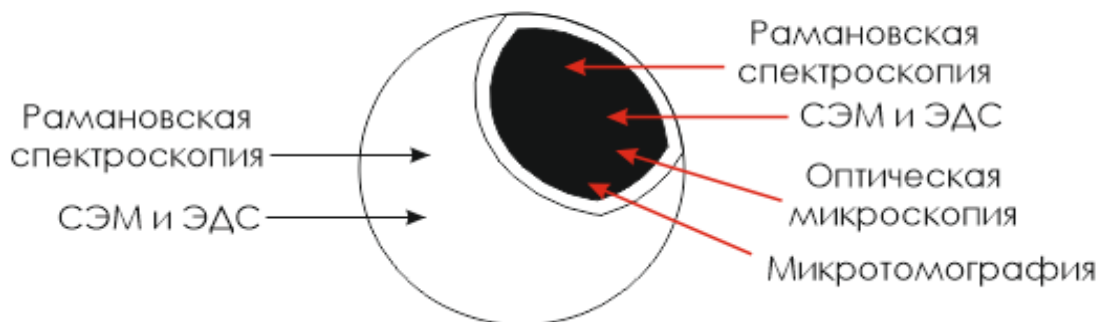


Рисунок 2.1. Методика исследования ММ

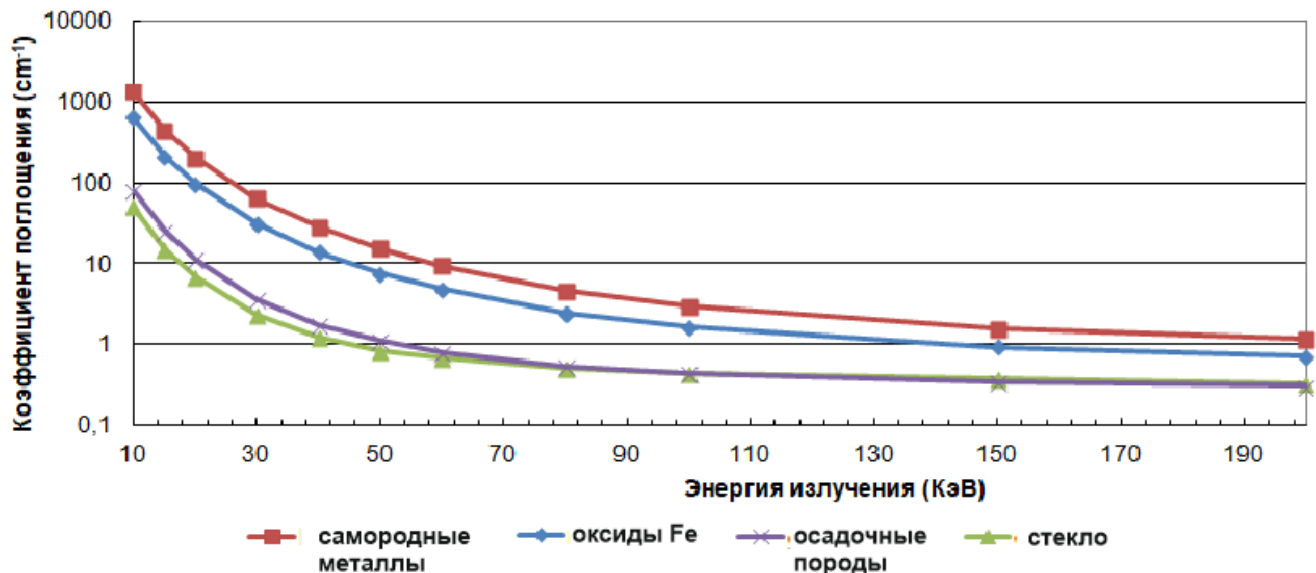


Рисунок 2.2. Зависимость коэффициента поглощения от энергии излучения для разных веществ [256]

редкого или уникального образца крайне малого объема для его дальнейшего изучения другими методами. Микро-КТ позволяет не только визуализировать внутреннее строение образца, но также определить форму, размеры микровключений, количество пустот и дифференциацию вещества внутри ММ. Насколько известно автору, ранее метод микро-КТ не использовался российскими исследователями при изучении ММ, и в единичных случаях применялся за рубежом [153, 166, 209].

В работе для поиска ММ в образце породы, их визуализации и изучения внутреннего строения использован рентгеновский компьютерный томограф Phoenix V|tome|X S 240. Пространственное разрешение при съемке на данном томографе зависит от размера образца и составляет 1/1000 от максимального размера области сканирования. С учетом очень малого диаметра некоторых ММ (1–15 мкм), размер исследуемых образцов пород с потенциальными рентгеноплотными объектами составлял более 10 см.

Для создания 3D образов внутреннего строения объекта применялась компьютерная обработка массивов данных, состоящих из множества его 2D теневых рентгеновских проекций с использованием программного обеспечения `data|x reconstruction`. 3D модели с помощью программного обеспечения VG

Studio MAX 2.1 и Avizo Fire 7.1. Микро-КТ проводилась при участии автора в Институте геологии и нефтегазовых технологий КФУ, оператор Е. О. Стаценко.

Далее для извлечения ММ применялось растворение или истирание пород. Так, соли растворялись в воде, карбонаты – в 5–10 % растворе уксусной кислоты, терригенные породы и импактиты истирались в агатовой ступке. Выделение магнитной фракции из раздробленных, рыхлых образцов или нерастворимого остатка проводилось с помощью **магнитной сепарации**. Для этого нами первоначально с учетом опыта предшественников применялся постоянный (ферритовый) магнит. В дальнейшем последний был заменен на существенно более эффективный редкоземельный (неодимовый) магнит, т. к. сила его притяжения на порядок выше, чем у ферритового магнита, и действует он в пределах небольших расстояний. Например, к неодимовому магниту могут притягиваться объекты с низкой и очень низкой магнитной проницаемостью, а также парамагнитные вещества, в частности, самородные металлы. Все это позволило обеспечить максимальное извлечение магнитных частиц из исследуемого образца.

Магнитная сепарация всех исследованных образцов выполнялась автором в следующей последовательности. Порошкообразный образец помещается в пластиковый стакан и заливается дистиллированной водой. Неодимовый магнит размещается в латексном напальчнике, который предварительно отмывается в ультразвуковой ванне и далее прикрепляется к внутренней стороне стакана. Стакан плотно закрывается и взбалтывается, в результате чего на поверхности напальчника собирается магнитная фракция. Для образцов калийно-магниевых солей, которые помещались в стеклянный стакан и растворялись водой, к напальчику привязывали леску, и магнитная тяжелая фракция собиралась со дна стакана. Отделение фракции от магнита происходит посредством аккуратного извлечения магнита из напальчника. Процедура взбалтывания и собирания магнитных частиц повторяется несколько раз до полного извлечения магнитных минералов и соединений. Кроме ММ, собирались минеральные микрочастицы неправильной формы: ферромагнетики (тэнит, камасит, аваруйт и др.),

ферромагнетики (вюстит, магнетит, ферриты и др.), антиферромагнетики (гематит) и парамагнетики (пирит, сидерит) [66, 92].

Отбор ММ, ферро- и ферромагнетиков неправильной формы из магнитной фракции осуществлялся с помощью бинокулярного микроскопа ЛОМО и стальной препарировальной иглы (Рисунок 2.3). Увеличение бинокуляра (до 160×) позволяет извлечь ММ с диаметром более 20 мкм и изучить их основные параметры – форму, блеск, цвет, структуру, текстуру и др. ММ с диаметром менее 20 мкм обнаруживались в магнитной фракции при помощи СЭМ.

Отметим, что определение минерального и химического состава ММ традиционными рентгенофазовым и масс-спектрометрическим методами невозможно в силу недостаточности материала (минимально допустимая навеска) отдельной микросферулы для проведения данных видов анализов. Поэтому детальное исследование ММ (морфология поверхности, определение минерального и химического состава, внутреннее строение и др.) опиралось на применение физико-химических методов высокого разрешения: рамановская спектроскопия, СЭМ, ЭДС, микро-КТ (см. Рисунок 2.1).

**Рамановская спектроскопия (спектроскопия комбинационного рассеяния)** применялась для идентификации минеральных фаз в отдельных точках ММ и минералогического картирования поверхности их полированных срезов.

Минералы, состоящие из одной молекулы (самородные металлы), не имеют активных мод для рамановской спектроскопии, и поэтому для подобных минералов лучше использовать рентгенофазовый анализ [265]. Однако учитывая невозможность проведения рентгенофазовых исследований, минеральный состав ММ в настоящей работе изучался с применением рамановского спектрометра inViaQontor (Renishaw), оснащенного поляризационным микроскопом Leica dm2700m (увеличение до 1000×). Рамановские спектры возбуждались твердотельным Nd:YAG лазером (532 нм), объектив 20×. Проводилась калибровка спектральных линий и положение пучка.



Магнитная индукция, Тл			
$1 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3}$		0,4	1,1-1,3
Стальная игла		Ферритовый магнит	Неодимовый магнит
Магнитная восприимчивость, ед.СИ			
25	1	25	$10^{-10}$
Магнитные минералы ММ Ферромагнетики, ферритмагнетики		Ферромагнетики, ферритмагнетики, антиферромагнетики, парамагнетики	

Рисунок 2.3. Физические параметры магнитной сепарации

лазера на кремниевом стандарте. Для идентификации минеральных фаз использовалась встроенная библиотека программного обеспечения Renishaw, программа «CrystalSleuth» и открытая база рамановских спектров RRUFF [299]. Собранные в базе RRUFF информация по эталонным минералам служит стандартом для определения минералов на Земле и во внеземных объектах. Исследования по рамановской спектроскопии проводились при участии автора в Институте геологии и нефтегазовых технологий КФУ, оператор А. В. Низамова.

**Сканирующая электронная микроскопия и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия.** Морфология и химический состав поверхности ММ изучались с помощью СЭМ Merlin и Phillips, каждый из которых оснащен SE-детектором и энергодисперсионным спектрометром. Детектор SE позволяет получить топографическую характеристику для изучения морфологии образца. Дополнительно СЭМ Merlin обладает детектором BSE, который информирует о контрасте по минеральной фазе (композиционная характеристика).

Универсальный аналитический комплекс автоэмиссионной сканирующей электронной микроскопии Merlin (Carl Zeiss) оснащен энергодисперсионным спектрометром X-Max (Oxford Instruments). Микроскоп Phillips XL-30 оснащен энергодисперсионным спектрометром ESEM. Измерения проводились инженером

В. В. Воробьевым в Междисциплинарном центре «Аналитическая микроскопия» КФУ (Merlin) и инженером Б. М. Галиуллиным в лаборатории сканирующей микроскопии Института геологии и нефтегазовых технологий КФУ (Phillips) при непосредственном участии автора.

Съемка поверхности ММ велась преимущественно в режиме SE; некоторые образцы снимались в режиме BSE. Для проведения количественного анализа использовался набор эталонов в программах ESEM и Aztec. Элементный анализ проводился при ускоряющем напряжении 15–20 кэВ и рабочем отрезке 10 мм, что позволило избежать минимальных погрешностей. Глубина проникновения зонда составляла 2 мкм.

Дополнительно электронно-микроскопические исследования с энергодисперсионной спектроскопией выполнялись в Геофизической обсерватории «Борок» Института физики Земли РАН (п. Борок) ведущим научным сотрудником к.ф.-м.н. В. А. Цельмовичем с использованием рентгеноспектрального микроанализатора Tescan Vega II. Исследования проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе 0.2 нА, размер луча зонда 0.2 мкм, предел обнаружения 0.1 %.

Для исследования внутреннего строения ММ классифицированы по диаметру на 2 группы: до 50 мкм и более 50 мкм (см. Рисунок 2.1). Подобное разделение обусловлено сложностями при создании полированных срезов мелких ММ с диаметром до 50 мкм. Срезы (шлифы) ММ с диаметром более 50 мкм изготавливались автором путем заливки отдельных микросферул в эпоксидную пашку с последующей полировкой.

Внутренняя морфология и химический состав полированных срезов изучались с применением СЭМ и ЭДС. Кроме получения информации о химическом составе в отдельных точках, проводились геохимические профили через весь шлиф ММ; для отдельных образцов выполнялось площадное элементное картирование. Дополнительные исследования по срезам методами СЭМ и ЭДС проводились в Южно-Уральском ФНЦ минералогии и геоэкологии

УрО РАН (г. Миасс) научным сотрудником И. А. Блиновым на сканирующем микроскопе Tescan Vega III с энергодисперсионным спектрометром.

В полированных срезах ММ минеральный состав изучался с помощью рамановской спектроскопии как в отдельных точках, так и в виде картирования с получением площадного распределения минеральных фаз в шлифе. Дополнительные исследования полированных срезов ММ проводились в Институте геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург) младшим научным сотрудником Е. А. Панкрушиной.

Кроме полированных срезов, для изучения внутреннего строения ММ из осадочных пород и техногенных образований применялся метод микро-КТ, позволяющий визуализировать полости-пустоты, а также дифференциацию минерального вещества ММ (см. Рисунок 2.2).

Для статистической обработки полученных количественных данных ЭДС использовались программы Microsoft Excel и Statistica, для расчета коэффициентов кристаллохимических формул – MineralCalc v.1.1; графические изображения результатов исследования ММ методами микро-КТ, СЭМ и рамановской спектроскопии созданы с помощью программ OriginPro 7.0 и ImageJ. Так, на электронных и томографических снимках ММ с помощью программы ImageJ выделялись пустоты с возможностью автоматического количественного подсчета соотношения пустотного пространства и матрикса, что можно использовать для подсчета площадной доли пор – одного из диагностических признаков внутреннего строения ММ. С помощью программы ImageJ также определялся коэффициент сферичности микросферул  $n = D_{\max} / D_{\min}$ , где  $D_{\max}$  – максимальный диаметр,  $D_{\min}$  – минимальный диаметр. При  $n \approx 1$  форма ММ будет сферичной, а при  $n$  более 1 – субсферичной. Коэффициент сферичности можно использовать как типоморфную характеристику ММ разного происхождения. Данный параметр в работе определяется на электронных снимках ММ, при этом для минимизации погрешности определения коэффициента сферичности перед началом фотографирования находилось положение ММ с

наибольшей площадью. Эталонные электронно-микроскопические снимки использовались автором также для создания атласа ММ (Приложение 1).

С помощью современных физико-химических методов высокого разрешения выполнены следующие объемы лабораторных исследований: 570 электронных изображений ММ, 486 анализов методом ЭДС, 75 рамановских спектров и 35 рентгено-томографических образцов (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Методы и объемы исследований ММ

Изученные объекты	Объем исследованных ММ по методам			
	СЭМ	ЭДС	Рамановская спектроскопия	Микро-КТ
Эвапориты из соляных и гипсовых месторождений	279	177	19	11
Терригенно-карбонатные породы	86	105	10	3
Торф	88	88	-	-
Импактиты	7	9	6	5
Сварочные шлаки	15	21	1	6
Металлургические шлаки	58	52	12	5
Золы уноса	37	34	27	5
<b>Всего</b>	<b>570</b>	<b>486</b>	<b>75</b>	<b>35</b>

**Выводы.** Автором разработан алгоритм методических приемов для изучения ММ. Он включает в себя последовательное использование методов высокого разрешения для изучения внешней и внутренней частей исследуемых объектов и позволяет предварительно обнаружить микросферулы во вмещающих породах с помощью рентгеновской компьютерной микротомографии. Поэтому совместное использование традиционных и современных методов позволяет получить наиболее комплексную и достоверную информацию об объектах диссертационного исследования – магнитных микросферулах.

### 3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами настоящего исследования являются ММ, извлеченные автором из осадочных пород, импактитов и техногенных образований на севере Евразии в пределах Уральской складчатой системы, Восточно-Европейской (ВЕП), Западно-Европейской и Сибирской платформ (Таблица 3.1, Рисунок 3.1).

Таблица 3.1 – Объекты исследований ММ

Объект исследования	Количество изученных	
	образцов	микросферул
Скважина, Усть-Черемшанский прогиб, Республика Татарстан	12	23
Разрез Усолка, Предуральский краевой прогиб, Республика Башкортостан	70	54
Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей, Пермский край	40	87
Камско-Устьинское месторождение гипса, Республика Татарстан	17	41
Байматское месторождение гипса, Республика Татарстан	12	124
Калининградско-Гданьское месторождение калийно-магниевых солей, Калининградская область	53	27
Скважина, Прикаспийская впадина, Казахстан	50	9
Кратер Попигай, Красноярский край	2	2
Кратер Рис, Германия	1	5
Современные болотные отложения, Московская синеклиза, Ярославская область	1	88
Сварочные шлаки	1	более 100
Среднеуральский медеплавильный завод, Свердловская область	1	38
Кировградский медеплавильный комбинат, Свердловская область	1	более 100
Нижнетуринская ГРЭС, Свердловская область	1	более 100

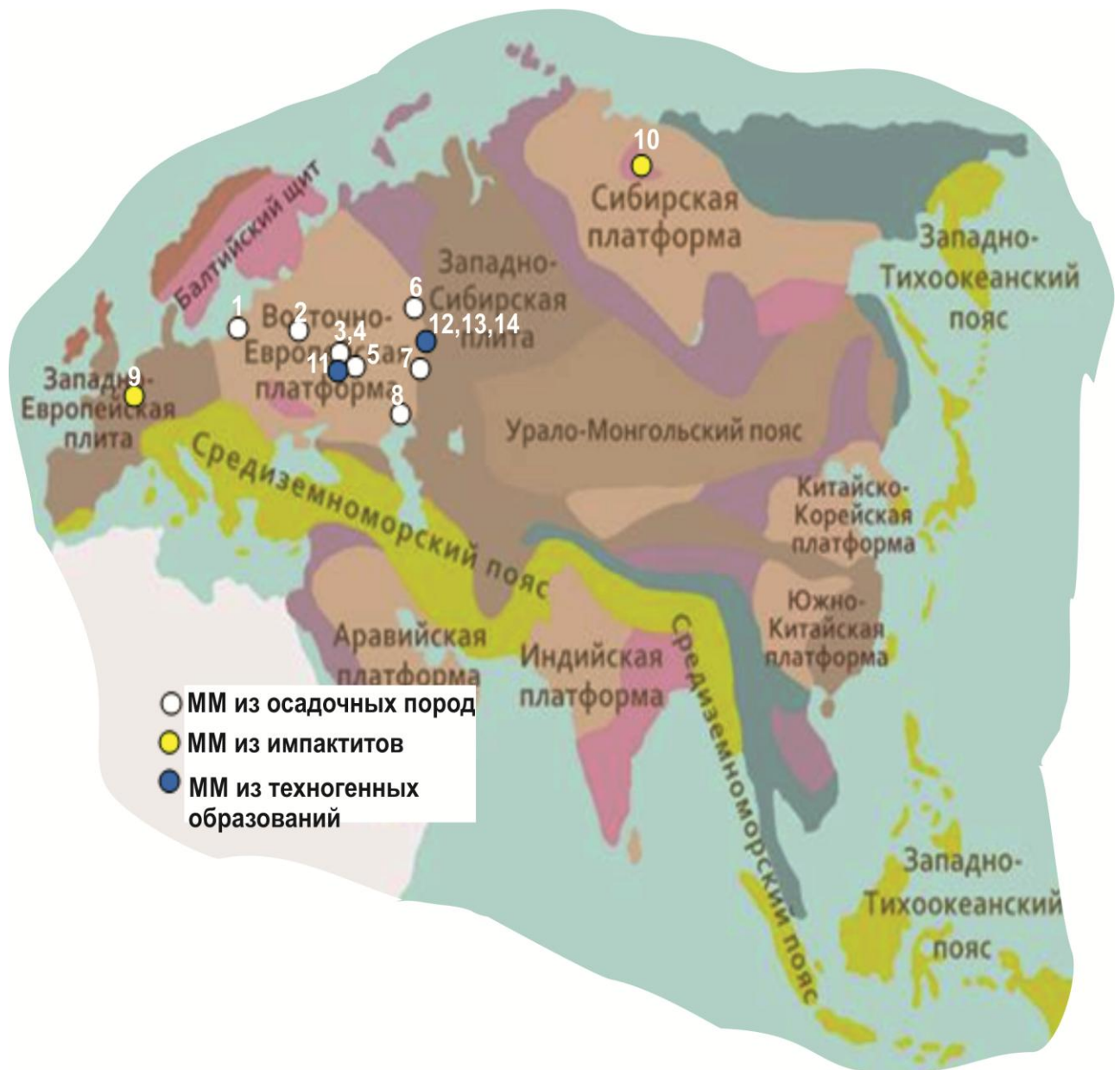


Рисунок 3.1. Объекты исследования

1-8 – ММ из осадочных пород: 1 – Калининградско-Гданьское месторождение калийно-магниевых солей; 2 – Обуховское болото (торф); 3, 4 – Камско-Устьинское и Байматское месторождения гипса, 5 – Усть-Черемшанский прогиб; 6 – Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей; 7 – разрез Усолка; 8 – Прикаспийская впадина.

9–10 – ММ из импактитов: 9 – кратер Рис; 10 – кратер Попигаи.

11–14 – ММ из техногенных образований: 11 – сварочные шлаки; 12 – золы уноса Нижнетуриной ТЭС; 13 – шлаки Среднеуральского медеплавильного завода; 14 – шлаки Кировградского медеплавильного комбината

### 3.1. Магнитные микросферулы из осадочных пород

Исследованы ММ из разнофациальных (морские, континентальные и переходные) образований ВЕП и Предуральского прогиба (Рисунок 3.1). На востоке ВЕП в пределах Волго-Уральской антеклизы изучены среднепермские эвапориты (гипсы, доломиты) Камско-Устьинского и Байматского месторождений гипса, каменноугольные известняки Усть-Черемшанского прогиба, расположенные на территории Республики Татарстан. В восточной части Балтийской синеклизы (запад ВЕП, Калининградская область) ММ обнаружены в верхнепермских соленосных толщах. На юго-востоке ВЕП исследованы неогеновые, пермские и каменноугольные терригенно-карбонатные породы Прикаспийской впадины (Республика Казахстан). В Предуральском прогибе изучены нижнепермские эвапориты Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (Пермский край) и верхнекаменноугольные терригенно-карбонатные породы разреза Усолка (Республика Башкортостан). В южной части Московской синеклизы ВЕП (Ярославская область) изучены болотные отложения голоцена.

В *Усть-Черемшанском прогибе* из керна скважины 33 отобраны 12 образцов известняков московского и гжельского ярусов (Рисунок 3.2). Образцы для исследований предоставлены доцентом кафедры палеонтологии и стратиграфии КФУ Г. М. Сунгатуллиной.

*Разрез Усолка* расположен в осевой части на юге Предуральского прогиба (Рисунок 3.3) и предлагается в качестве эталонного стратиграфического объекта (GSSP) для нижних границ касимовского и гжельского ярусов каменноугольной системы. Отложения разреза Усолка относятся к флишевым образованиям и представлены ритмично чередующимися карбонатными, терригенными и кремнистыми отложениями с прослоями туфов. Всего отобрано и обработано 70 образцов в интервале от верхов московского яруса и до нижней части гжельского яруса [80]; в 20 образцах обнаружены ММ.

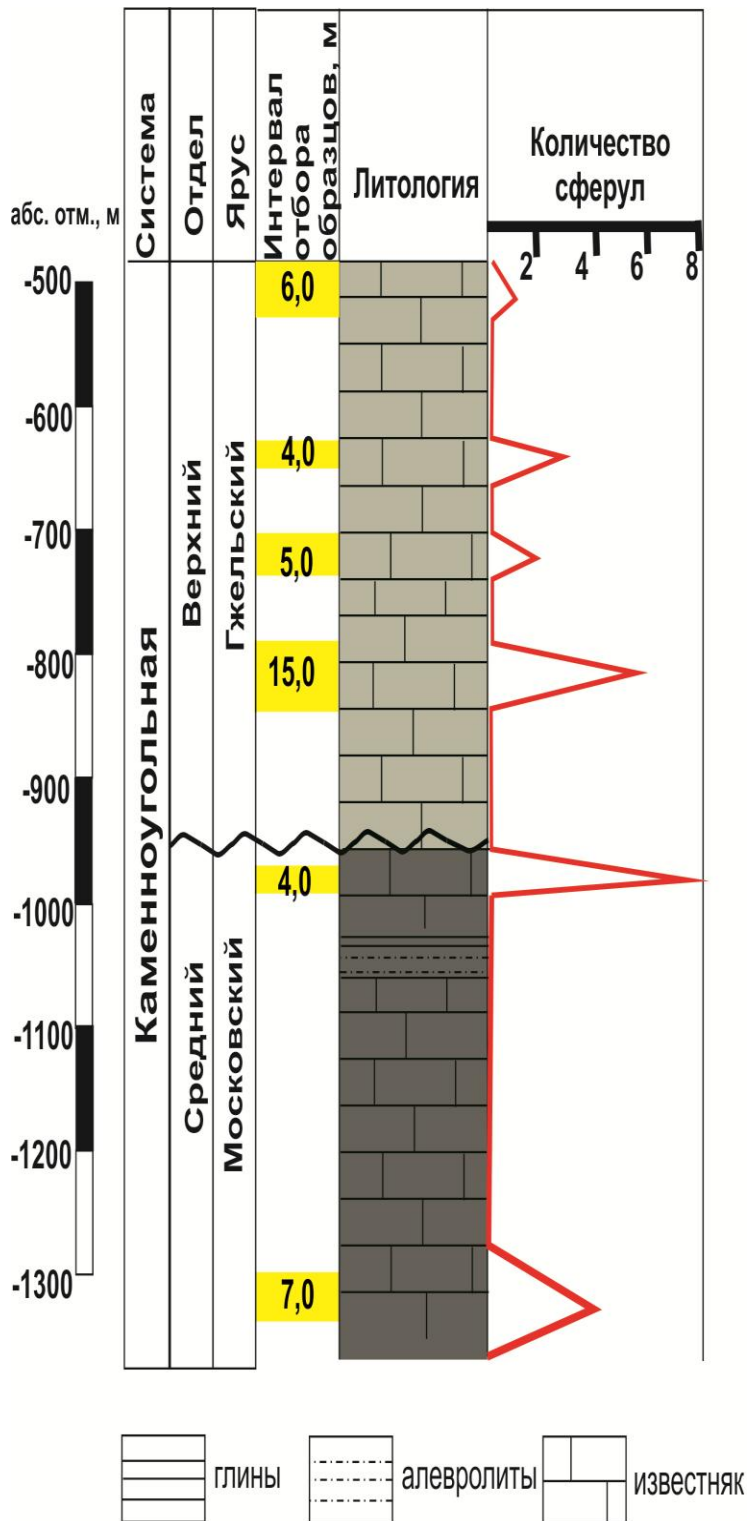


Рисунок 3.2. Каменноугольные отложения скважины № 33 в Усть-Черемшанском прогибе, из

[24, 25]



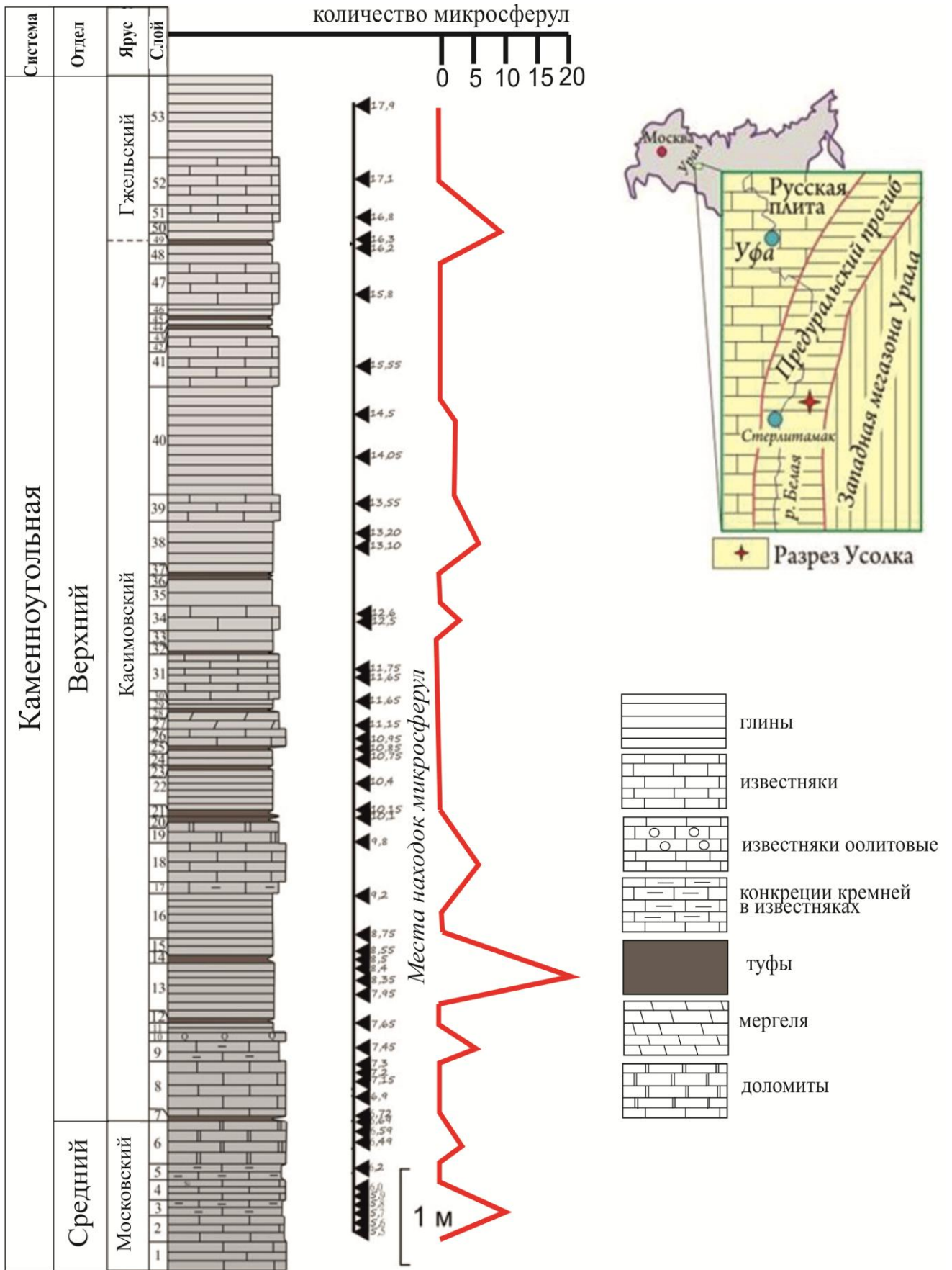
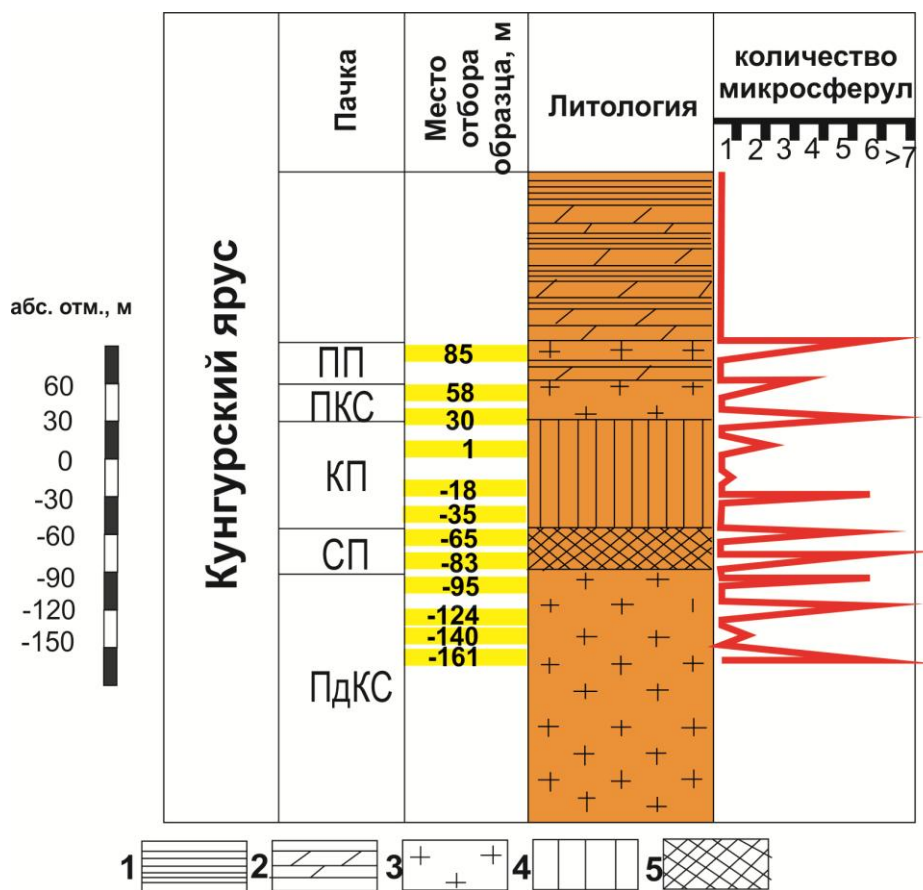


Рисунок 3.3. Разрез Усолка

Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей, расположенное в Соликамской впадине Предуральяского прогиба, является единственной сырьевой базой калийной промышленности России. Разрабатываемое месторождение включает продуктивную соленосную залежь кунгурского яруса, состоящую из 4 пачек (Рисунок 3.4): подстилающей галитовой (ПдКС), сильвинитовой (СП), карналлитовой (КП) и покровной галитовой (ПКС). Для извлечения ММ использованы измельченные (до 1 мм) керновые образцы, представленные каменной солью, сильвинитом и карналлитом. Всего исследовано 40 образцов, из них в 12 образцах обнаружены ММ. Образцы предоставлены главным геотехнологом АО «ЦНИИгеолнеруд» А. К. Вишняковым.



ПдКС - подстилающая галитовая, СП -сильвинитовая  
 КП - карналлитовая, ПКС - покровная галитовая,  
 ПП - перекрывающие породы

Рисунок 3.4. Разрез галогенной формации Соликамской впадины, по [65]

1 – глина; 2 – мергель; 3 – каменная соль; 4 – карналлит; 5 – сильвинит

*Байматское и Камско-Устьинское месторождения гипса* расположены на правом берегу р. Волга в 66–84 км южнее г. Казань (Рисунок 3.5) и включают 2 продуктивных пласта гипса верхнеказанского подъяруса. Мощность нижнего пласта составляет 7–12 м, верхнего – 4–8 м; они разделены доломитовой толщей мощностью до 4 м. Продуктивные пласты гипса включают прожилки и гнезда доломитов; в нижнем пласте встречаются гнезда ангидритов. На Камско-Устьинском месторождении более 100 лет разрабатывается нижний пласт гипса.

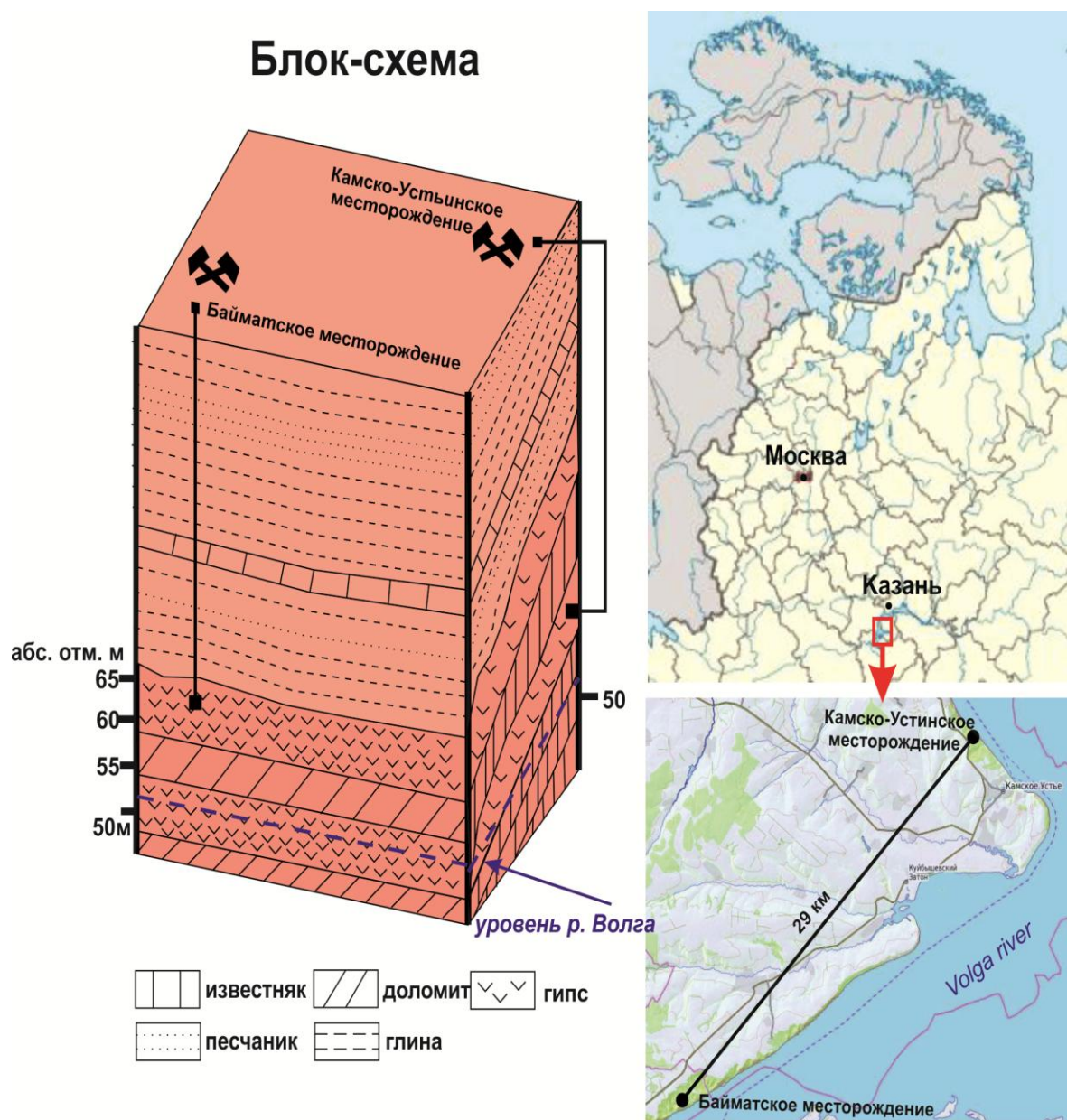
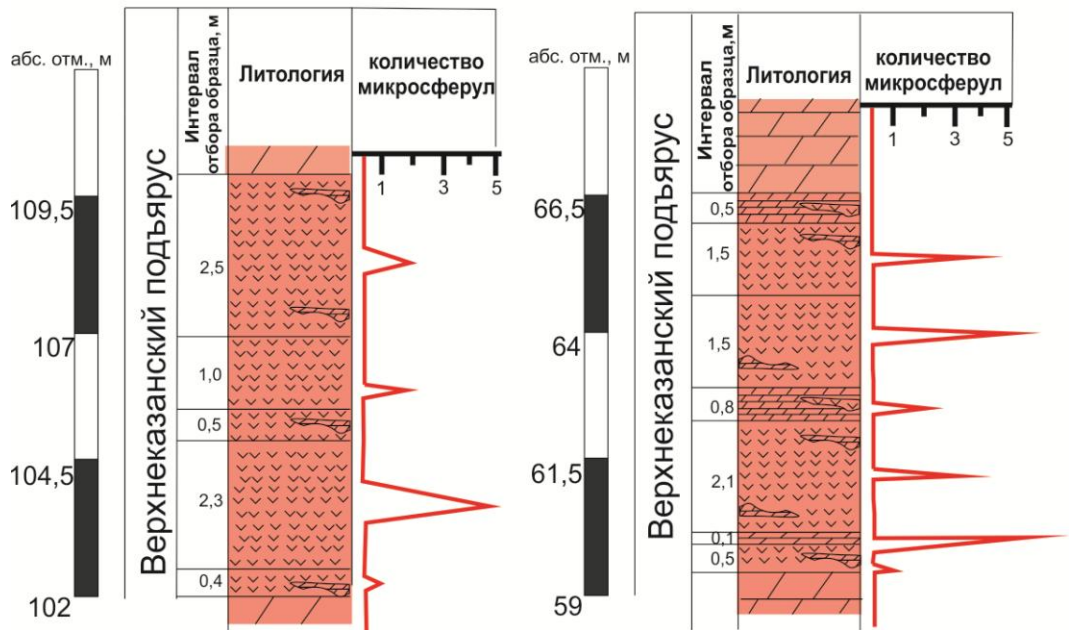


Рисунок 3.5. Месторождения гипса на правом берегу р. Волга

Верхний пласт



Нижний пласт

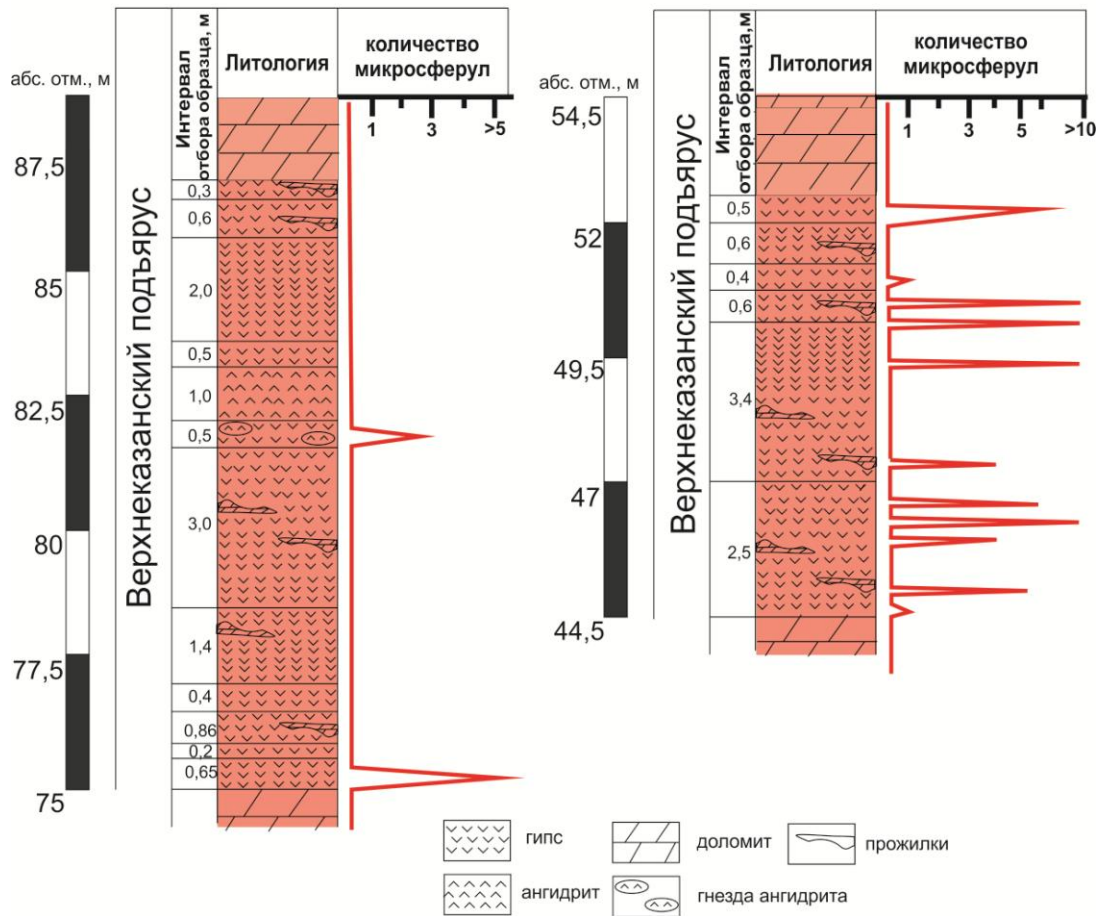


Рисунок 3.6. Литологические разрезы пластов гипса Камско-Устьинского (слева) и Байматского (справа) месторождений

Байматское месторождение в настоящее время является наиболее крупным (по запасам гипсового камня) объектом в России, но не эксплуатируемым. Автором отобраны керновые образцы обоих месторождений и образцы из штольни Камско-Устьинского гипсового рудника. Всего отобрано 29 образцов: 17 образцов из Камско-Устьинского месторождения и 12 образцов из Байматского месторождения (Рисунок 3.6). Керновый материал для исследований предоставлен главным геологом ОАО «Камско-Устьинский гипсовый рудник» Ю. А. Евдокимовым и ведущим геологом ТГРУ ПАО «Татнефть», к. г.-м.н. А. Н. Тюриным.

*Калининградско-Гданьский соленосный бассейн* представлен 53 образцами из эвапоритов. В разрезе калиеносной зоны выделяются 26 слоев, имеющие повышенные содержания калийных, калийно-магниевых и магниевых минералов. Продуктивная зона перекрывается и подстилается каменной солью (Рисунок 3.7). Исследовано 27 образцов, в 9 из них обнаружены ММ. Материал для исследования предоставлен научным сотрудником АО «ЦНИИГеолнеруд» М. С. Вафиной.

В *Прикаспийской впадине* (юго-восток ВЕП) исследован керновый материал, представленный карбонатами турнейского, визейского, башкирского ярусов каменноугольной системы и терригенными отложениями верхней юры, нижнего мела и неогена (Рисунок 3.8). Всего отобрано 50 проб. Образцы для исследований предоставлены доцентом кафедры палеонтологии и стратиграфии КФУ Г. М. Сунгатуллиной.

В *Обуховском болоте* исследованы образцы голоценового торфяника. В верховых торфяных болотах практически отсутствует горизонтальный перенос частиц минерального вещества, т. е. частицы, попавшие на поверхность торфа, фиксируются в месте своего падения. Это позволяет обнаруживать изменения количества минеральных частиц, поступающих на единицу площади земной поверхности во время торфонакопления.

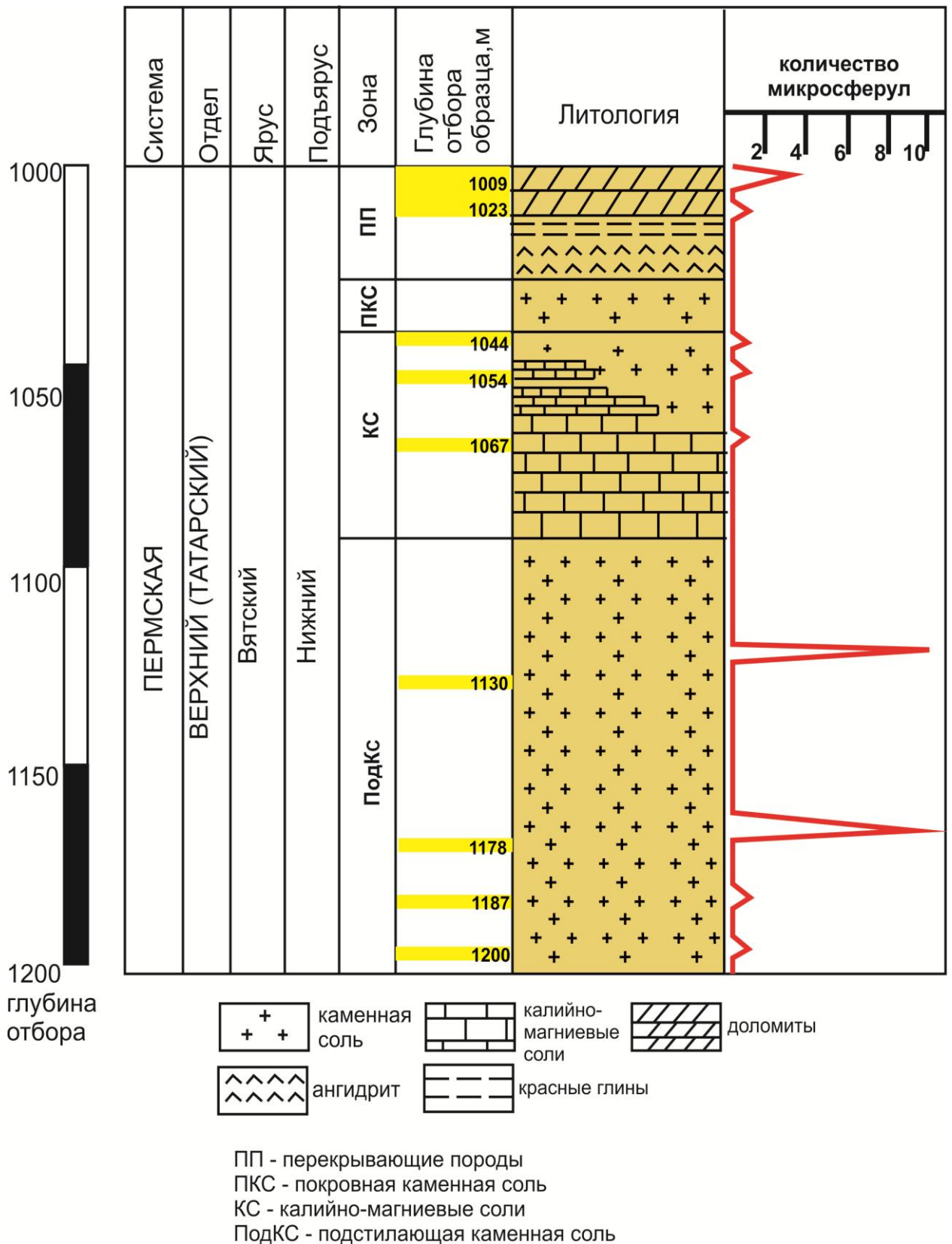


Рисунок 3.7. Литолого-стратиграфический разрез Калининградско-Гданьского соленосного бассейна (из [44, 110]) с уровнями находок ММ

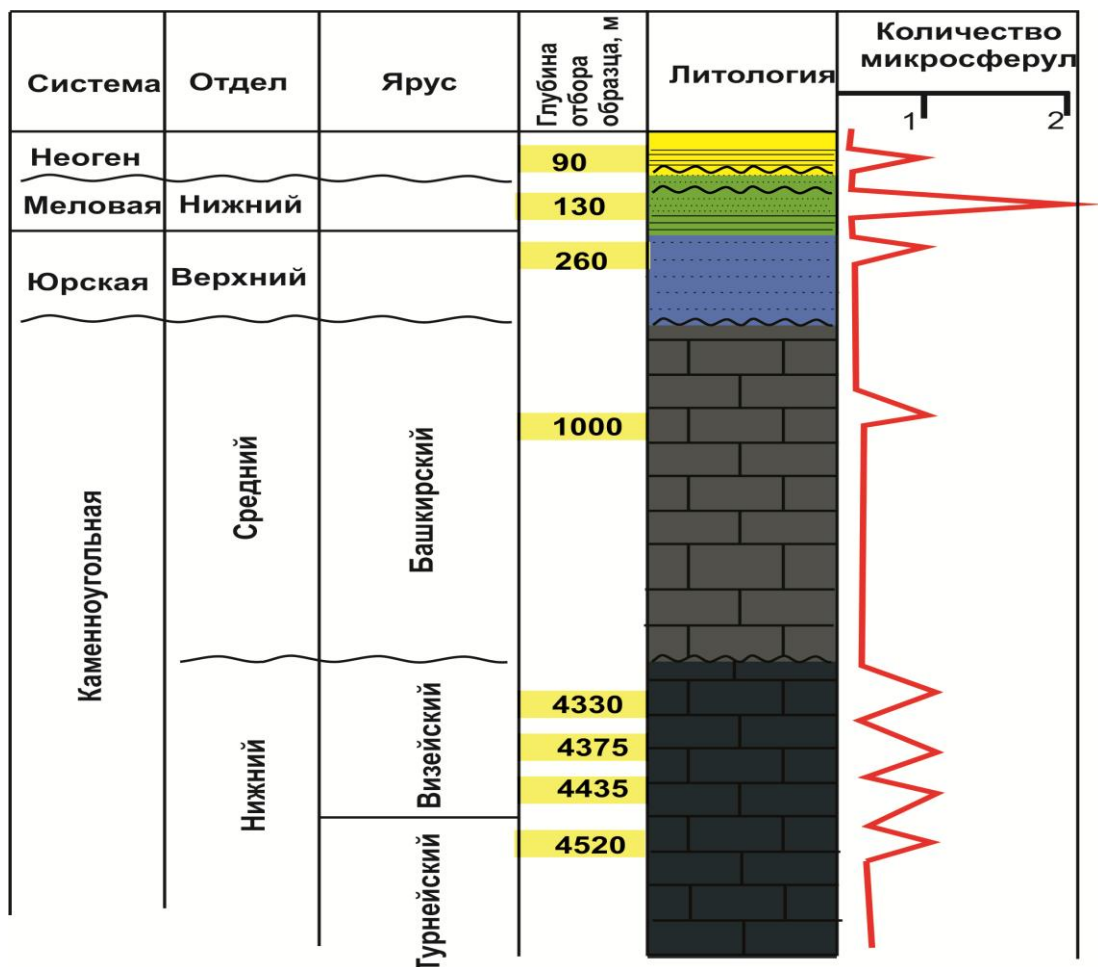


Рисунок 3.8. Стратиграфическая колонка Прикаспийской синеклизы и находки ММ

Скорость торфонакопления в основном составляет порядка 1 мм/год (исследованные торфяные толщи имели мощность в несколько метров). При отборе образцов через 1–2 см возможно изучить короткопериодные (10–100 лет) вариации поступления космогенного вещества, что соизмеримо с точностью абсолютного датирования радиоуглеродным методом. Торфяные толщи верховых болот, включая Обуховское, формировались на водоразделах в тектонически спокойных регионах на большом удалении от зон проявлений эксплозивного магматизма. Поэтому весьма маловероятно попадание в них минералов и ММ, образовавшихся вследствие вулканических извержений или в зонах глубинных разломов. Данные СЭМ- и ЭДС-анализов ММ из торфа Обуховского болота любезно предоставлены ведущим научным сотрудником геофизической обсерватории «Борок» Института физики Земли РАН, к.ф.-м.н. В. А. Цельмовичем.

### 3.2. Магнитные микросферулы из импактитов

Автором исследованы ММ, извлеченные из пород метеоритных кратеров Попигай (Красноярский край) и Рис (Германия).

*Попигайский кратер* образовался в эоцене (~35,7 млн. лет назад) при ударе метеорита в двухслойную мишень, состоящую из кристаллических пород Анабарского щита Сибирской платформы и перекрывающих их осадочных пород (Рисунок 3.9). Попигайская структура заполнена коптогенными (перемещенными продуктами механического ударного разрушения пород) образованиями и продуктами их ударного плавления – импактитами. Среди последних выделяются лавоподобные массивные разности с обломками различных пород и минералов (тагамиты) и обломочные, туфоподобные разности (зювиты). Брекчии, зювиты и тагамиты залегают на ложе из раздробленных пород фундамента и заполняют воронку диаметром 75–80 км и максимальной глубиной 2 км. Среди импактитов наиболее распространены зювиты; их суммарная мощность в центре кратера может превышать 1 км. В верхней части разреза преобладают пепловые и реже – лапиллиевые зювиты с обломками осадочных пород (преобладают) и импактного стекла; в нижней части разреза широко распространены зювиты с преобладанием обломков кристаллических пород и импактного стекла. Зювиты и тагамиты содержат алмазы, образованные в результате твердофазного преобразования графита кристаллических пород мишени. Попигайский метеоритный кратер – это два месторождения импактных алмазов (Скальное и Ударное) с гигантскими ресурсами сверхтвердого алмаз-лонсдейлитового материала, абразивная способность которого в 1,5–2 раза выше, чем у синтетических и природных (кимберлитовых) алмазов.

*Кратер Рис (Ries)* возник при ударе метеорита 14,5 млн. лет назад (миоцен) и представляет собой амфитеатр диаметром 24 км (Рисунок 3.10) в области развития горизонтально залегающих осадочных пород (аргиллиты,



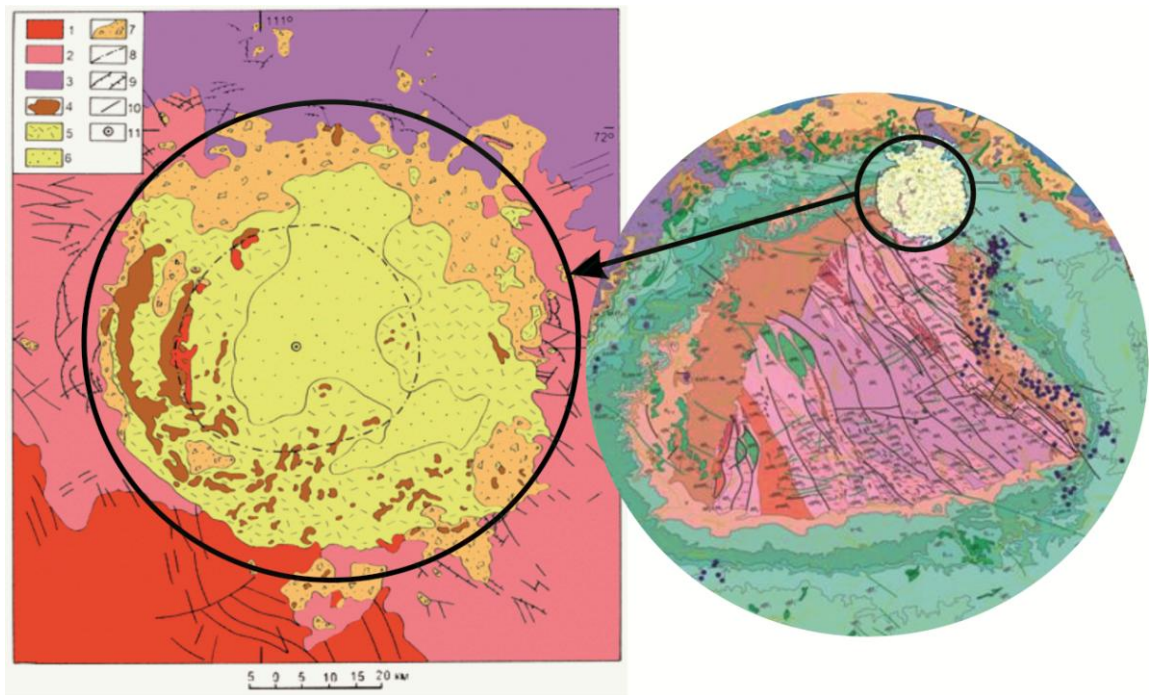


Рисунок 3.9. Геологическое строение Попигайского кратера, врезка из [18]

1 – кристаллические породы архейского фундамента; 2 – осадочные породы верхнего протерозоя и нижнего палеозоя; 3 – осадочные и вулканогенно-осадочные породы верхнего палеозоя и мезозоя; 4 – тагамиты; 5 – зювиты; 6 – псаммито-алевритовые брекчии; 7 – аллогенные брекчии; 8 – гребень кольцевого поднятия; 9 – надвиги и сбросы; 10 – разрывные нарушения неустановленной морфологии; 11 – центр кратера

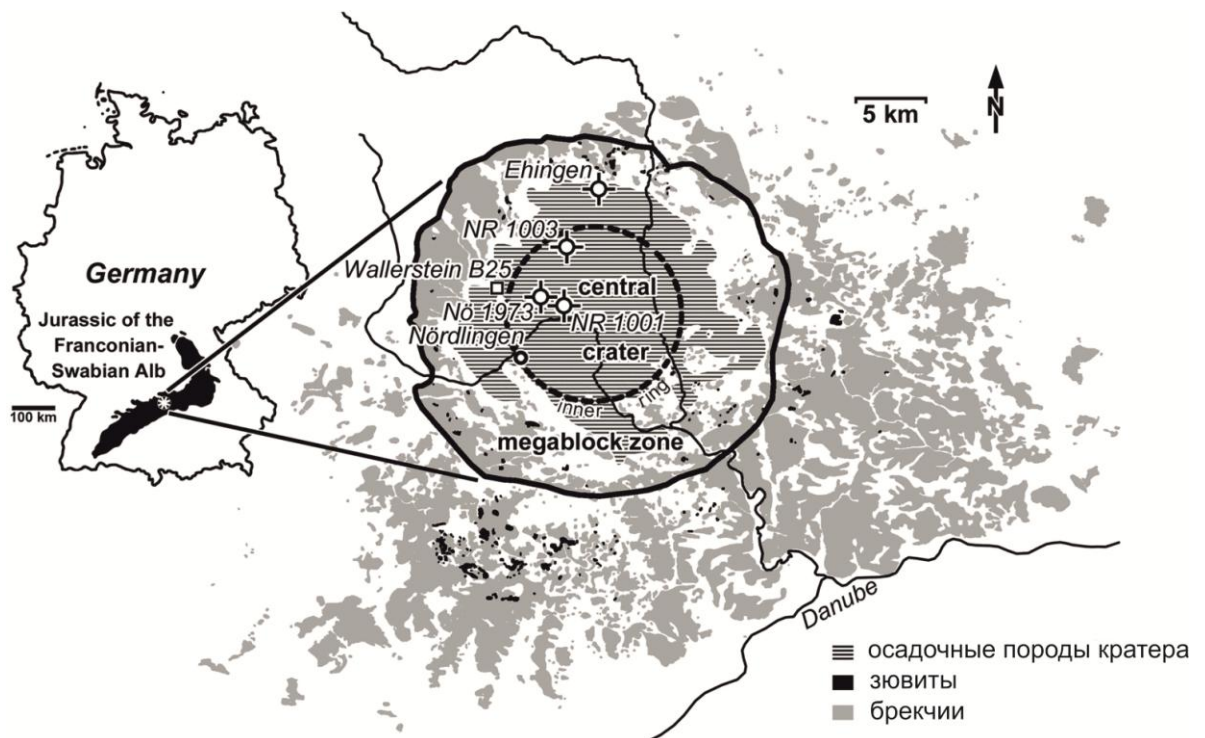


Рисунок 3.10. Кратер Рис, из [136]

песчаники верхнего триаса, аргиллиты, мергели, известняки, песчаники юры, известняки, мергели, глины, бурые угли олигоцена и миоцена) мощностью 500–600 м. Осадочная толща залегает с несогласием на докембрийских гнейсах и амфиболитах, интродуцированных герцинскими гранитами и гранодиоритами. На поверхности коренных пород залегают образования коптогенного комплекса и зювиты.

Для исследования ММ в импактитах научным сотрудником ГЕОХИ РАН А. В. Корочанцевым автору предоставлены 3 образца зювитов из кратеров Попигай и Рис. Образцы из кратера Попигай представлены мелко- и крупнообломочной разностями с кластической и витро-литокластической текстурами. Образец из кратера Рис представляет собой среднеобломочный витро-литокластитовый зювит.

### **3.3. Магнитные микросферулы из техногенных образований**

ММ обнаружены в образцах шлаков промышленных предприятий, расположенных на территории Свердловской области. Это золы уноса Нижнетуринской ГРЭС (г. Нижняя Тура), металлургические шлаки Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда), отходы химической промышленности (пиритные огарки) Кировградского медеплавильного комбината (в настоящее время АО «Уралэлектромедь», г. Кировград). Материал для исследований техногенных ММ предоставлен профессором кафедры геологии, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Уральского государственного горного университета, д.г.-м.н., профессором А. Б. Макаровым. Кроме того, объектами исследования являлись ММ, полученные автором в ходе высокотемпературной резки стальных изделий (детали забора и автомобиля). Таким образом, в настоящей работе исследованы 4 техногенных объекта с ММ (Рисунок 3.11).

*ММ из зол уноса Нижнетуринской ГРЭС.* При сжигании твердого топлива на тепловых и гидроэлектростанциях образуется значительное количество



Рисунок 3.11. Источники техногенных ММ

золошлаковых отходов, которые поступают не только в отвалы, но и в окружающую среду, что приводит к загрязнению приповерхностных геосред. Изученные ММ из зол уноса Нижнетуринской ГРЭС отобраны непосредственно из почв вблизи предприятия. Материалом для сжигания на ТЭС и ГРЭС в Свердловской области служат преимущественно высокозольные экибастузские угли.

*ММ из шлаков Среднеуральского медеплавильного завода.* Шлакоотвалы завода расположены в 4 км севернее г.Ревда (Рисунок 3.12) и состоят из обожженных огарков медистых пиритов Дегтярского медно-колчеданного месторождения, находящегося в 15 километрах южнее города.

*ММ из шлакоотвалов Кировградского медеплавильного комбината* обнаружены в пиритных огарках старого отвала (Рисунок 3.12), который сформирован в 1932–1955 гг. и составляет 780 тыс. тонн [74, 114]. Пиритные огарки представляют собой тонкодисперсный буроватый, красновато-бурый порошок с плотностью  $3,73 \text{ г/см}^3$  [88]. Источником минерального сырья Кировградского медеплавильного комбината являлись медно-колчеданные руды Левихинской группы месторождений в западном борту Щучьинско-Тагильского палеовулканического пояса на Среднем Урале.



Рисунок 3.12. Шлакоотвалы Среднеуральского медеплавильного комбината (вверху) и отвалы пиритных огарков Кировградского медеплавильного комбината (внизу). Источник – Google карты [<https://www.google.com/maps>]

**Выводы.** Для обнаружения и извлечения ММ автором настоящей работы на значительной территории Северной Евразии исследованы разные по происхождению объекты: эвапоритовые отложения Камско-Устьинского и Байматского месторождений гипса, Верхнекамского месторождения солей и Калининградско-Гданьского соленосного бассейна, морские отложения Усть-Черемшанского прогиба, Прикаспийской впадины, Предуральского прогиба, современные болотные отложения на юге Московской синеклизы, металлургические шлаки, золы уноса и отходы химической промышленности Среднеуральского медеплавильного завода, Нижнетуринской ГРЭС, Кировградского медеплавильного комбината и сварочные шлаки.

## 4. МОРФОЛОГИЯ И СОСТАВ МАГНИТНЫХ МИКРОСФЕРУЛ

Электронно-микроскопические снимки наиболее типичных (эталонных) ММ, полученные автором в процессе выполнения диссертационной работы, представлены в виде атласа (приложение 1).

### 4.1. Морфологические особенности магнитных микросферул

Диаметры изученных нами природных ММ варьируют от 5 до 330 мкм при среднем значении 45 мкм (Рисунок 4.1). ММ из техногенных образований обладают диаметром от 5 мкм до 1 мм при среднем размере 90 мкм. Для сравнения нами проведен анализ литературных данных по вулканическим ММ [27, 35, 78, 80, 81, 99, 100, 111, 104, 207, 215].

Анализ позволил установить, что вулканические ММ имеют диаметр от 10 мкм до 1 мм при среднем значении 213 мкм (Рисунок 4.1).

Замеры диаметров ММ показали (Рисунок 4.2), что наиболее сферичны (см. раздел 2) микросферулы из осадочных пород, импактитов и торфа. Так, по коэффициенту сферичности ( $n$ ) 96 % ММ из осадочных пород и импактитов имеют сферичную форму, очень редко – каплевидную. ММ из техногенных образований обладают глобулярной, в единичных случаях (менее 1 %) – сферичной формой, а все ММ вулканического происхождения обладают глобулярной формой. Разная степень сферичности исследованных ММ может объясняться механизмами их происхождения.

Микроструктурный рисунок поверхности ММ природных образований формируется за счет закономерного характера срастаний агрегатов дендритового и мозаичного типов с кристаллитами размером 1–14 мкм субизометричной формы (Рисунок 4.3). Отметим, что структурные типы поверхности изученных ММ полностью совпадают с описаниями предшественников [212]. Так, например,

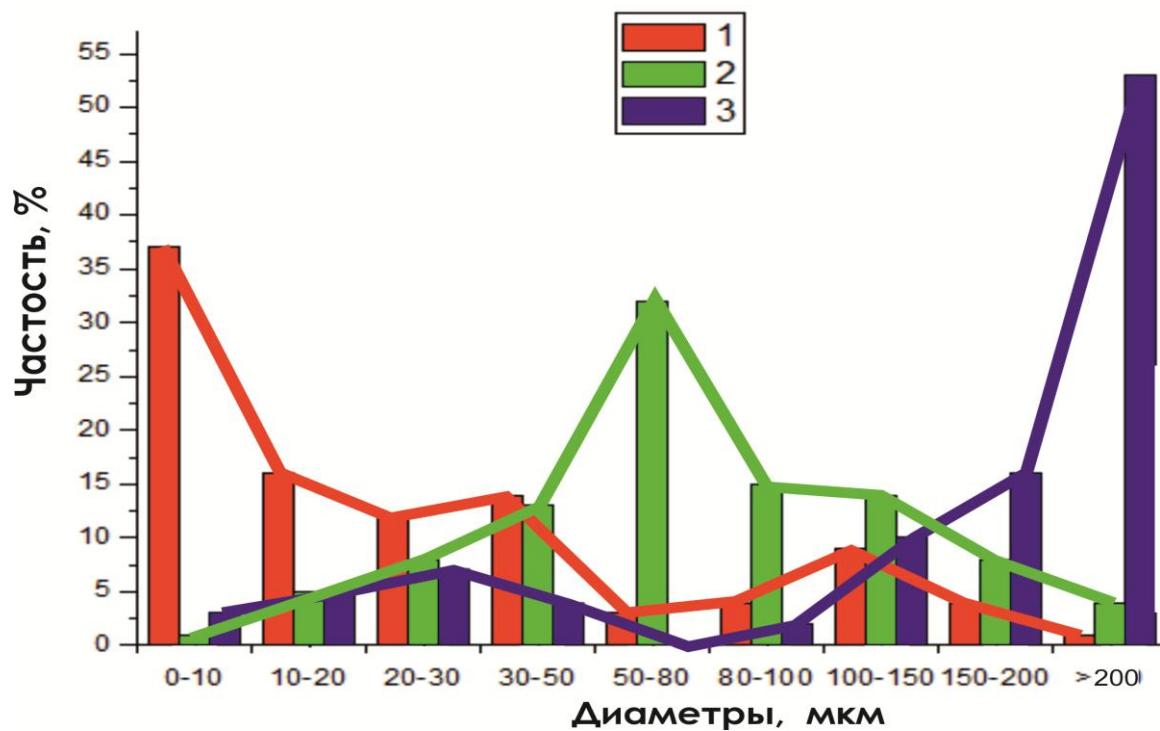


Рисунок 4.1. Диаметры ММ в разных образованиях

1 – осадочные породы и импактиты; 2 – техногенные образования; 3 – вулканические отложения

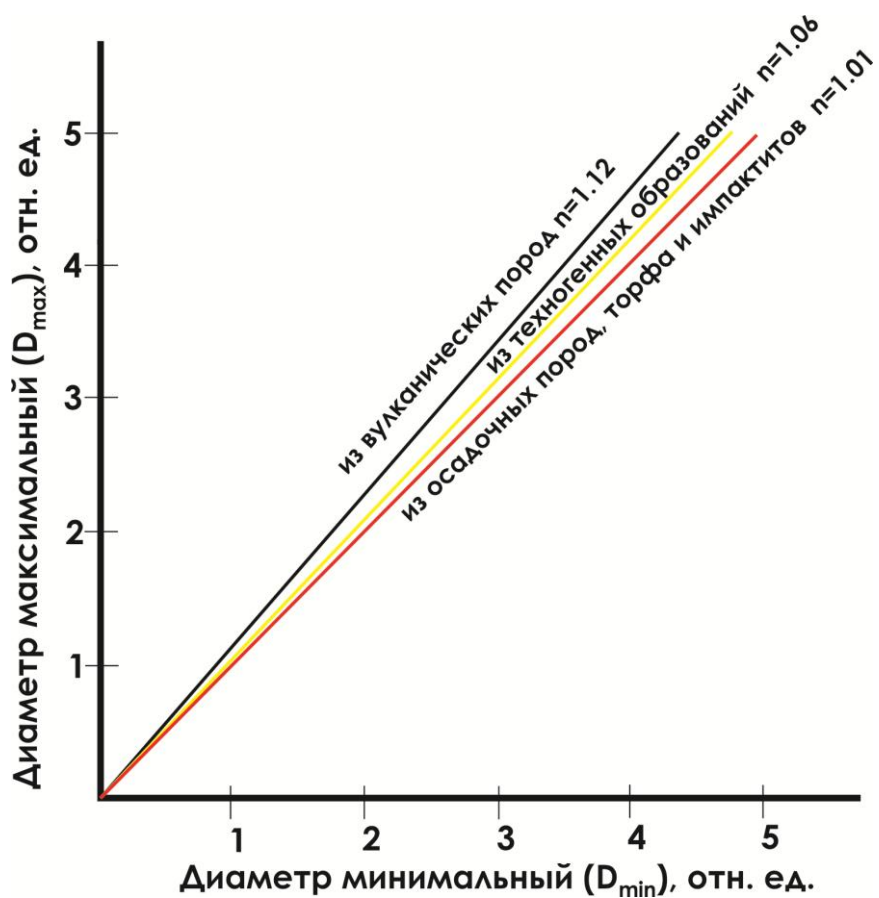


Рисунок 4.2. Коэффициент сферичности ММ разной природы

среди 2 основных типов поверхностных структур (дендритового и мозаичного) можно выделить следующие подтипы (Рисунок 4.3): сморщенный (1), скелетный (2), перьевидный (3), чешуйчатый (4), трещиноватый (5). Иногда встречаются смешанные подтипы. Все структурные подтипы формируются за счет закаливания [212], что приводит к образованию характерных «елочек» (Рисунок 4.4).

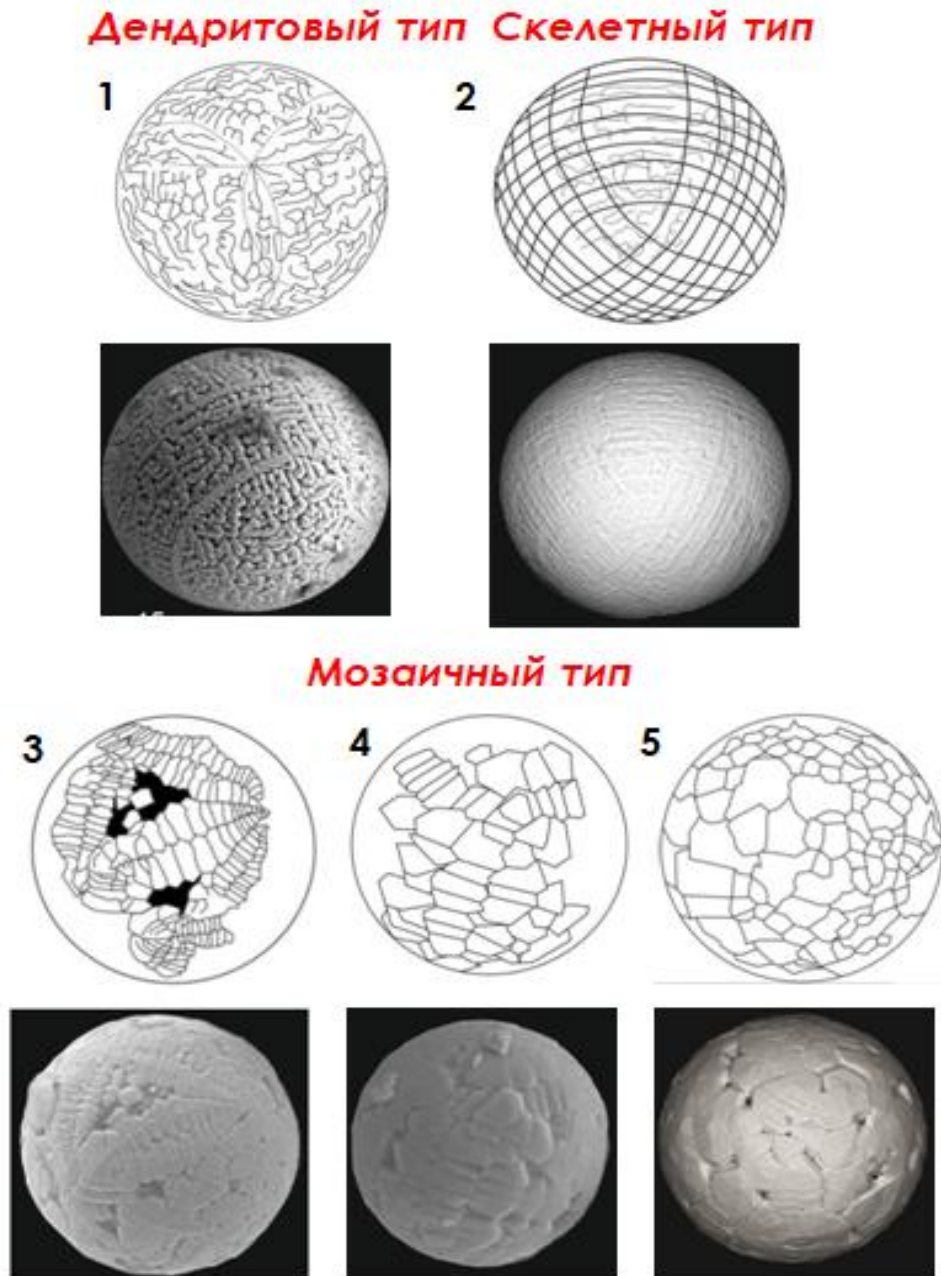


Рисунок 4.3. Микроструктурные особенности ММ из природных образований.

Пояснения см. в тексте



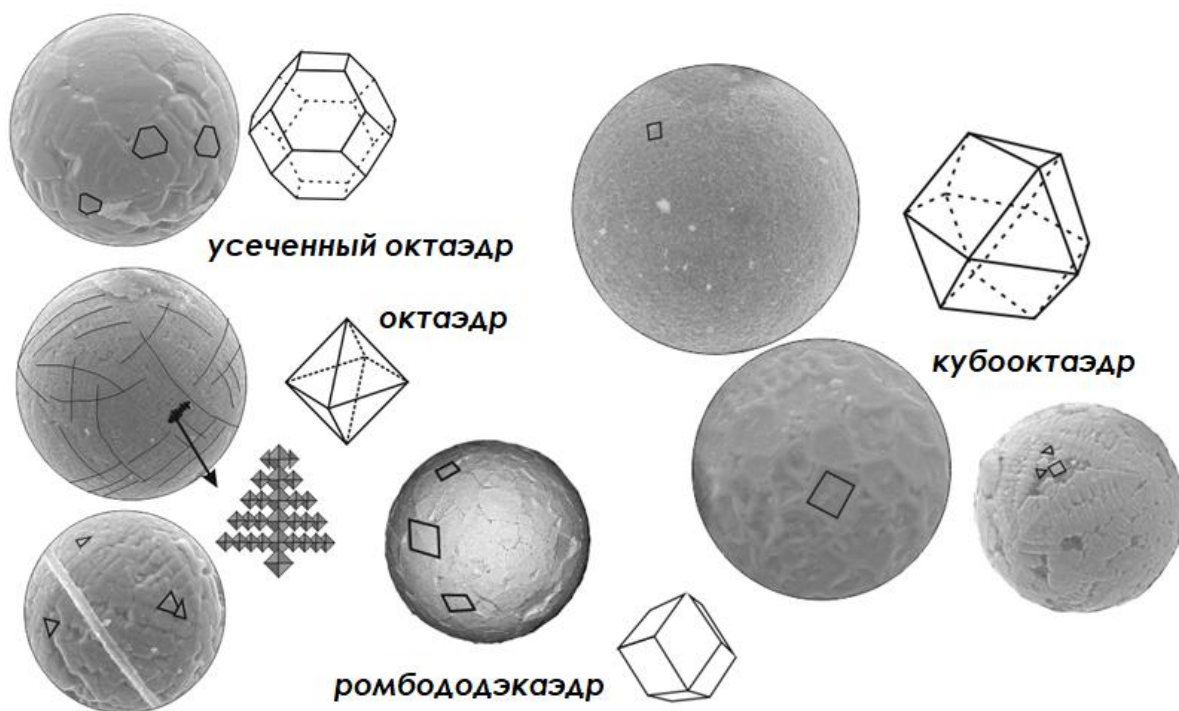


Рисунок 4.4. Кристаллы ферришпинелидов (серия магнетита)

При морфологическом изучении отдельных кристаллитов обнаруживаются грани кристаллов разного габитуса: октаэдр, усеченный октаэдр, кубооктаэдр, ромбододекаэдр (Рисунок 4.4). В целом, подобные кристаллы характерны для семейства ферришпинелидов и минералов кубической сингонии пространственных групп класса  $m\bar{3}m$ , куда входит и магнетит.

Дендритовая структура поверхности наиболее характерна для ММ из осадочных пород (Рисунок 4.5). Учитывая преобладание среди них объектов с диаметром до 30 мкм (Рисунок 4.1), можно утверждать, что для данных ММ типичной является дендритовая структура. Более редкая скелетная структура (Рисунок 4.5) характерна для ММ с диаметром от 20 до 300 мкм и средним размером до 60 мкм (Рисунок 4.6). Мозаичная структура характерна для ММ с диаметром более 30 мкм, при этом чаще она встречается среди крупных (более 100 мкм) микросферул. Таким образом, из анализа оригинальных эмпирических данных следует, что чем меньше капля расплава, из которой формируется сферула, тем быстрее остывает её поверхность с образованием более крупных кристаллитов с мозаичной структурой.



Рисунок 4.5. Поверхностные микроструктуры ММ из осадочных пород

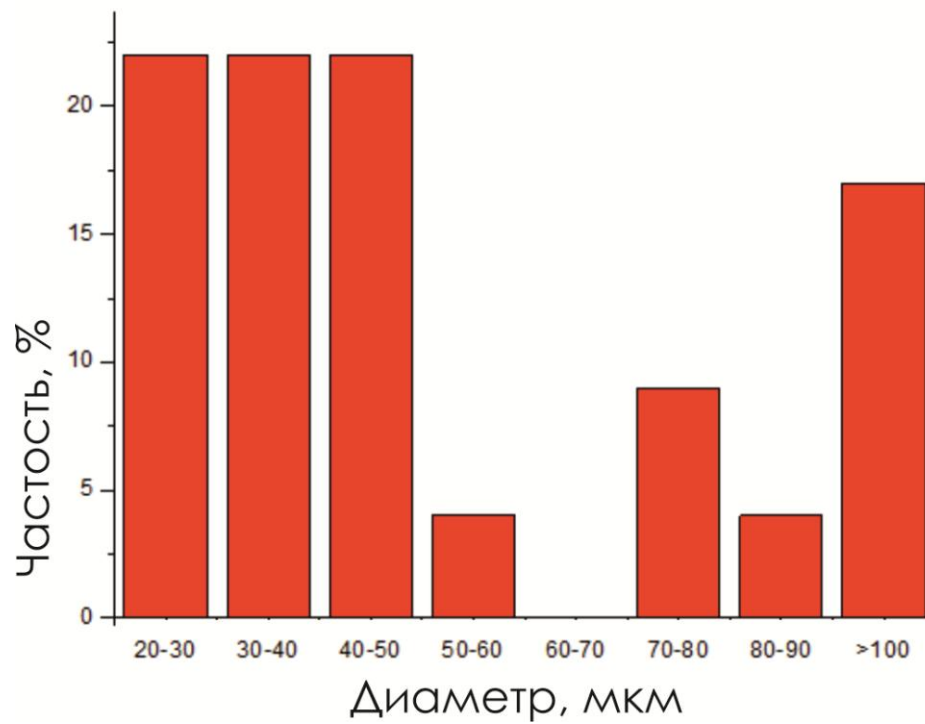


Рисунок 4.6. Размер ММ со скелетной микроструктурой

Поверхностные микроструктуры техногенных ММ представлены пятью типами: скелетным, мозаичным, гладким, микропорфировым и бугристым (Рисунок 4.7). Для мозаичного типа характерен чешуйчатый и трещиноватый подтипы. Для микропорфировой структуры ММ из зол уноса характерны подтипы спинифекс и разъедания (Рисунок 4.8), а также пористая текстура.



Рисунок 4.7. Микроструктуры ММ из техногенных образований

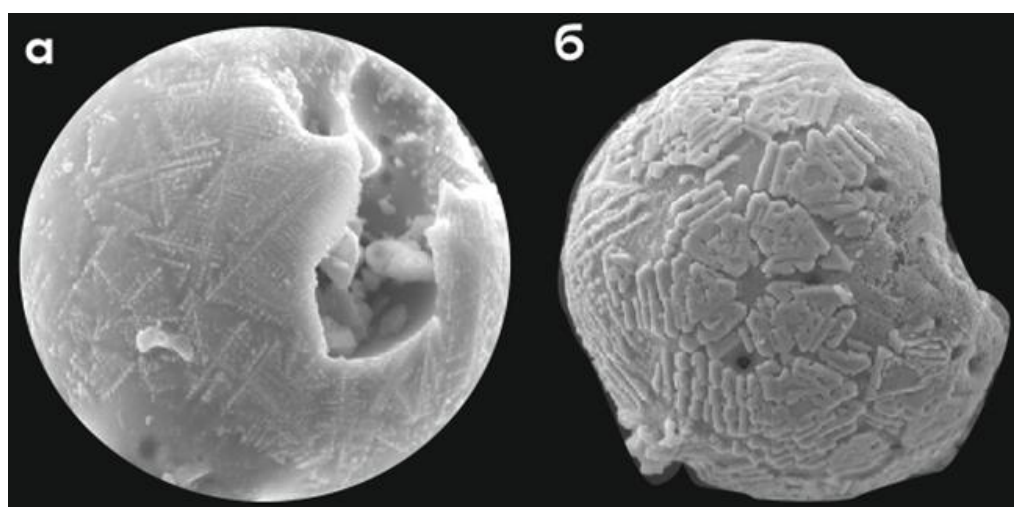


Рисунок 4.8. Микропорфировая микроструктура ММ из зол уноса  
а, б – подтипы структур: а – спинифекс; б – разъедания

ММ металлургических шлаков обладают скелетной, мозаичной (чешуйчатый и трещиноватый подтипы) и реже – микропорфировой структурой. Для «пиритных огарков» характерны мозаичная (трещиноватый подтип) и бугристая структуры. Поверхности ММ сварочных шлаков в основном однородны и представляют собой гладкие блестящие шарики; в единичных случаях среди них встречается бугристая структура. Кристаллографические формы техногенных ММ (Рисунок 4.9) аналогичны таковым для ММ из природных объектов (см. Рисунок 4.4), что может свидетельствовать о схожих условиях их образования. Исследованные нами сварочные ММ часто идеально сферичны, однако достаточно крупный размер (300–1000 мкм и более), бугристая или гладкая поверхность (Рисунок 4.10) являются их существенными отличительными признаками.

Микроструктуры ММ из вулканических пород имеют некоторые общие черты с другими ММ. Так, с одной стороны, среди них обнаруживаются дендритовые, мозаичные и бугристые типы микроструктур (см. раздел 1). С другой, ММ из природных отложений и импактитов не имеют микропорфировую, бугристую и спинифекс-микроструктуры.

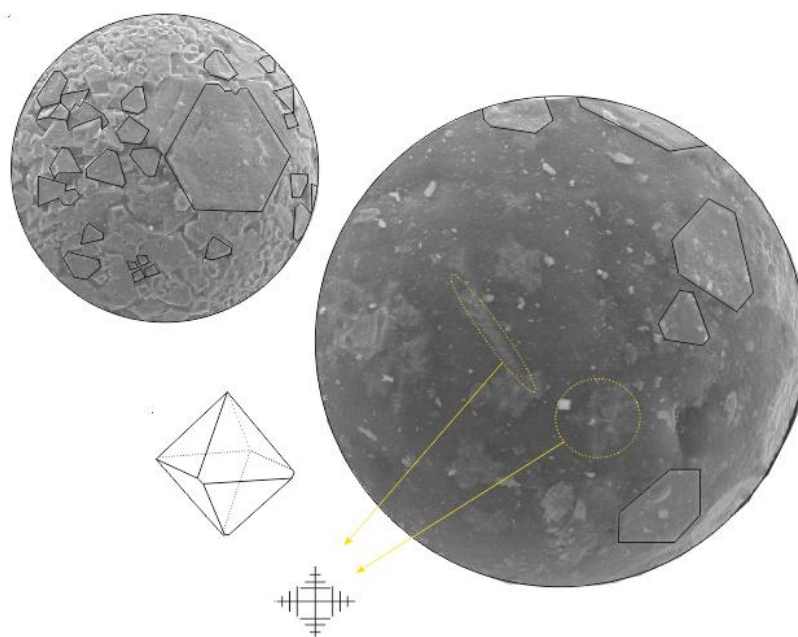


Рисунок 4.9. Форма кристаллов магнетита техногенных ММ

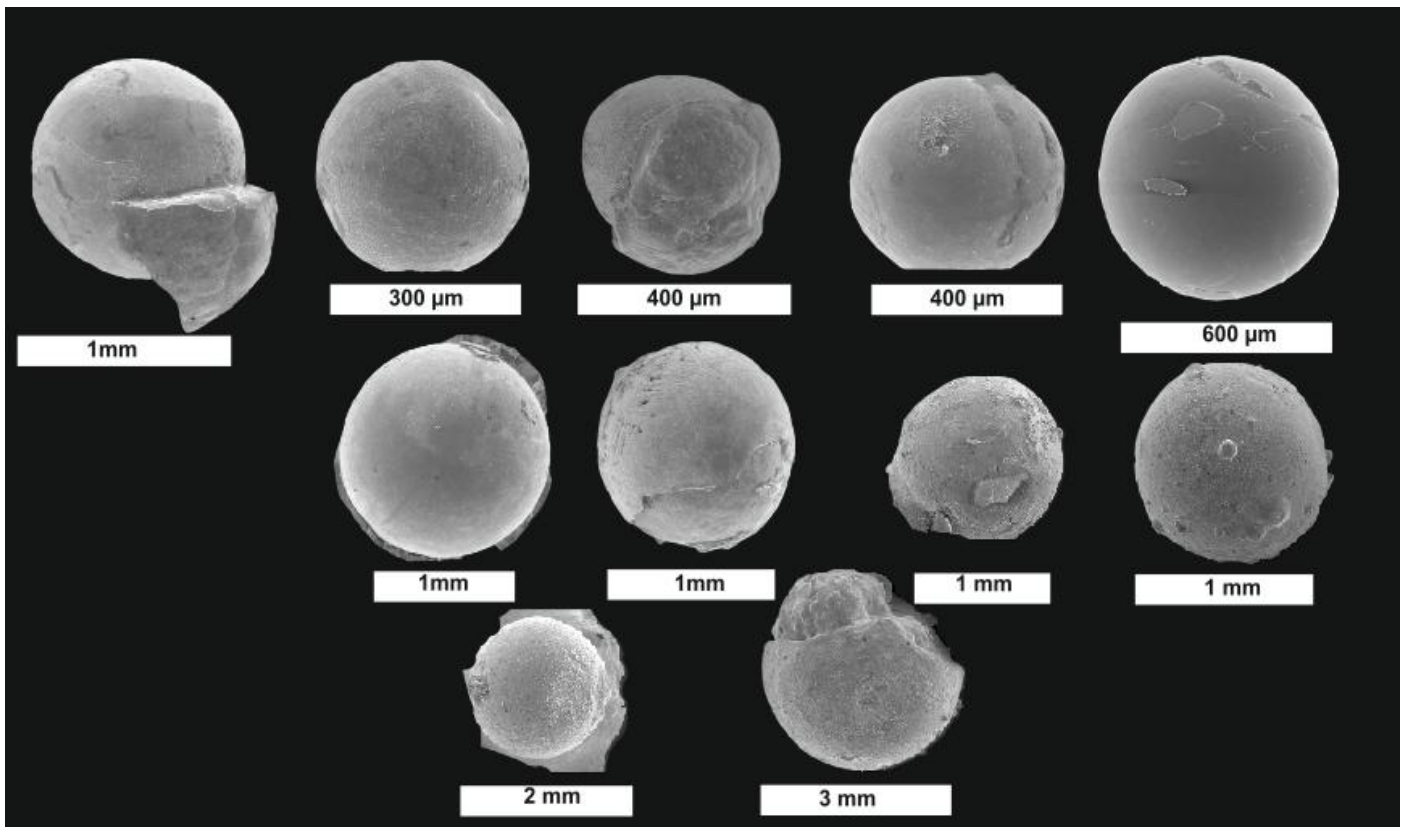


Рисунок 4.10. Микросферулы из сварочных шлаков

Таким образом, детальные морфологические исследования позволили автору обнаружить существенные различия для ММ разного генезиса по диаметру, сферичности и микроструктурному рисунку поверхности.

#### 4.2. Результаты рентгеновской компьютерной томографии

Метод микро-КТ применялся для решения двух задач: 1) поиск микровключений минеральных фаз с высоким рентгеновским поглощением в исследованных образцах; 2) изучение внутреннего пространства ММ без их разрушения.

Результатом микро-КТ в данной работе явились трехмерные (3D) томографические изображения образцов осадочных пород и импактитов, демонстрирующие пространственное распределение минеральных фаз с разным коэффициентом адсорбции (Рисунок 4.11). 3D изображения можно также разделить на слайсы (2D – изображения), т. е. получить проекцию образца на

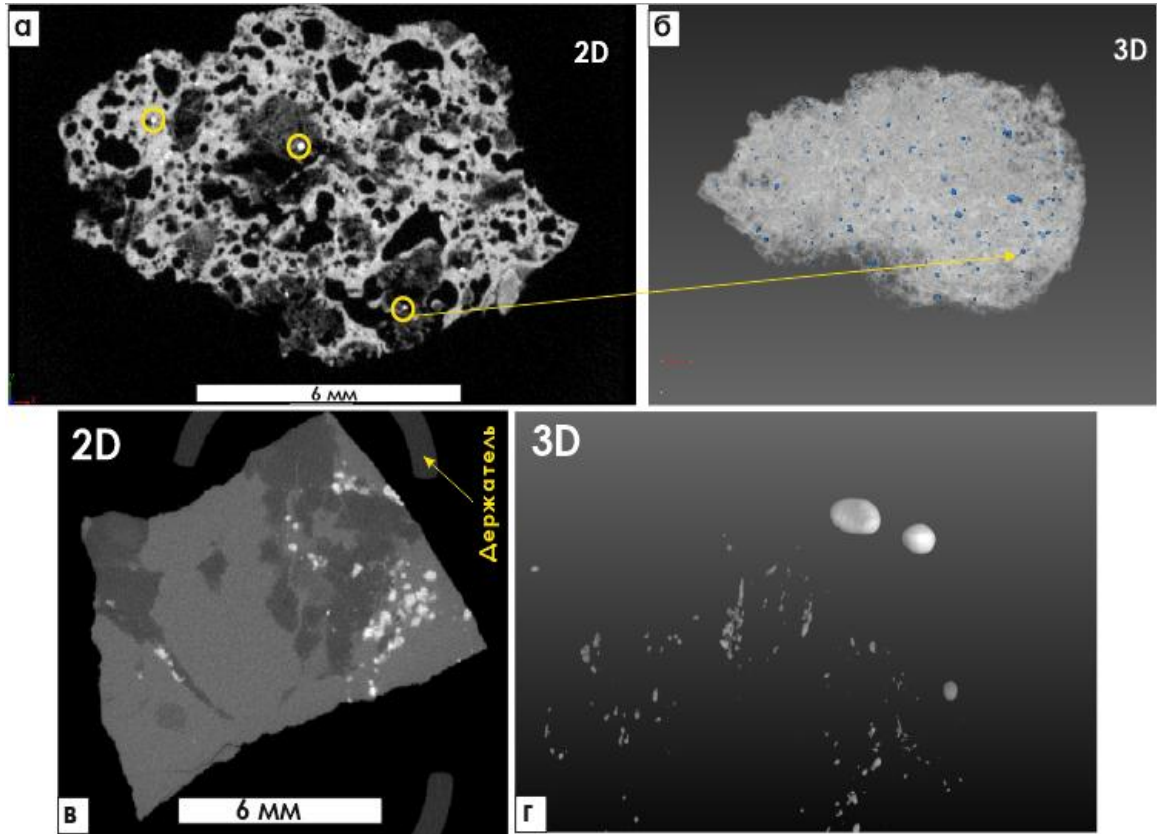


Рисунок 4.11. Томографические изображения пород с включениями минералов с высоким рентгеновским поглощением

*а, б – импактит, кратер Рис; в – гипс, Камско-Устьинское месторождение; г – округлые микрочастицы в гипсе Камско-Устьинского месторождения*

произвольно выбранную плоскость. Визуально на томографических снимках плотностное расхождение фиксируется по различиям оттенков серого цвета, а на слайсах минеральные фазы с высоким рентгеновским поглощением обладают более ярким контрастом белого цвета относительно вмещающей породы (Рисунок 4.11). Кроме того, на томографических снимках 2D и 3D четко визуализируются белые объекты округлой формы и пространственное (объемное) их распределение в породе (Рисунок 4.11, в, г). Полученные нами данные доказывают природное происхождение высокоплотных микрочастиц (включая ММ) в породах и опровергают их техногенное происхождение за счет загрязнения при лабораторной пробоподготовке.

Исследование внутреннего строения ММ с помощью микро-КТ показало, что техногенные ММ обладают очень большим количеством пор, распределенных неравномерно по объему сферулы (Рисунок 4.12). В некоторых техногенных ММ четко проявлена дифференциация минеральных фаз, отражаемая на томографических срезах участками белого и разными оттенками серого цветов. Электронно-микроскопические снимки полированных срезов ММ подтвердили дифференциацию минерального вещества и значительную внутреннюю пористость техногенных ММ (Рисунок 4.13). Разные минеральные фазы возможно обнаружить благодаря эффекту BSE с наглядной визуализацией оттенков серого цвета для отдельных минеральных зерен и матрикса. Так, в некоторых ММ техногенного происхождения фиксируются ламели магнетита и грани ромбоэдра, характерные для гематита (Рисунок 4.13, а, б).

По сравнению с техногенными ММ, микросферулы из осадочных пород и импактитов имеют более однородный состав, что выражается почти монотонным серым цветом на томографических срезах (Рисунок 4.12). Пустоты внутри природных ММ представлены, преимущественно, одной большой полостью, иногда субсферической формы. Субсферические пустоты встречены и в полированных срезах ММ из природных объектов (Рисунок 4.13, г). Кроме того, для них характерны сеть мелких пустот (Рисунок 4.13, д) и наличие в полостях кристаллов ферришпинелидов (Рисунок 4.13, е).

В полированных срезах ММ из сварочных шлаков отчетливо наблюдаются внешняя корка, а также дифференциация вещества внутренней части по BSE (Рисунок 4.13, в), что подтверждается и данными микро-КТ (Рисунок 4.12, а-в). Подобная дифференциация характерна для техногенных ММ [38, 87, 98].

Техногенные микросферулы обладают значительным объемом внутреннего пустотного пространства (Рисунок 4.12) относительно ММ другого генезиса [22]. Причинами образования внутренних пустот в техногенных ММ являются выделения при разогреве газов (азот, кислород, водород, сероводород), углеводородов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ),  $\text{NO}$  и  $\text{NH}_3$  [46, 49], а также паров воды, что в целом приводит к наибольшей пористости микросферулы.

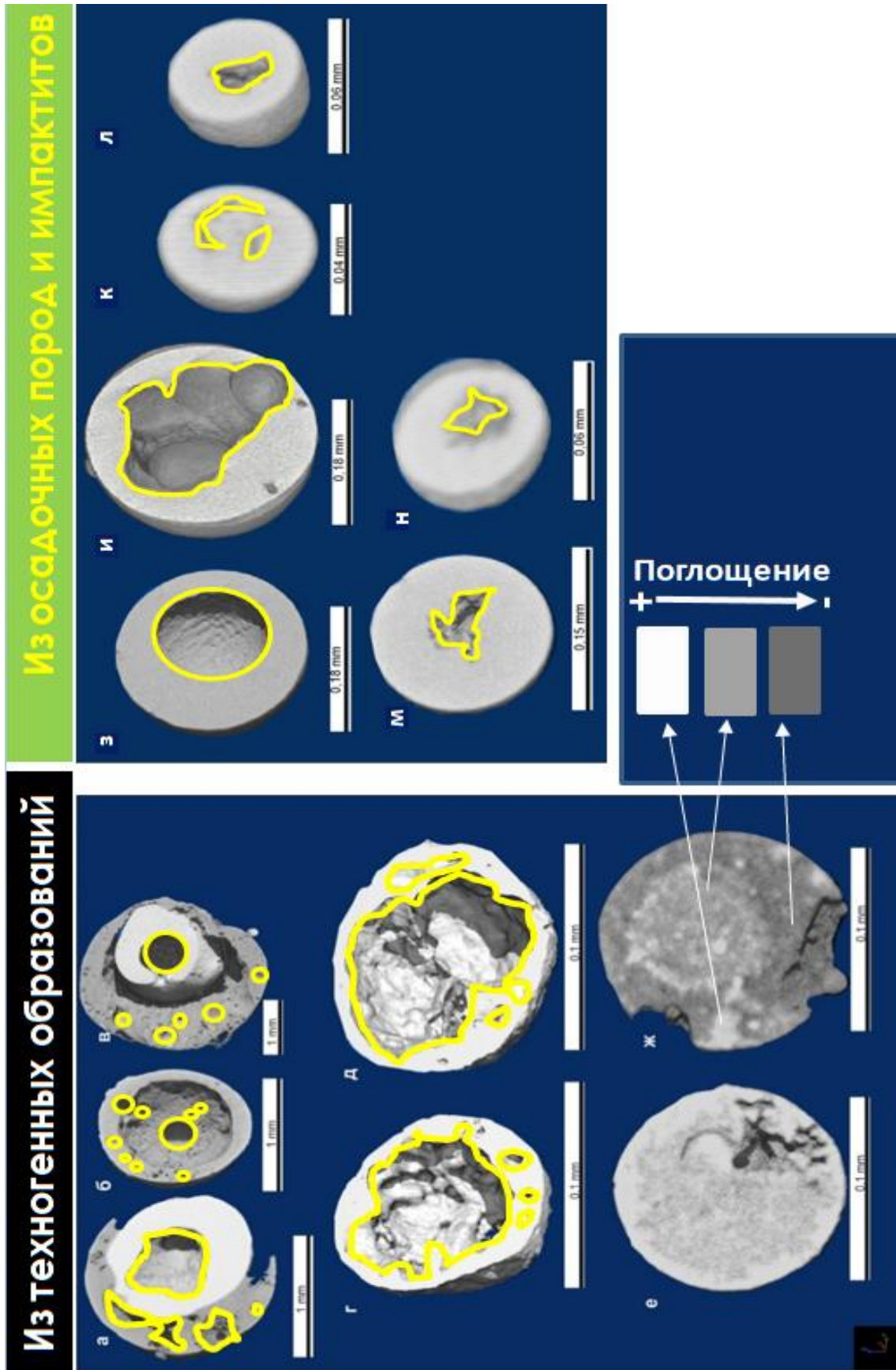


Рисунок 4.12. Томографические срезы внутреннего строения ММ



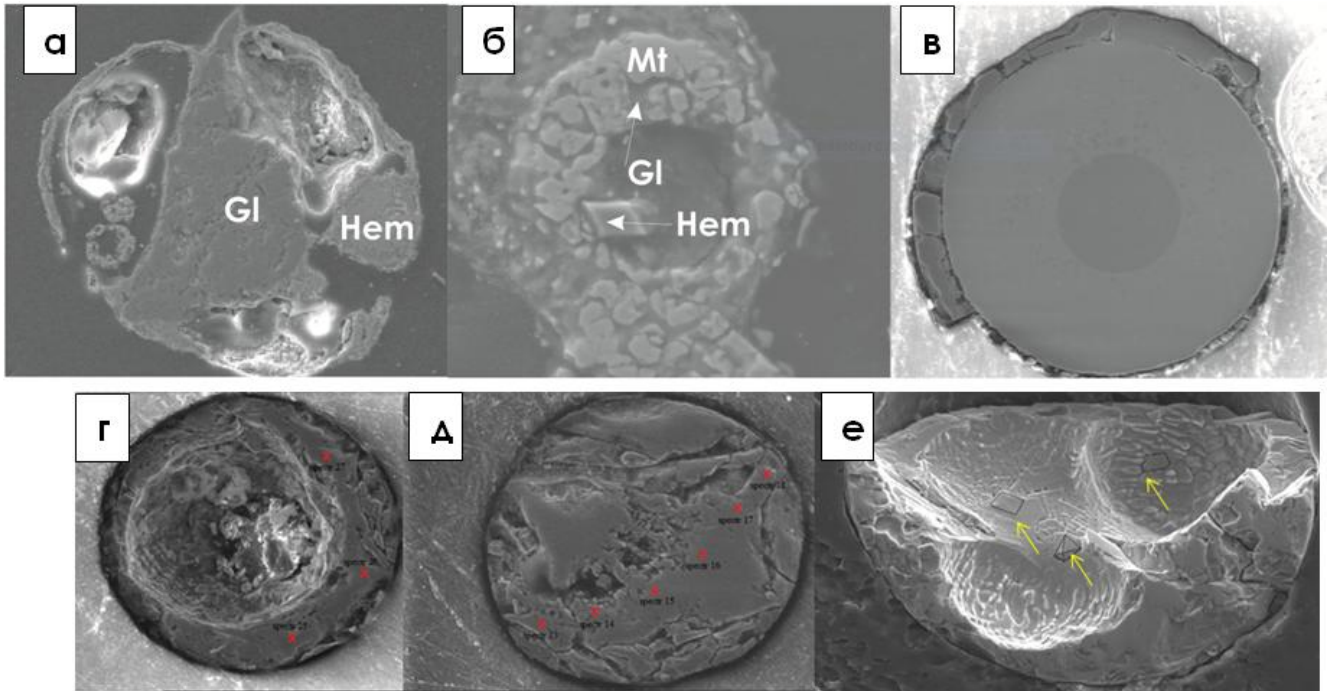


Рисунок 4.13. Электронно-микроскопические снимки полированных срезов ММ из техногенных (а-в) и природных (г-е) образований

Внутренние пустоты ММ количественно можно охарактеризовать диагностическим параметром «площадная доля пор» (пористость), который показывает отношение суммарной площади пор к общей площади сферулы. Для количественной оценки данного параметра нами совместно использовались оригинальные 2D-томографические снимки и электронно-микроскопические снимки полированных срезов ММ из осадочных пород, импактитов, техногенных образований, а также изображения срезов вулканических ММ из работ предшественников [27, 79, 99, 100, 103 и др.].

Расчеты отношения пустот к матриксу сферулы в площадном срезе показали, что наименьшее среднее значение (13 %) площадной доли пор характерно для ММ из осадочных пород и импактитов (Таблица 4.1); площадная доля пор для вулканических ММ составляет 19 %, а в техногенных ММ данный параметр максимален – 22 %.

Таблица 4.1 – Площадная доля пор ММ разного генезиса

Происхождение ММ	Количество срезов	Доля пор в ММ, %	Среднее содержание пор в ММ, %	Стандартное отклонение, %
Осадочные породы и импактиты	30	0 – 36	13	10
Вулканические породы	14	8 – 33	19	8
Техногенные образования	28	1 – 60	22	15

Таким образом, выполненные автором томографические, электронно-микроскопические исследования и количественные расчеты показали, что дифференциация минерального вещества, пустотное пространство и площадная доля пор являются важнейшими критериями, которые, совместно с морфологическими показателями, позволяют достаточно уверенно диагностировать происхождение ММ.

### **4.3. Минеральный и химический составы магнитных микроферул**

Полированные срезы ММ из осадочных пород при просмотре под поляризационным микроскопом в отраженном свете представлены изотропной минеральной фазой серого и серовато-белого цветов со слабым коричневатым оттенком. С учетом магнитных свойств и цветовой окраски это может указывать на преобладание магнетита, что согласуется с результатами исследования минерального состава поверхности с помощью СЭМ (см. подраздел 4.1). Рамановская спектроскопия в отдельных точках ММ подтвердила, что основной минеральной фазой является магнетит (Рисунок 4.14) с характерными сдвигами 554 и 672  $\text{см}^{-1}$ . Результаты площадного минерального картирования ММ также свидетельствуют о мономинеральном (магнетитовом) составе внутренней части

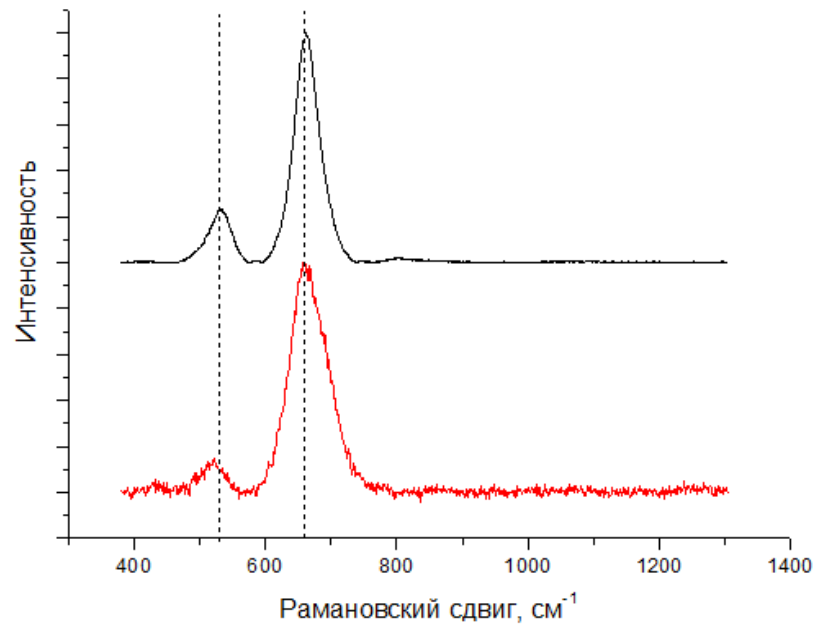


Рисунок 4.14. Рамановские спектры магнетита

*вверху – эталонный спектр из базы данных RRUFF [299];*

*внизу – усредненный спектр поверхности ММ из осадочных пород (по данным 35 анализов)*

микросферул из природных образований (Рисунок 4.15). Различие цветов магнетита на верхнем левом снимке среза (Рисунок 4.15) связано со смещением позиции главного рамановского сдвига  $672\text{ см}^{-1}$ , указывающего на разную степень кристалличности магнетита.

Минеральный состав поверхности ММ из техногенных образований по результатам рамановской спектроскопии представлен магнетитом и магнезиоферритом с характерными сдвигами  $332$  и  $611\text{ см}^{-1}$  (Рисунок 4.16), что подтверждается обнаруженными кристаллами кубической сингонии пространственных групп класса  $m\bar{3}m$  (см. подраздел 4.1). Кроме того, здесь же встречается гематит с характерными рамановскими сдвигами  $229$ ,  $249$ ,  $295$ ,  $414\text{ см}^{-1}$  (Рисунок 4.17), что подтверждается находками ромбоэдрических кристаллов гематита во внутренней части ММ (Рисунок 4.13, б). Отметим, что гематит не обнаружен при изучении полированного среза в отраженном свете. Наличие гематита, магнезиоферрита и магнетита подтверждается результатами площадного минерального картирования полированных срезов ММ из техногенных образований (Рисунок 4.18).

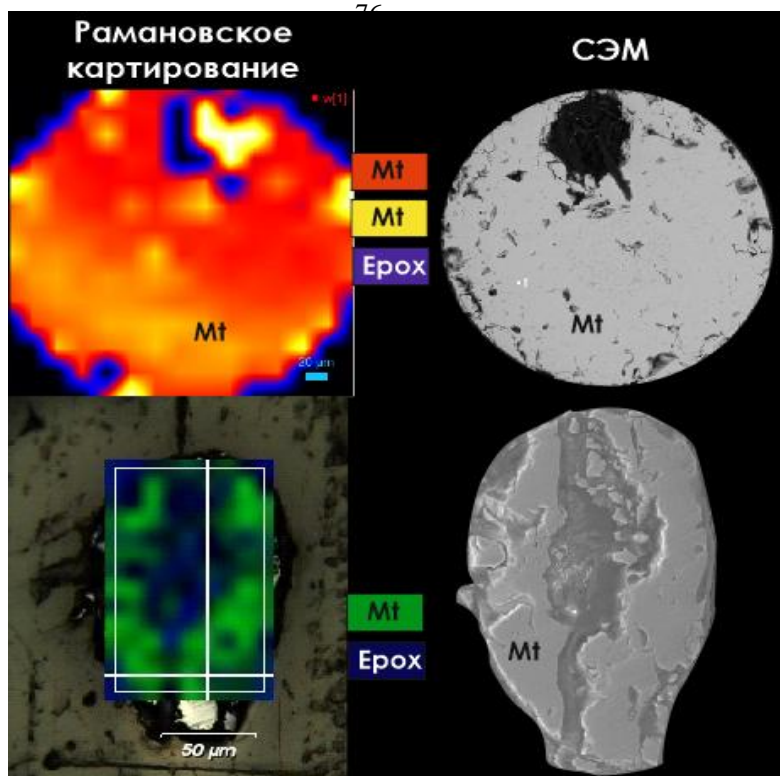


Рисунок 4.15. Магнетитовый состав ММ из природных образований

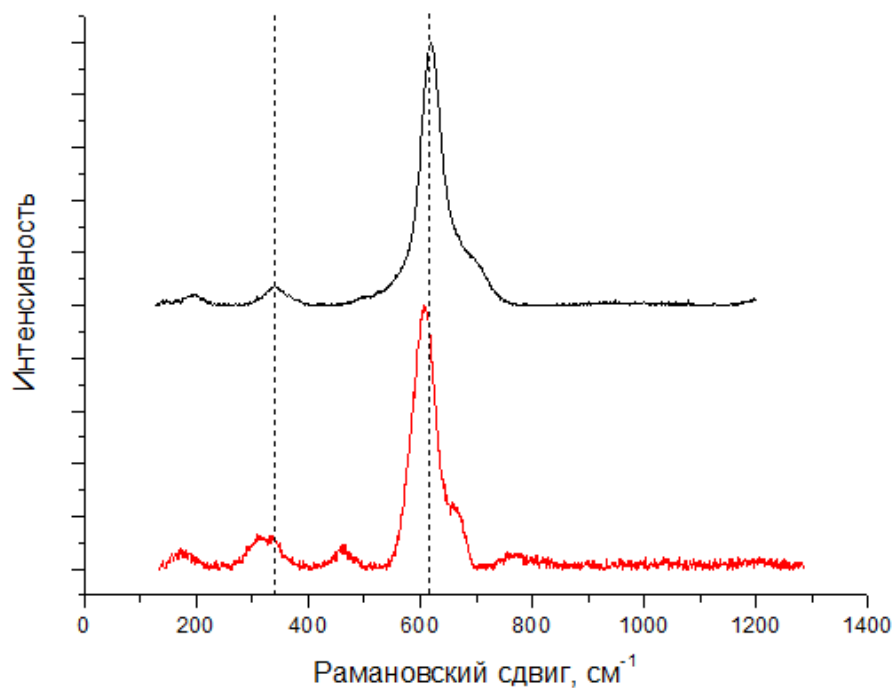


Рисунок 4.16. Рамановский спектр магнезиоферрита  
*вверху – эталонный спектр из базы данных RRUFF [299];*  
*внизу – усредненный спектр поверхности ММ из техногенных образований (по данным 3-х анализов)*

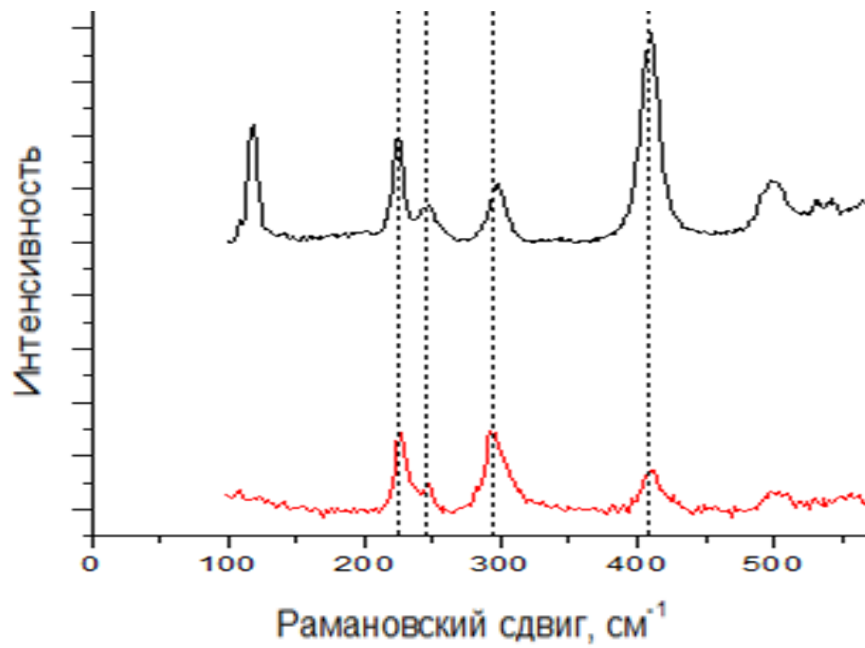


Рисунок 4.17. Рамановский спектр гематита  
 вверху – эталонный спектр из базы данных RRUFF [299]; внизу – усредненный спектр  
 поверхности ММ из техногенных образований (по данным 37 анализов)

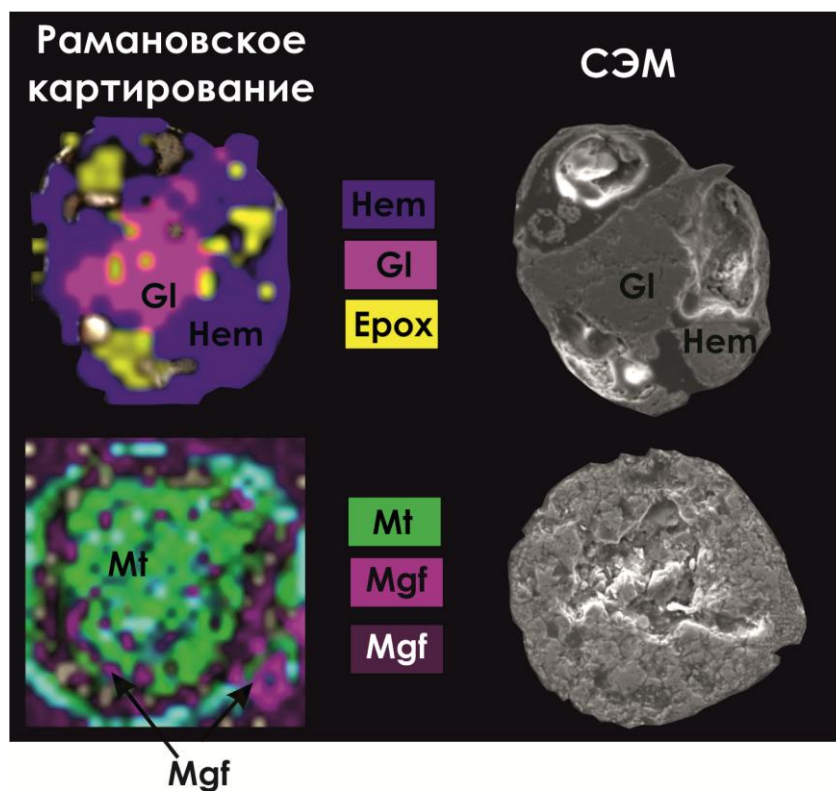


Рисунок 4.18. Минеральный состав ММ из техногенных образований

Таким образом, ММ из техногенных образований, в отличие от природных, состоят из нескольких минеральных фаз. Минералогическое картирование техногенных ММ с помощью рамановской спектроскопии выявило или подтвердило данные СЭМ и микро-КТ наличия разных ассоциаций (парагенезов) минералов: гематит – стекло, магнетит – стекло, магнетит – гематит – стекло, магнетит – магнезиоферрит.

Химический состав ММ из осадочных пород, торфа и импактитов показал, что их главными минералообразующими элементами являются железо и кислород, суммарно составляющие 73.6–100 % (Таблица 4.2, Рисунок 4.19, Приложение 2). Примесями являются Mg, Ni, Cr, Mn, Ti, Cu и Zn, которые изоморфно входят в структуру магнетита, образуя непрерывные ряды твердых растворов ферришпинелидов; также встречаются хром- и титаношпинелиды. На основе пересчета на миналы данных ЭДС-анализов минеральный состав ММ из осадочных пород, торфа и импактитов представлен следующими группами:

1. Однофазная группа, состоящая только из магнетита.

2. Двухфазная группа включает 2 подгруппы: а) магнетит со стеклофазой; б) магнетит – шпинелид. В последней встречаются следующие минеральные парагенезы: треворит-магнетит  $(\text{Ni}_{0,04-0,08} \text{Fe}^{2+}_{0,92-0,96})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00}\text{O}_4$ , хромит-магнетит  $\text{Fe}^{2+}_{1,00} (\text{Fe}^{3+}_{1,9-1,97} \text{Cr}_{0,03-0,1}) \text{O}_4$ , яacobсит-магнетит  $(\text{Mn}_{0,01-0,03} \text{Fe}^{2+}_{0,97-0,99})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00}\text{O}_4$ , магнезиоферрит-магнетит  $(\text{Mg}_{0,06-0,1} \text{Fe}^{2+}_{0,9-0,94})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00}\text{O}_4$ , ульвошпинель-магнетит  $\text{Fe}^{2+}_{1,00} (\text{Fe}^{3+}_{1,97-1,9} \text{Ti}_{0,03-0,1}) \text{O}_4$ , франклинит-магнетит  $(\text{Zn}_{0,03-0,4} \text{Fe}^{2+}_{0,6-0,97})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00}\text{O}_4$ , купрошпинель-магнетит  $(\text{Cu}_{0,06} \text{Fe}^{2+}_{0,94})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00}\text{O}_4$ .

3. Трехфазная группа состоит из 2 подгрупп: а) магнетит – шпинелид – стекло, б) магнетит – шпинелид 1 – шпинелид 2. В последней встречаются следующие ассоциации (минеральные парагенезы): треворит-яacobсит-магнетит  $(\text{Ni}_{0,04-0,07} \text{Mn}_{0,05-0,09} \text{Fe}^{2+}_{0,84-0,91})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00} \text{O}_4$ , треворит-магнезиоферрит-магнетит  $(\text{Ni}_{0,04-0,06} \text{Mg}_{0,06-0,1} \text{Fe}^{2+}_{0,84-0,9})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00}\text{O}_4$ , ульвошпинель- треворит-магнетит  $(\text{Ni}_{0,05-0,06} \text{Fe}^{2+}_{0,94-0,95})_{1,00} (\text{Fe}^{3+}_{1,95-1,96} \text{Ti}_{0,04-0,05})_{2,00}\text{O}_4$ , треворит-хромит-магнетит

$(\text{Ni}_{0,04-0,06} \text{Fe}^{2+}_{0,94-0,96})_{1,00}(\text{Fe}^{3+}_{1,6-1,97} \text{Cr}_{0,03-0,4})_{2,00} \text{O}_4$ , ульвошпинель-якобсит-магнетит  
 $(\text{Mn}_{0,03-0,05} \text{Fe}^{2+}_{0,95-0,97})_{1,00}(\text{Fe}^{3+}_{1,91-1,95} \text{Ti}_{0,05-0,09})_{2,00} \text{O}_4$ .

Таблица 4.2 – Химический состав ММ из осадочных пород

Параметр	Объ- ект	Компонент (вес. %), стандартное отклонение (%)										
		FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	TiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	CaO	CuO	ZnO
Максимальное- минимальное значение	1	80.8– 100	0.1– 6.2	0.2– 10.3	0.3– 0.6	0.1– 1.5	0.1– 4.7	0.1– 4.5	0.1–2	0.1– 5	н.о.	0.1– 1.1
	2	86.7– 100	0.5– 1.9	0.3– 2.2	0.2– 3.2	н.о.	н.о.	н.о.	0.5– 4.3	н.о.	н.о.	5.2– 13.3
	3	73.6– 100	0.1– 11	0.1– 15.4	0.1– 14.6	0.1– 2.5	0.1– 3.2	0.1– 1.8	0.1– 2.9	0.1– 5	0.1– 1.9	н.о.
Среднее содержание	1	95.3	1.1	1.7	0.02	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2	н.о.	0.1
	2	96.5	0.2	0.2	0.7	н.о.	н.о.	н.о.	0.2	н.о.	н.о.	0.3
	3	95.3	0.8	1.3	0.1	0.8	0.06	0.1	0.4	0.2	0.04	н.о.
Стандартное отклонение	1	7.4	1.4	2.4	0.1	0.3	0.6	0.5	0.9	0.4	н.о.	0.1
	2	8.1	0.4	0.4	0.8	н.о.	н.о.	н.о.	0.7	н.о.	н.о.	2.0
	3	6.1	1.5	1.7	1.0	0.9	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	н.о.

*Примечание:* 1 – аргиллиты и карбонаты (102 анализа); 2 – торф (70 анализов); 3 – хлориды и сульфаты (207 анализов); н.о. – не обнаружено. Здесь и далее все железо пересчитано на FeO

4. Четырехфазная группа состоит из магнетита, шпинелида 1, шпинелида 2 и стекла.

Повышенное содержание кремнекислоты (Таблица 4.2) указывает на присутствие редкой железистой стеклофазы (размером до 4 мкм), которая подтверждается СЭМ (Рисунок 4.20). Предполагается, что у большинства ММ стекло занимает пространство между дендритовыми сростками и кристаллитами магнетита и других шпинелидов. Не исключается наличие внутри стеклофазы ферритов Ca и Al или изоморфного замещения Si на Al, на что указывают результаты ЭДС-картирования (Рисунок 4.21).

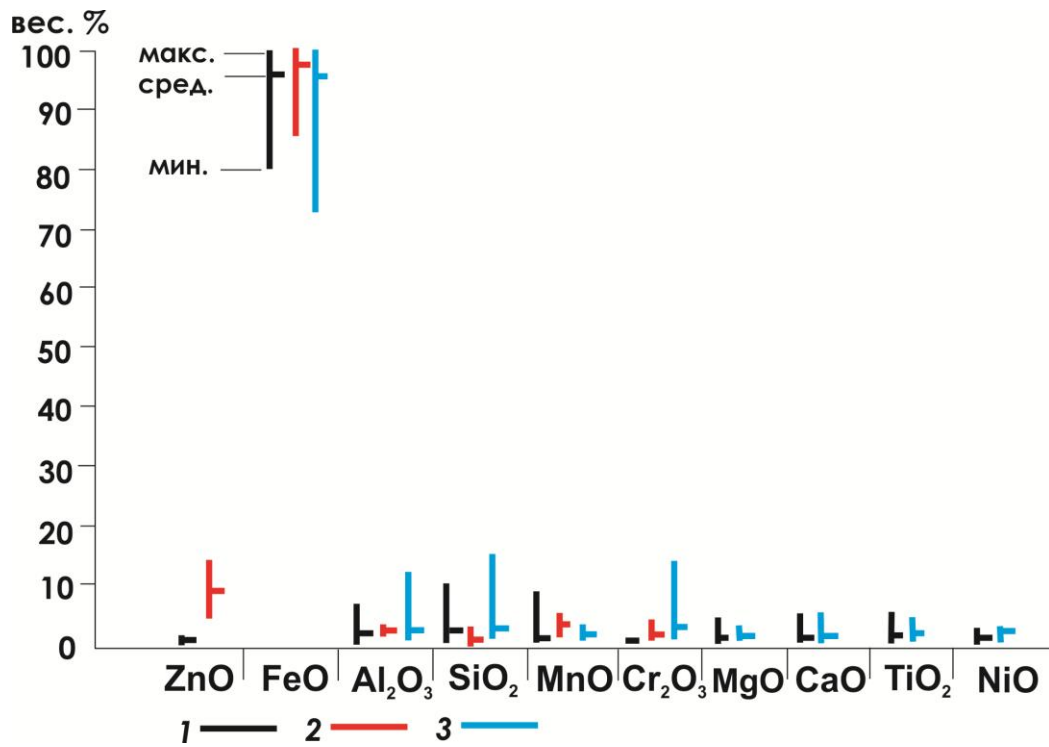
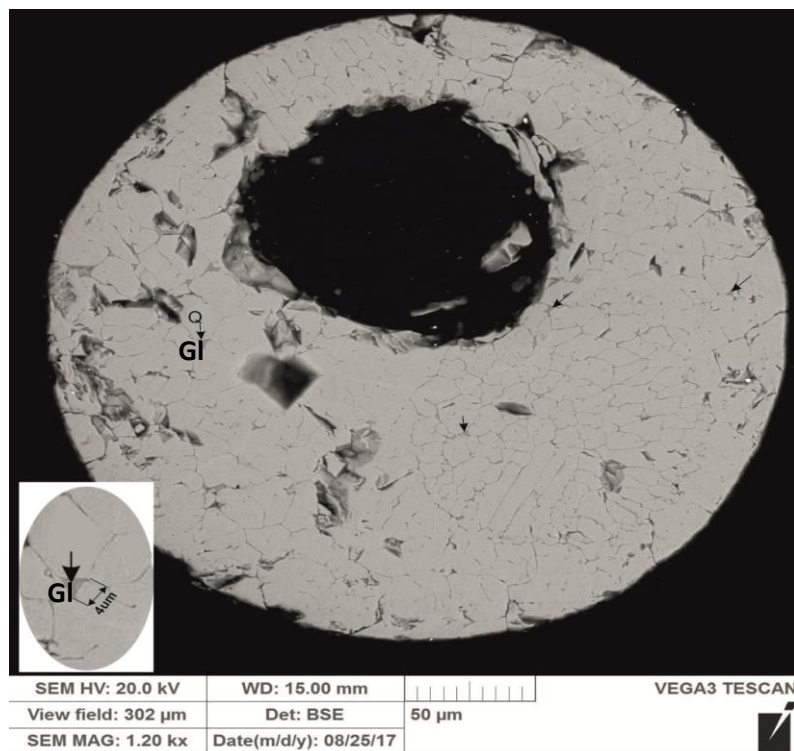


Рисунок 4.19. Химические компоненты в ММ из осадочных пород (см. Таблица 4.2)

1 – аргиллиты и карбонаты; 2 – торф; 3 – хлориды и сульфаты



17309a

Рисунок 4.20. ММ из осадочных пород Прикаспийской синеклизы с включением стеклофазы



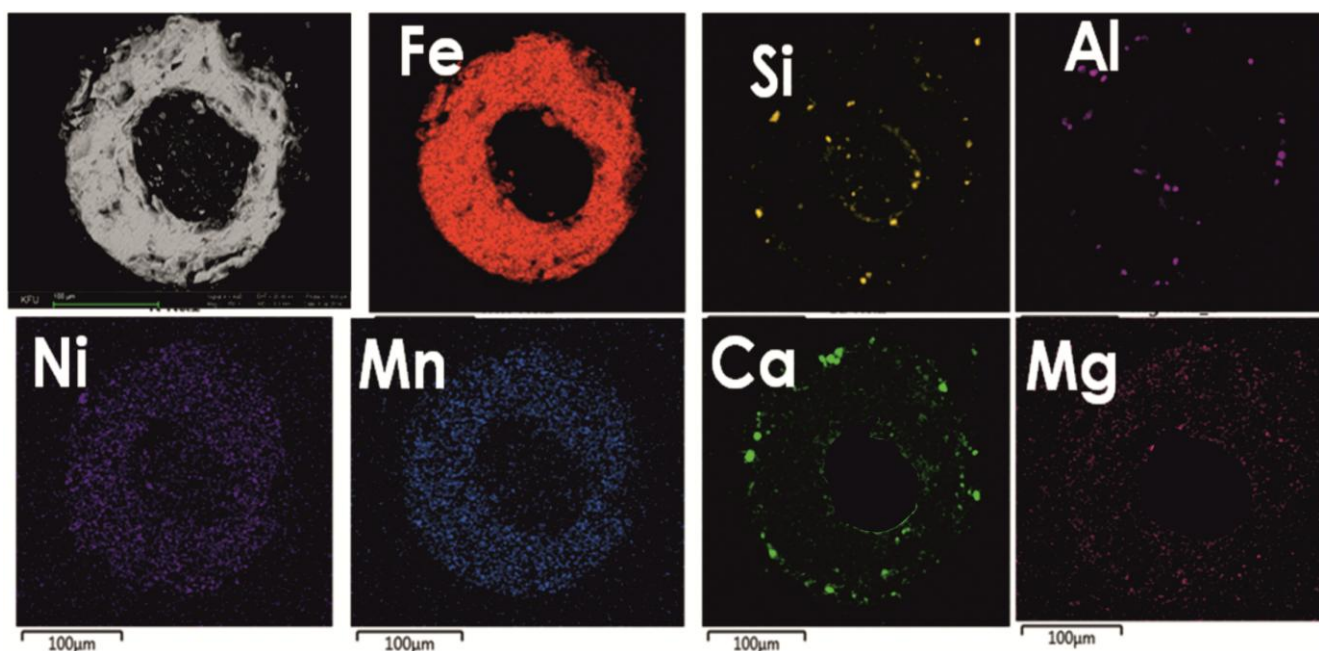


Рисунок 4.21. ЭДС-картирование среза ММ из осадочных пород разреза Усолка

В целом, химический состав всех ММ из природных образований близок, что позволяет их рассматривать как объекты, образованные в одинаковых условиях.

Химический состав техногенных ММ отличается от состава ММ из природных объектов. Для первых характерно относительно низкое среднее содержание FeO – 76 % (Таблица 4.3, Рисунок 4.22, Приложение 2), по сравнению с средним его содержанием в природных ММ (96 %), а также повышенные содержания SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Кремнекислота образует стеклофазу, которая четко фиксируется на электронных снимках техногенных ММ (Рисунок 4.13). Техногенные ММ только в 2-х исследованных нами образцах представлены чистым магнетитом; во всех остальных техногенных ММ повсеместно содержится стекло и изоморфные непрерывные ряды твердых растворов ферри- и титаношпинелидов.

**ММ из зол уноса** сложены двух-, трех-, четырех- и пятифазными группами. Двухфазная группа состоит из магнетита и стекла. Трехфазная группа включает магнетит, шпинелид и стекло со следующими минеральными парагенезами: ульвошпинель-магнетит  $\text{Fe}^{2+}_{1,00}(\text{Fe}^{3+}_{1,96}\text{Ti}_{0,01-0,04})_{2,00}\text{O}_4$ , треворит-магнетит  $(\text{Ni}_{0,01-0,04}\text{Fe}^{2+}_{0,96})_{1,00}\text{Fe}^{3+}_{2,00}\text{O}_4$ , яacobит-магнетит  $(\text{Mn}_{0,04-0,05}\text{Fe}^{2+}_{0,95-0,96})_{1,00}\text{Fe}^{3+}_{2,00}\text{O}_4$ , магнезиоферрит-магнетит  $(\text{Mg}_{0,06-0,1}\text{Fe}^{2+}_{0,9-0,94})_{1,00}\text{Fe}^{3+}_{2,00}\text{O}_4$ .

Таблица 4.3 – Химический состав ММ из техногенных образований (по данным 121 анализа)

Компонент	Содержание, вес. %			Стандартное отклонение, %
	Минимальное	Максимальное	Среднее	
FeO	47.4	100	76	16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5	31.9	4.9	4.8
SiO <sub>2</sub>	0.9	39.7	12.9	13.1
NiO	0.7	2.1	0.3	0.5
TiO <sub>2</sub>	0.4	3.8	0.2	0.4
MgO	0.4	5.3	0.9	1.3
MnO	0.6	7.7	0.7	1.3
CaO	0.3	4.1	0.8	1.1
CuO	1	42.6	1.9	6.8
ZnO	1.8	11.5	1.1	2.4

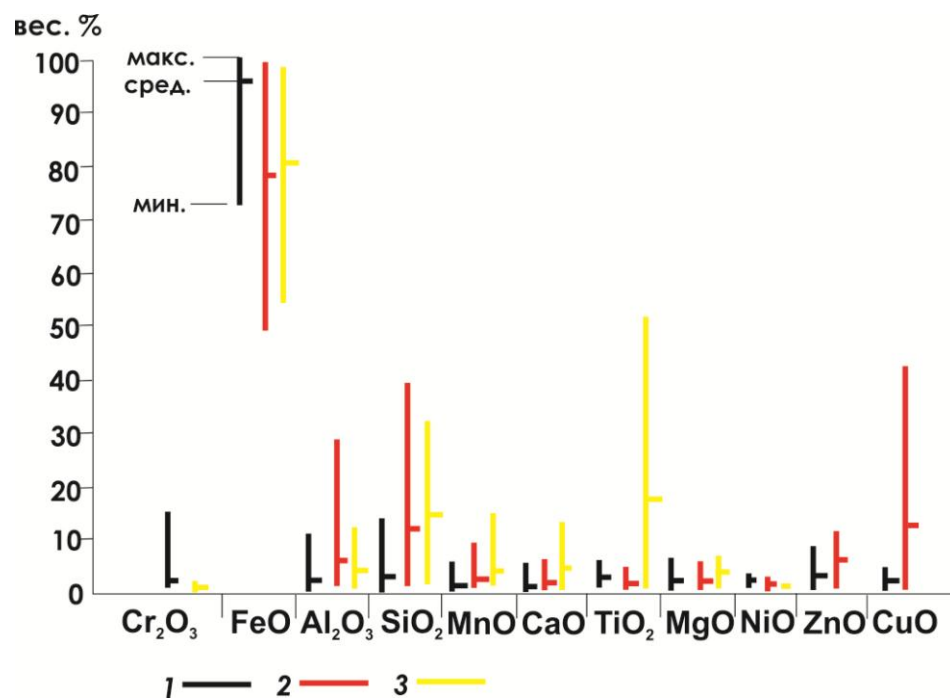


Рисунок 4.22. Химический состав ММ разного происхождения

1 – осадочные породы; 2 – техногенные образования; 3 – вулканические породы [27, 79, 99, 100, 103 и др.]

Четырехфазная группа состоит из магнетита, шпинелида 1, шпинелида 2, стекла и включает следующие минеральные парагенезы шпинелидов: якобсит-магнезиоферрит-магнетит  $(Mg_{0,1-0,23} Mn_{0,04-0,08} Fe^{2+}_{0,69-0,86})_{1,00} Fe^{3+}_{2,00}O_4$ , треворит-магнезиоферрит  $(Mg_{0,07-0,1} Ni_{0,04-0,05} Fe^{2+}_{0,85-0,89})_{1,00} Fe^{3+}_{2,00}O_4$ , треворит-якобсит-магнетит  $(Mn_{0,04-0,13} Ni_{0,04-0,09} Fe^{2+}_{0,78-0,92})_{1,00} Fe^{3+}_{2,00}O_4$ . Пятифазная группа состоит из магнетита, стекла и 3-х ферришпинелидов: якобсит-треворит-магнезиоферрит

$(\text{Mg}_{0,09-0,22} \text{Mn}_{0,03-0,06} \text{Ni}_{0,05-0,07} \text{Fe}^{2+}_{0,65-0,83})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00} \text{O}_4$ .

**ММ из металлургических шлаков** сложены однофазными, двух-, трех-, четырех-, пяти- и шестифазными группами. В трехфазной группе (магнетит – шпинелид – стекло) встречаются 2 парагенеза: купрошпинель-магнетит  $(\text{Cu}_{0,1-0,35} \text{Fe}^{2+}_{0,65-0,9})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00} \text{O}_4$  и франклинит-магнетит  $(\text{Zn}_{0,2-0,23} \text{Fe}^{2+}_{0,77-0,8})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00} \text{O}_4$ . Четырехфазная группа (магнетит – шпинелид 1 – шпинелид 2 – стекло) обладает более разнообразными парагенезами: магнезиоферрит-франклинит-магнетит  $(\text{Mg}_{0,08-0,28} \text{Zn}_{0,05-0,32} \text{Fe}^{2+}_{0,4-0,87})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00} \text{O}_4$ , треворит-магнезиоферрит-магнетит  $(\text{Mg}_{0,19-0,22} \text{Ni}_{0,03-0,05} \text{Fe}^{2+}_{0,73-0,78})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00} \text{O}_4$ , купрошпинель-франклинит-магнетит  $(\text{Zn}_{0,16-0,3} \text{Cu}_{0,1-0,3} \text{Fe}^{2+}_{0,4-0,74})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00} \text{O}_4$ , франклинит-треворит-магнетит  $(\text{Zn}_{0,16-0,2} \text{Ni}_{0,04-0,06} \text{Fe}^{2+}_{0,74-0,8})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00} \text{O}_4$ . В пятифазной группе встречаются парагенезы: купрошпинель-магнезиоферрит-франклинит  $(\text{Mg}_{0,07-0,24} \text{Zn}_{0,12-0,27} \text{Cu}_{0,09-0,23} \text{Fe}^{2+}_{0,26-0,72})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00} \text{O}_4$ , треворит-франклинит-купрошпинель-магнетит  $(\text{Cu}_{0,2} \text{Zn}_{0,13} \text{Ni}_{0,05} \text{Fe}^{2+}_{0,62})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00} \text{O}_4$ , треворит-магнезиоферрит-франклинит-магнетит  $(\text{Mg}_{0,1} \text{Zn}_{0,22} \text{Ni}_{0,05} \text{Fe}^{2+}_{0,63})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00} \text{O}_4$ . Шестифазная группа (магнетит – шпинелид 1 – шпинелид 2 – шпинелид 3 – шпинелид 4 – стекло) состоит из одной ассоциации треворит – магнезиоферрит – франклинит – купрошпинель – магнетит  $(\text{Mg}_{0,18} \text{Cu}_{0,3} \text{Zn}_{0,26} \text{Ni}_{0,06} \text{Fe}^{2+}_{0,2})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00} \text{O}_4$ .

**ММ из отходов химической промышленности (пиритные огарки)** обладают двухфазным (магнетит + стекло) составом с преобладанием магнетита. Трех- и четырехфазные парагенезы встречены в единичных образцах и включают магнетит, шпинелиды и стекло: магнезиоферрит-магнетит  $(\text{Mg}_{0,09} \text{Fe}^{2+}_{0,91})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00} \text{O}_4$ , купрошпинель-магнетит-магнезиоферрит  $(\text{Mg}_{0,6} \text{Cu}_{0,09} \text{Fe}^{2+}_{0,31})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00} \text{O}_4$ .

Изучение минеральных парагенезов ММ позволило установить (Рисунок 4.23), что для большинства ММ из осадочных пород характерен двухфазный состав, тогда как состав минералов ММ из техногенных образований более разнообразен.

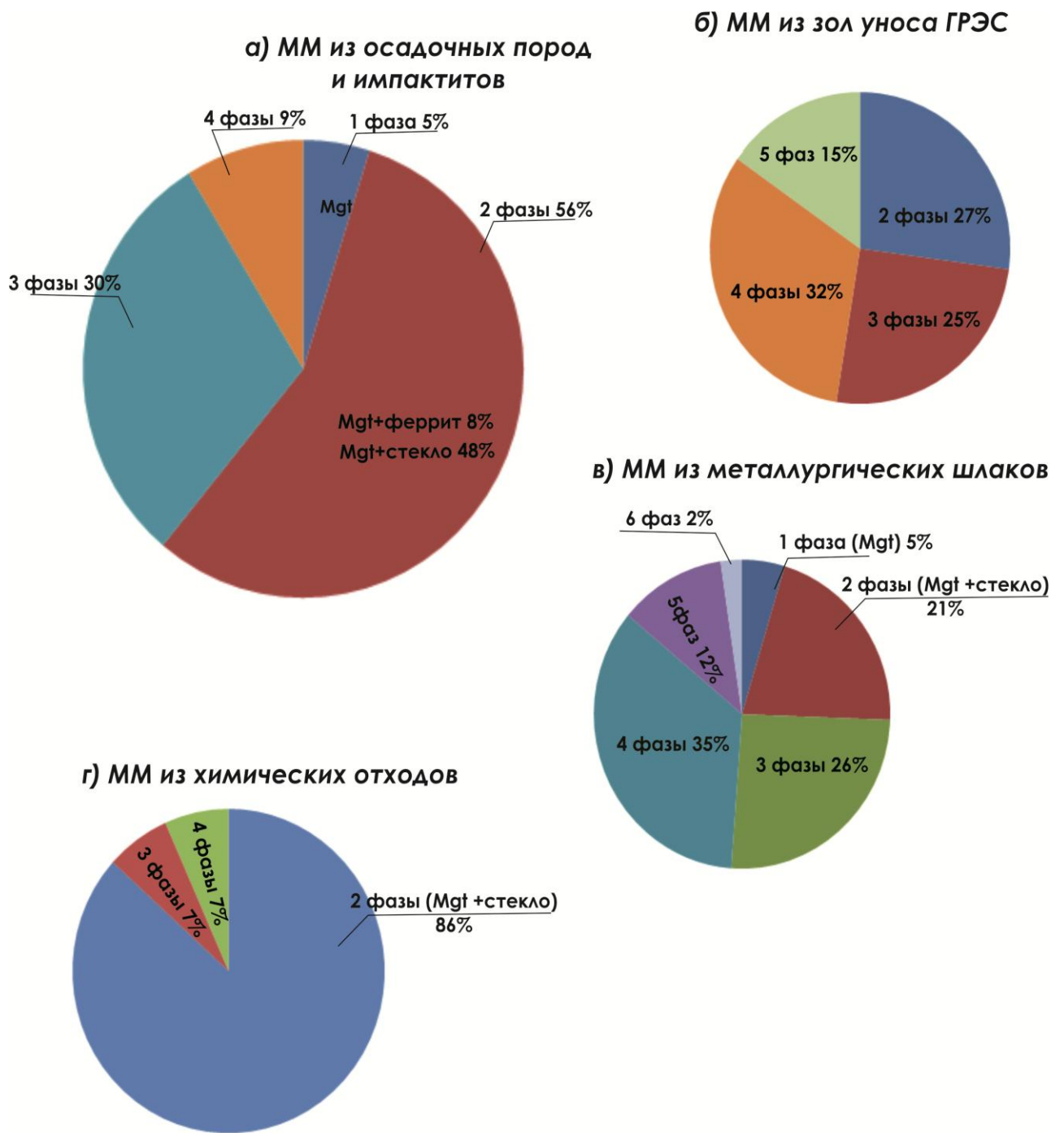


Рисунок 4.23. Минеральный состав ММ разного происхождения

Нами проанализирован химический состав 66 вулканических ММ (Таблица 4.4). Их основными отличиями от ММ других природных образований являются: высокое содержание титана, пониженные содержания железа, низкие содержания никеля, хрома, отсутствие цинка (Рисунок 4.22). В единичных случаях в составе ММ обнаруживается медь [81, 82, 103].

Оригинальные авторские результаты и анализ литературных данных по ММ позволили нам построить классификационные диаграммы. Диаграмма минерального состава показывает (Рисунок 4.24, а), что ММ из природных образований состоят практически полностью из магнетита, что резко отличает их от ММ другого генезиса с более разнообразным набором минералов. По химическому составу (Рисунок 4.24, б) ММ из природных образований расположены в поле космических микросферул и микрометеоритов [164].

В научной литературе существует мнение, что никель в составе ММ может указывать на их космическую природу [3, 13, 219, 292]. Однако нами и другими исследователями [73] выявлено, что никель может присутствовать и в техногенных микросферулах, в частности, в виде треворита  $(\text{Ni}_{0,04-0,08} \text{Fe}^{2+}_{0,92-0,96})_{1,00} \text{Fe}^{3+}_{2,00} \text{O}_4$ , что подтверждается данными ЭДС. Кроме того, во внутренней части ММ из вулканических пород также встречается примесь никеля.

Поэтому данные по содержаниям железа и никеля представлены нами в виде диаграммы FeO – NiO (Рисунок 4.25). Здесь изученные нами ММ из осадочных пород попадают в область микрометеоритов [208, 297] и абляционных сферул [3, 208, 297], что свидетельствует о близости их происхождения. С другой стороны, ММ из осадочных пород практически не объединяются с техногенными ММ, что может свидетельствовать о разных механизмах их образования.

Ранее нами [31] в ММ из осадочных пород обнаружены выпоты Fe-Ni-интерметаллида – аваруита ( $\text{Ni}_3\text{Fe}$ ) в интерстициях между кристаллами магнетита (Рисунки 4.26, 4.27), что может указывать на просачивание расплава никелистой фазы (протрузию) во время сильного (более  $1500^\circ\text{C}$ ) нагрева.

Таблица 4.4 – Химический состав ММ из вулканических пород по данным 66 анализов, из [27, 35, 99, 100, 103, 104, 207]

Компонент	Содержание, вес. %			Стандартное отклонение, %
	Минимальное	Максимальное	Среднее	
FeO	56.6	99	80.3	13.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1	12.8	3.4	3.1
SiO <sub>2</sub>	0.9	32.7	15.2	10.1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1	0.4	0.2	0.02
NiO	0.1	0.3	0.2	0.02
TiO <sub>2</sub>	0.1	51.2	18.1	16.8
MgO	0.1	5.6	2.8	1.8
MnO	0.1	16.1	3.1	4.5
CaO	0.1	14.1	4.1	4.2

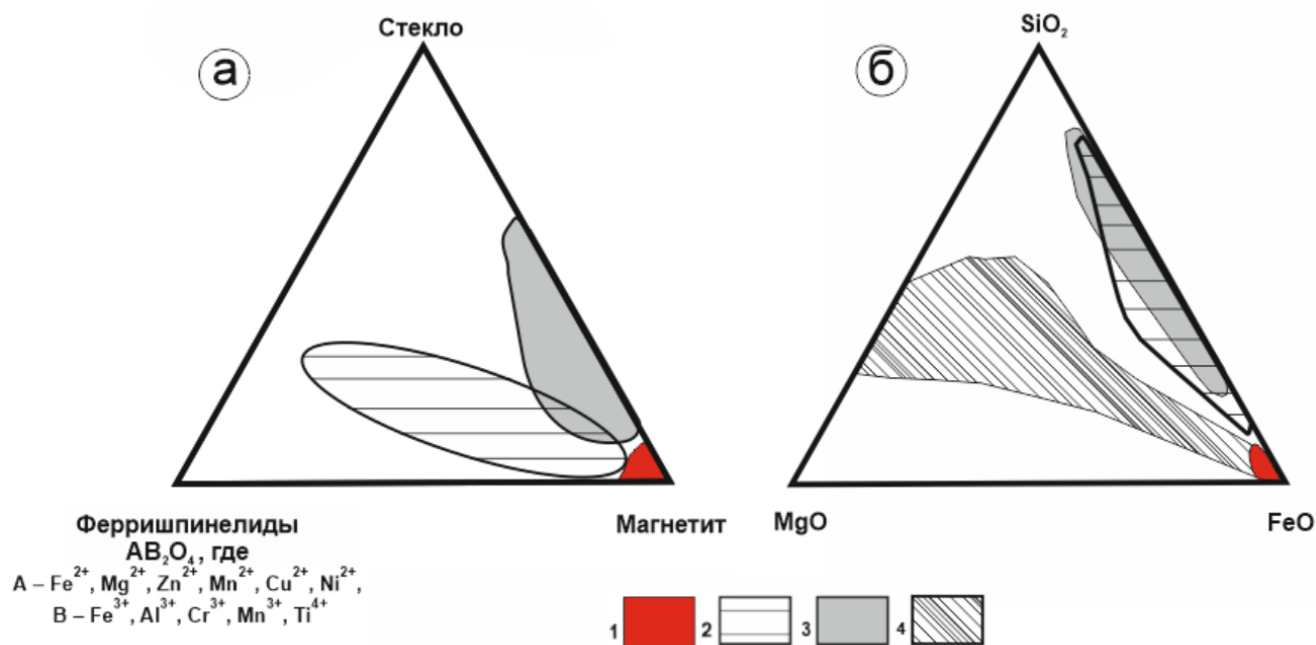


Рисунок 4.24. Минеральный (а) и химический (б) составы ММ

1 – осадочные породы; 2 – вулканические породы; 3 – техногенные образования; 4 – космические микросферулы и микрометеориты, по [164]

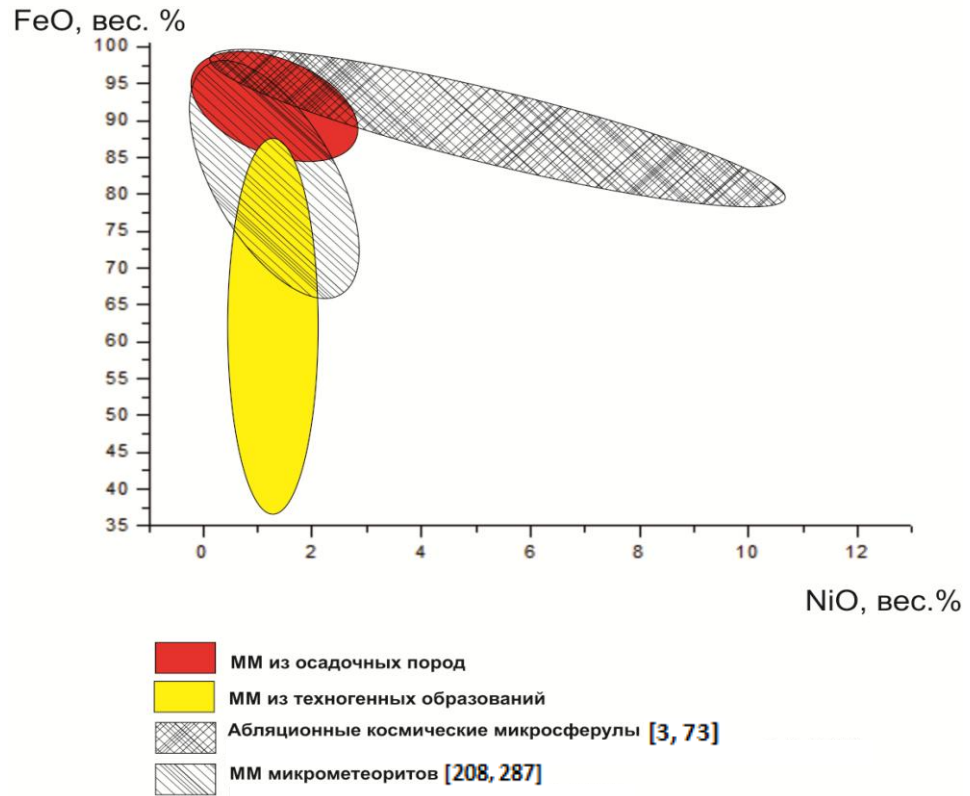


Рисунок 4.25. Диаграмма FeO – NiO для ММ

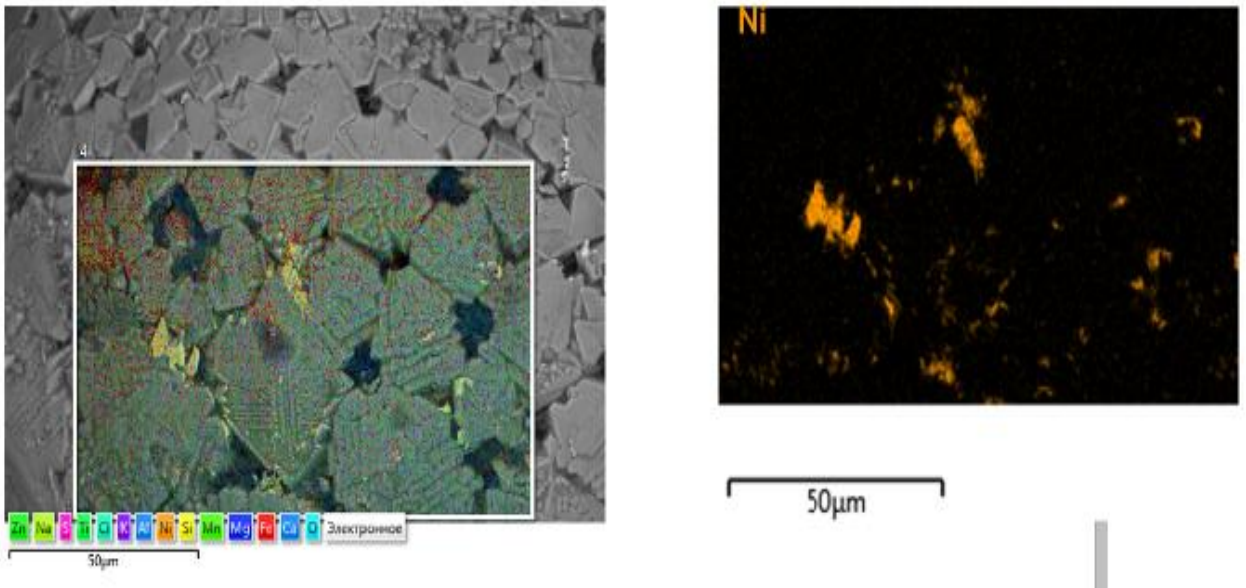


Рисунок 4.26. Аваруит в интерстициях (желтое) на поверхности ММ, из [31]

Подобный механизм объясняет наличие центральных субсферических пустот внутри ММ, а также самородного никеля и/или железо-никелевых интерметаллидов (камасита с Ni менее 6 %, тэнита с Ni более 25 %, аваруита с Ni более 40 %), что является дополнительным диагностическим критерием абляционных сферул. Отметим, что в МАС не всегда имеется примесь Ni. Это связано, по-видимому, с присутствием никеля в материнском метеороиде или его полным окислением при плавлении метеороида в атмосфере [3]. В составе микрометеоритных ММ никель встречается даже чаще, чем в МАС, однако его содержание здесь не превышает 1 %.

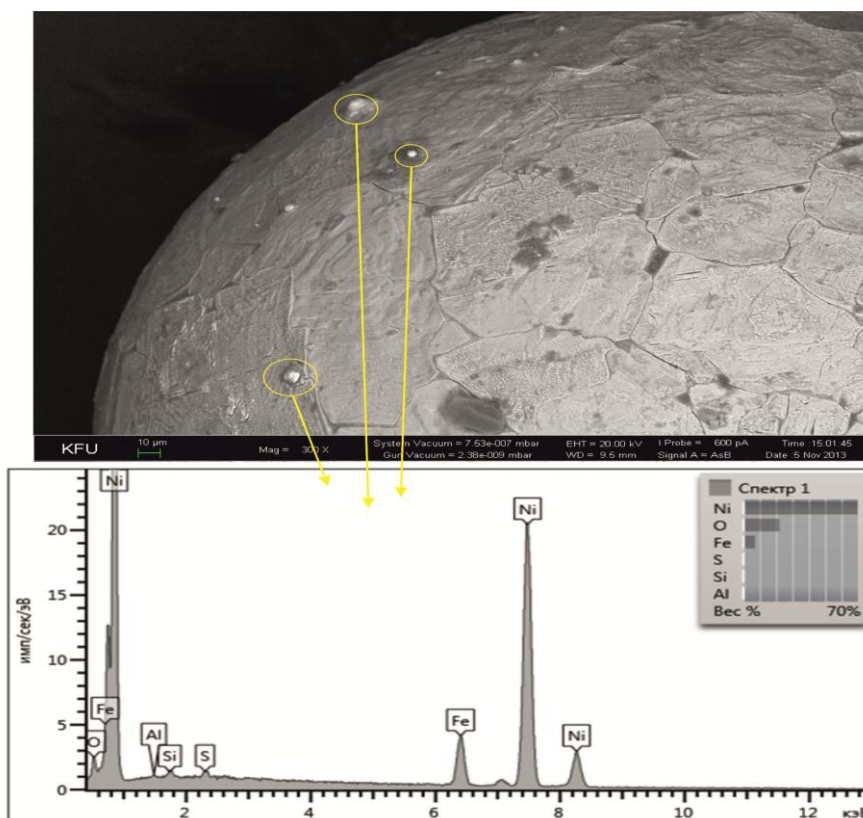


Рисунок 4.27. Аваруит на поверхности ММ, из [30]

Вышеприведенные морфологические, минералогические и химические особенности состава ММ из осадочных пород и техногенных образований, которые существенно дополняют данные предшественников (см. Таблица 1.1), обобщены в Таблице 4.5.



**Выводы.** В ходе обработки результатов оригинальных исследований автором дополнены типоморфные диагностические признаки для распознавания ММ космического и техногенного происхождения.

1. **По средним значениям диаметров:** четко дифференцируются ММ разного происхождения: для вулканических ММ эта величина превышает 200 мкм, для техногенных – 90 мкм, тогда как ММ из осадочных пород и импактитов имеют средний диаметр 45 мкм.

2. **По коэффициенту сферичности:** ММ из осадочных пород и импактитов обладают почти идеальной сферичностью (средний коэффициент сферичности  $n = 1,01$ ); ММ из вулканических пород и техногенных образований менее сферичны ( $n = 1,06–1,12$ ).

3. **По микроструктурам:** для поверхности ММ абляционного и импактного происхождения характерна мозаичная структура, а ММ микрометеоритов обладают дендритовой (скелетной) структурой. Для техногенных характерна микропорфировая структура с пористой текстурой, а также скелетная, мозаичная, бугристая и однородная структуры. Вулканические ММ характеризуются структурой раскристаллизации, дендритовой, мозаичной, сноповидной и бугристой.

4. **По форме и количеству пустот:** большие субсферические пустоты характерны для МАС и импактных ММ; отсутствие пустот или сеть мелких пустот характерны для ММ микрометеоритного происхождения; вулканические и техногенные ММ обладают большим количеством разных по размеру пустот.

5. **Площадная доля пор:** ММ из осадочных пород и импактитов обладают наименьшей пористостью (среднее 13 %), а наибольшая пористость (до 60 %) характерна для техногенных ММ.

Таблица 4.5 – Диагностические критерии разделения ММ разного генезиса

Критерии		Космическая группа			Магматическая группа	Техногенная группа
		Микро-метеориты	Магнитные абляционные сферулы	Импактные	Вулканические	Золы уноса, отходы химической промышленности, металлургические и сварочные шлаки
Встречаемость ММ в пробе весом 100 г, штук		10 <sup>0</sup> – n 10 <sup>2</sup>				10 <sup>2</sup> – 10 <sup>5</sup>
Внешние критерии	Коэффициент сферичности	1.01			1.06	1.12
	Диаметр, мкм (min–max/среднее)	$\frac{5-100}{45}$			$\frac{100-1000}{213}$	$\frac{10-1000}{90}$
	Структура	Дендритовая и скелетная	Мозаичная	Мозаичная	Дендритовая, мозаичная, сноповидная, бугристая, раскристаллизации	Скелетная, микропорфировая, мозаичная, бугристая, однородная
Внутренние критерии	Ядро	Отсутствие ядра	Может присутствовать Fe-Ni ядро (Ni до 10%)	Отсутствие ядра	Может присутствовать ядро из самородного Fe, Fe-Ni, Fe-Cu	Отсутствие ядра
	Поры	Пор нет или мелкие поры неправильной формы	Единственная субсферическая пора		Множественные субсферические поры или разные по размерам поры неправильной формы	
	Площадная доля пор, % (min–max/среднее)	$\frac{0-36}{13}$			$\frac{8-33}{19}$	$\frac{1-60}{22}$
Минералы		Магнетит, вюстит	Магнетит, вюстит, тэнит, камасит, троилит, шрейберзит		Магнетит, ульвит, купрошпинель; якобсит, магнезиоферрит, стекло, шорломит	Магнетит, вюстит, маггемит, гематит, магнезиоферрит, якобсит, ферриты Са, стекло
Дифференциация вещества по поглощению рентгеновских лучей		Нет		Нет данных	Нет данных	Есть
Химические и минеральные примеси		Содержание NiO (1 %)	Присутствие самородного никеля или Ni <sub>3</sub> Fe	Нет данных	TiO <sub>2</sub> до 24 %; стекло может превышать 30 %	Состав зависит от исходного сырья. Стекло может превышать 30 %. У сварочных ММ примеси могут отсутствовать

*Примечание:* при составлении таблицы использованы оригинальные данные и опубликованные материалы из [3, 27, 35, 73, 98-100, 104, 176, 193, 207-209, 212, 287, 292]

**6. По минеральному составу:** комплексом методов высокого разрешения (СЭМ, ЭДС-картирование, микро-КТ и рамановское картирование) доказан примитивный однородный (преимущественно магнетитовый) состав ММ из осадочных пород и импактитов; состав ММ техногенного и вулканического происхождения значительно более разнообразен и включает несколько минеральных фаз шпинелидов и стекло.

Из вышеизложенного можно констатировать, что идеальная сферичность, блочно-мозаичный тип микроструктуры, наличие субсферической полости, магнетитовый состав с выделениями самородного никеля и/или Fe-Ni-интерметаллидов указывают на образование ММ при абляции метеороида или импактном взрыве. ММ с идеальной сферичностью и диаметром менее 100 мкм, обладающие дендритовой микроструктурой, незначительной (около 10–15 %) площадной долей пор, магнетитовым составом с примесью никеля можно отнести к космическим объектам.

## 5. ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ МИКРОСФЕРУЛ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

### 5.1. Импакт-стратиграфическая шкала фанерозоя

ММ космического происхождения достаточно часто встречаются в древних отложениях и могут указывать на импактные события разного масштаба в геологическом прошлом [55]. Другими трейсерами (от англ. *trace* – след, отпечаток, индикатор) – минеральными типами с характерными для импактных событий структурно-текстурными и геохимическими признаками являются: микрокрититы (микроалмазы, Ni-шпинель, муассанит, ударный кварц), самородные железо, никель и их интерметаллиды [31, 55, 109, 172 и др.], микротектиты (сферулы силикатного состава) и МАС, характеристика которых приведена в разделе 1. Некоторые исследователи считают [4, 5], что крупные импактные события могут приводить к глобальным вымираниям фауны – биотическим кризисам.

Анализ распространения ММ в фанерозойских осадочных толщах, выполненный автором с привлечением оригинальных и опубликованных данных, показывает достаточно хорошую корреляцию между количеством ММ в осадках и известными космическими событиями (Рисунок 5.1). Ниже будут охарактеризованы космические события для отдельных периодов фанерозоя.

*Девон.* В позднедевонских отложениях зафиксированы 3 крупных импактных события с образованиями кратеров Аламо (США, Невада) [152], Вудлей (западная Австралия, залив Шарк) [310], Сильян (Швеция) [93]. Для девонских отложений также зафиксированы находки ММ [28], микротектитов, ударного кварца и иридиевой аномалии [4, 5, 55].

Эонотема	Эратема	Система	Индекс	ММ		Микро тектиты	Микро алмазы	Астроблемы	
<b>ФАНЕРОЗОЙ</b>	<b>КАЙНОЗОЙ</b>	Q		●	● <sup>С</sup>	●	★	<b>Эльгыгытгын</b>	
		неоген	N2		●	●			<b>Рис</b>
			N1	●		●	★		<b>Попигай</b>
		палеоген	Р2	●	●	●	★		<b>Чикскулуб Болтыш Каменская Гусевская</b>
			мел	K2	●	●●	●●	★	<b>Мьолнир Мороквенг</b>
	<b>МЕЗОЗОЙ</b>	юра			●				
					●				
		триас	T2		● <sup>С</sup>	●			<b>Бедоут Вилксленд</b>
			Р3	●	● <sup>С</sup>	●			
	<b>ПАЛЕОЗОЙ</b>	пермь	Р2	●●					<b>Терновский</b>
			Р1	●●	●				<b>Актогай Айдарлы</b>
			С3	●●					<b>Шарлевуа Сильян Вудлей Аламо</b>
		девон карбон	С2	●●					
			С1	●●					
		силур	D3		●				
						●			
	ордовик								
		Є3			●●				<b>Киннекуль</b>
	кембрий								

-  магнитные микросферулы обнаруженные другими исследователями  
 авторские данные  
 импактные микроалмазы  
 высокоуглеродистые ММ

Рисунок 5.1. Импакт-стратиграфическая шкала фанерозоя

Использованы данные из [4, 5, 13, 26, 54-56, 93, 105, 140, 170-173, 190, 204, 220, 223, 248, 262, 285и др.]

Из событий конца девона известно также великое девонское вымирание, в качестве основных причин которого рассматриваются чередования межледниковий и ледниковий, к которым могли привести не только катастрофические космические события, но и крупномасштабный магматизм [4, 5].

*Карбон.* Среди крупных космических событий раннего карбона отмечены падение метеорита и образование кратера Шарлевуа (Квебек, Канада) около 342 ( $\pm 15$ ) млн. лет назад [223]. Время падения метеорита трассируется обнаруженными магнетитовыми, Ni-Fe микросферулами и микрометеоритами в турнейских отложениях Прикаспийской впадины [12, 31, 160]. В московских отложениях Русской плиты встречаются микрометеориты и абляционные сферулы, указывающие на возможное падение крупных космических тел, но не имеющие пока дополнительных подтверждений [80, 162]. В отложениях гжельского и касимовского ярусов встречаются ММ [161], трассирующие падение болида, приведшего к образованию сразу двух ударных кратеров – Актогай и Айдарлы (Казахстан). В них обнаружен еще один трейсер – ударный кварц [37].

*Пермь.* В кунгурском веке отмечено падение болида, образовавшего Терновский кратер в Украине [94]. Находки разными исследователями ММ в кунгурских солевых отложениях Донбасса и Пермского края [39, 242, 253] могут трассировать данное событие. В казанских эвапоритовых отложениях широко распространены ММ, что указывает на возможные падения болидов в казанский век или свидетельствует об усиленном поступлении на Землю космического материала [172, 300].

*Поздняя пермь – триас.* На рубеже перми и триаса длительное время главными событиями считались трапповый вулканизм на севере Сибири (сибирские траппы) и локальные проявления вулканической активности в Китае. Кроме того, в разных регионах мира выявлены горизонты, обогащенные ММ и высокоуглеродистыми сферулами в Шангси-Мейшане (Китай) [137, 246], ММ в Японии [212] и Альпах [138]. Известны также находки ММ Fe-Pb состава в нижнем триасе Австралии [285], микрометеоритов и микротектитов в верхней

перми [157]. Такое масштабное распространение трейсеров может быть свидетельством массовой космической бомбардировки Земли на рубеже перми и триаса. Доказательством данного события считается метеоритный кратер Бедоут возрастом более 250 млн. лет (Австралия) [141], а также предполагаемый гигантский метеоритный кратер Вилкслэнд возрастом 260 млн. лет в Антарктиде [190]. Известные данные о распределении, химическом составе и морфологии микрометеоритов из слоя 27 (около 252 млн. лет) в разрезе Мейшань (Китай) – микротектитов, ММ магнетитового состава и микрометеоритов [54] – хорошо согласуются с возрастом метеоритного кратера Бедоут [55]. Множество обнаруженных исследователями микротектитов на двух стратиграфических уровнях в слое 27 [54] свидетельствует о падении на Землю как минимум двух метеоритов. Находки в слое 27 микрометеоритов с редкоземельными элементами [56] и аналогичные ММ, обнаруженные в отложениях солей вятского яруса Нивенской впадины (Калининград) [22], можно рассматривать как свидетельство столкновения астероидов на околоземной орбите с метеоритом, обогащенным редкими землями [55].

*Мел.* В готеривских и аптских отложениях нижнего мела на плато Устюрт (Казахстан) встречаются ММ. Микрометеоритное событие в раннем сеномане зафиксировано горизонтом ММ никель-цинкового и железо-никелевого составов на горе Кременная в Крыму [59]. Также в разрезе Губден (Дагестан) выявлены 4 горизонта с микрометеоритами: в нижнем горизонте обнаружены микрометеориты, состоящие из сплавов Fe-Ni и Fe-Ni-Cr; из прослоя известняка-ракушечника выделены микротектиты; из прослоя мергеля – горизонт с ММ магнетитового состава и микрометеоритами из сплава Zn-Ni; горизонт с магнитными и высокоуглеродистыми микросферулами. Горизонт микротектитов свидетельствует о падении на Землю метеорита в самом начале сеномана, размеры которого пока определить невозможно [55]. Наличие еще трех стратиграфически близких горизонтов с микрометеоритами свидетельствует в пользу того, что падение на Землю метеорита сопровождалось столкновениями на околоземной орбите нескольких астероидов хондритового состава и одного

астероида L-хондритового состава [55]. Находки единого стратиграфического уровня с микрометеоритами в Крыму и на Северном Кавказе указывают на крупное микрометеоритное и импактное событие, произошедшее на рубеже *альба* и *сеномана*.

Импактное событие *на рубеже коньяка и сантона* зафиксировано в прослое белого окремнелого известняка, обогащенного микротектитамии в окрестностях города Белогорск в Крыму [58]. Космическое вещество также представлено небольшим количеством Na-S-микротектитов. Силикатные микротектиты и MM обнаружены в коньякских отложениях супергруппы White Chalk [287]. Все это является свидетельством падения на Землю метеорита, размеры которого пока не установлены.

*Мел – палеоген.* На границе мела и палеогена во многих удаленных местах отмечаются следы импактных событий, зафиксированных иридиевой аномалией, горизонтами тектитовых микросферул, горизонтом с микрометеоритами и микрокристаллами – Ni-шпинелью, микроалмазами, муассанитом, рением и платиной [26, 55]. Обломки от метеорита, упавшего в Чикскулубе, обнаружены в центральной части Тихого океана [220]. В районе самого кратера (разрезы Эль-Пиньон и Эль-Мулато) имеются два горизонта с микротектитамии [229]. Микротектиты из пограничных отложений мела и палеогена изучены в разрезе Ля-Сьеррита в Мексике [179] и отложениях из скважины в Атлантическом океане [271]. В Техасе также обнаруживается слой со сферулами, который связывают с формированием кратера Чикскулуб. Слой сложен измененными магниевосмектитовыми и железо-магниевохлоритовыми диагенетически измененными микросферулами [179]. Подобные слои обнаружены также в Дании (Стевенс Клинт), Испании (Агоста, Каравака) и Грузии (Тетрицкаро). Исходя из результатов изотопного анализа  $^{54}\text{Cr}$  из сферулового слоя в Караваке, Стевенс Клинте и Нью-Мексико (США) исследователи установили, что они являются свидетельством падения углистого хондрита [271, 305]. В основании переходной глины, между мелом и палеогеном, в Караваке обнаружены сферулы с высоким содержанием калия. В данном случае в качестве источника сферул



рассматривается вещество упавшего железного метеорита. Прослой с ММ отмечен на юге Европейской России (Тепловка, Ключи) в верхней части маастрихта [248]. Ударные алмазы обнаружены в районе Мексиканского залива на границе мела и палеогена в США, Мексике [204] и Гамсе (Австрия), где найден также муассанит [135, 295].

Современные находки на рубеже мела и палеогена могут указывать на мультиимпактные события, хотя корреляция событий на данном рубеже между Мексиканским заливом и Европой опирается на существование одного импактного события [55]. Так, зерна ударного кварца двух типов на границе мела и палеогена в разных регионах мира (в районе Мексиканского залива, Дании и Новой Зеландии) рассматриваются как следы падения двух разных метеоритов вблизи данной границы [140]. Существование двух горизонтов с микросферулами в ассоциации с аномалиями иридия и отрицательным экскурсом  $\delta^{13}\text{C}$  вблизи границы мела и палеогена в Абате (Оман) также может свидетельствовать о двух импактных событиях [294].

*Эоцен.* В позднем эоцене произошли три импактных события, отмеченные горизонтами микротектитов в Северной Америке [189, 216]. Предприняты также попытки определить трейсеры Попигайского падения метеорита [228]. Здесь обнаружены ММ, микротектиты, ударный кварц и алмазы [23, 77, 89, 172].

*Миоцен.* Импактное событие в среднем миоцене отмечено горизонтом с большим количеством высоконатриевых микротектитов на острове Карагинский у восточного побережья Камчатки [55]. В это же время образовался ударный кратер Рис, в пределах которого обнаруживают ММ, микротектиты, ударный кварц и алмазы [55, 172, 264].

На рубеже *плейстоцена* и *голоцена* многие исследователи выделяют слой Younger Dryas (YD, поздний дриас), с которым связаны импактные события на рубеже 12000–13000 лет назад [142, 170, 173, 208, 239, 262, 279, 297]. Подобное явление фиксируется горизонтом высокоуглеродистых микросферул и микроалмазов в Северной Америке и могло стать причиной продления на 1 тысячелетие ледниковой эпохи («импактная зима»), которая завершилась только

к началу голоцена. Все это привело к массовому вымиранию мегафауны, включая мамонтов [173, 279], и сокращению человеческих популяций на территории Северной Америки и Европы.

Несколько микрометеоритных событий данного интервала выражены горизонтами, содержащими ММ в четвертичных отложениях Восточной Европы [19, 279]. Так, автором в магистерской диссертации (2017) были детально исследованы четвертичные образования в районе импактного кратера – озера Рабига Куль [19], расположенного на левобережье р. Волга в Республике Татарстан (Рисунки 5.2, 5.3). При непосредственном участии автора возле озера Рабига Куль пройдены 3 зондировочные скважины глубиной в 1 м каждая (Рисунок 5.4), в которых обнаружены ММ и металлические микрочастицы спиралевидной формы (Рисунок 5.4).

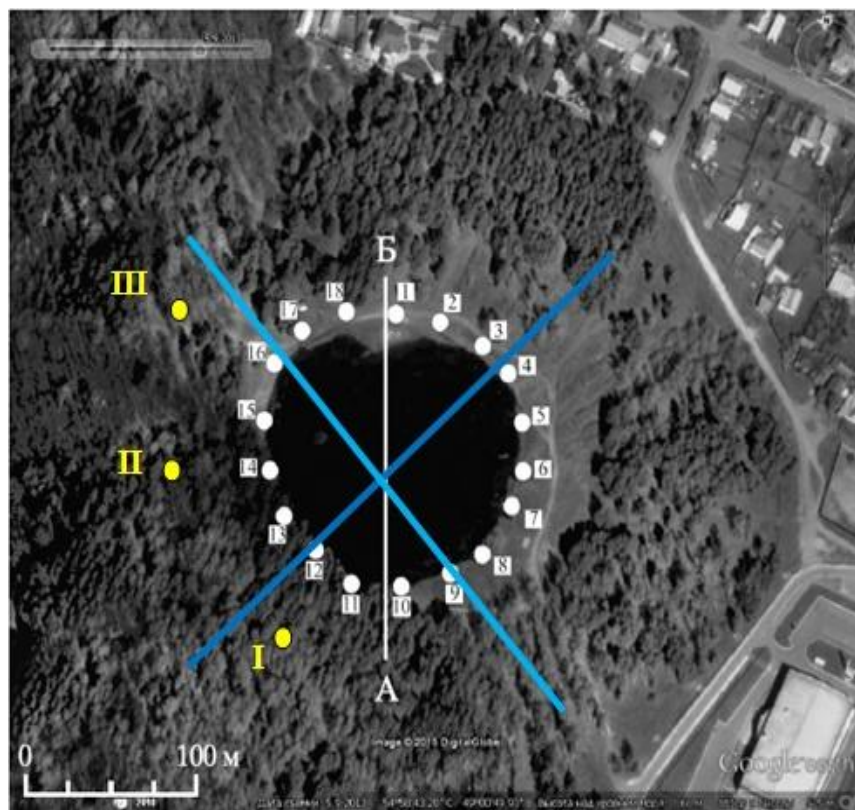


Рисунок 5.2. Зондировочные скважины (желтый цвет), их номера и магнитометрические профили (синие линии) в районе озера Рабига-Куль  
*Белые точки – места отбора почвенных проб; белая линия – геоморфологический профиль, из [19]*

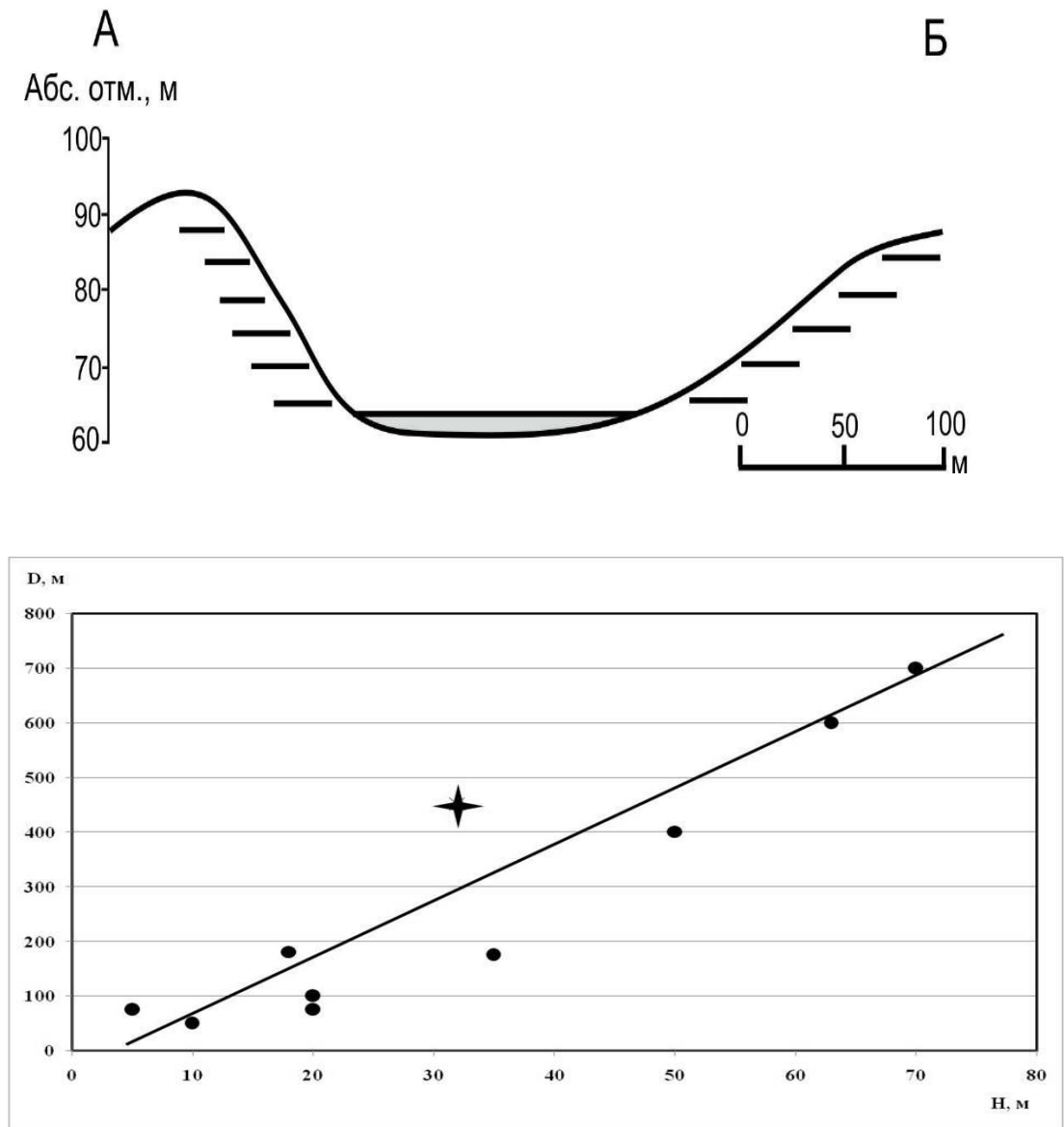


Рисунок 5.3. Поперечный профиль озера Рабига Куль (вверху, см. Рисунок 5.2) и морфологические параметры импактных структур (внизу), из [19]

*Черные точки на нижнем рисунке – данные по импактным мелким кратерам; звездочка – котловина озера Рабига Куль; D – диаметр кратера по гребню вала; H – глубина кратера от гребня вала до дна*

Было доказано, что в четвертичных отложениях озера Рабига-Куль имеются индикаторы импактного события на границе плейстоцена и голоцена: ММ (Рисунок 5.5); частицы с оплавленной коркой; самородные металлы и интерметаллиды.

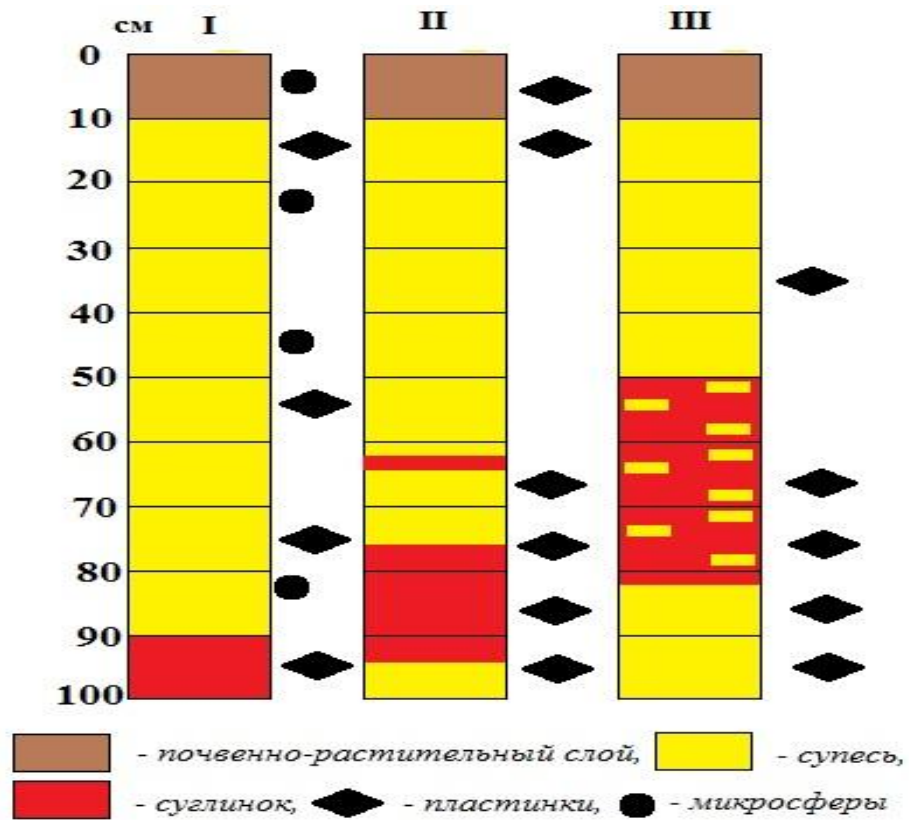


Рисунок 5.4. Разрез четвертичных отложений по данным зондировочных скважин возле озера Рабига Куль и находки металлических микрочастиц (расположение зондировочных скважин см. Рисунок 5.2)

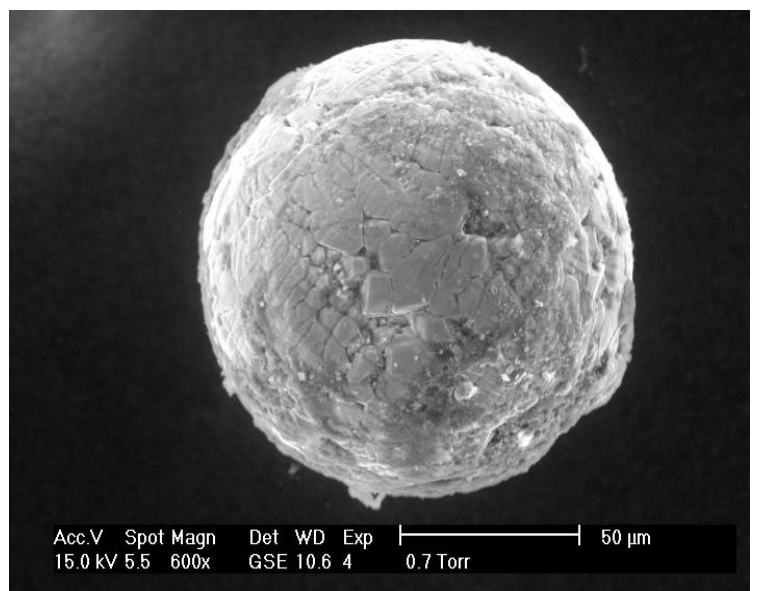
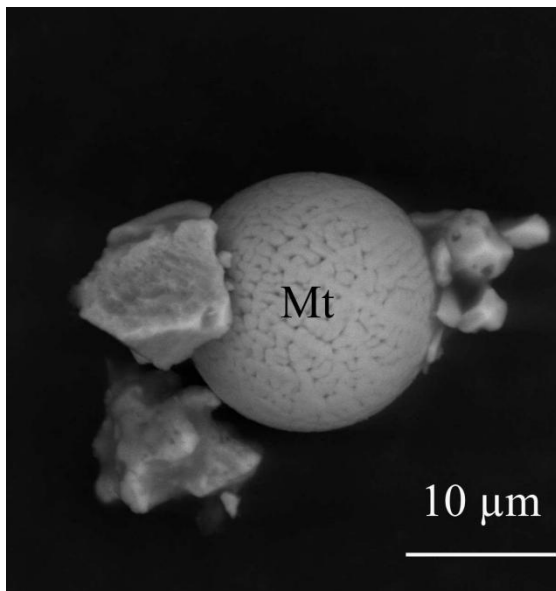


Рисунок 5.5. ММ из четвертичных отложений озера Рабига Куль ММ слева – из [19]; справа – из зондировочной скважины, глубина 30 см

Это, наряду с морфологическими признаками (Рисунки 5.2, 5.3) и геологическими данными, является свидетельством образования данного озера при ударе метеорита [19]. По результатам профильной магнитометрии (Рисунок 5.2) нами в северо-восточной части озера выявлена магнитная аномалия, которая, возможно, связана с погребенным под озерными осадками метеоритом.

## **5.2. Маркирующие горизонты с магнитными микросферулами и корреляция осадочных толщ**

Последствия космических событий могут использоваться на практике, например, как маркирующие горизонты при корреляции разрезов. Среди подобных событий, интересующих геологов, выделяются случаи выпадения на поверхность Земли в геологическом прошлом космического вещества в виде метеоритов, микрометеоритов и космической пыли.

Некоторыми исследователями при стратиграфической корреляции толщ используются трейсеры импактных событий [249, 276], к которым относятся находки микротектитов и микрокриститов [55], геохимические (например, иридиевая) аномалии, обнаружение минералов внеземного происхождения [293] и микрометеоритов [238]. Существует и противоположное мнение [55], согласно которому, ввиду недостатка данных о распределении и характере импактных событий для решения корреляционных задач, ММ не могут быть использованы в стратиграфических целях.

Однако современные факты свидетельствуют в пользу наличия ММ среди пылевой компоненты, образованной после абляции или импактного события (Рисунок 5.6). Находки ММ достоверно устанавливаются при падениях метеоритов. Так, например, Челябинский метеорит, упавший 15 февраля 2013 г. в районе озера Чебаркуль (Рисунок 5.7), создал вокруг северного полярного круга ореол из космической пыли [1, 97], которая осаждалась на сушу и морские акватории на протяжении 2–3 месяцев (Рисунок 5.7). В пылевой компоненте из снежного покрова [123, 124] и в метеоритных обломках Челябинского метеорита

[76, 129] обнаружены ММ (Рисунок 5.8), а спутниковые наблюдения за пылевым ореолом (Рисунок 5.7) подтвердили возможность использования находок ММ абляционного и/или импактного происхождений как дополнительного (иногда и единственного) инструмента для корреляции полифациальных толщ (Рисунок 5.9).

Возможности стратиграфической корреляции по ММ на больших расстояниях подтверждены для события на границе позднего плейстоцена и голоцена (Рисунок 5.10) при столкновении Земли с крупным космическим телом диаметром в несколько сотен метров.

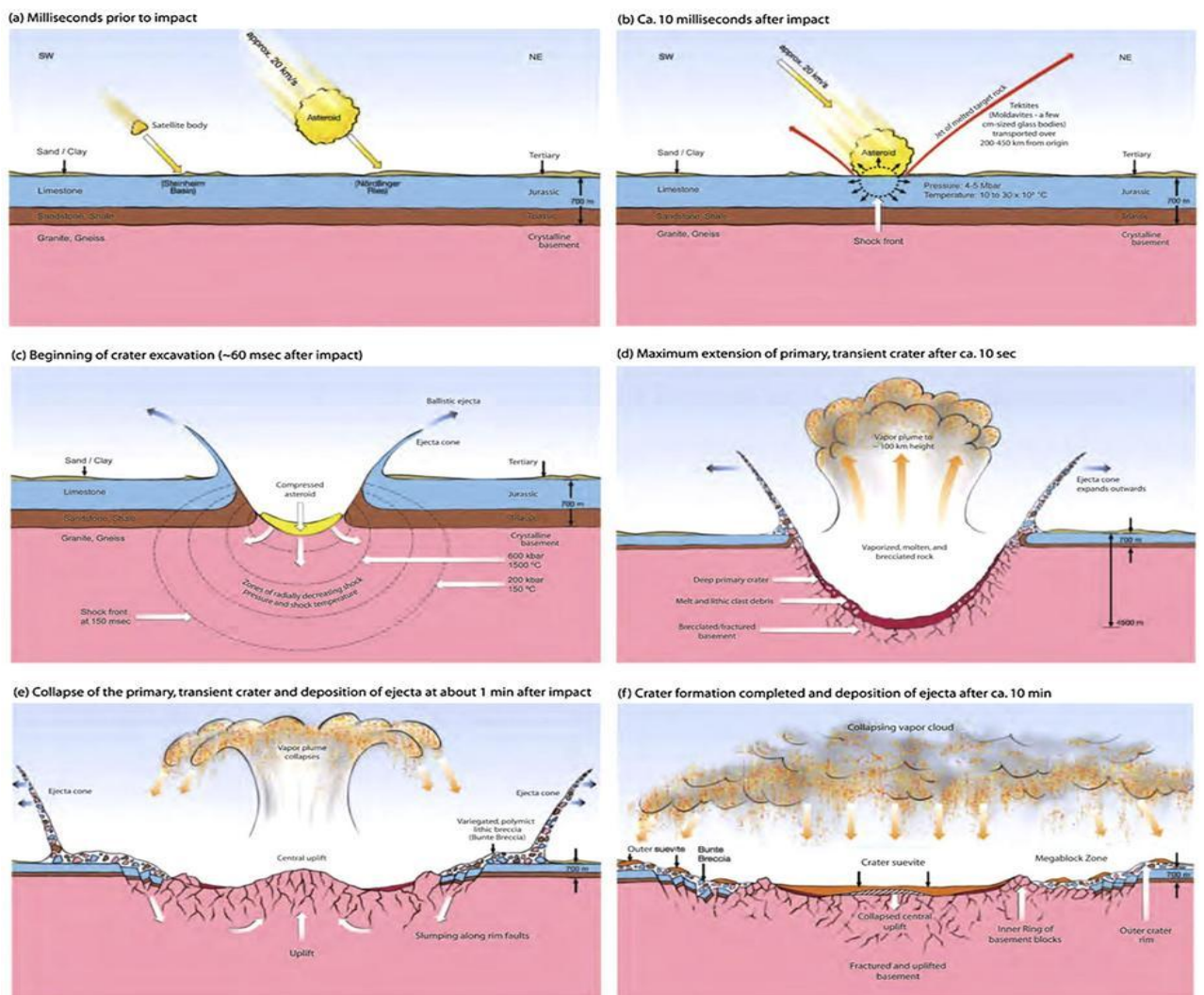


Рисунок 5.6. Образование импактной структуры и выброс смешанного материала в атмосферу, из [274]

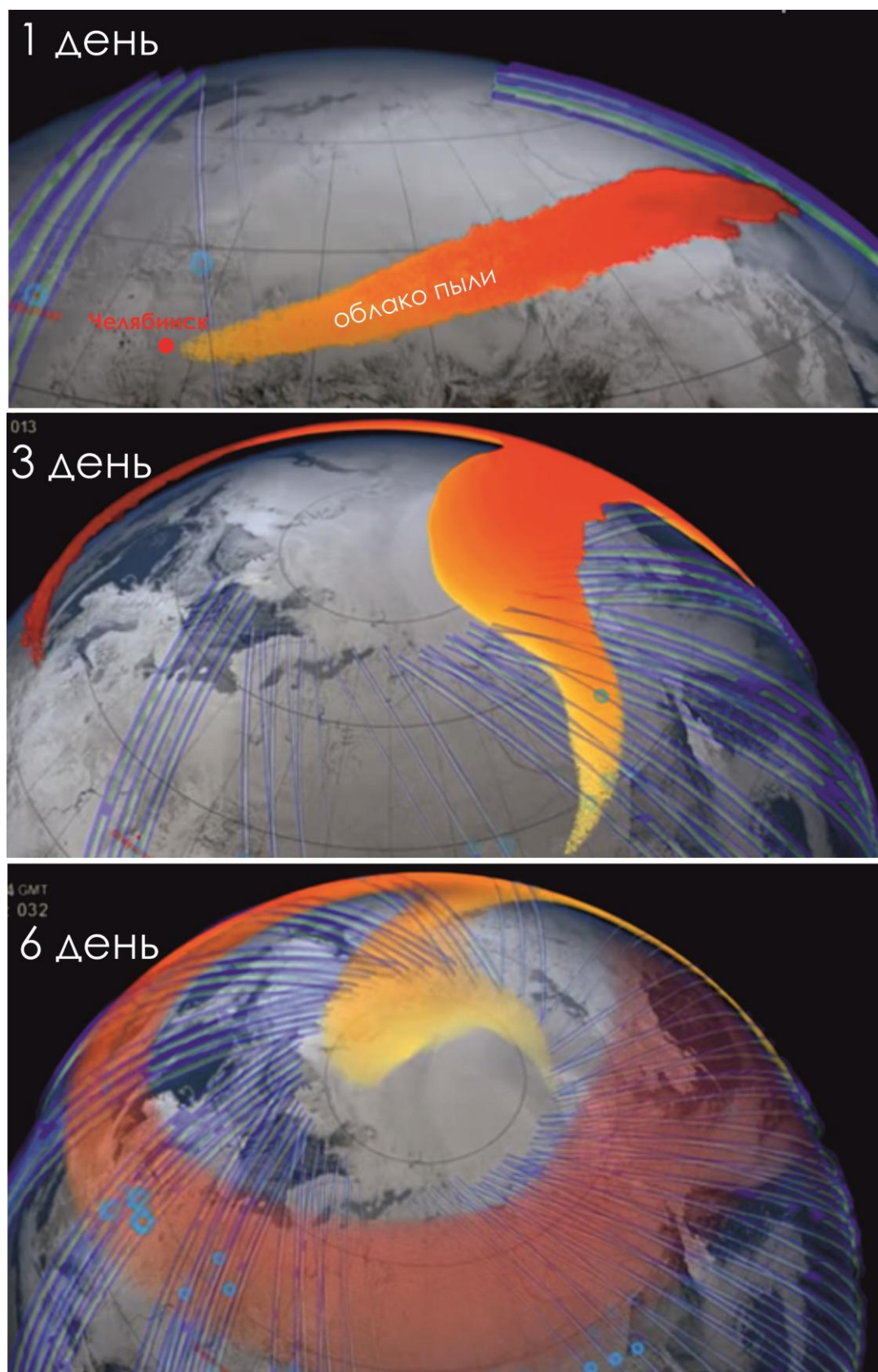


Рисунок 5.7. Расширение облака пыли Челябинского метеорита, из [97]

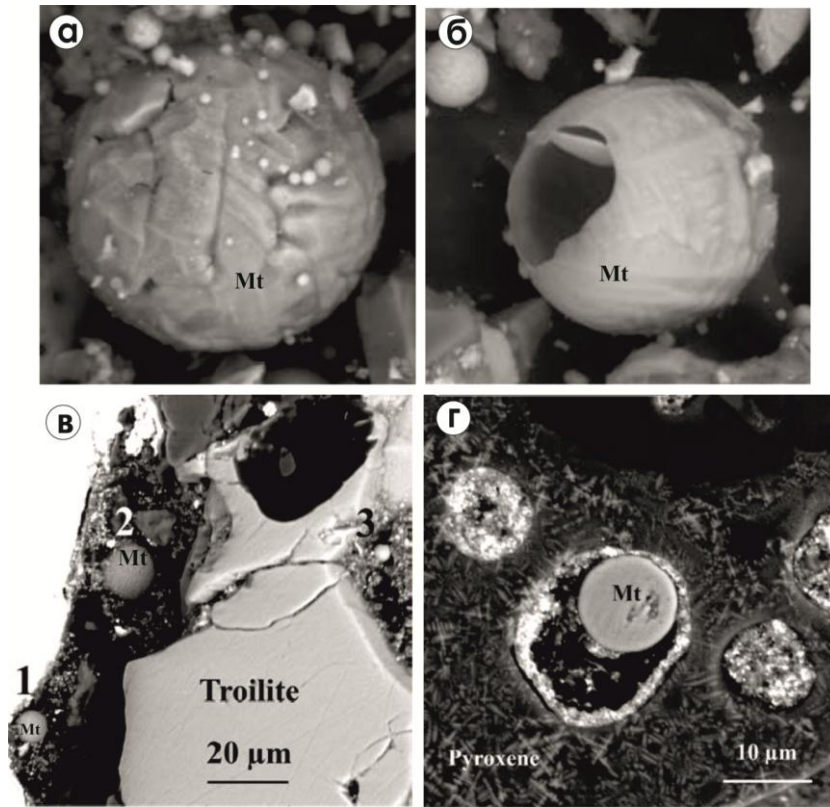


Рисунок 5.8. ММ в снеговом покрове после падения Челябинского метеорита (а, б) и ММ в обломке Челябинского метеорита (в, г), из [76, 123, 124, 129]

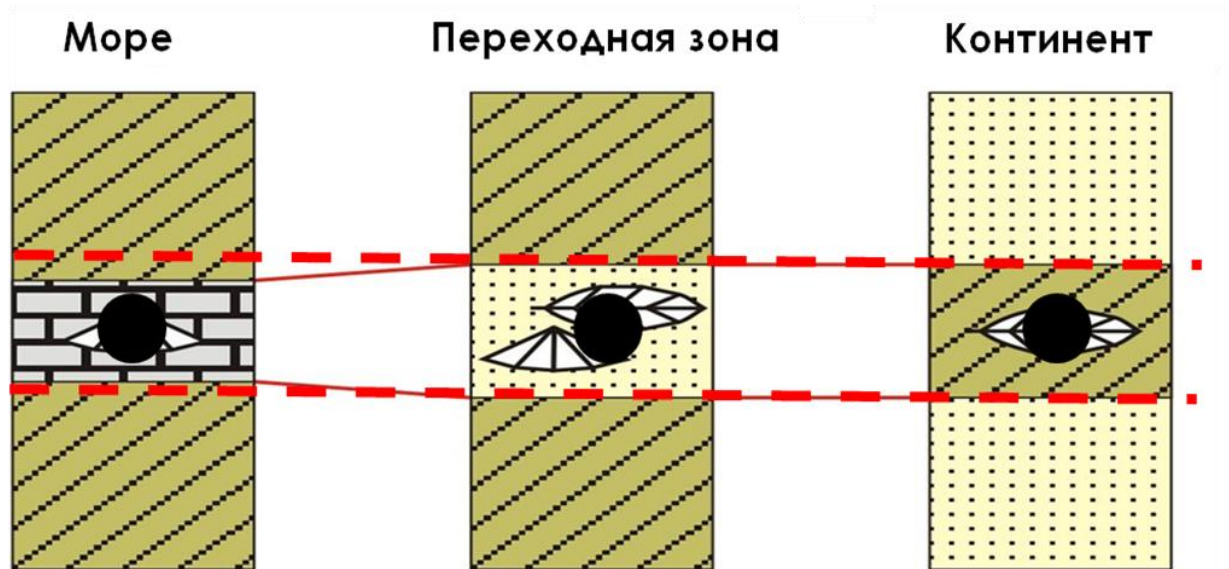


Рисунок 5.9. Использование ММ для стратиграфической корреляции полифациальных разрезов





Рисунок 5.10. Места находок космических микрочастиц (черные точки) из позднего дриаса и область их распространения (серый цвет), по [176] из [19]

*Места находок кратерных озер в Восточной Европе (белые кружки) и новая область импактных кратерных структур (черная область)*

Данный объект двигался с большой скоростью и распался на множество обломков в земной атмосфере, что привело к образованию слоя импактитов и озерных котловин с характерным морфологическим обликом (см. подраздел 5.1).

Разделение космогенных ММ необходимо для понимания возможностей их применения для решения геологических и ряда других задач. Так, например, ММ из космической пыли могут быть применимы для подсчета поступления космического вещества на Землю; падения крупных космических тел могли влиять на жизнь и климат на Земле; с абляционными и импактными ММ связывают образование кратеров и пород ударного метаморфизма, а импактные события отвечают за образование месторождений полезных ископаемых [37, 77, 93, 131, 168]. Однако необходимо различать ММ, относящиеся к космической пыли, абляционные и импактные. Известно, что ММ абляционного и импактного

происхождения обладают размерами более 100 мкм, имеют железо-никелевое ядро или субсферическую полость, состав элементов-примесей в них более разнообразен, т. к. зависит от состава пород мишени [3, 55, 142, 243, 292, 298]. Наиболее распространенными находками в слоях со следами импактных событий являются ММ, которые, например, выявили среднепалеозойское событие (лохковский век, ~415 млн. лет назад), импактное на юго-западе Украины [109]. Кроме ММ, в импактатах встречаются микрочастицы железо-никелевых интерметаллидов, а также самородные железо и никель.

Импактные ММ обладают диаметрами более 100 мкм (см. раздел 1), а незначительный размер зерен магнетита свидетельствует о высокой скорости остывания металлического расплава. При этом, чем больше микросферулы, тем более крупными кристаллами магнетита они сложены, что свидетельствует о более высокой скорости остывания мелких шаровидных капель расплава по сравнению с крупными. Округлая форма капель жидких фаз в природе обычно объясняется необходимостью минимизации поверхностной энергии, величина которой прямо пропорциональна площади поверхности шара и силе (энергии) поверхностного натяжения. Поэтому жидкая фаза принимает форму шара под действием сил поверхностного натяжения, всегда вызывающих уменьшение поверхности, причем, чем меньше количество жидкости, тем сильнее проявляется данный эффект, т. к. с уменьшением размера шара его масса уменьшается в большей степени, чем площадь поверхности. Поверхностное натяжение у расплавов металлов существенно больше, чем у расплавов силикатов [47], и поэтому образующиеся в импактном процессе капли расплава железа крайне малых размеров стремятся приобрести сферическую форму [15]. Застывая, они порождают шаровые формы импактитов, среди которых часто встречаются и ММ.

В каменноугольных отложениях эталонного разреза Усолка ММ распределены неравномерно (см. раздел 3, Рисунок 3.3). Большинство из них имеет диаметр около 100 мкм, микроструктура поверхности мозаичного типа (Рисунок 5.11, Приложение 1), внутри имеются субсферические пустоты. Минеральный состав ММ очень примитивный и включает поликристаллический

агрегат магнетита с примесями Ni и Cr. Подобный минеральный состав характерен для каменных метеоритов [26], а микроструктурный рисунок поверхности ММ, наряду с почти идеальной сферичностью, считается одним из определяющих критериев их космогенности [26, 28]. Сопоставление содержаний кислорода и железа в ММ из разреза Усолка и палеозойских отложений Прикаспийской впадины выявило их общие тренды, что свидетельствует о едином генезисе данных образований. Таким образом, по химическим и минералогическим параметрам ММ из разреза Усолка можно, с большой вероятностью, отнести к объектам космического происхождения. Дополнительным подтверждением подобного вывода является наличие в разрезе Усолка тектитов [80].

Совместный анализ результатов изотопных исследований в Предуральском прогибе и распределения ММ в разрезе Усолка показал, что одной из возможных причин отрицательных аномалий  $\delta^{13}\text{C}$  могла являться метеоритная бомбардировка с импактным событием на рубеже московского и касимовского веков [34]. К настоящему времени имеются лишь единичные данные об импактных событиях в каменноугольном и пермском периодах [83, 85], поэтому обнаружение в других районах земного шара в данном стратиграфическом интервале ММ может выявить новые глобальные корреляционные уровни, которые не зависят от происхождения вмещающих осадочных пород.

Отметим, что корреляция полифациальных толщ в настоящее время является важнейшим элементом поисковых работ в нефтегазовой геологии. Однако применение для решения данной задачи традиционных биостратиграфических, литологических, минералого-геохимических методов, включая определение абсолютного возраста пород, связано с большими трудностями при сопоставлении разрезов разного происхождения для отдельных месторождений и площадей. Один из новых дополнительных методов сопоставления полифациальных толщ – изучение частиц космической пыли, включая ММ, которые в геологическом прошлом осаждались на земной поверхности [30]. Некоторые исследователи с подобными объектами связывают

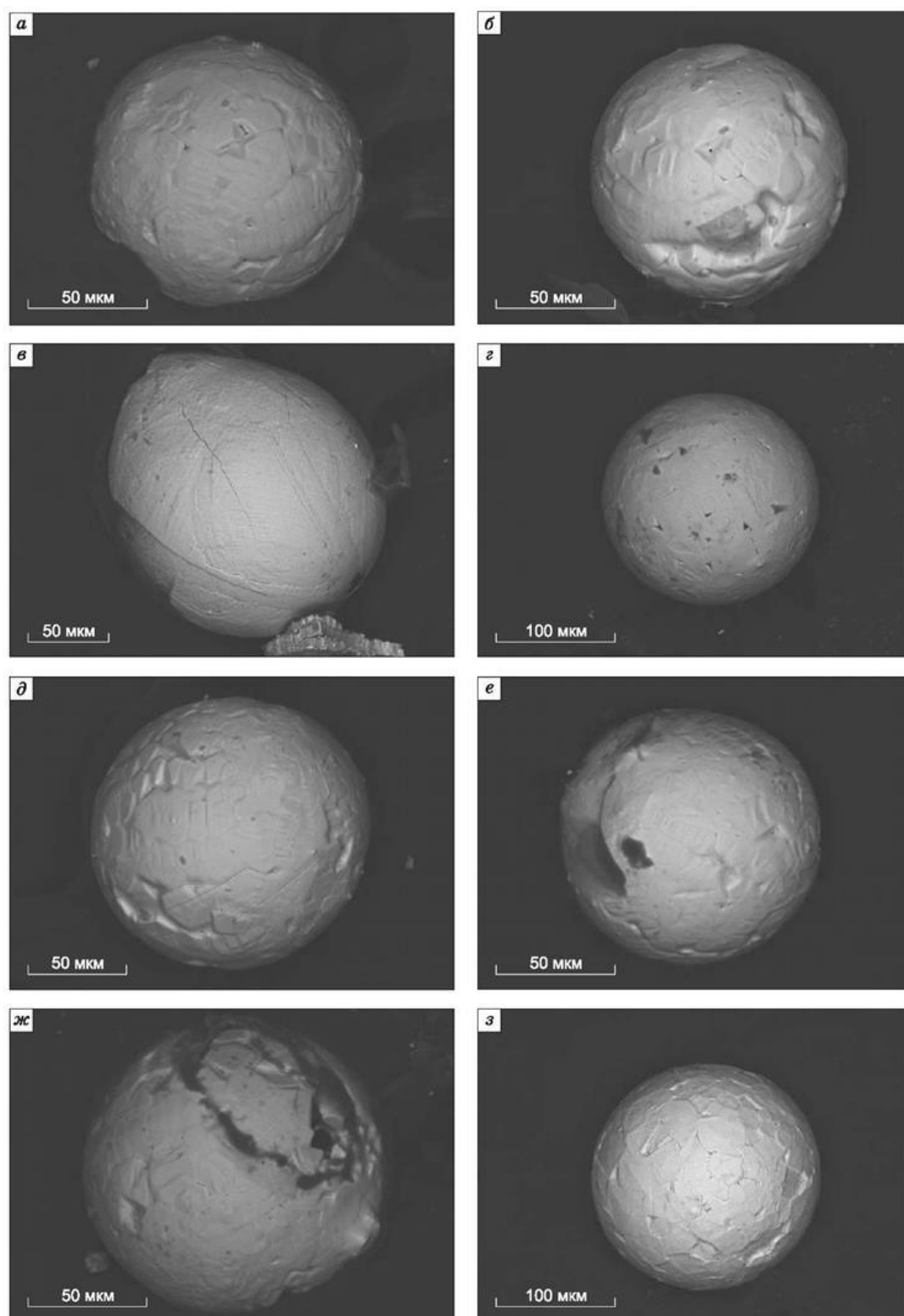


Рисунок 5.11. МАС из пород разреза Усолка, из [80]

*а-в – слой 13; г-ж – слой 16; з – слой 33*

возможности выделения событийных стратиграфических уровней глобального, регионального и местного масштабов [12, 19, 57, 60, 85, 101, 160, 163, 272].

В будущем объекты космического происхождения могут существенно повысить точность расчленения и корреляции разрезов (микростратиграфичность [163]) при проведении поисково-разведочных работ в нефтегазоносных бассейнах, а также при изучении других стратифицированных полезных ископаемых.

В ходе исследований нефтеносных отложений Прикаспийской синеклизы встречены ММ космического происхождения диаметром до 1 мм, которые можно использовать в качестве дополнительного инструмента выделения маркирующих горизонтов (микростратиграфических реперов) при поиске залежей углеводородов в полифациальных отложениях. Продуктивными нефтеносными пластами здесь являются девонский, каменноугольный, пермский, триасовый, юрский, меловой, палеогеновый и неогеновый комплексы [12]. Нами в корреляционных целях анализировался керн скважин глубиной до 5 км. По находкам ММ (размер более 100 мкм, мозаичная структура поверхности, магнетитовый состав и примесь никеля) проведена корреляция для турнейских (нижний карбон) и казанских (средняя пермь) осадочных отложений (Рисунок 5.12).

В палеозойских ММ Прикаспийской впадины под тонкой магнетитовой корочкой обнаружено высокое содержание хлора, что может быть связано с наличием здесь редкого минерала хиббингита ( $\text{Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ), который встречается в метеоритном веществе [149]. Так, например, хиббингит выявлен и в неоплавленной (центральной) части фрагментов Челябинского метеорита. По мнению некоторых исследователей [12], находки хиббингита могут свидетельствовать о присутствии воды в форме гидроксид-ионов. При прохождении земной атмосферы температура поверхности метеорита составляет тысячи градусов, тогда как в центральных частях существует космический холод, что позволяет некоторым минералам сохранять первоначальный состав.

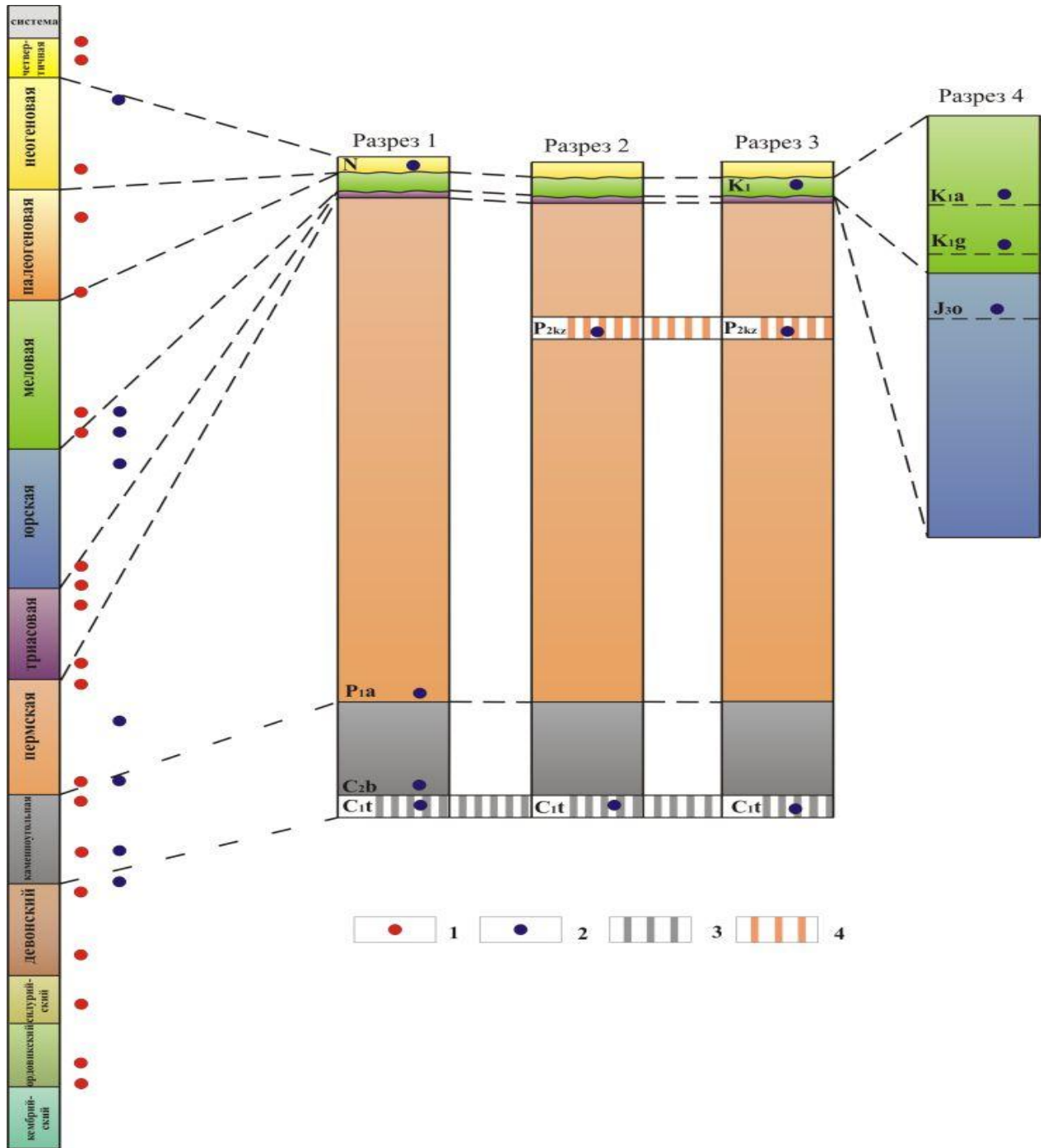


Рисунок 5.12. Корреляция по ММ из керна скважин Прикаспийской синеклизы, вскрывших фанерозойские породы, из [12]

1, 2 – находки ММ: 1 – по миру; 2 – в Прикаспийской впадине;

3, 4 – корреляционные уровни по ММ:

3 – в турнейских отложениях; 4 – в казанских отложениях

Возможно, такая консервация произошла и с хиббингитом, который после взрыва попал в атмосферу, а затем в виде включений сохранился в ММ.

Нами предпринята попытка провести дальнюю корреляцию по находкам ММ для разрезов, вскрывающих пермь-триасовую границу (Рисунки 5.13, 5.14).

Для сопоставления выбраны континентальные красноцветные отложения разреза Балебиха в Московской синеклизе [2], переходные (эвапоритовые) отложения Балтийской синеклизы [22], морские отложения пояса Tamba-Mino в Японии [212] и разреза Мэйшань в Китае [54, 62]. Последний разрез является эталоном («золотым гвоздем») нижней границы индского яруса триаса. Во всех изученных объектах обнаружены абляционные ММ размером около 100 мкм и более, обладающие близкой морфологией, мозаичной структурой, характерными для МАС, а также магнетитовым составом с примесями Ni и Cr (Рисунок 5.13). Все это, по-видимому, является свидетельством крупного космического события на границе перми и триаса (падение крупного метеороида), что, наряду с излияниями сибирских траппов, могло привести к крупнейшему биотическому кризису в фанерозойской истории Земли на границе палеозоя и мезозоя.

Большие сложности возникают у геологов при корреляции «немых» толщ, не содержащих палеонтологические остатки, к исследованию которых невозможно применить биостратиграфический метод корреляции. Поэтому автор впервые попытался скоррелировать пласты гипса Камско-Устьинского и Байматского месторождений (Волго-Уральская антеклиза) по содержаниям ММ и их типоморфным свойствам. В ходе изучения количественного распространения ММ в пределах продуктивных пластов (Рисунок 5.15) обнаружено, что микросферулы распространены неравномерно. В отдельном образце весом ~100 граммов можно обнаружить от одной до 30 микросферул. Результатом проведенного исследования является обнаружение ММ в количестве 1–5 штук в нижней части нижнего пласта обоих месторождений (Рисунок 5.15). При этом все ММ обладают общими характерными признаками: идеальной сферичностью (коэффициент  $n=1,02$ ), дендритовой и мозаичной микроструктурами, магнетитовым составом с незначительными примесями Si, Mn и Ca.

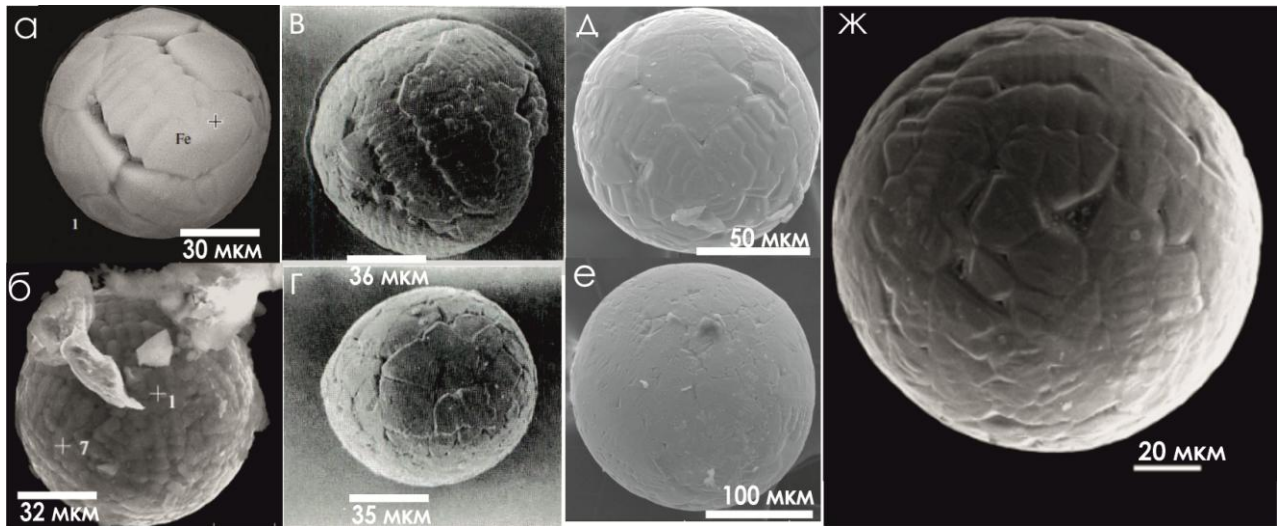


Рисунок 5.13. Магнитные абляционные сферулы на границе перми и триаса  
Отложения: а-г – морские [54, 212]; д, е – переходные [22]; ж – континентальные [2]

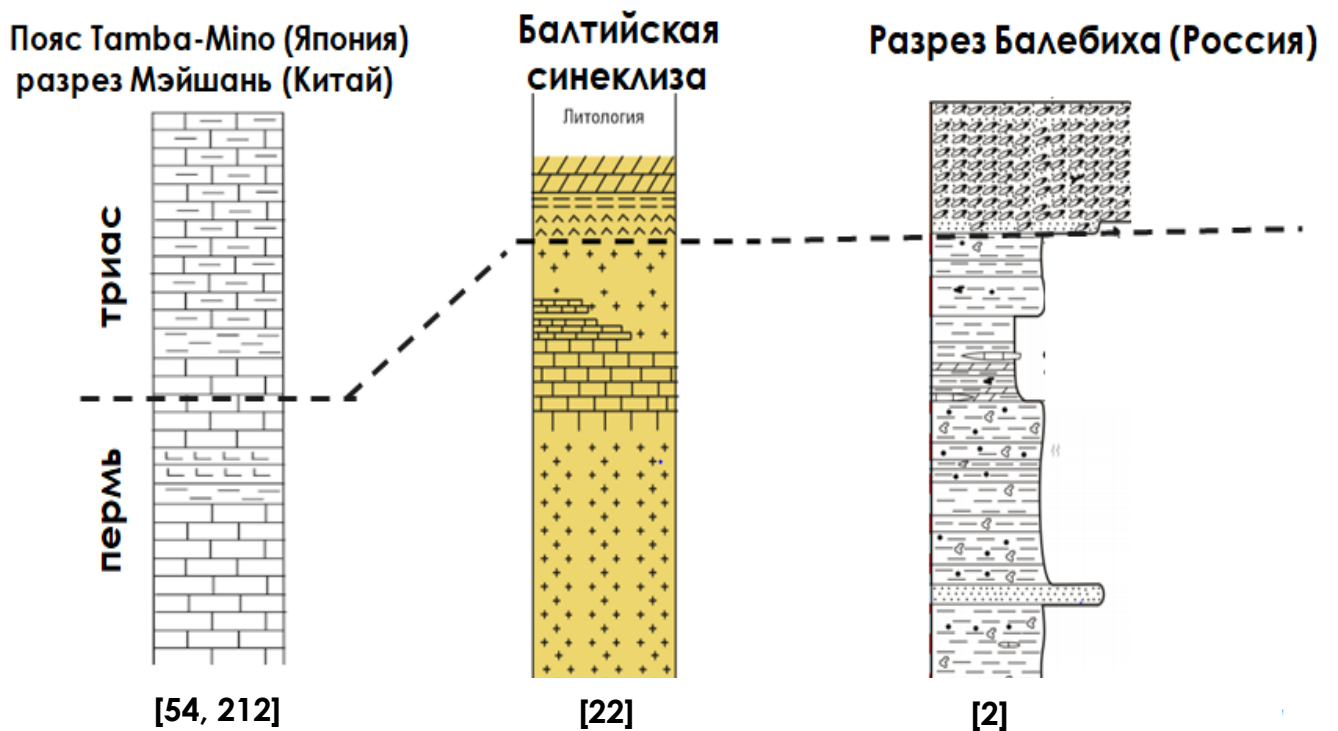


Рисунок 5.14. Использование ММ для стратиграфической корреляции полифациальных разрезов на границе перми и триаса (см. Рисунок 5.13)



# Нижний пласт

## Камско-Устьинское месторождение

## Байматское месторождение

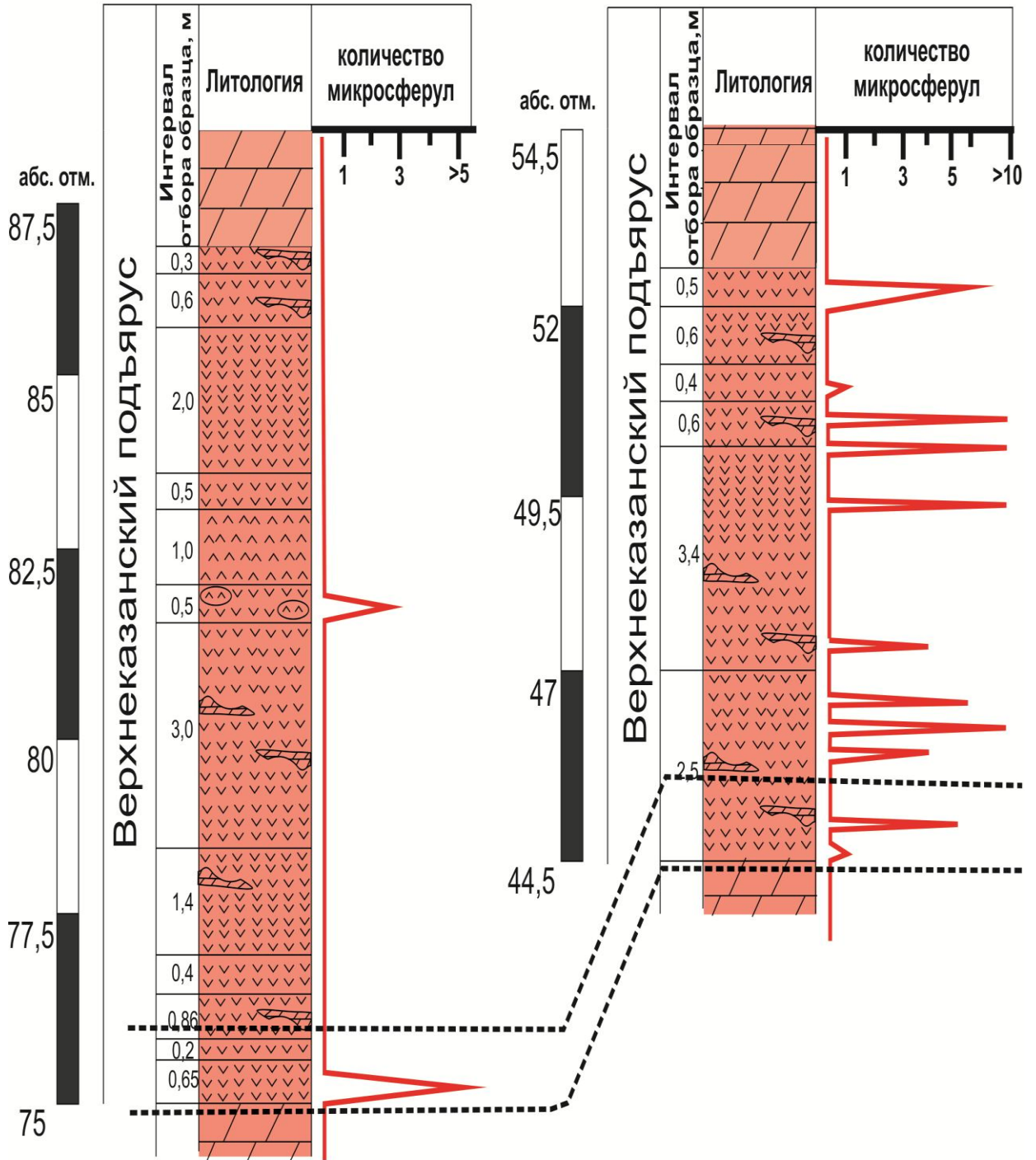


Рисунок 5.15. Распределение ММ в нижнем продуктивном пласте месторождений гипса на правобережье реки Волги (см. Рисунок 3.6)

**Выводы.** Проведенные исследования и анализ литературных данных обосновывают следующие направления использования ММ при решении геологических задач:

1. Изучение ММ космогенного происхождения позволяет получать и дополнять информацию о влиянии космических событий на жизнь и климат Земли.

2. Магнитные микросферулы абляционного и импактного происхождения применимы для поисков взрывных структур и связанных с ними полезных ископаемых.

3. Опираясь на первые результаты по неравномерному количественному распределению абляционных и импактных ММ в осадочных разрезах фанерозоя, предлагается использовать маркирующие горизонты с магнитными микросферами в качестве дополнительного критерия при корреляции полифациальных и немых отложений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации детально рассмотрены внешние особенности и внутреннее строение магнитных микросферул из природных и техногенных образований Северной Евразии. В работе решена научная задача по обоснованию генетической классификации ММ путем выявления морфологических, микроструктурных, минералогических и геохимических критериев с применением комплекса прецизионных физико-химических методов.

Резюмируя полученные результаты, можно сделать следующие основные выводы:

1. Выработаны новые методические приемы для всестороннего изучения и диагностики ММ с помощью методов высокого разрешения. Набор методов исследования подобных микрообъектов необходимо расширить неразрушающими (микротомографическими) технологиями, которые помогают обнаружить ММ в породах и изучить их внутреннее строение, раскрыть явления дифференциации вещества и минералообразования в быстропротекающих процессах.

2. Создана коллекция электронно-микроскопических снимков ММ, включающая 178 типичных изображений микросферул, извлеченных из разных объектов.

3. На основе комплексного изучения морфологических признаков, микротекстурных и микроструктурных особенностей, минералогического состава и геохимической характеристики ММ установлены дополнительные диагностические критерии, позволяющие расшифровать их генезис.

4. На ряде объектов опробованы возможности выделения в осадочных комплексах маркирующих горизонтов с ММ для корреляции разнофациальных и немых толщ при геологическом картировании и поисках стратифицируемых полезных ископаемых.

Дальнейшие исследования ММ необходимо осуществлять в следующих направлениях:

- ✓ Находки абляционных сферул могут быть использованы для поиска древних импактных структур и захороненных в породах метеоритов.
- ✓ Необходимо продолжить целенаправленные и детальные поиски маркирующих горизонтов с ММ в осадочных толщах с совместным использованием геохимических и геофизических методов для выработки новых корреляционных критериев полифациальных толщ.
- ✓ Для решения минералого-технологических задач переработки техногенных ММ возможно использование авторской методики и алгоритма выполнения методов высокого разрешения. ММ из техногенных отвалов представляют потенциальный источник минерального сырья ближайшего будущего, что потребует разработки оригинальных минералого-технологических методик освоения техногенных месторождений.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

- ВЕП – Восточно-Европейская платформа
- ГРЭС – гидроэлектростанция
- КП – космическая пыль
- КФУ – Казанский федеральный университет
- МАС – метеоритная абляционная сферула
- мкм – микрометр
- ММ – магнитная микросферула (магнитные микросферулы)
- микро-КТ – рентгеновская компьютерная микротомография
- СЭМ – сканирующая электронная микроскопия
- ТЭС – тепловая электростанция
- ЭДА – энергодисперсионный анализатор
- ЭДС – энергодисперсионная спектроскопия
- BSE – back scattered electrons (обратно рассеянные электроны)
- ЕРОХ – эпоксидная смола
- Gl – стекло
- Неп – гематит
- Mgf – магнезиоферрит
- Mt – магнетит
- SE – secondary electrons (вторичные электроны)

**СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ\***

**Глобула** – шаровидная частица.

**Импактит** – ударно-метаморфическая порода, возникающая в местах столкновения с поверхностью Земли астероидов и гигантских метеоритов.

**Космическая пыль** – микрообъекты, представленные твердым веществом, распространенном в межзвездном (размер от  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$  мкм) и межпланетном (от 1 до 10 и более мкм) космическом пространстве.

**Космическое вещество** – объекты космического происхождения, представляющие собой твердое вещество размером от  $10^{-3}$  мкм и более 10 м.

**Магнитные микросферулы** – магнитные сферулы размером от первых микрометров до 1 мм.

**Метеорит** – метеороид размером более 1 см, не испарившийся в земной атмосфере и упавший на поверхность Земли.

**Метеоритные абляционные сферулы (МАС)** – разновидность метеоритной пыли, представленная оплавленными микрообъектами (полые и пористые магнетитовые микросферулы, капли и колбочки), которые образовались при абляции метеороида (разогрева, испарения, окисления вещества и сдува расплава набегающим атмосферным потоком с поверхности) в атмосфере Земли.

**Метеороид** – метеорное тело (от долей мм до нескольких десятков м) космического происхождения, передвигающееся в межпланетном и околоземном пространствах, по размеру промежуточное между астероидами и космической пылью.

**Метеорные тела** – метеороиды (от долей мм до 10 мм), сгорающие в земной атмосфере и порождающие явление метеоров.

**Микрометеорит** – пылеватые частицы, образующиеся при дезинтеграции метеороидов и плавлении частиц метеорных тел размером первые мм при их входе в атмосферу на высотах около 80 км.

---

\*При составлении словаря терминов использовались [16, 17, 21, 55, 63,92, 108, 116, 119, 188, 292].

**Микроструктура** – совокупность черт строения объекта, обусловленная размером, формой, составом, взаимным соотношением минералов, которые различимы при увеличении под микроскопом.

**Микротектиты (тектиты)** – частицы, конденсированные из пара или отделенные от ударного расплава, образовавшегося при столкновении астероидов и комет с Землей.

**Сферичность** – соотношение диаметров частицы, отражающее степень приближения ее формы к шарообразной.

**Ферриты** – минералы, двойные окислы переходных металлов, прежде всего, железа. Большинство ферритов – ферримагнетики.

**Шпинелиды** – минералы группы шпинели; сложены оксидами с общей формулой  $AB_2O_4$ , где **A** –  $Fe^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  и др.; **B** –  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$ ,  $V^{3+}$ ,  $Ti^{4+}$  и др. В зависимости от преобладающего катиона в позиции **B** различают алюмошпинелиды, хромшпинелиды, ферришпинелиды, титаношпинелиды, ванадиошпинелиды, стибшошпинелиды.

**in situ** (от лат. *на месте*) – проведение измерений непосредственно в породе без ее разрушения.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 г. / В.В. Емельяненко, О.П. Попова, Н.Н. Чугай [и др.] // Астрономический вестник. – 2013. – Т. 47, № 4. – С. 262–277.
2. Арефьев М.П. Высокотитанистые железные сферулы из пограничных пермо-триасовых отложений Московской синеклизы / М.П. Арефьев, Б.Б. Шкурский // Ленинградская школа литологии: материалы Всерос. литологического совещания, посвящ. 100-летию со дня рождения Л.Б. Рухина. – СПб., 2012. – Т. 2. – С. 3–5.
3. Бадюков Д.Д. Абляционные сферулы Сихотэ-Алинского метеорита и условия их формирования / Д.Д. Бадюков, Й. Райтала // Петрология. – 2012. – Т. 20, № 6. – С. 574–582.
4. Бараш М.С. Массовая гибель организмов океана на рубеже палеозоя и мезозоя: следствия и причины / М.С. Бараш // Океанология. – 2012. – Т. 52, № 2. – С. 258–269.
5. Бараш М.С. Причины катастрофической гибели морских организмов на границе мезозоя и кайнозоя / М.С. Бараш // Океанология. – 2011. – Т. 51, № 4. – С. 683–695.
6. Биогенный гематит богатых железных руд Беленихинского месторождения Белгородского района КМА / В.М. Новиков, Н.С. Бортников, Н.М. Боева [и др.] // Вестник ВГУ. Сер. Геология. – 2017. – № 4. – С. 58–62.
7. Вернадский В.И. О необходимости организованной научной работы по космической пыли / В.И. Вернадский // Проблемы Арктики. – 1941. – № 5. – С. 55–64.
8. Вернадский В.И. Об изучении космической пыли / В.И. Вернадский // Мирозведение. – 1932. – Т. 21, № 5. – С. 32–41.



9. Виленский В.Д. Сферические микрочастицы в ледниковом покрове Антарктиды / В.Д. Виленский // Метеоритика. – 1972. – № 31. – С. 57–61.

10. Виленский Д.В. Удельный вес сферических микрочастиц, собранных в атмосфере / В.Д. Виленский // Геохимия. – 1966. – № 5. – С. 586–593.

11. Внеземной хромит в ордовикских известняках северо-запада России / А.В. Корочанцев, К.А. Лоренц, М.А. Иванова [и др.] // Вестник ОНЗ РАН. – 2009. – № 1. – С. 1–3.

12. Возможности использования космических микросфер при корреляции нефтегазоносных отложений / Р.Х. Сунгатуллин, Г.М. Сунгатуллина, М.С. Глухов [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 2. – С. 16–19.

13. Выпадение космического вещества на поверхность Земли / Г.М. Иванова, В.Ю. Львов, Н.В. Васильев, И.В. Антонов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1975. – 120 с.

14. Генезис железосодержащих частиц космического происхождения. Полученные факты и их анализ / В.А. Цельмович, М.В. Трухина, О.Н. Бобылева, М.В. Провоторов // Минералы: строение, свойства, методы исследования: материалы II Всерос. молодежной науч. конф. / ИГГ УрО РАН. – Екатеринбург; Миасс, 2010. – С. 357–359.

15. Геншафт Ю.С. Поведение металлического железа в силикатных расплавах при атмосферном давлении / Ю.С. Геншафт, В.А. Цельмович, А.К. Гапеев // Физика Земли. – 2001. – № 10. – С. 87–92.

16. Геологический словарь: в 3 т. / С.И. Андреев, Б.П. Арсеньев, А.М. Ахмедов [и др.]; гл. ред. О.В. Петров. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. – Т. 1: А–Й. – 432 с.

17. Геологический словарь: в 3 т. / С.И. Андреев, Б.П. Арсеньев, А.М. Ахмедов [и др.]; гл. ред. О.В. Петров. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2012. – Т. 3: Р–Я. – 440 с.

18. Геология астроблем / В.Л. Масайтис, А.Н. Данилин, М.С. Мащак [и др.] – Л.: Недра, 1980. – 231 с.

19. Геоморфологические и геолого-минералогические признаки импактного происхождения озерной котловины Рабига Куль, Республика Татарстан / Р.Х. Сунгатуллин, В.А. Цельмович, Р.А. Вафин, Г.М. Сунгатуллина // Геоморфология. – 2016. – № 1. – С. 64–72.

20. Георгиевский А.Ф. Микробиота бокситов месторождения Ева (Гвинея-Бисау) / А.Ф. Георгиевский, Е.А. Жегалло, В.М. Бугина // Литология и полезные ископаемые. – 2019. – № 6. – С. 557–567.

21. Гиндилис Л.М. Проблемы изучения космической пыли на Земле: (к программе исследования) / Л.М. Гиндилис, М.И. Капралов. – Дубна: ОИЯИ, 2014. – 87 с.

22. Глухов М.С. Магнитные микросферулы из эвапоритов Калининградско-Гданьского месторождения / М.С. Глухов, А.В. Низамова, А.А. Горюнова // Уральская минералогическая школа – 2020 «Под знаком золота и платины»: сб. науч. трудов / ИГГ УрО РАН. – Екатеринбург, 2020. – С. 24–26.

23. Глухов М.С. Морфология и внутреннее строение природных и техногенных железоксидных микросфер / М.С. Глухов // Известия УГГУ. – 2019. – Вып. 1 (53). – С. 60–66.

24. Голов А.А. Особенности геологического строения и перспективы нефтеносности северо-западной части Самарской области и ее обрамления / А.А. Голов // Геология нефти и газа. – 2005. – № 2. – С. 9–15.

25. Горюнова Л.Ф. Особенности строения и оценка перспектив нефтегазоносности Верхнедевонско-Нижнекаменноугольного нефтегазоносного комплекса Мелекесской впадины: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.12 / Горюнова Любовь Федоровна; Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина. – М., 2009. – 24 с.

26. Грачев А.Ф. Первая находка чистой самородной платины в переходном слое глин на границе мела и палеогена в разрезе Гамс (Вост. Альпы, Австрия) / А.Ф. Грачев, С.Е. Борисовский // Физика Земли. – 2010. – № 3. – С. 3–6.

27. Гребенников А.В. Силикатно-металлические сферулы и проблема механизма игнимбритовых извержений (на примере Якутинской вулкано-

тектонической структуры) / А.В. Гребенников, С.А. Щека, А.А. Карабцов // Вулканология и сейсмология. – 2012. – № 4. – С. 3–22.

28. Диагностика происхождения магнитных микросфер / В.А. Цельмович, О.А. Корчагин, А.Н. Некрасов, С.В. Старченко // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: материалы Междунар. семинара по проблемам палеомагнетизма и магнетизма горных пород. – СПб., 2010. – С. 165–171.

29. Дивари Н.Б. О сборе космической пыли на леднике Туяк-Су / Н.Б. Дивари // Метеоритика. – 1948. – № 4. – С. 120–122.

30. Дубинина С.В. О выделении нового терминального яруса кембрийской системы в Казахстане / С.В. Дубинина // Материалы XIV Междунар. полевой конф. и экскурсии рабочей группы по ярусному делению кембрия – хребет Малый Каратау (южный Казахстан) / НАН РК. – Алма-Ата, 2009. – С. 53–55.

31. Железо-никелевые микрочастицы в осадочных породах как индикаторы космических процессов / Р.Х. Сунгатуллин, А.И. Бахтин, В.А. Цельмович [и др.] // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2015. – Т. 157, кн. 3. – С. 102–118.

32. Заварзин Г.А. Введение в природоведческую микробиологию: учеб. пособие / Г.А. Заварзин, Н.Н. Колотилова. – М.: Университет, 2001. – 256 с.

33. Загурский А.М. Субмикроморфология магнитных фракций почв / А.М. Загурский, А.В. Иванов, С.А. Шоба // Почвоведение. – 2009. – № 9. – С. 1124–1132.

34. Закиров М.И. Аномальные содержания  $\delta^{13}\text{C}$  в верхнепалеозойских отложениях Предуралья / М.И. Закиров, Р.Х. Сунгатуллин // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – 2015. – № 2. – С. 26–30.

35. Закаленные частицы из эруптивной брекчии зоны сочленения Приазовского массива с Донбассом / С.Н. Цымбал, В.И. Татаринцев, В.К. Гаранин, Г.П. Кудрявцева, А.А. Колодько // Записки РМО. – 1985. – Ч. 114, вып. 2. – С. 224–228.

36. Захаров В.А. Иридиевая аномалия на границе юры и мела на севере Сибири / В.А. Захаров, А.С. Лапухов, О.В. Шенфиль // Геология и геофизика. – 1993. – Т. 34, № 1. – С. 102–109.

37. Зейлик Б.С. О признаках космогенных взрывов на меднопорфировых месторождениях Актогай и Айдарлы (Южный Казахстан) / Б.С. Зейлик, С.А. Литвинцев, Э.Ю. Сейтмуратова // Доклады АН СССР. – 1984. – Т. 276, № 1. – С. 187–191.

38. Зырянов В.В. Зола уноса – техногенное сырье / В.В. Зырянов, Д.В. Зырянов. – М.: Маска, 2009. – 320 с.

39. Иванов А.В. Космические шарики в нижнепермских соляных отложениях / А.В. Иванов, К.П. Флоренский // Геохимия. – 1968. – № 4. – С. 483–485.

40. Иванов А.В. Минералы метеоритов – новый каталог / А.В. Иванов, А.А. Ярошевский, М.А. Иванова // Геохимия. – 2019. – Т. 64, № 8. – С. 869–932.

41. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах / М.М. Астафьева, Л.М. Герасименко, А.Р. Гептнер [и др.]. – М.: ПИН РАН, 2011. – 172 с.

42. Импактиты / под ред. А.А. Маракушева. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. – 239 с.

43. Исследования динамики поступления космической пыли на земную поверхность по торфяным отложениям / В.А. Цельмович, А.Ю. Куражковский, А.Ю. Казанский [и др.] // Физика Земли. – 2019. – № 3. – С. 156–160.

44. Каменная и калийно-магниевые соли Калининградской области / А.К. Вишняков, Р.Р. Туманов, Б.С. Чуприна [и др.] // Отечественная геология. – 2011. – № 4. – С. 47–54.

45. Карпов Г.А. Микрочастицы самородных металлов, сульфидов и оксидов в андезитовых пеплах Карымского вулкана / Г.А. Карпов, А.В. Мохов // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 3. – С. 19–35.

46. Кизильштейн Л.Я. Алюмосиликатные микросферы из золы пылеугольного сжигания углей / Л.Я. Кизильштейн, А.Л. Шпицглюз, В.Г. Рылов // ХТТ. – 1987. – № 6. – С. 122–126.

47. Киреев В.А. Краткий курс физической химии / В.А. Киреев – М.: Госхимиздат, 1962. – 648 с.

48. Кожара В.Л. Основы классиологии / В.Л. Кожара. – Сыктывкар: Коми республ. тип., 2021. – 488 с.
49. Компоненты зол и шлаков ТЭС / Л.Я. Кизильштейн, И.В. Дубов, А.Л. Шпицглуз, С.Г. Парада. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 176 с.
50. Конденсатные стекла кратера Жаманшин. I. Иргизиты / Т.А. Горностаева, А.В. Мохов, П.М. Карташов, О.А. Богатиков // Петрология. – 2016. – Т. 24, № 1. – С. 3–24.
51. Конденсатный компонент в импактных стеклах кратера Жаманшин / Т.А. Горностаева, А.В. Мохов, П.М. Карташов, О.А. Богатиков // Доклады АН. – 2015. – Т. 464, № 1. – С. 91–95.
52. Константинов М.М. Биогеохимические системы и рудообразование / М.М. Константинов, А.А. Сидоров // Природа. – 2008. – № 5. – С. 27–35.
53. Комплексная палеонтологическая, седиментологическая и геохимическая характеристика терминальных отложений пермской системы северо-восточного борта Московской синеклизы. Статья 1. Бассейн реки Малая Северная Двина / М.П. Арефьев, В.К. Голубев, В.Н. Кулешов [и др.] // Бюллетень Моск. о-ва испытателей природы. Отд. геологии. – 2016. – Т. 91, № 1. – С. 24–49.
54. Корчагин О.А. Космические магнетитовые микросферы и металлические частицы вблизи границы Пермь – Триас в точке глобального стратотипа границы (слой 27, Мэйшань, Китай) / О.А. Корчагин, В.А. Цельмович, И.И. Поспелов, Цяньтао Бянь // Доклады РАН. – 2010. – Т. 432, № 2. – С. 232–238.
55. Корчагин О.А. Ископаемые микрометеориты, микротектиты и микрокрититы: методика исследований, классификация и импакт-стратиграфическая шкала / О.А. Корчагин // Стратиграфия в начале XXI века – тенденции и новые идеи. – М., 2013. – С. 112–142. – (Очерки по региональной геологии России; Вып. 6).
56. Корчагин О.А. Космические частицы (микрометеориты) и наносферы из пограничного слоя глины между мелом и палеогеном (К/Т) разреза Стевенс Клинт, Дания / О.А. Корчагин, В.А. Цельмович // Доклады РАН. – 2011. – Т. 437, № 4. – С. 520–525.

57. Корчагин О.А. Метеоритные микросферы и частицы из глубоководных известняков верхнего кембрия (Батырбай, Южный Казахстан) / О.А. Корчагин, В.А. Цельмович, С.В. Дубинина // Изв. вузов. Геология и разведка. – 2007. – № 3. – С. 17–22.

58. Корчагин О.А. Планктонные фораминиферы и радиолярии из коньяк-сантонских отложений горы Ак-Кая, Горный Крым, Украина / О.А. Корчагин, Л.Г. Брагина, Н.Ю. Брагин // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2012. – Т. 20, № 1. – С. 83–107.

59. Корчагин О.А. Присутствие металлических микросфер и микрочастиц в раннем сеномане Крыма – «Космическое Пылевое Событие» / О.А. Корчагин // Доклады РАН. – 2010. – Т. 431, № 6. – С. 783–787.

60. Космическая пыль и микрометеориты в переходном слое глин на границе мела и палеогена в разрезе Гамс (Восточные Альпы): морфология и химический состав / А.Ф. Грачев, О.А. Корчагин, В.А. Цельмович, Х.А. Коллманн // Физика Земли. – 2008. – № 7. – С. 42–57.

61. Коханов А.А. Особенности морфометрических характеристик малых ударных кратеров в полярных областях Луны / А.А. Коханов, М.А. Креславский, И.П. Карачевцева // Астрономический вестник. Исследования солнечной системы. – 2015. – Т. 49, № 5. – С. 332–339.

62. К оценке космогенного притока тяжелых металлов на поверхность Земли / А.П. Бояркина, Н.В. Васильев, Г.Г. Глухов [и др.] // Космическое вещество и Земля. – Новосибирск, 1986. – С. 203–206.

63. Кринов Е.Л. Новые исследования падения и сбор частей Сихотэ-Алинского метеоритного дождя / Е.Л. Кринов // Проблемы космохимии и метеоритики. – Киев: Наукова думка, 1971. – С. 117–128.

64. Кринов Е.Л. Основы метеоритики / Е.Л. Кринов. – М.: Гостехиздат, 1955. – 392 с.

65. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей / А.И. Кудряшов. – 2-е изд., перераб. – М.: Эпсилон Плюс, 2013. – 368 с.

66. Ла-Берж Дж. Л. О биогенном происхождении докембрийских железорудных формаций / Дж. Л. Ла-Берж // Докембрийские железорудные формации мира. – М., 1975. – С. 248–262.

67. Лебединец В.Н. Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве Метеоры / В.Н. Лебединец. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 247 с.

68. Логачев А.А. Магниторазведка / А.А. Логачев, В.П. Захаров. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра, 1979. – 351 с.

69. Луканин О.А. Декомпрессионный механизм восстановления оксидного железа тектитовых расплавов при их формировании в импактном процессе / О.А. Луканин, А.А. Кадик // Геохимия. – 2007. – № 9. – С. 933–961.

70. Лукин А.Е. Минеральные сферулы – индикаторы специфического флюидного режима рудообразования и нафтидогенеза / А.Е. Лукин // Геофизический журнал. – 2013. – Т. 35, № 6. – С. 10–53.

71. Львов Ю.А. О нахождении космического вещества в торфе / Ю.А. Львов // Проблема Тунгусского метеорита. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1967. – Вып. 2. – С. 140–144.

72. Магнитные минералы в осадках на границе мела и палеогена (разрез Гамс, Восточные Альпы) / А.Ф. Грачев, Д.М. Печерский, С.Е. Борисовский, В.А. Цельмович // Физика Земли. – 2008. – № 10. – С. 40–55.

73. Макаров А.Б. Магнитные сферулы из почв вблизи шлакового отвала Нижнетагильского металлургического комбината / А.Б. Макаров, Б.М. Осовецкий, И.А. Антонова // Известия УГГУ. – 2017. – № 4 (48). – С. 42–45.

74. Макаров А.Б. Главные типы техногенно-минеральных месторождений Урала / А.Б. Макаров. – Екатеринбург: УГГУ, 2006. – 206 с.

75. Малич К.Н. Микросферулы из ультрабазитов концентрически-зональных массивов Алданского щита, их генетическое и прикладное значение / К.Н. Малич, Н.С. Рудашевский, Н.И. Соколова // Минералогический журнал. – 1991. – Т. 13, № 4. – С. 52–71.

76. Марков Г.П. Магнитные минералы метеорита Челябинск / Г.П. Марков, Д.М. Печерский, В.А. Цельмович // *Астрономический вестник. Исследования солнечной системы.* – 2015. – Т. 49, № 5. – С. 340–352.

77. Масайтис В.Л. Алмазы в импактитах Попигаевского метеоритного кратера / В.Л. Масайтис, С.И. Футергендлер, М.А. Гневушев // *Записки ВМО.* – 1972. – Ч. 101, вып. 1. – С. 108–112.

78. Металлические и силикатно-оксидные сферулы из ультраосновных пегматитов в дунитах Нижнетагильского платиноносного массива на Среднем Урале (первые данные) / Е.В. Пушкарев, Е.В. Аникина, Дж. Гарути [и др.] // *Доклады РАН.* – 2002. – Т. 383, № 1. – С. 90–94.

79. Металлические микросферулы в карбонатитах Южного Урала / В.Г. Кориневский, Е.В. Кориневский, И.А. Блинов, В.А. Котляров // *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН.* – 2018. – № 10. – С. 39–46.

80. Микросферы космического происхождения в каменноугольных отложениях разреза Усолка, Предуральский прогиб / Р.Х. Сунгатуллин, Г.М. Сунгатуллина, М.И. Закиров [и др.] // *Геология и геофизика.* – 2017. – Т. 58, № 1. – С. 74–85.

81. Минерально-фазовый парагенезис в эксплозивных продуктах современных извержений вулканов Камчатки и Курил. Часть 1. Алмазы, углеродные фазы, конденсированные органоиды / В.И. Силаев, Г.А. Карпов, Л.П. Аникин [и др.] // *Вулканология и сейсмология.* – 2019. – № 5. – С. 54–67.

82. Минерально-фазовый парагенезис в эксплозивных продуктах современных извержений вулканов Камчатки и Курил. Часть 2. Минералы-спутники алмазов толбачинского типа / В.И. Силаев, Г.А. Карпов, Л.П. Аникин [и др.] // *Вулканология и сейсмология.* – 2019. – № 6. – С. 36–49.

83. Михеева А.В. [Импактные структуры Земли, 2067 объектов] / А.В. Михеева. – 2013. – Текст: электронный. – URL: [labmpg.sccc.ru/impact/](http://labmpg.sccc.ru/impact/) (дата обращения: 12.03.2021).

84. Мохов А.В. Новые ультрадисперсные минеральные фазы лунного реголита по данным аналитической электронной микроскопии: дис. ... д-ра геол.-



минерал. наук: 25.00.05 / Мохов Андрей Владимирович; ИГЕМ РАН. – М., 2009. – 289 с.

85. Нигматзянов Р.С. Галактическая первопричина границ в истории Земли / Р.С. Нигматзянов // Отечественная геология. – 2015. – № 3. – С. 70–83.

86. Новгородова М.И. Самородные металлы в гидротермальных рудах / М.И. Новгородова. – М.: Наука, 1983. – 288 с.

87. О магматической природе самородного железа в гранитоидах и продуктах его окисления / В.Д. Тян, П.В. Ермолов, Н.В. Попов, Т.К. Рафиков // Геология и геофизика. – 1976. – № 5. – С. 48–54.

88. Особенности вещественного состава и возможные технологии переработки пиритных огарков / А.Б. Макаров, Г.Г. Хасанова, М.С. Глухов, М.А. Паньшин // Известия УГГУ. – 2019. – № 62. – С. 22–28.

89. Осовецкий Б.М. Микро- и наноформы поверхности импактных алмазов / Б.М. Осовецкий, О.Б. Наумова // Вестник Перм. ун-та. Геология. – 2014. – Вып. 2 (23). – С. 8–19.

90. Осовецкий Б.М. Природно-техногенные осадки / Б.М. Осовецкий, Е.А. Меньшикова. – Пермь: Перм. гос. ун-т, 2006. – 209 с.

91. Первая находка биогенного наносидерита в окисленных железистых кварцитах Лебединского месторождения КМА / Н.С. Бортников, В.М. Новиков, Н.М. Боева [и др.] // Доклады академии наук. – 2016. – Т. 466, № 5. – С. 569–573.

92. Печерский Д.М. Палеомагнитология, петромагнитология и геология: словарь-справочник для соседей по специальности / Д.М. Печерский. – [2009. – 123 с.]. – Текст: электронный. – URL: [geokniga-pecherskiypaleomagnetologiya.doc](#) (дата обращения: 21.01.2022).

93. Пиковский Ю.И. Блоковая структура и нефтегазоносность импактного кратера Сильян / Ю.И. Пиковский, М.П. Гласко, В.Г. Кучеров // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58, № 2. – С. 243–249.

94. Плотников А.В. О генезисе Терновской структуры в Криворожском бассейне / А.В. Плотников // Геотектоника. – 1994. – № 3. – С. 36–43.

95. Поиски мелкодисперсного вещества в торфах района падения Тунгусского метеорита / Н.В. Васильев, Г.М. Иванова, Т.А. Менявцева [и др.] // Метеоритика. – 1974. – № 32. – С. 203–206.

96. Покровский М.П. Введение в классиологию / М.П. Покровский. – Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2014. – 484 с.

97. Последствия падения «челябинского метеорита»: видео-модель от NASA, 2013. – Текст: электронный. – URL: <http://habr.com/ru/post/190210> (дата обращения: 20.06.2021).

98. Природа, химический и фазовый состав энергетических зол челябинских углей / Э.В. Сокол, Н.В. Максимова, Е.Н. Нигматулина, А.Э. Френкель. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, фил. «Гео», 2001. – 107 с.

99. Рудные и рудно-силикатные микросферы в рифейских песчаниках Южного Тимана / Н.Ю. Никулова, И.Н. Бурцев, В.Н. Филиппов, А.С. Мяндин // Записки РМО. – 2018. – Т. 147, № 2. – С. 35–44.

100. Рычагов С.Н. Рудные и силикатные магнитные шарики как индикаторы структуры, флюидного режима и минералорудообразования в современной гидротермальной системе Баранского (о-в Итуруп) / С.Н. Рычагов, С.Ф. Главатских, Е.И. Сандиминова // Геология рудных месторождений. – 1996. – Т. 38, № 1. – С. 31–40.

101. Самородное железо космического происхождения в глубоководных отложениях Северо-Западной Атлантики по данным термомагнитного анализа / И.О. Мурдмаа, Д.М. Печерский, Д.К. Нургалиев [и др.] // Литология и полезные ископаемые. – 2015. – № 2. – С. 129–147.

102. Самородные металлы в траппах Сибирской платформы / А.В. Округин, Б.В. Олейников, Н.В. Заякина, Н.В. Лескова // Записки ВМО. – 1981. – Ч. 110, № 2. – С. 186–204.

103. Сандиминова Е.И. Сферические минеральные образования вулканических пород Курильских островов и Камчатки: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.04 / Сандиминова Елена Ивановна; Дальневост. геол. ин-т ДВО РАН. – Петропавловск-Камчатский, 2008. – 24 с.

104. Свидетельства вулканических извержений Тамбора и Кракатау (XIX в.) по данным химического и электронно-микроскопического исследования снежно-фирновых кернов из района станции Восток (Антарктида) / Т.В. Ходжер, Л.П. Голобокова, Э.Ю. Осипов [и др.] // Лед и Снег. – 2011. – № 1. – С. 105–113.

105. Смирнов В.Н. Новые данные о сферулах района кратера «Эльгыгытгын» / В.Н. Смирнов, Н.Е. Савва, О.Ю. Глушкова // Геохимия. – 2011. – № 3. – С. 329–333.

106. Снежный покров Центральной Антарктиды (станция Восток) как идеальный природный планшет для сбора космической пыли: предварительные результаты по выявлению микрометеоритов типа углистых хондритов / Е.С. Булат, В.А. Цельмович, J.-R. Petit [и др.] // Лед и Снег. – 2012. – Т. 120, № 4. – С. 146–152.

107. Сокол Э.В. Зола углей Челябинского бассейна / Э.В. Сокол, Н.В. Максимова // Уральский геологический журнал. – 1999. – № 6. – С. 151–154.

108. Справочник по литологии / Н.В. Логвиненко, Н.Б. Вассоевич, В.Л. Либрович, В.И. Марченко. – М.: Недра, 1983. – 509 с.

109. Среднепалеозойское импактное событие на юго-западе Восточно-Европейской платформы / Р.Х. Сунгатуллин, А.И. Бахтин, В.А. Цельмович [и др.] // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59, № 9. – С. 1431–1444.

110. Строение и условия образования калийно-магниевых солей центральной части Нивенской впадины Калининградско-Гданьского соленосного бассейна / А.К. Вишняков, А.Д. Смычник, В.Д. Панов [и др.] // Отечественная геология. – 2017. – № 4. – С. 90–97.

111. Металлические и стеклянные сферулы в рыхлых отложениях истоков реки Пут (Средний Урал) / С.Г. Сустанов [и др.] // Литосфера. – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 273–282.

112. Сферические микрочастицы из района тунгусского события: может ли их источником быть Тунгусское космическое тело? / Д.Д. Бадюков, А.В. Иванов, Й. Райтала, Н.Р. Хисина // Геохимия. – 2011. – № 7. – С. 675–689.

113. Температурная и минералого-геохимическая характеристика геотермального месторождения Океанское (о-в Итуруп) / С.Н. Рычагов, С.Ф. Главатских, О.П. Гончаренко [и др.] // Геология рудных месторождений. – 1993. – Т. 35, № 5. – С. 405–418.

114. Техногенно-минеральные месторождения пиритных огарков и их влияние на природную окружающую среду / А.Б. Макаров, О.М. Гуман, И.А. Антонова, А.В. Захаров // Известия УГГУ. – 2012. – № 27-28. – С. 38–45.

115. Техногенные ресурсы минерального строительного сырья / Е.С. Туманова, А.Н. Цибизов, Н.Т. Блоха [и др.]. – М.: Недра, 1991. – 207 с.

116. Тимофеев П.П. Англо-русский геологический словарь: ок. 52000 терминов / П.П. Тимофеев, М.Н. Алексеев, Т.А. Софиано. – М.: Рус. язык, 1988. – 541 с.

117. Тип ударника и модель образования кратера Жаманшин, Казахстан / Т.А. Горностаева, А.В. Мохов, П.М. Карташов, О.А. Богатиков // Петрология. – 2018. – Т. 26, № 1. – С. 92–106.

118. Фазовый состав мелкодисперсного взвешенного вещества из района Тунгусской катастрофы / К.П. Флоренский, А.В. Иванов, О.А. Кирова, Н.И. Заславская // Геохимия. – 1968. – № 10. – С. 1174–1182.

119. Фельдман В.И. Импаکتитогенез: учеб. пособие / В.И. Фельдман, Л.И. Глазовская. – М.: Университет, 2018. – 151 с.

120. Флоренский К.П. Предварительные результаты 1961 комплексной Тунгусской метеоритной экспедиции / К.П. Флоренский // Метеоритика. – 1963. – Т. 23. – С. 3–37.

121. Флоренский П.В. Метеоритный кратер Жаманшин (Северное Приаралье) и его тектиты и импаکتиты / П.В. Флоренский // Изв. АН СССР. Сер. Геол. – 1975. – № 10. – С. 73–86.

122. Химический состав космических шариков из района Тунгусской катастрофы и некоторые вопросы дифференциации вещества космических тел / К.П. Флоренский, А.В. Иванов, Н.П. Ильин [и др.] // Геохимия. – 1968. – № 10. – С. 1163–1173.

123. Цельмович В.А. Анализ магнитной фракции в пылевой компоненте Челябинского метеорита / В.А. Цельмович, Л.М. Гиндилис, Г.Н. Шевелев // Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всерос. науч. конф. / ЮУрГУ. – Челябинск, 2014. – С. 301–307.

124. Цельмович В.А. Отличительные характеристики магнитных минералов Челябинского метеорита / В.А. Цельмович, Д.М. Печерский, Г.П. Марков // Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всерос. науч. конф. / ЮУрГУ. – Челябинск, 2014. – С. 612–636.

125. Цельмович В.А. Земное и космогенное вещество месторождения «Стальное». От анализа вещества – к бассейновому анализу / В.А. Цельмович, Л.П. Максе // XIII Уральское литологическое совещание: сб. науч. трудов / УГГУ. – Екатеринбург, 2020. – С. 286–288.

126. Цельмович В.А. Магнитные частицы космического и антропогенного происхождения из осадков озера Б. Ложка (Новосибирская область) / В.А. Цельмович, А.Ю. Казанский // Электрон. науч.-информ. журн. «Вестник Отделения наук о Земле РАН». – 2009. – Т. 1, № 27. – С. 1–3. – URL: <http://www.bourabai.ru/tselmowich/magnetic.pdf> (дата обращения: 5.06.2020).

127. Цельмович В.А. О возможном импактном событии, записанном в вулканических породах Южно-Синегорской Дивы / В.А. Цельмович, Ю.С. Бретштейн // Минералы: строение, свойства, методы исследования: материалы II Всерос. молодежной науч. конф. / ИГГ УрО РАН. – Екатеринбург; Миасс, 2010. – С. 354–356.

128. Цельмович В.А. Космические магнитные минералы в осадках озера Плещеево / В.А. Цельмович, А.В. Романовский // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле: VIII Междунар. конф. – М., 2007. – С. 141–143.

129. Цельмович В.А. Космические шарики на поверхности Челябинского метеорита / В.А. Цельмович // Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Челябинск: Край Ра, 2013. – С. 140–147.

130. Чайковский И.И. Эксплозивные минеральные фазы алмазоносных вишеритов Западного Урала / И.И. Чайковский, О.В. Коротченкова // Литосфера. – 2012. – № 2. – С. 125–140.

131. Чихирин А.А. О природе Каменской астроблемы и возможной газоносности пород подкратерного комплекса / А.А. Чихирин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2005. – № 8. – С. 34–38.

132. Шувалов В.В. Гигантские болиды в атмосфере Земли / В.В. Шувалов, И.А. Трубецкая // Астрономический вестник. Исследования солнечной системы. – 2007. – Т. 41, № 3. – С. 241–251.

133. Яковлев О.И. Условия образования пленочных конденсатов на поверхности частиц лунного реголита / О.И. Яковлев, М.В. Герасимов, Ю.П. Диков // Геохимия. – 2011. – № 10. – С. 1025–1031.

134. A collection of diverse micrometeorites recovered from 100 tonnes of Antarctic blue ice / M. Maurette, C. Olinger, M. Christophe Michel-Levy [et al.] // Nature. – 1991. – Vol. 351. – P. 44–47.

135. A New Look at the Nature of the Transitional Layer at the K/T Boundary near Gams, Eastern Alps, Austria, and the Problem of the Mass Extinction of the Biota / A.F. Grachev, O.A. Korchagin, H.A. Kollmann [et al.] // Russian Journal of Earth Sciences. – 2005. – Vol. 7, Issue 6. – P. 1–45.

136. A volcanic ash layer in the Nördlinger Ries impact structure (Miocene, Germany): Indication of crater fill geometry and origins of longterm crater floor sagging / G. Arp, I. Dunkl, D. Jung [et al.] // Journal of Geophysical Research: Planets. – 2021. – Vol. 126, Issue 4. – P. 1–21.

137. Astrogeological events in China / D. Xu, Q. Zhang, Y. Sun [et al.]. – N. Y.: Van Nostrand Reinold, 1989. – 262 p.

138. Bachmann H.B. First evidence of microsphaerula interval around the continental Permian-Triassic boundary, Germany, and its correlation with the marine realm / H.B. Bachmann, H.W. Kozur // Prirodovedny sbornic Zapadnomoavskeno Muzea V Trebici. – 2003. – Vol. 41. – P. 143–146.

139. Bacterial origin of iron-rich microspheres in Miocene mammalian fossils / M.D. Pesquero, L. Alcalá, L.S. Bell, Y. Fernández-Jalvo // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2015. – Vol. 420. – P. 27–34.

140. Bauluz B. TEM study of meteorite impact glass at New Zealand Cretaceous-Tertiary sites: evidence for multiple impacts or differentiation during global circulation / B. Bauluz, D.R. Peacor, C.J. Hollis // *Earth Planet Sci. Lett.* – 2004. – Vol. 219, Issue 3-4. – P. 209–219.

141. Bedout: A Possible End-Permian Impact Crater Offshore of North western Australia / L. Becker, R.J. Poreda, A.R. Basu [et al.] // *Science*. – 2003. – Vol. 304, № 5676. – P. 1469–1476.

142. Bi D. Cosmic nickel-iron alloy spherules from Pleistocene sediments, Alberta, Canada / D. Bi, R.D. Morton, K. Wang // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1993. – Vol. 57, Issue 16. – P. 4129–4136.

143. Bornhold B.D. Magnetic spherules in Arctic ocean sediments / B.D. Bornhold, M. Bonaldi // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1979. – Vol. 16, № 9. – P. 1778–1788.

144. Brett R. Metallic spherules in impactite and tektite glasses / R. Brett // *The American Mineralogist*. – 1967. – Vol. 52. – P. 721–733.

145. Brownlee D.E. A working taxonomy for micrometeorites / D.E. Brownlee, E. Olzewsky, M. Wheelock // *Lunar and Planetary Science XIII (abstract)*. – 1982. – P. 71–72.

146. Brownlee D.E. Meteor ablation spherules as chondrule analogs / D.E. Brownlee, B. Bates, R.H. Beauchamp // *Chondrules and Their Origins* / ed. E.A. King; Lunar and Planetary Institute. – Houston, Texas, 1983. – Vol. 1. – P. 10–25.

147. Brownlow A.E. Cosmic spherules in a Pacific core / A.E. Brownlow, W. Hunter, D.W. Parkin // *Geophysical Journal International*. – 1966. – Vol. 12, Issue 1. – P. 1–13.

148. Brunn A.F. Magnetic particles found by raking the deep-sea bottom / A.F. Brunn, E. Langer, H. Pauly // *Deep-Sea Research*. – 1955. – Vol. 2, Issue 3. – P. 230–246.

149. Buchwald V.F. Hibbingite (Beta-Fe<sub>2</sub>(OH)<sub>3</sub>Cl), a Chlorine-rich Corrosion Product in Meteorites and Ancient Iron Objects / V.F. Buchwald, C.B. Koch // *Meteoritics*. – 1995. – Vol. 30, № 5. – P. 493.

150. Buddhue J.D. Meteoritic dust / J.D. Buddhue. – Albuquerque: Univ. of New Mexico Press, 1950. – 102 p.

151. Chao E.C.T. New data on the nickel-iron spherules from Southeast Asian tektites and their implications / E.C.T. Chao, E.J. Dwornik, J. Littler // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 1964. – Vol. 28, Issue 6. – P. 971–974.

152. Carbon isotope chemostratigraphy and precise dating of middle Frasnian (lower Upper Devonian) Alamo Breccia, Nevada, USA / J.R. Morrow, C.A. Sandberg, K. Malkowski, M.M. Joachimski // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2009. – Vol. 282, Issue 1-4. – P. 105–118.

153. Carmignato S. Industrial X-Ray Computed Tomography / S. Carmignato, W. Dewulf, R. Leach. – Cham: Springer International Publishing, 2018. – 369 p.

154. Chapman M.G. Iron spherules from the Triassic-Jurassic boundary zone of the Lower Moennave, Nevada: a preliminary report on possible extraterrestrial dust deposits / M.G. Chapman, D. Lauretta // 32nd IGC Florence. Scientific Sessions: abstracts (part 2). – 2004. – P. 1141.

155. Characteristics and mass distribution of extraterrestrial dust from the Greenland ice cap / M. Maurette, C. Jehanno, E. Robin, C. Hammer // *Nature*. – 1987. – Vol. 328. – P. 699–702.

156. Characterization and geochemistry of technogenic magnetic particles (TMPs) in contaminated industrial soils: Assessing health risk via ingestion / A. Bourliva, L. Papadopoulou, E. Aidona [et al.] // *Geoderma*. – 2017. – Vol. 295. – P. 86–97.

157. Chondritic Meteorite Fragments Associated with the Permian-Triassic Boundary in Antarctica / A.R. Basu, M.I. Petaev, R.J. Poreda [et al.] // *Science*. – 2003. – Vol. 302, Issue 5649. – P. 1388–1392.

158. Cometary dust in Antarctic snow and ice: past and present chondritic porous micrometeorites preserved on the Earth's surface / T. Noguchi, N. Ohashi,



S. Tsujimoto, T. Mitsunari // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2015. – Vol. 410. – P. 1–11.

159. Composition and accretion rate of fossil micrometeorites recovered in Middle Triassic deep-sea deposits / T. Onoue, T. Nakamura, T. Haranosono, C. Yasuda // *Geology*. – 2011. – Vol. 39, Issue 6. – P. 567–570.

160. Composition and Morphology of Metal Microparticles in Paleozoic Sediments of Caspian Depression / A.I. Bakhtin, V.V. Vorobev, J.N. Osin, R.H. Sungatullin, G.M. Sungatullina [et al.] // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2015. – Vol. 10, Issue 24. – P. 45372–45382.

161. Cosmic dust in the deposits of the Moscovian and Kasimovian stages, Usolka section, Cisuralian foredeep, Russia / R.Kh. Sungatullin, G.M. Sungatullina, M.S. Glukhov [et al.] // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2017. – Vol. 52. Special Issue: 80th Annual Meeting of the Meteoritical Society. – P. 6121.

162. Cosmic Microspheres from the Deposits of the Moscovian Stage of the Eastern Part of the Russian Plate / R. Sungatullin, M. Glukhov, B. Galiullin [et al.] // *Advances in Devonian, Carboniferous and Permian Research: Stratigraphy, Environments, Climate and Resources: Proceedings Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting*. – Bologna: Filodiritto Publisher, 2018. – P. 431–439.

163. Cosmic spherules from the Ordovician of Argentina / G.G. Voldman, M.J. Genge, G.L. Albanesi [et al.] // *Geological Journal*. – 2012. – Vol. 48, № 2-3. – P. 222–235.

164. Cosmic spherules from Widerøefjellet, Sør Rondane Mountains (East Antarctica) / S. Goderis, B. Soens, M.S. Huber [et al.] // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2020. – Vol. 270. – P. 112–143.

165. Crozier W.D. Black, magnetic spherules in sediments / W.D. Crozier // *J. Geophys. Research*. – 1960. – Vol. 65, № 9. – P. 2971–2977.

166. Density, porosity, mineralogy, and internal structure of cosmic dust and alteration of its properties during high-velocity atmospheric entry / T. Kohout, A. Kallonen, J.-P. Suuronen [et al.] // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2014. – Vol. 49, № 7. – P. 1157–1170.

167. Determination of the densities of individual meteoric, glacial and volcanic spherules / F.A. Franklin, P.W. Hodge, F.W. Wright, C.C. Langway // *J. Geophys. Res.* – 1967. – Vol. 72, № 10. – P. 2543–2546.

168. Diamond and silicon carbide in impact melt rock from the Ries impact crater/ R.M. Hough, I. Gilmour, C.T. Pillinger [et al.] // *Nature.* – 1995. – Vol. 378. – P. 41–44.

169. Discovery and study of microspherules at the Permian-Triassic boundary of the Shansi section, Guangyuan, Sichuan / Z. Gao, D. Xu, Q. Zang, Y. Sun // *Dizhi Lunping = Geological Review.* – 1987. – Vol. 33, № 3. – P. 205–213.

170. Don G. Extraterrestrial spherules with Fe-Ni core and Pt group nuggets in Pleistocene sediment from Hungary / G. Don, K. Gál-Sólymos // *Lunar and Planetary Science.* – 2004. – Vol. 35 – P. 1591.

171. Elevated flux of cosmic spherules (micrometeorites) in Ordovician rocks of the Durness Groupe, NW Scotland / I. Dredge, J. Parmell, P. Lindgren, S. Bowden // *Scottish J. Geol.* – 2010. – Vol. 46, Issue 1. – P. 7–16.

172. Enigma of ferruginous inclusions in Permian evaporites / R. Kadyrov, M. Glukhov, E. Statsenko, B. Galliulin // *Arabian Journal of Geosciences.* – 2020. – Vol. 13, № 20. – Art. 1058.

173. Evidence for an extraterrestrial impact 12,900 years ago that contributed to the megafaunal extinctions and the Younger Dryas cooling / R.B. Firestone, A. West, J.P. Kennett [et al.] // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* – 2007. – Vol. 104, Issue 41. – P. 16016–16021.

174. Evidence for deposition of 10 million tonnes of impact spherules across four continents 12,800 y ago / J.H. Wittke, J.C. Weaver, T.E. Bunch [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Science.* – 2013. – Vol. 110, Issue 23. – P. E2088–E2097.

175. Extraterrestrial microspherules from Bajada del Diablo, Chubut, Argentina / M.J. Orgeira, L.N. Castro, G.A. Goldmann [et al.] // *Geoscience Frontiers.* – 2017. – Vol. 8, Issue 1. – P. 137–149.

176. Features of the material composition and possible technologies of pyrite cinders processing / A.B. Makarov, G.G. Khasanova, M.S. Glukhov, M.A. Pan'shin // Известия УГГУ. – 2021. – Вып. 2 (62). – P. 22–28.

177. Fechting H. On the presence or absence of nickel in dark magnetic cosmic spherules and their mechanism of origin / H. Fechting, K. Utech // Ann. N.Y. Acad. Sci. – 1964. – Vol. 119, Issue 1. – P. 243–249.

178. Ferarro J.R. Introductory Raman spectroscopy / J.R. Ferarro. – Boston: Academic press, 2003. – 434 p.

179. Fe-rich and K-rich mafic spherules from slumped and channelized Chicxulub ejecta deposits in the Northern La Sierrita area, NE Mexico / P. Schulte, W. Stinnesbeck, D. Stüben [et al.] // Int. J. Earth Sci (Geol Rundsch). – 2003. – Vol. 92, Issue 1. – P. 114–142.

180. Flight W. Meteoric deposits on Arctic Snow off the Taimur Coast, 1880 / W. Flight // Geol. Mag. New series. – 1882. – Decade 2, Vol. 9. – P. 360–362.

181. Fredriksson K. Meteoritic debris from the Southern California desert / K. Fredriksson, R. Gowdy // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1963. – Vol. 27, Issue 3. – P. 241–243.

182. French B.M. Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures / B.M. French. – Houston: Lunar and Planetary Institute, 1998. – 120 p. – (LPI Contribution; № 954).

183. Genge M.J. The fusion crusts of stony meteorites: Implications for the atmospheric reprocessing of extraterrestrial materials / M.J. Genge, M.M. Grady // Meteoritics Planetary Science. – 1999. – Vol. 34, Issue 3. – P. 341–356.

184. Genge M.J. The origins of I-type spherules and the atmospheric entry of iron micrometeoroids / M.J. Genge // Meteorit. Planet. Sci. – 2016. – Vol. 51, Issue 6. – P. 1063–1081.

185. Geochemistry and age of Ivory Coast tektites and microtektites / C. Koeberl, R. Bottomley, B.P. Glass, D. Storzer // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1997. – Vol. 61, Issue 8. – P. 1745–1772.

186. Geochemistry of meteorite-rich marine limestone strata and fossil meteorites from the lower Ordovician at Kinnekulle, Sweden / B. Schmitz, M. Lindstrom, F. Asaro, M. Tassinari // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1996. – Vol. 145, Issue 1-4. – P. 31–48.

187. Glass B.P. Microirghizites recovered from a sediment sample from the Zhamanchin impact structure / B.P. Glass, K. Fredriksson, P.V. Florensky // *J. Geophys. Res.* – 1983. – Vol. 388, Issue S01. – P. B319– B330.

188. Glass B.P. Tektites and microtektites: Key facts and interferences / B.P. Glass // *Tectonophysics.* –1990. – Vol. 171, Issue 1-4. – P. 393–404.

189. Glass B.P. Upper Eocene Impact Ejecta/Spherule layers in Marine sediments / B.P. Glass // *Chem. Erde – Geochemistry.* – 2002. – Vol. 62, Issue 3. – P. 173–196.

190. GRACE gravity evidence for an impact basin in Wilkes Land, Antarctica / R.R.B. Von Frese, L.V. Potts, S.B. Wells [et al.] // *Geochem., Geophys., Geosys.* – 2009. – Vol. 10, Issue 1. – Art. Q02014.

191. Grachev A.F. Mantle Plumes and Their Influence on the Lithosphere, Sea-level Fluctuations and Atmosphere / A.F Grachev // *The K/T boundary of Gams (Eastern Alps, Austria) and the nature of terminal Cretaceous mass Extinction.* – Wien: *Abh. Geol. Bund.*, 2009. – Bd. 63. – P. 147–164.

192. Grieve R.A.F. Extraterrestrial impacts on earth: the evidence and the consequences. Meteorites: Flux with time and impact effects / R.A.F. Grieve // *Geological Society, London, Special Publications.* – 1998. – Vol. 140, Issue 1. – P. 105–131.

193. Guatia C. Cosmic Microsphere: a sem study / C. Guatia, F. Martegani // *Memorie Societa Astronomica Italiana.* – 2008. – Vol. 12. – P. 110–125.

194. Gurov E.P. The group of Macha craters in western Yakutia / E.P. Gurov, E.P. Gurova // *Planetary and Space Science.* – 1998. – Vol. 46, Issue 2-3. – P. 323–328.

195. Hanesch M. Raman spectroscopy of iron oxides and (oxy)hydroxides at low laser power and possible applications in environmental magnetic studies / M. Hanesch // *Geophys. J. Int.* – 2009. – Vol. 177, Issue 3. – P. 941–948.

196. Harvey R.P. The origin and significance of cosmic dust from the Walcott Névé, Antarctica / R.P. Harvey, M. Maurette // Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference. – Houston, 1991. – Vol. 21. – P. 569–578.

197. Hemenway C.L. Micrometeorite collection from a recoverable sounding rocket. I / C.L. Hemenway, R.K. Soberman, E.F. Fullam // Astronom. J. – 1962. – Vol. 67. – P. 116.

198. Hemenway C.L. Nanometeorites / C.L. Hemenway, E.F. Fullam, L. Phyllips // Nature. – 1961. – Vol. 190. – P. 897–898.

199. Hemenway C.L. Studies of micrometeorites obtained from a recoverable sounding rocket / C.L. Hemenway, R.K. Soberman // Astron. J. – 1962. – Vol. 67. – P. 256–266.

200. Hodge P.W. Meteoritic particles in the soil surrounding the Hunbury meteorite crater / P.W. Hodge, F.W. Wright // J. Geophys. Res. – 1971. – Vol. 76, Issue 17. – P. 3880–3895.

201. Hodge P.W. Studies of particles for extraterrestrial origin: 3. Analysis of dust particles from polar ice deposits / P.W. Hodge, F.W. Wright, C.C. Langway // J. Geophys. Res. – 1964. – Vol. 69, Issue 14. – P. 2919–2931.

202. Hodge P.W. Studies of particles for extraterrestrial origin: 2. A comparison of microscopic spherules of meteoritic and volcanic origin / P.W. Hodge, F.W. Wright // J. Geophys. Res. – 1964. – Vol. 69, Issue 12. – P. 2449–2454.

203. Hodge P.W. Studies of particles of extraterrestrial origin: 5. Compositions of the interiors of spherules from arctic and Antarctic ice deposits / P.W. Hodge, F.W. Wright, C.C. Langway // J. Geophys. Res. – 1967. – Vol. 72, Issue 4. – P. 1404–1406.

204. Hough R.M. Diamond in the Ejecta and Fireball layers of K/T boundary in the USA and Mexico / R.M. Hough, I. Gilmore, C.T. Plinger // Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution. – Planetary Sciences Research Institute, 2001. – P. 6093.

205. Hunter W. Cosmic dust in Tertiary rock and the lunar surface / W. Hunter, D.W. Parkin // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 1961. – Vol. 24, Issue 1-2. – P. 32–39.

206. Identification of two populations of extraterrestrial particles in a Jurassic hardground of the southern Alps / C. Jehanno, D. Boclet, Ph. Bonte [et al.] // 18th Lunar and Planetary Science Conference. – Houston, 1988. – P. 623–630.

207. Implication from Chemical study of Magnetic Spherules from a Thin Ferruginous Layer Located in Fatehgarh Formation of Barmer Basin, India / S. Mathur, R.P. Tripathi, S.C. Mathur [et al.] // Journal of the Geological Society of India. – 2019. – Vol. 93, Issue 1. – P. 56–60.

208. Implications from chemical, structural and mineralogical studies of magnetic microspherules from around the lower Younger Dryas boundary (New Mexico, USA) / A.V. Andronikov, I.E. Andronikova, C.W. Loehn [et al.] // Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography. – 2015. – Vol. 98, Issue 1. – P. 39–59.

209. Internal structure of type I deep-sea spherules by X-ray computed microtomography / H. Feng, K.W. Jones, S. Tomov [et al.] // Meteoritics & Planetary Science. – 2005. – Vol. 40, Issue 2. – P. 195–206.

210. Isotopic and elemental composition of iron, nickel and chromium in type I deep-sea spherules: implications for origin and composition of the parent micrometeoroids / G.F. Herzog, S. Xue, G.S. Hall [et al.] // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1999. – Vol. 63, Issue 9. – P. 1443–1457.

211. Isotopic compositions oxygen, iron, chromium, and nickel in cosmic spherules: toward a better comprehension of atmospheric entry heating effects / C. Engrand, K.D. McKeegan, L.A. Leshin [et al.] // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2005. – Vol. 69, Issue 22. – P. 5365–5385.

212. Iwahashi J. Shape and Surface Structure of the Magnetic Micro-Spherules from Permian and Triassic Bedded Chert / J. Iwahashi // Journal of Geosciences, Osaka City University. – 1991. – Vol. 34, Issue 2. – P. 55–73.

213. Jubb A.M. Vibrational spectroscopic characterization of hematite, maghemite, and magnetite thin films produced vapor deposition / A.M. Jubb, H.C. Allen // ACS Applied Material & Interfaces. – 2010. – Vol. 2, № 10. – P. 2804–2812.

214. Junge C.E. Etudes sur les poussières cosmiques / C.E. Junge // *Nature*. – 1876. – Vol. 14.
215. Kamenetsky V.S. Origin of noble-metal nuggets in sulfide-saturated arc magmas: A case study of olivine-hosted sulfide melt inclusions from the Tolbachik volcano (Kamchatka, Russia) / V.S. Kamenetsky, M. Zelenski // *Geology*. – 2020. – Vol. 48, Issue 6. – P. 620–624.
216. Keller G. Impact Stratigraphy: Old principle, new reality / G. Keller // *Geol. Soc. Am.* – 2008. – Vol. 437. – P. 147–178.
217. Kleinmann B. Magnetite bearing spherules in tektites / B. Kleinmann // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 1969. – Vol. 33, № 9. – P. 1113–1120.
218. Koeberl C. Extraterrestrial spherules in glacial sediment from the Transantarctic Mountains, Antarctica: Structure, mineralogy and chemical composition / C. Koeberl, E.H. Hagen // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1989. – Vol. 53, Issue 4. – P. 937–944.
219. Krinov E.L. Scattered meteoritic matter in the area of fall of the Sikhote-Alin iron meteorite / E.L. Krinov // *Ann. NY Acad. Sci.* – 1964. – Vol. 119, Issue 1. – P. 224–234.
220. Kyte F. A meteorite from the Cretaceous/Tertiary boundary / F. Kyte // *Nature*. – 1998. – Vol. 396. – P. 237–239.
221. Laevastu T. Extraterrestrial material in deep-sea deposits / T. Laevastu, O. Mellis // *Eos, Transactions of the American Geophysical Union*. – 1955. – Vol. 36, Issue 3. – P. 385–389.
222. Lal D. Low-energy protons: average flux in interplanetary space during the last 100,000 years / D. Lal, V.S. Venkatavaradan // *Science*. – 1966. – Vol. 151, Issue 3716. – P. 1381–1384.
223. Lamontagne M. Complex Faulting Confounds Earthquake Research in the Charlevoix Seismic Zone, Quebec / M. Lamontagne, P. Keating, T. Toutin // *EOS Transactions American Geophysical Union*. – 2000. – Vol. 81, № 26. – P. 289–293.

224. Lanci L. Meteoric smoke fallout revealed by superparamagnetism in Greenland ice / L. Lanci, D.V. Kent // *Geophysical Research Letters*. – 2006. – Vol. 33, Issue 13. – Art. L13308.

225. Langway C.C. Jr. Some characteristics of black spherules / C.C. Langway Jr., U.B. Marvin // *New York Acad. Sci., Conf. on Cosmic Dust*. – 1964. – Vol. 119, Issue 1. – P. 205–223.

226. Langway C.C. Jr. Stratigraphic Analysis of a Deep Ice Core from Greenland / C.C. Langway Jr. // *Geological Society of America*. – 1970. – Vol. 125. – P. 101–180.

227. Langway C.C. Jr. Sampling for extra-terrestrial dust on the Greenland Ice Sheet / C.C. Langway Jr. // *International Association of Scientific Hydrology, Berkeley Symposium*. – 1963. – Vol. 61. – P. 189–197.

228. Late Eocene impact ejecta: geochemical and isotopic connections with the Popigai impact structure / J. Whitehead, D.A. Papanastassiou, J.G. Spray [et al.] // *Earth and Planetary Sciences Letters*. – 2000. – Vol. 181, Issue 4. – P. 473–487.

229. Late Eocene impact microspherules: Stratigraphy, age and geochemistry / G. Keller, S.L. D'Hondt, C.J. Orth [et al.] // *Meteoritics*. – 1987. – Vol. 22. – P. 25–60.

230. Legodi M.A. The preparation of magnetite, goethite, hematite and maghemite of pigment quality from mill scale iron waste / M.A. Legodi, D. de Waal // *Dyes and Pigments*. – 2007. – Vol. 74, Issue 1. – P. 161–168.

231. Lightning-induced volcanic spherules / K. Genareau, J.B. Wardman, T.M. Wilson, S.R. McNutt [et al.] // *Geology*. – 2015. – Vol. 43, Issue 4. – P. 319–322.

232. Lougheed M.S. A classification of extraterrestrial spherules found in sedimentary rocks and till / M.S. Lougheed // *The Ohio Journal of Science*. – 1966. – Vol. 66, Issue 3. – P. 274–283.

233. Magnetic Microspherules in Impactites and Sedimentary Rocks / M.S. Glukhov, V.A. Tsel'movich, R.Kh. Sungatullin [et al.] // *Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation: Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. – Cham: Springer, 2020. – P. 65–71.



234. Magnetic spherules: cosmic dust or markers of a meteoritic impact? / G. Szoor, Z. Elekes, P. Rózsa [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Ser. B.* – 2001. – Vol. 181, Issue 1-4. – P. 557–562.

235. Magnetization of polar ice: a measurement of terrestrial dust and extraterrestrial fallout / L. Lanci, B. Delmonte, D.V. Kent, V. Maggi [et al.] // *Quat. Sci. Rev.* – 2012. – Vol. 33. – P. 20–31.

236. Maher B.A. The magnetic properties of Quaternary aeolian dusts and sediments, and their palaeoclimatic significance / B.A. Maher // *Aeolian Research.* – 2011. – Vol. 3, Issue 2. – P. 87–144.

237. Margolis S.V. Microtektites, Microkristites, and Spinels from a Late Pliocene Asteroid Impact in the Southern Ocean / S.V. Margolis, Ph. Claeys, F. Kyte // *Science.* – 1991. – Vol. 251, Issue 5001. – P. 1594–1597.

238. Marini F. Magnetic fines from the Kaali impact-site (Holocene, Estonia): preliminary SEM investigation / F. Marini, A. Raukas, R. Tiirmaa // *Geochemical Journal.* – 2004. – Vol. 38, Issue 2. – P. 107–120.

239. Marvin U.B. Black, magnetic spherules from Pleistocene and recent beach sands / U.B. Marvin, M.T. Einaudi // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1967. – Vol. 31, Issue 10. – P. 1871–1884.

240. Mechanical transport of metallogenic materials in endogenic hydrothermal solutions: evidence from the microspherules in micro-disseminated gold deposits, northwestern Sichuan, China / J. Liu, M. Zheng, J. Liu [et al.] // *Ore Geology Reviews.* – 2003. – Vol. 22, Issue 1-2. – P. 1–16.

241. Merrihue C. Rare gas evidence for cosmic dust in modern Pacific red clay / C. Merrihue // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* – 1964. – Vol. 119, Issue 1. – P. 351–367.

242. Metallic microspheres of cosmic and technogenic origin / M.S. Glukhov, R.Kh. Sungatullin, B.M. Galiullin [et al.] // *Meteoritics & Planetary Science.* – 2018. – Vol. 53, Issue 1. – P. 6202.

243. Meteoritic ablation debris from the Transantarctic Mountains: Evidence for a Tunguska-like impact over Antarctica ca. 480 ka ago / M. van Ginneken, L. Folco,

N. Perchiazzi [et al.] // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2010. – Vol. 293, Issue 1-2. – P. 104–113.

244. Meteoritic event recorded in Antarctic ice / R.P. Harvey, N.W. Dunbar, W.C. McIntosh [et al.] // *Geology*. – 1998. – Vol. 26, Issue 7. – P. 607–610.

245. Mineral microbial structures in a bone of the Late Cretaceous dinosaur *Saurolophus angustirostris* from the Gobi Desert, Mongolia – a Raman spectroscopy study / B. Kremer, K. Owocki, A. Królikowska [et al.] // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* – 2012. – Vol. 358-360. – P. 51–61.

246. Miura Y. Carbon-rich and Ni-Fe-rich spherules at the end of the Permian: application to materials of space explorations / Y. Miura // LPS, Proceedings of the Lunar and Planetary Science XXXVII. – Houston, USA, 2006. – Vol. 371. – P. 2441.

247. Modern Urban Sediments: Identification of the Cosmic Spherules / I.A. Danilenko, E.M. Baglaeva, E.V. Petrova [et al.] // *Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation: Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. – Springer, Cham., 2019. – P. 9–15.

248. Molostovsky E.A. Sedimentogenesis in Maastrichtian-Danian basins of the Russian plate and adjacent areas in the context of plume geodynamics / E.A. Molostovsky, V.A. Fomin, D.M. Pechersky // *Rus. J. Earth Sci.* – 2006. – Vol. 8, Issue 6. – P. 1–13.

249. Montanari A. Impact Stratigraphy: The Italian Record / A. Montanari, C. Koeberl. – Berlin; N. Y.: Springer, 2002. – 364 p.

250. Morris R.V. Phyllosilicate-poor palagonitic dust from Mauna Kea Volcano (Hawaii): A mineralogical analogue for magnetic Martian dust? / R.V. Morris, T.G. Graff, S. Mertzman // *Journal of Geophysical Research Planets*. – 2001. – Vol. 106, Issue E3. – P. 5057–5084.

251. Murray J. Mineral Substances of Terrestrial and Extra-terrestrial Origin in Deep-sea Deposits / J. Murray, A.F. Renard // *Report of the Scientific Results of the Voyage of H.M.S. Challenger During the Years 1873–1876*. – London [et al.], 1891. – Chapter 5. – P. 291–334.

252. Murray J. On the distribution of volcanic debris over the floor of ocean / J. Murray // *Proceedings of the Royal Society of Edinburg.* – 1878. – Vol. 9. – P. 247–261.

253. Mutch T.A. Abundance of magnetic spherules in Silurian and Permian salt samples / T.A. Mutch // *Earth and Planetary Science Letters.* – 1966. – Vol. 1, Issue 5. – P. 325–329.

254. Mutch T.A. Extraterrestrial particles in Paleozoic salts / T.A. Mutch // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* – 1964. – Vol. 119, Issue 1. – P. 166–185.

255. Mutch T.A. Volcanic ashes compared with Paleozoic salts containing extraterrestrial spherules / T.A. Mutch // *J. Geophys. Res.* – 1964. – Vol. 69, Issue 22. – P. 4735–4740.

256. NIST XCO database at MuCalcTool / M.J. Berger, J.H. Hubbell, S.M. Seltzer [et al.]. – Text: electronic // XCOM: Photon Cross Sections Database, 2015. – URL: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html> (accessed: 05.06.2021).

257. Nordenskjöld A.E. On the cosmic dust which falls on the surface of the Earth with the atmospheric precipitation / A.E. Nordenskjöld // *Philosophical magazine.* – 1874. – Vol. 48. – P. 546.

258. Nordenskjöld A.E. Über den grossen Staubfall in Schweden und angrenzenden Landern / A.E. Nordenskjöld // *Meteor. Zeitschr.* – 1894. – Vol. 11. – P. 201–218.

259. Nordenskjöld A.E. Undersökning at ett kosmikstsofft, som nedfallit pa Gardillererna nara San Fernando i Chile / A.E. Nordenskjöld // *Geol. Foren. Forhandl.* – 1886. – Vol. 8. – P. 446.

260. Öpik E.J. Physics of meteor flyght in the atmosphere / E.J. Öpik. – Dover Phoenix Editions. – N. Y.; London: Interscience, 1958. – 174 p.

261. Öpik E.J. Researches on the physical theory of meteor phenomena. III. Basis of the physical theory of meteor phenomena / E.J. Öpik, T. Ülikool // *Publ. Obs. Astron. Tartu.* – 1937. – Vol. 29, Issue 5. – P. 1–67.

262. Origin and provenance of spherules and magnetic grains at the Younger Dryas boundary / Y. Wu, M. Sharma, M.A. LeCompte, M.N. Demitroff [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2013. – Vol. 110, Issue 38. – P. E3557–E3566.

263. Origins of microspherules from the Permian – Triassic boundary event layers in South China / H. Zhang, S. Shen, C. Cao, Q. Zheng // *Lithos*. – 2014. – Vol. 204. – P. 246–257.

264. Osinski G.R. The nature of the groundmass of surficial suevite from the Ries impact structure, Germany, and constraints on its origin / G.R. Osinski, A.F. Grieve, J.G. Spray // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2004. – Vol. 39, Issue 10. – P. 1655–1683.

265. Ostrooumov M. Mineralogical composition of the meteorite El Pozo (Mexico): a Raman, infrared and XRD study / M. Ostrooumov, M. del Sol Hernández-Berna // *Spectrochim. Acta. Part A, Mol. Biomol Spectrosc.* – 2011. – Vol. 83, Issue 1. – P. 437–443.

266. Parashar K. Investigations on a large collection of cosmic dust from the central Indian Ocean / K. Parashar, M.S. Prasad, S.S.S. Chauhan // *Earth, Moon and Planets*. – 2010. – Vol. 107, Issue 2. – P. 197–217.

267. Parkin D.W. Further studies on cosmic spherules from deep-sea sediments / D.W. Parkin, R.A.L. Sullivan, J. Andrews // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* – 1980. – Vol. 297. – P. 495–518.

268. Parkin D.W. Meteorites and cosmic dust / D.W. Parkin, W. Hunter // *Advances Astronom. and Astrophys.* – 1962. – Vol. 1. – P. 105–163.

269. Parkin D.W. Cosmic dust in the atmosphere / D.W. Parkin, W. Hunter // *Nature*. – 1959. – Vol. 183, Issue 4663. – P. 732–734.

270. Placers of cosmic dust in the blue ice lakes of Greenland / M. Maurette, C. Hammer, N. Reeh [et al.] // *Science*. – 1986. – Vol. 233, Issue 4766. – P. 869–872.

271. Quench textures in altered spherules from the Cretaceous-Tertiary boundary layer at Agost and Caravaca, SE Spain / F. Martinez-Ruiz, M.O. Huertas, I. Palomo, P. Acquafredda // *Sedimentary Geology*. – 1997. – Vol. 113, Issue 1-2. – P. 137–147.

272. Raukas A. Distribution and composition of impact and extraterrestrial spherules in the Kaali area (Island of Saaremaa, Estonia) / A. Raukas // *Geochemical Journal*. – 2004. – Vol. 38, Issue 2. – P. 101–106.

273. Reid A.M. Synthetic metallic spherules in a Philippine tektite / A.M. Reid, F.R. Park, A.J. Cohen // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 1964. – Vol. 28, Issue 6. – P. 1009–1010.

274. Reimold W.U. Impact structures in Africa: A Review / W.U. Reimold, C. Koeberl // *Journal of African Earth Sciences* – 2014. – Vol. 93. – P. 57–175.

275. Sasaki T. Shinkaitei suferuru no bunri-Keitai, naibukozo, Kagakusoei no tokucho to seiin ni tsuite-(Classification of spherules in deep-sea sediments-about characters and genesis of shapes, inner structures and chemical compositions) (in Japanese) / T. Sasaki // *Osaha no chigakll kyoiku*. – 1983. – Vol. 5. – P. 9–18.

276. Sankaran A.V. Search for the elusive and-Permian bolide impact: Exotic carbon – fullerene, as a potential tracer / A.V. Sankaran // *Current Science*. – 2002.– Vol. 83, Issue 4. – P. 363–365.

277. Senftle F.E. Magnetic properties of nikel-iron spherules in tektites from Isabela, Philippine Islands / F.E. Senftle, A.E. Thorpe, R.R. Lewis // *Journal of Geophysical Research*. – 1964. – Vol. 49. – P. 317–324.

278. Shilovsky O. Microstructure and geochemical features of hard dental tissues of *Deltavjatia vjatkensis* and *Suminia getmanovi* Permian tetrapods (Kotelnich site, Kirov region, Russia) / O. Shilovsky, D. Kiseleva // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – Vol. 516, Issue 1. – Art. 012020.

279. Shock-synthesized hexagonal diamonds in Younger Dryas boundary sediments / D.J. Kennett, J.P. Kennett, A. West [et al.] // *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* – 2009. – Vol. 106, Issue 31. – P. 12623–12628.

280. Silicate glass micro and nanospherules generated in explosive eruptions of ultrabasic magmas: implications for the origin of pelletal lapilli / M. Carracedo Sánchez, F. Sarrionandia, J. Arostegui, J.I. Gil Ibarguchi // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2015. – Vol. 293. – P. 13–24.

281. Singer S.F. Zodiacal dust and deep-sea sediments / S.F. Singer // *Science*. – 1967. – Vol. 156, Issue 3778. – P. 1080–1083.
282. Skolnick H. Ancient meteoritic dust / H. Skolnick // *Geol. Soc. Am. Bull.* – 1961. – Vol. 72, Issue 12. – P. 1837–1842.
283. Spheroids at the Cretaceous-Tertiary boundary are altered impact droplets of basaltic composition / A. Montanari, R.L. Hay, W. Alvarez [et al.] // *Geology*. – 1983. – Vol. 11, Issue 11. – P. 668–671.
284. Spherules with pure iron cores from Myanmar jadeitite: Type-I deep-sea spherules? / Shi Guang-Hai, Zhu Xiang-Kun, Deng Jun [et al.] // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2011. – Vol. 75, Issue 6. – P. 1608–1620.
285. Standard J. Raining lead around 250mya: a smoking gun for an Australian impact origin of the Permian Extinction / J. Standard, A. Angell // *Geophysics*. – 2003. – Vol. 1. – P. 1–9.
286. Stankowski W.T.J. Crystallographic variety of magnetic spherules from Pleistocene and Holocene sediments in the Northern foreland of Morasko-Meteorite Reserve / W.T.J. Stankowski, A. Katrusiak, A. Budzianowski // *Planetary and Space Science*. – 2006. – Vol. 54, Issue 1. – P. 60–70.
287. Suttle M.D. Diagenetically altered fossil micrometeorites suggest cosmic dust is common the geological record / M.D. Suttle, M.J. Genge // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2017. – Vol. 476. – P. 132–142.
288. Taylor S. Accretion rate of cosmic spherules measured at the South Pole / S. Taylor, J.H. Lever, R.P. Harvey // *Nature*. – 1998. – Vol. 392, Issue 6679. – P. 899–903.
289. Taylor S. Cosmic Dust: Finding a Needle in a Haystack / S. Taylor, S. Messenger, L. Folco // *Elements*. – 2016. – Vol. 12, Issue 3. – P. 171–176.
290. Taylor S. Cosmic spherules in the geologic record / S. Taylor, D.E. Brownlee // *Meteoritics*. – 1991. – Vol. 26, Issue 3. – P. 203–211.
291. Taylor S. Numbers, types and compositions of an unbiased collection of cosmic spherules / S. Taylor, J.H. Lever, R.P. Harvey // *Meteoritics and Planetary Science*. – 2000. – Vol. 35, Issue 4. – P. 651–666.

292. The classification of micrometeorites / M.J. Genge, C. Engrand, M. Gounelle, S. Taylor // *Meteoritics and Planetary Science*. – 2008. – Vol. 43, Issue 3. – P. 497–515.

293. The Global Boundary Stratotype Section and Point for the base of the Danian Stage (Paleocene, Paleogene, «Tertiary», Cenozoic) at El Kef, Tunisia – Origin definition and revision / E. Molina, L. Alegret, I. Arenillas [et al.] // *Episodes*. – 2006. – Vol. 29, Issue 4. – P. 263–273.

294. The K-T boundary in Oman: identified using magnetic susceptibility field measurements with geochemical confirmation / B.B. Ellwood, W.D. McDonald, C. Wheeler, S.L. Benoit // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2003. – Vol. 206, Issue 3-4. – P. 529–540.

295. The K/T boundary of Gams (Eastern Alps, Austria) and the nature of terminal Cretaceous mass extinction / ed. by A.F. Grachev. – Wien: *Abh. Geol. Bund.*, 2009. – Bd. 63. – 199 p.

296. The mineralogy and petrology of I-type cosmic spherules: Implications for their sources, origins and identification in sedimentary rocks / M.J. Genge, B. Davies, M.D. Suttle [et al.] // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2017. – Vol. 218. – P. 167–200.

297. The Murray Springs Clovis site, Pleistocene extinction, and the question of extraterrestrial impact / C.V. Haynes, J. Boerner, K. Domanic [et al.] // *PNAS*. – 2010. – Vol. 107, Issue 9. – P. 4010–4015.

298. *The Precambrian Earth: Tempos and Events* / P.G. Eriksson, W. Altermann, D.R. Nelson [et al.]. – Amsterdam: Elsevier, 2004. – 966 p. – (Developments in Precambrian Geology Series; Vol. 12).

299. The RRUFF Project website containing an integrated database of Raman spectra, X-ray diffraction and chemistry data for minerals. – Text: electronic. – URL: <http://rruff.info/> (accessed: 16.02.2020).

300. The use of extraterrestrial microspherules to facilitate correlation of Permian evaporates / M.S. Glukhov, R.I. Kadyrov, R.Kh. Sungatullin [et al.] // *Proceedings Kazan Golovkinsky Young Scientists' Stratigraphic Meeting 2020 «Sedimentary Earth*

Systems: Stratigraphy, Geochronology, Petroleum Resources». – Bologna: Filodiritto Publisher, 2020. – P. 54–59.

301. Thiel E. Spherules from the Antarctic ice cap / E. Thiel, R.A. Schmidt // *J. Geophys. Research.* – 1961. – Vol. 66, Issue 1. – P. 307–310.

302. Thorpe A.N. Submicroscopic spherules and color of tektites / A.N. Thorpe, F.E. Senftle // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1964. – Vol. 28, Issue 6. – P. 981–994.

303. Toppani A. Experimental simulation of atmospheric entry of micrometeorites / A. Toppani, G. Libourel, C. Engrand, M. Maurette // *Meteorit. Planet. Sci.* – 2001. – Vol. 36, Issue 10. – P. 1377–1396.

304. Traces of the Marine Mjølnir Impact Event / H. Dypvik, M. Smelror, P.T. Sandbakken [et al.] // *Paleogeog. Paleoclimat. Paleoecol.* – 2006. – Vol. 241, Issue 3-4. – P. 621–636.

305. Trinquier A. The nature of K/T impactor. A  $^{54}\text{Cr}$  reappraisal / A. Trinquier, J.-L. Birck, C.J. Allegre // *Earth and Planetary Sci. Lett.* – 2006. – Vol. 241, Issue 3-4. – P. 780–788.

306. Tselmovich V.A. The First Finds of Silica Glass from the Cretaceous-Paleogene (K/T) Boundary Clay Layer in the Gams Stratigraphic Sequence, Eastern Alps / V.A. Tselmovich, A.F. Grachev, O.A. Korchagin // *100 Years Since Tunguska Phenomenon: Past, Present and Future: Intern. Conf.* – Moscow, 2008. – P. 221–222.

307. Two large meteorite impacts at the Cretaceous-Paleogene boundary / D. Jolley, I. Gilmour, E. Gurov [et al.] // *Geology.* – 2010. – Vol. 38, Issue 9. – P. 835–838.

308. Vassilev S.V. Mineralogy of combustion wastes from coal-fired power stations / S.V. Vassilev, C.G. Vassileva // *Fuel Processing Technology.* – 1996. – Vol. 47, Issue 3. – P. 261–280.

309. Walther J. Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft: beobachtungen über die Bildung der Gesteine und ihrer organischen Einschlüsse / J. Walther. – Jena: G. Fischer, 1893. – Bd. 3. – 534 p.



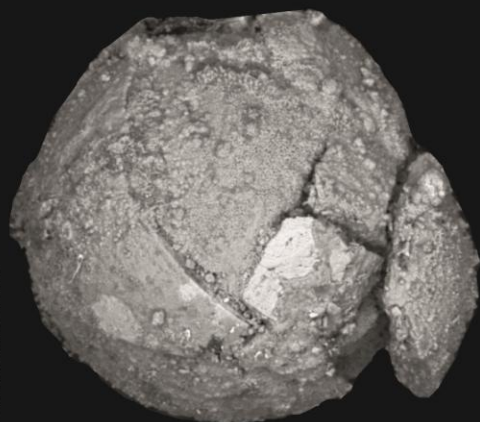
310. Woodleigh, Carnarvon Basin, Western Australia: a new 120 km diameter impact structure / A.J. Mory, R.P. Iasky, A.Y. Glikson, F. Pirajno // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2000. – Vol. 177, Issue 1-2. – P. 119–128.

311. Yiou F. Influx of cosmic spherules to Earth during the last ~105 years as deduced from concentrations in Antarctic ice cores / F. Yiou, G.M. Raisbeck, C. Jéhanno // *Meteoritics.* –1989. – Vol. 24. – P. 344.

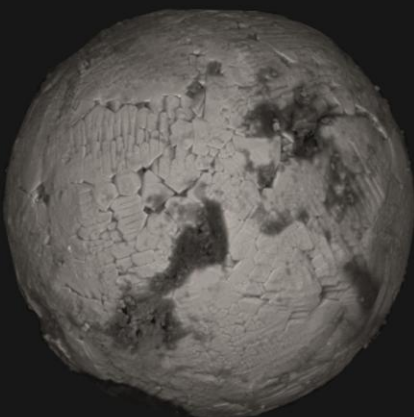
**АТЛАС  
МАГНИТНЫХ МИКРОСФЕРУЛ**

# Магнитные микросферы. Прикаспийская синеклиза. Казахстан

Кайнозойские отложения



200 µm

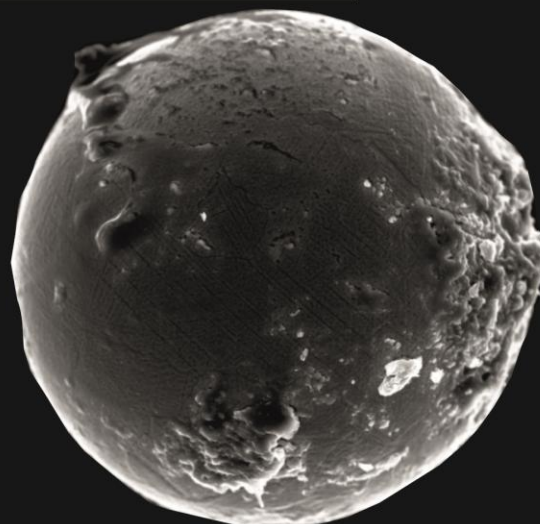


100 µm

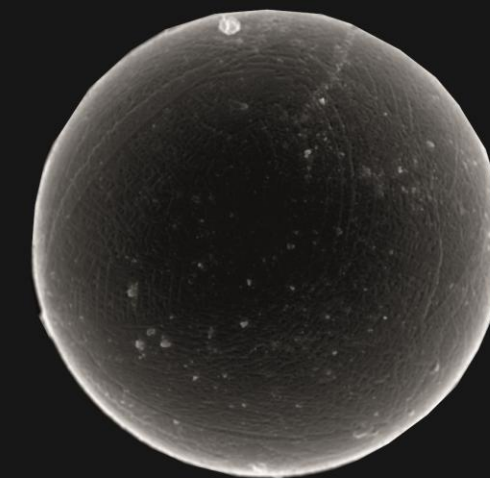
Мезозойские отложения



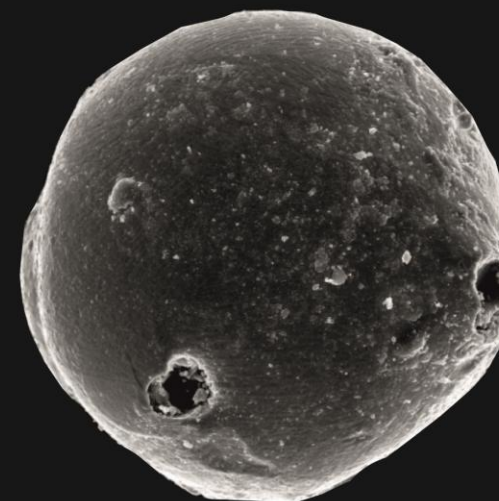
100 µm



200 µm



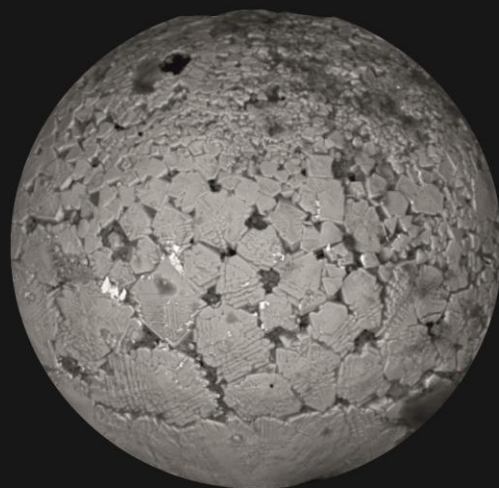
100 µm



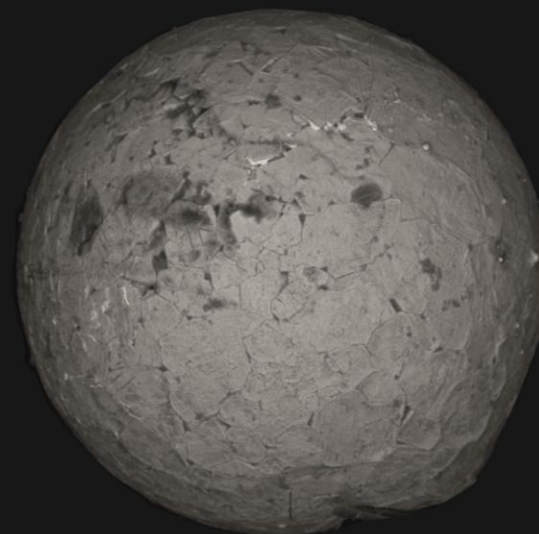
100 µm

# Магнитные микросферы. Прикаспийская синеклиза. Казахстан

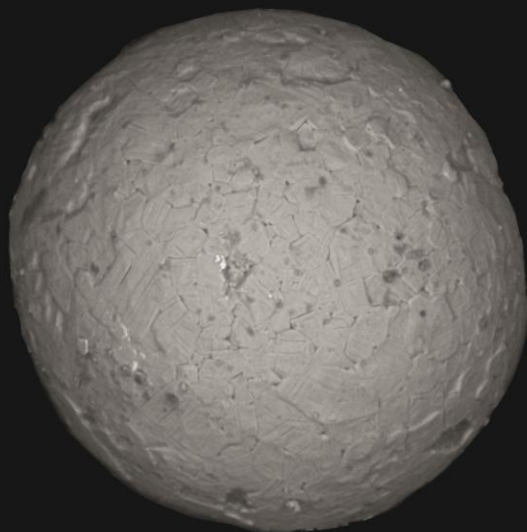
Палеозойские отложения



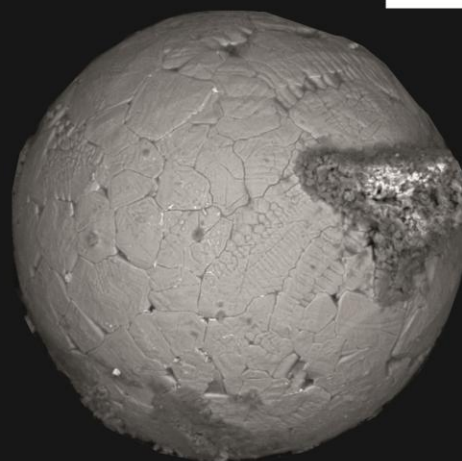
100 μm



300 μm



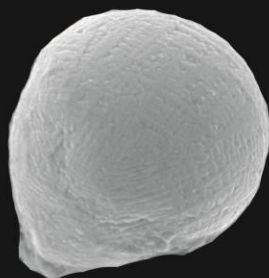
100 μm



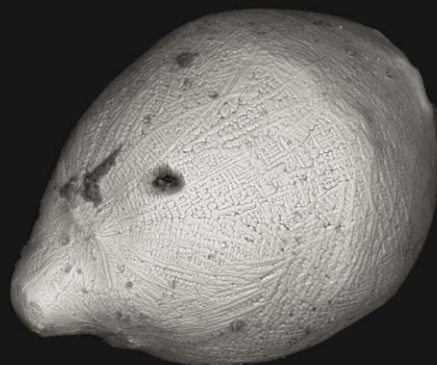
100 μm

**Магнитные микросферы. Каменноугольные отложения.  
Усть-Черемшанский прогиб.**

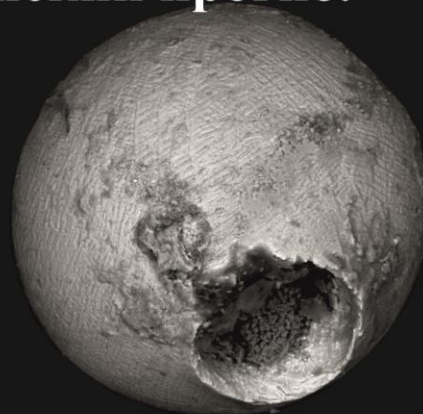
Гжельский ярус



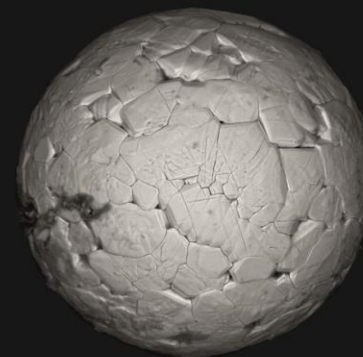
150  $\mu\text{m}$



200  $\mu\text{m}$

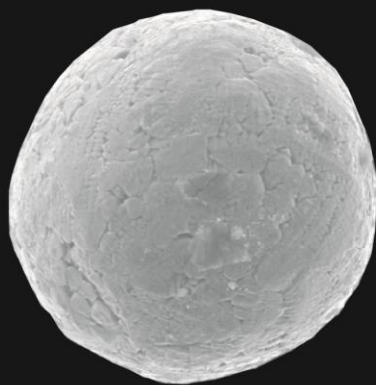


200  $\mu\text{m}$

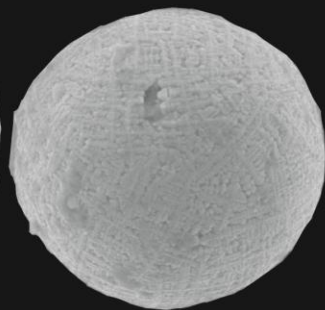


100  $\mu\text{m}$

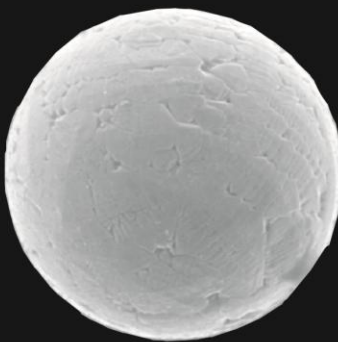
Московский ярус



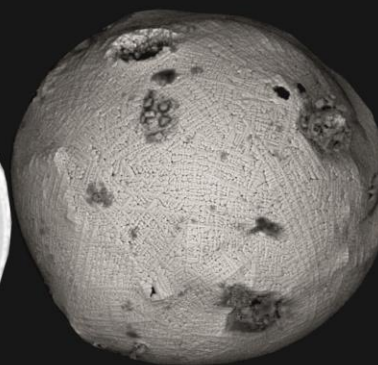
200  $\mu\text{m}$



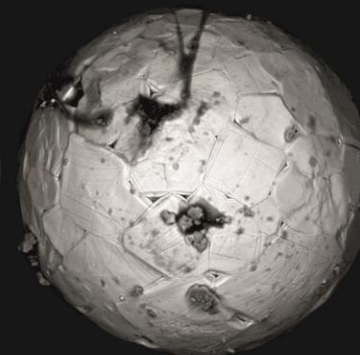
100  $\mu\text{m}$



150  $\mu\text{m}$

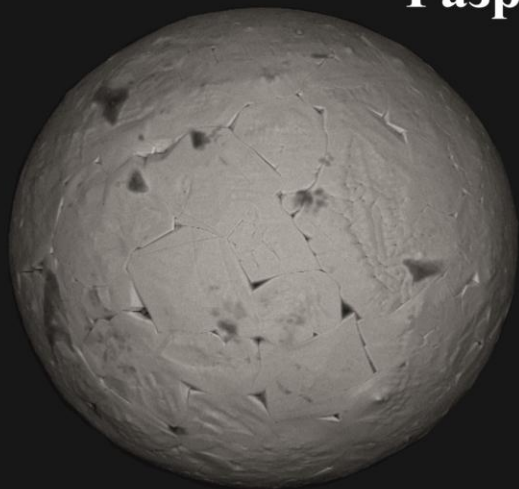


100  $\mu\text{m}$

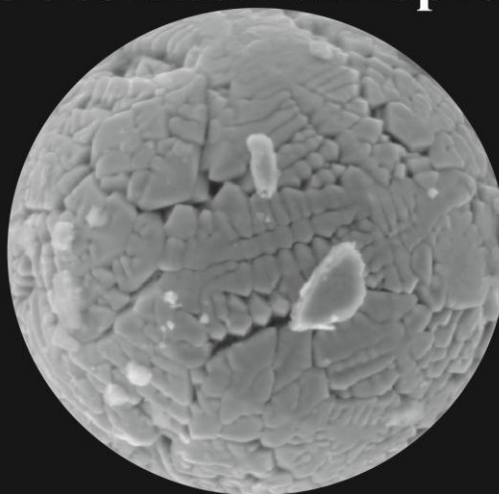


200  $\mu\text{m}$

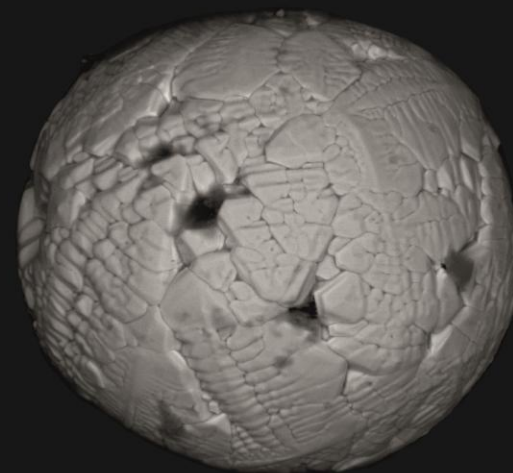
**Магнитные микросферы. Каменноугольные отложения (касимовский ярус)  
Разрез Усолка. Башкортостан**



100  $\mu\text{m}$

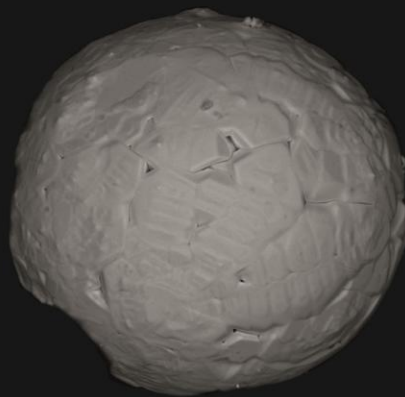


40  $\mu\text{m}$

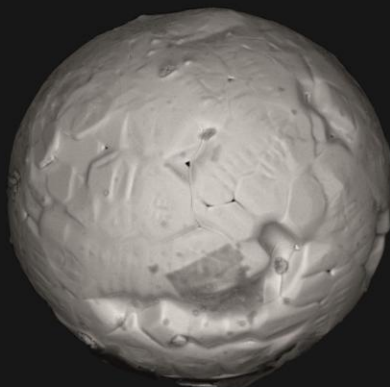


100  $\mu\text{m}$

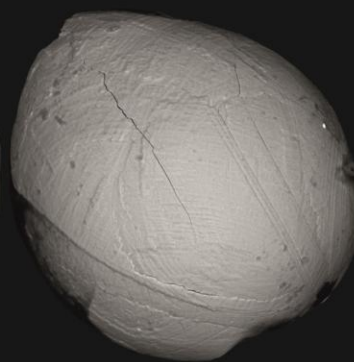
16 слой



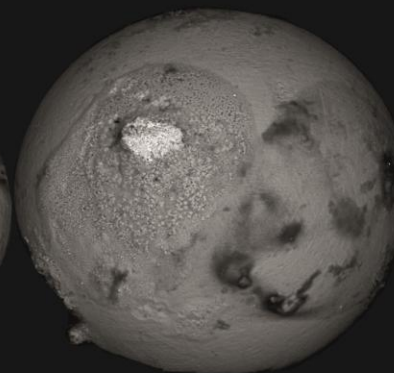
100  $\mu\text{m}$



100  $\mu\text{m}$



100  $\mu\text{m}$

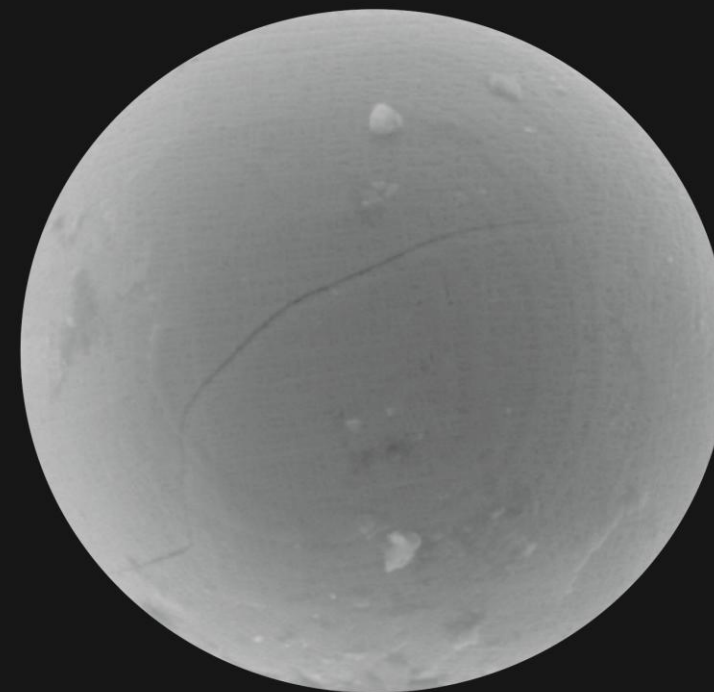
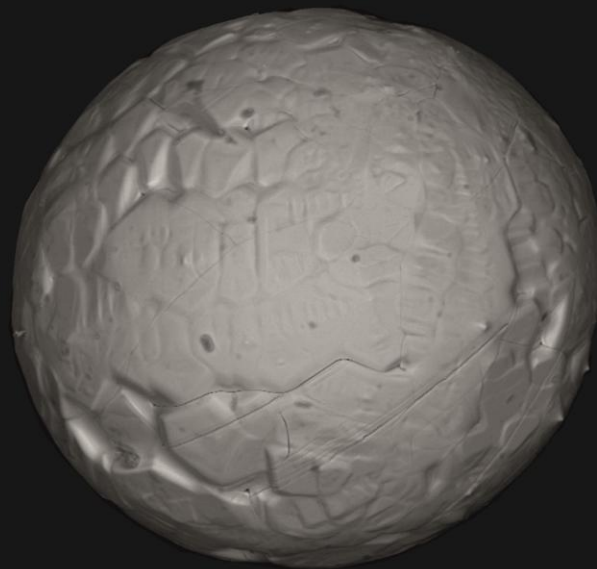
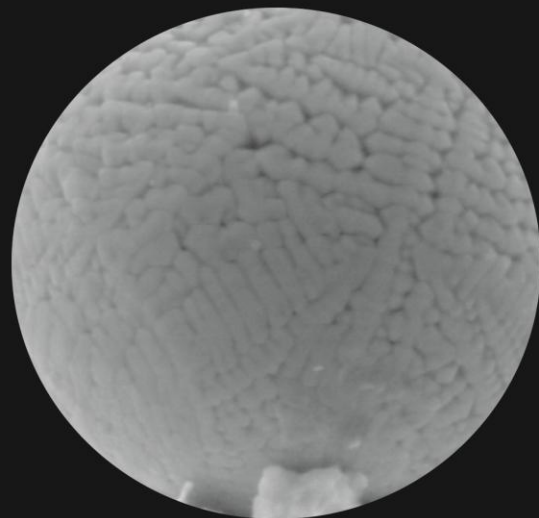


100  $\mu\text{m}$

13 слой

15 слой

**Магнитные микросферы. Каменноугольные отложения (касимовский ярус)  
Разрез Усолка. Башкортостан**

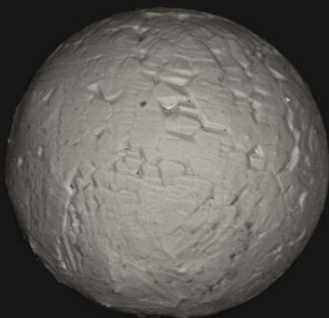


16 слой

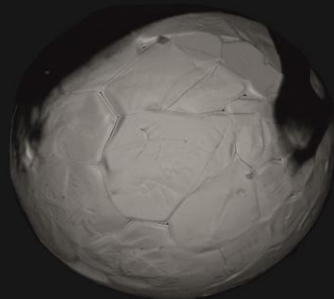
# Магнитные микросферы. Каменноугольные отложения (касимовский ярус) Разрез Усолка. Башкортостан

16 слой

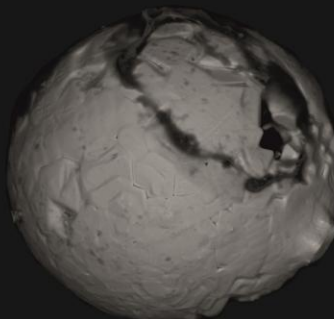
160



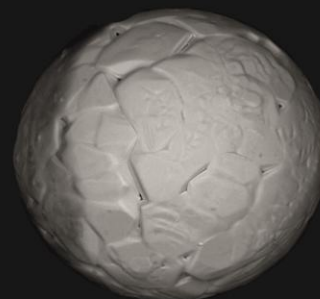
100  $\mu\text{m}$



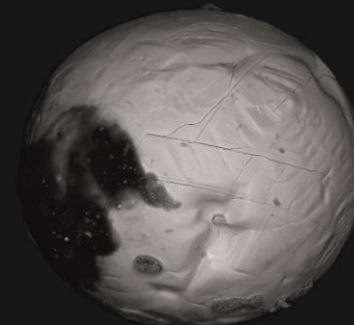
100  $\mu\text{m}$



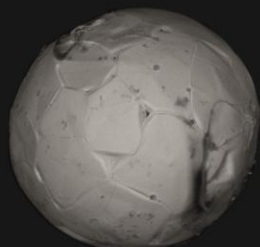
100  $\mu\text{m}$



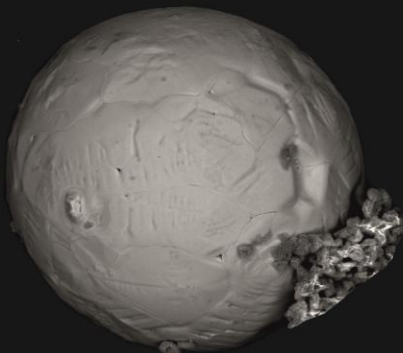
100  $\mu\text{m}$



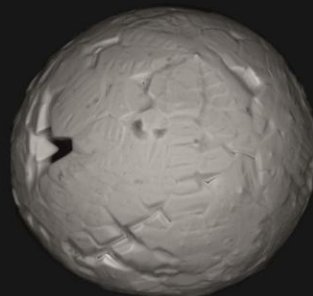
100  $\mu\text{m}$



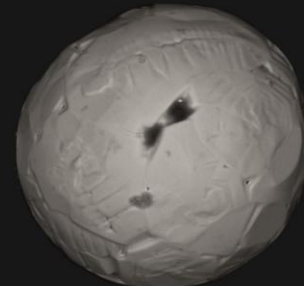
100  $\mu\text{m}$



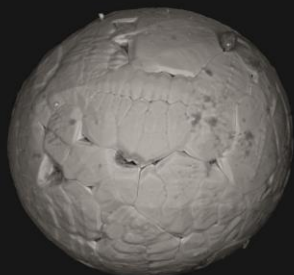
100  $\mu\text{m}$



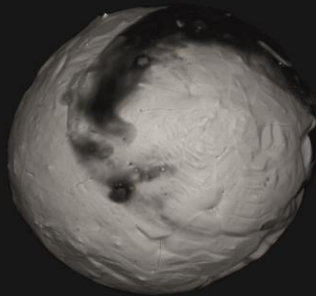
100  $\mu\text{m}$



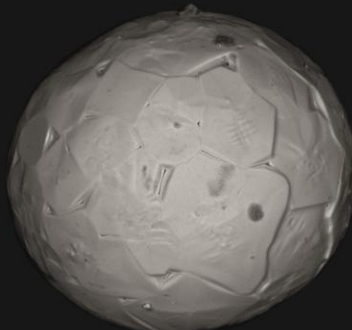
100  $\mu\text{m}$



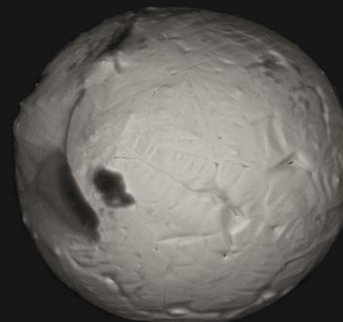
100  $\mu\text{m}$



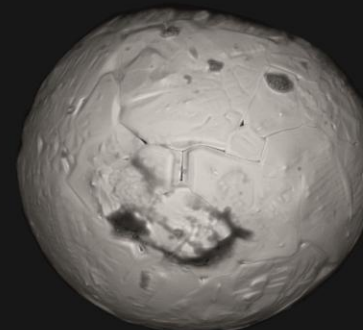
100  $\mu\text{m}$



100  $\mu\text{m}$



100  $\mu\text{m}$

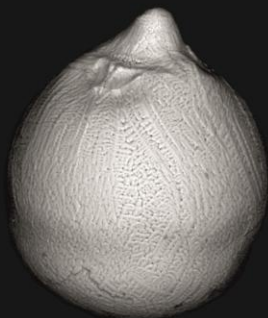


100  $\mu\text{m}$

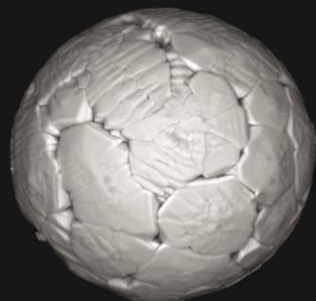


# Магнитные микросферы. Каменноугольные отложения Разрез Усолка. Башкортостан

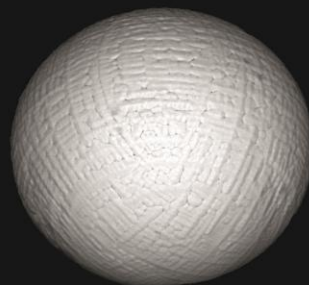
Гжельский ярус



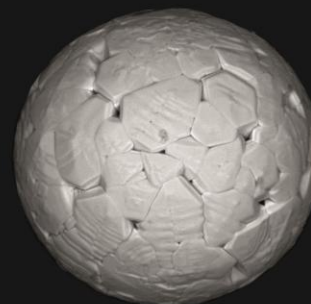
100  $\mu\text{m}$



100  $\mu\text{m}$



100  $\mu\text{m}$

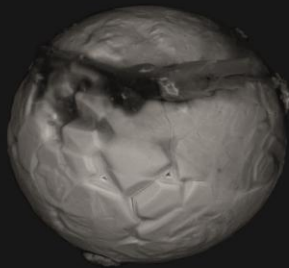


100  $\mu\text{m}$

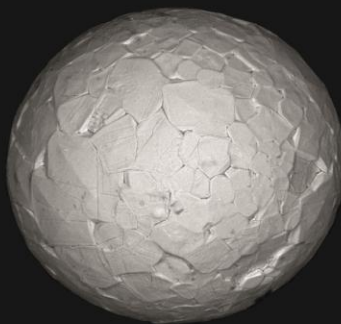
49 слой

51-52 слой

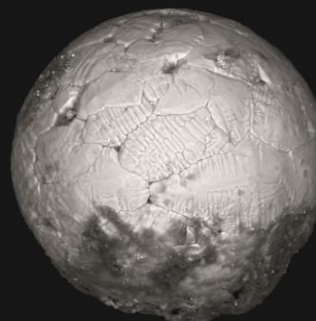
Касимовский ярус



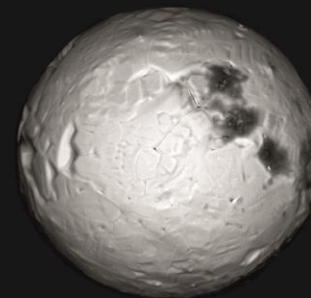
100  $\mu\text{m}$



100  $\mu\text{m}$



100  $\mu\text{m}$



100  $\mu\text{m}$

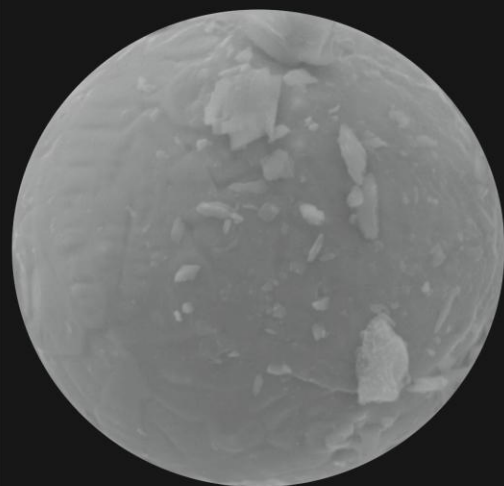
18 слой

33 слой

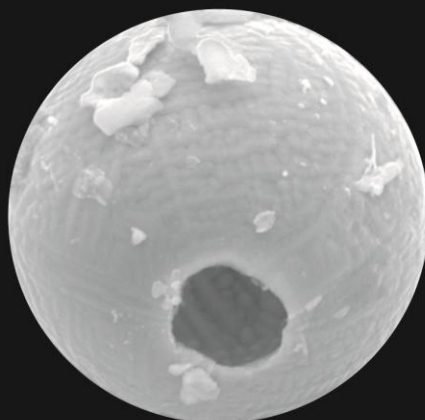
48 слой

**Магнитные микросферы. Пермские отложения (верхнеказанский подъярус)  
Камско-Устьинское месторождение.**

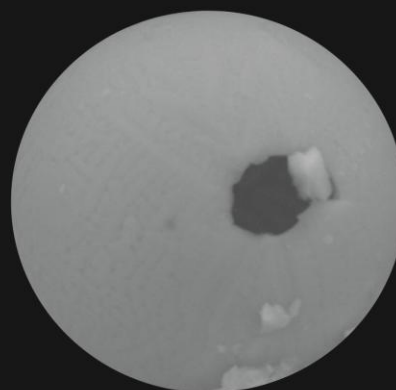
**Верхний пласт**



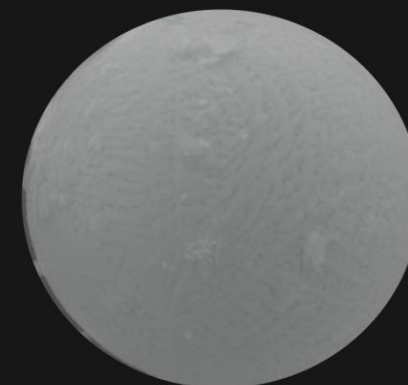
20 μm



20 μm

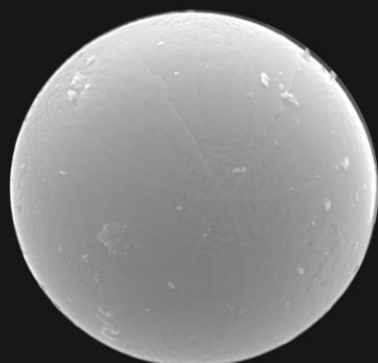


10 μm

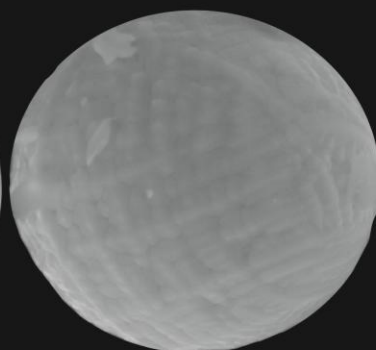


10 μm

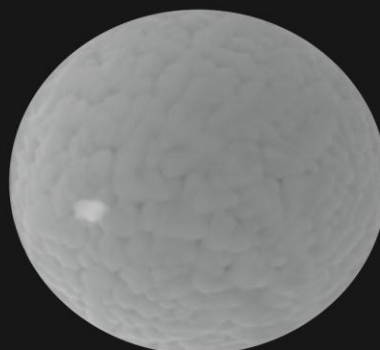
**Нижний пласт**



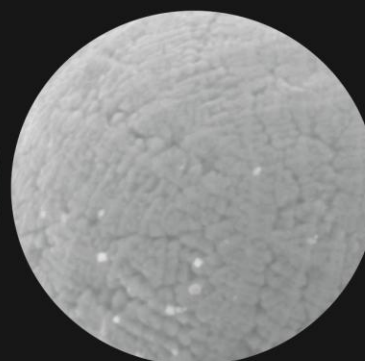
20 μm



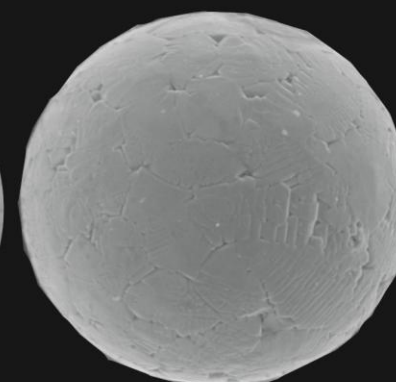
10 μm



10 μm



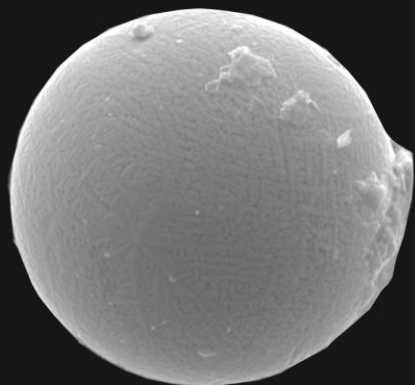
20 μm



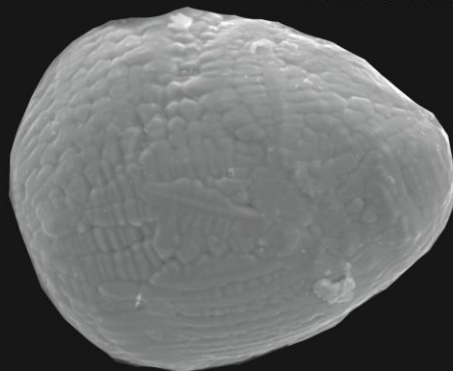
100 μm

**Магнитные микросферулы. Пермские отложения (верхнеказанский подъярус)  
Байматское месторождение.**

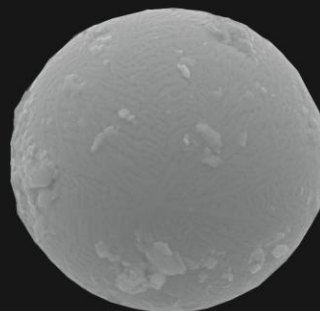
Нижний пласт



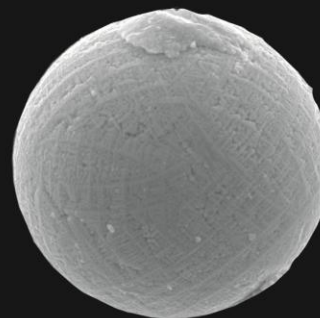
60  $\mu\text{m}$



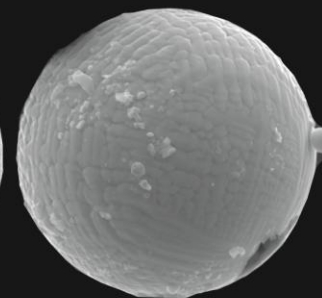
60  $\mu\text{m}$



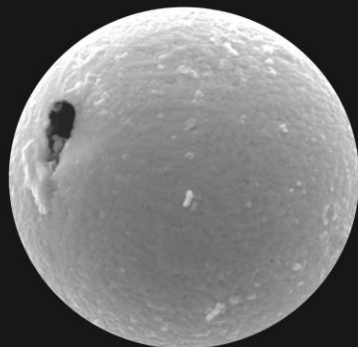
20  $\mu\text{m}$



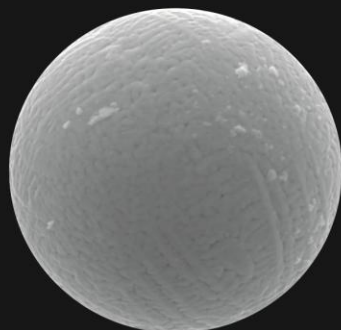
20  $\mu\text{m}$



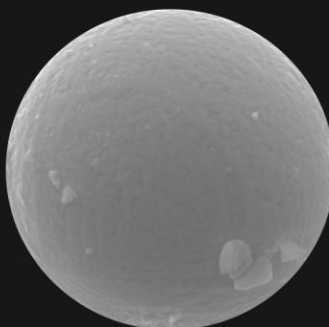
30  $\mu\text{m}$



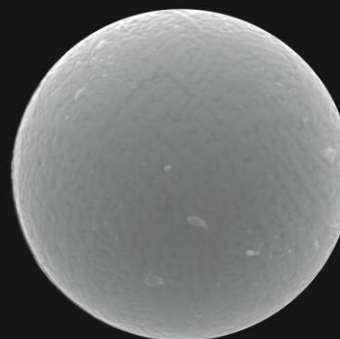
30  $\mu\text{m}$



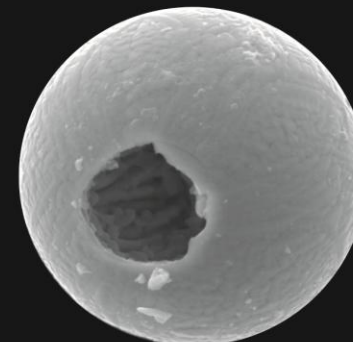
30  $\mu\text{m}$



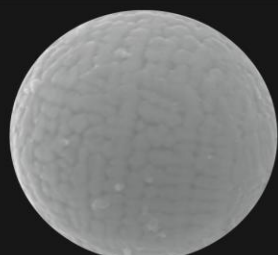
20  $\mu\text{m}$



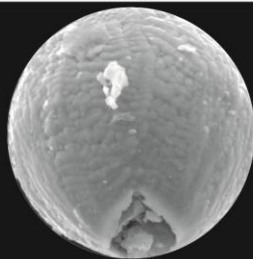
20  $\mu\text{m}$



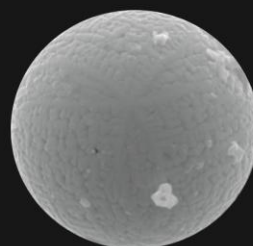
20  $\mu\text{m}$



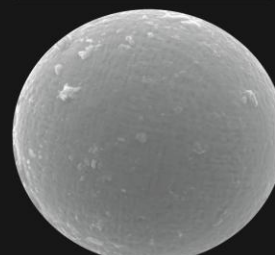
15  $\mu\text{m}$



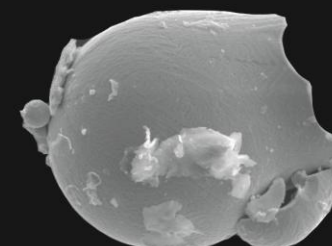
20  $\mu\text{m}$



15  $\mu\text{m}$



30  $\mu\text{m}$



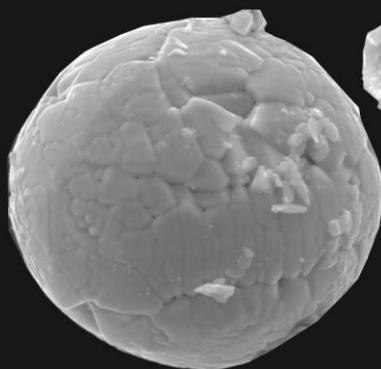
100  $\mu\text{m}$

**Магнитные микросферы. Пермские отложения (верхнеказанский подъярус)  
Байматское месторождение.**

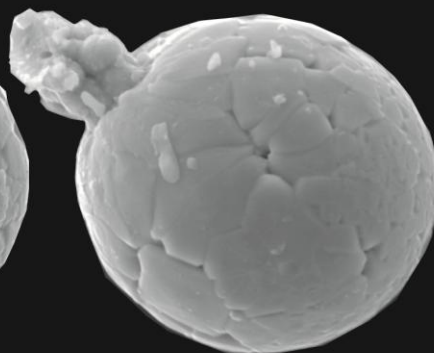
Нижний пласт



40  $\mu\text{m}$



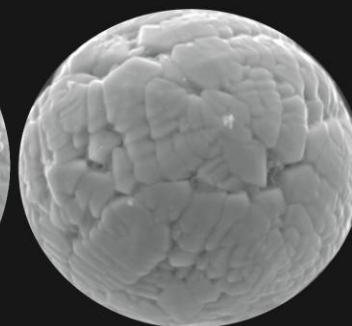
40  $\mu\text{m}$



40  $\mu\text{m}$



60  $\mu\text{m}$



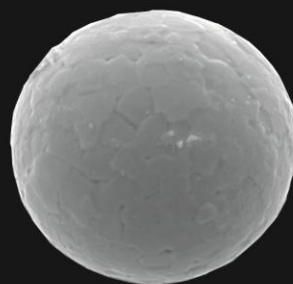
40  $\mu\text{m}$



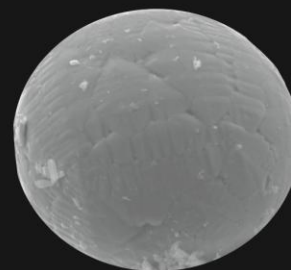
40  $\mu\text{m}$



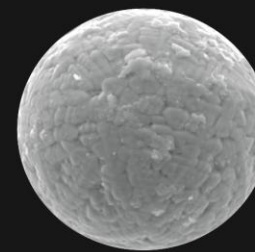
40  $\mu\text{m}$



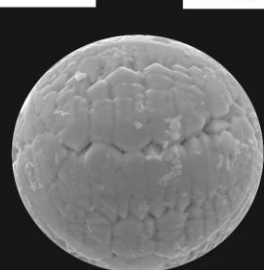
40  $\mu\text{m}$



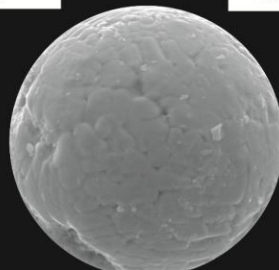
40  $\mu\text{m}$



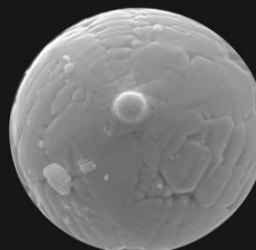
40  $\mu\text{m}$



30  $\mu\text{m}$



40  $\mu\text{m}$



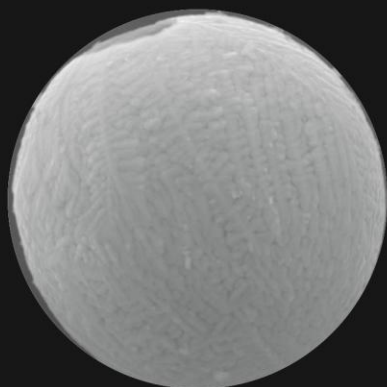
30  $\mu\text{m}$



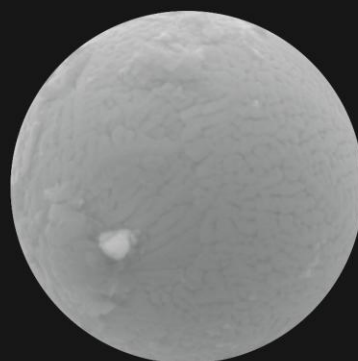
50  $\mu\text{m}$

**Магнитные микросферулы. Пермские отложения (верхнеказанский подъярус)  
Байматское месторождение.**

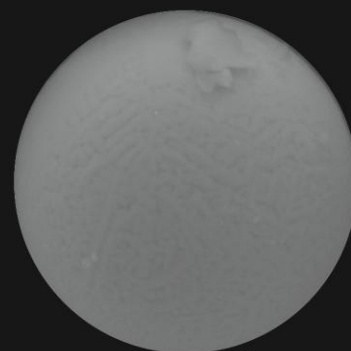
**Верхний пласт**



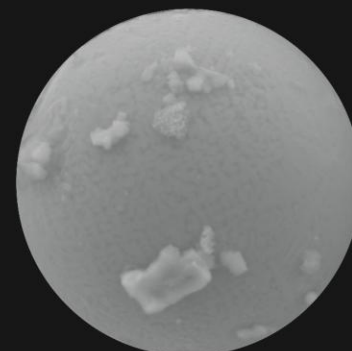
10  $\mu\text{m}$



10  $\mu\text{m}$



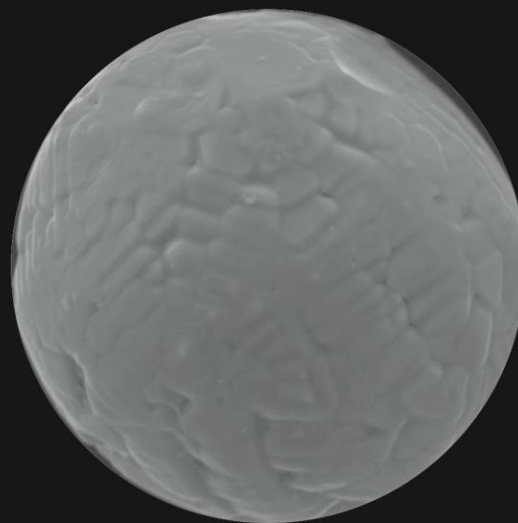
10  $\mu\text{m}$



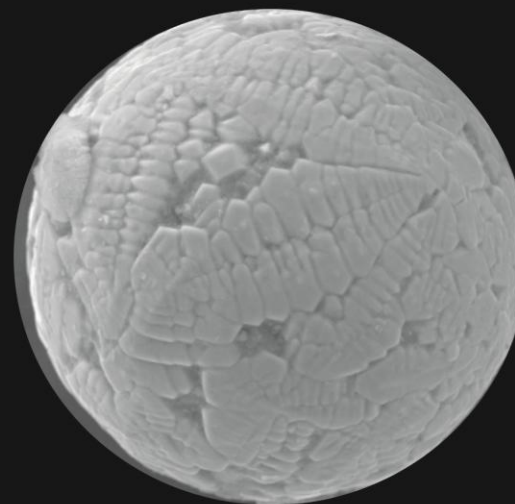
10  $\mu\text{m}$



10  $\mu\text{m}$

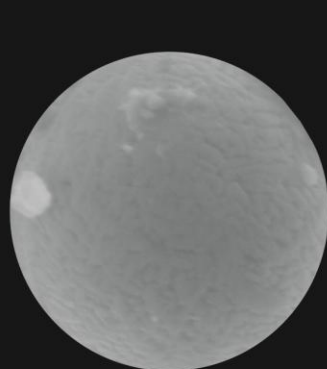


20  $\mu\text{m}$

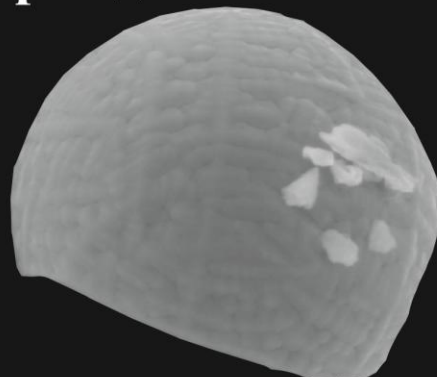


20  $\mu\text{m}$

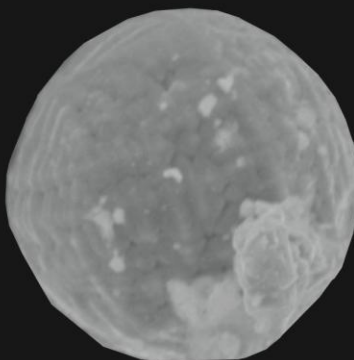
**Магнитные микросферулы. Пермские отложения (кунгурский ярус)  
Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей. Пермский край**



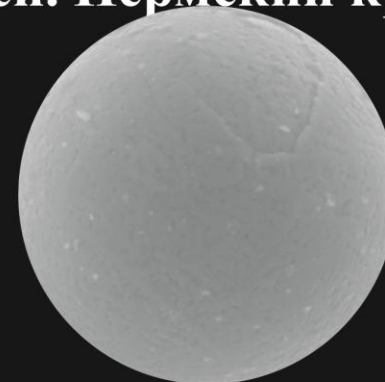
40  $\mu\text{m}$



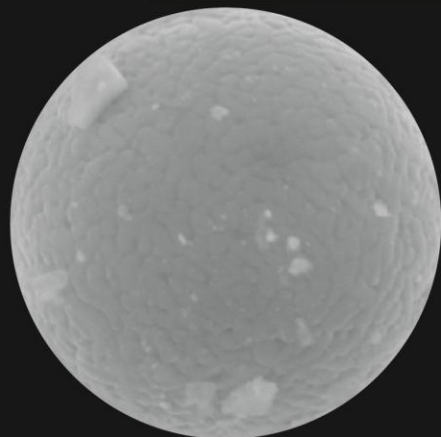
30  $\mu\text{m}$



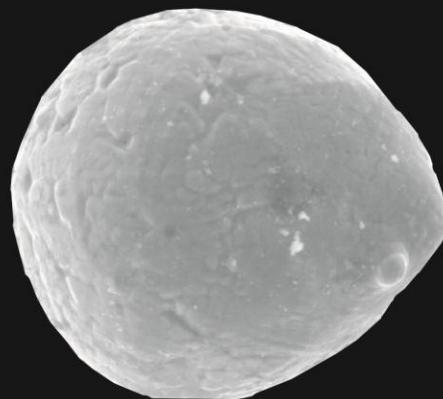
20  $\mu\text{m}$



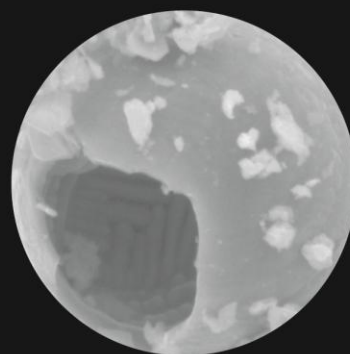
30  $\mu\text{m}$



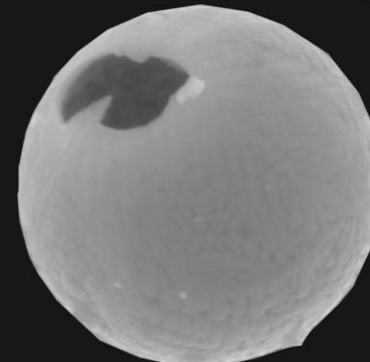
20  $\mu\text{m}$



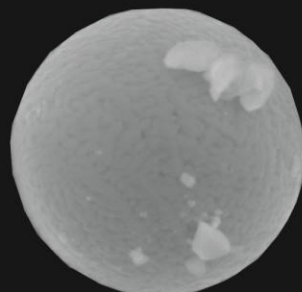
30  $\mu\text{m}$



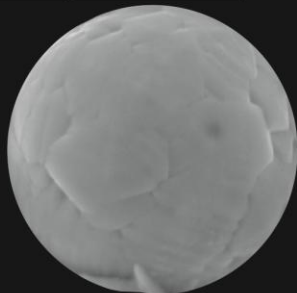
20  $\mu\text{m}$



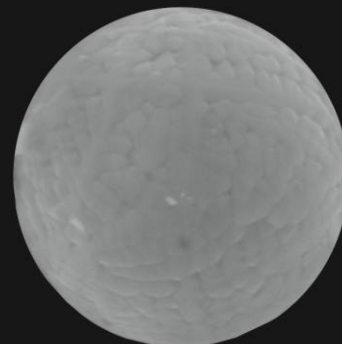
20  $\mu\text{m}$



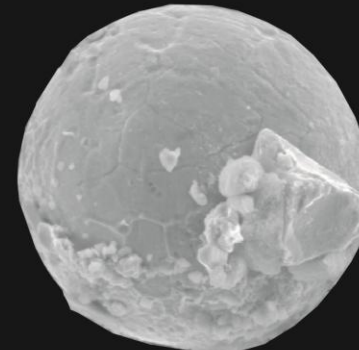
20  $\mu\text{m}$



20  $\mu\text{m}$

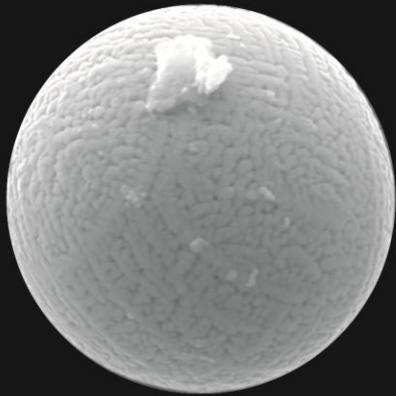


20  $\mu\text{m}$

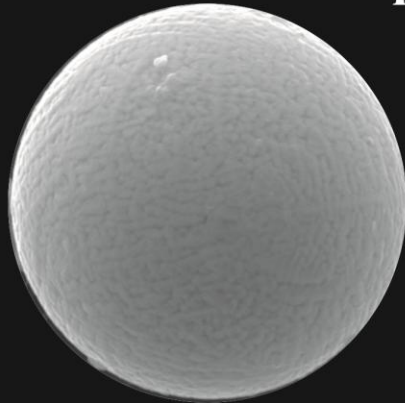


60  $\mu\text{m}$

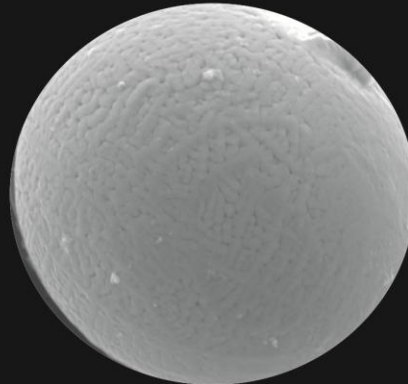
**Магнитные микросферы. Пермские отложения вятский ярус)  
Калининградско-Гданьское месторождение калийно-магниевых солей.  
Калининградская область**



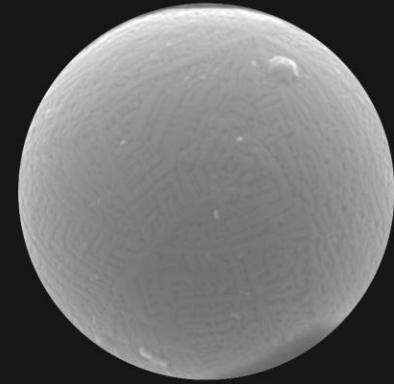
20  $\mu\text{m}$



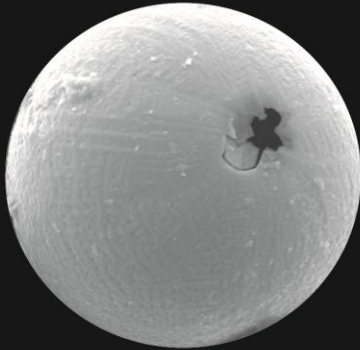
20  $\mu\text{m}$



20  $\mu\text{m}$



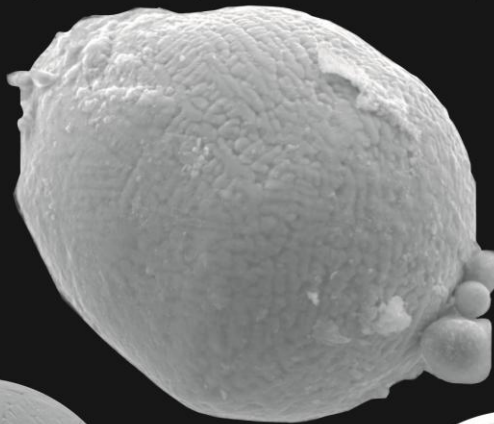
25  $\mu\text{m}$



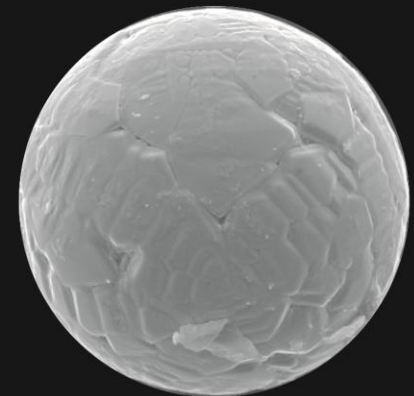
20  $\mu\text{m}$



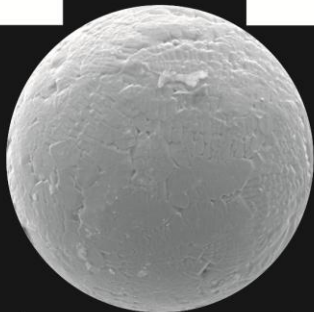
20  $\mu\text{m}$



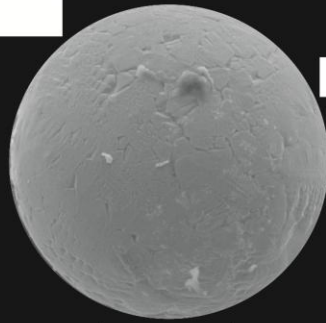
20  $\mu\text{m}$



50  $\mu\text{m}$



100  $\mu\text{m}$



100  $\mu\text{m}$

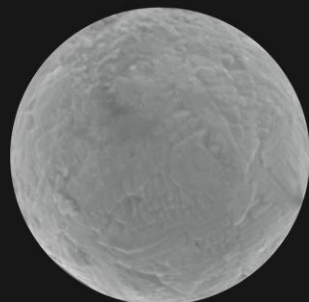


100  $\mu\text{m}$

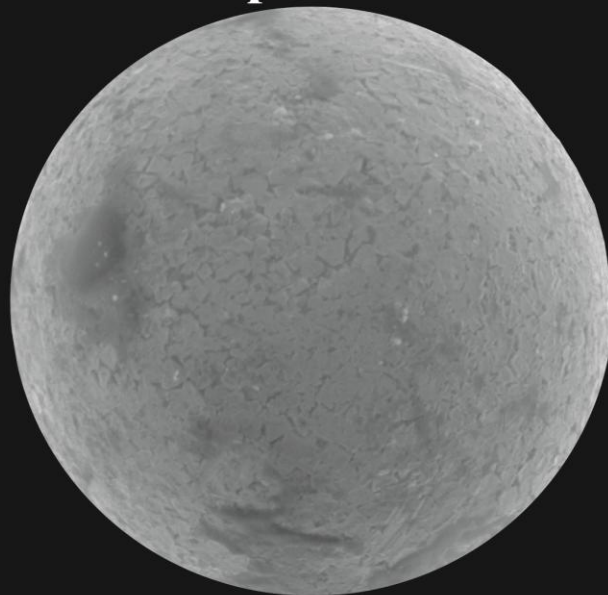
**Магнитные микросферулы.**

**Импактиты кратера Nördlinger Ries (14,5 млн. лет назад, неоген)**

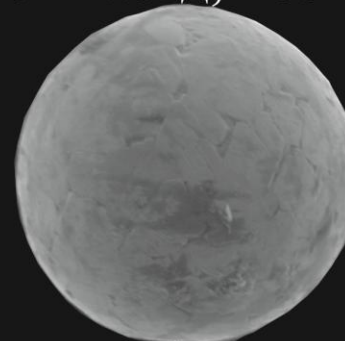
**Германия**



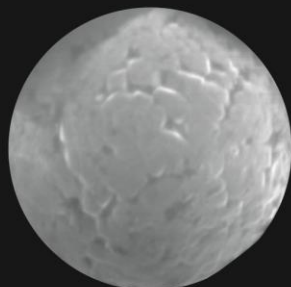
100  $\mu\text{m}$



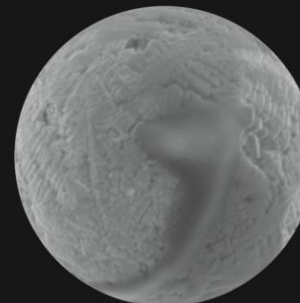
300  $\mu\text{m}$



150  $\mu\text{m}$



30  $\mu\text{m}$



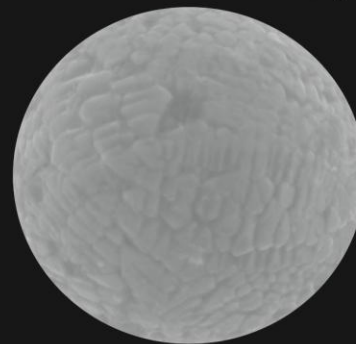
100  $\mu\text{m}$

**Магнитные микросферулы.**

**Импактиты кратера Попигай (35,7 млн. лет назад, эоцен-олигоцен)**



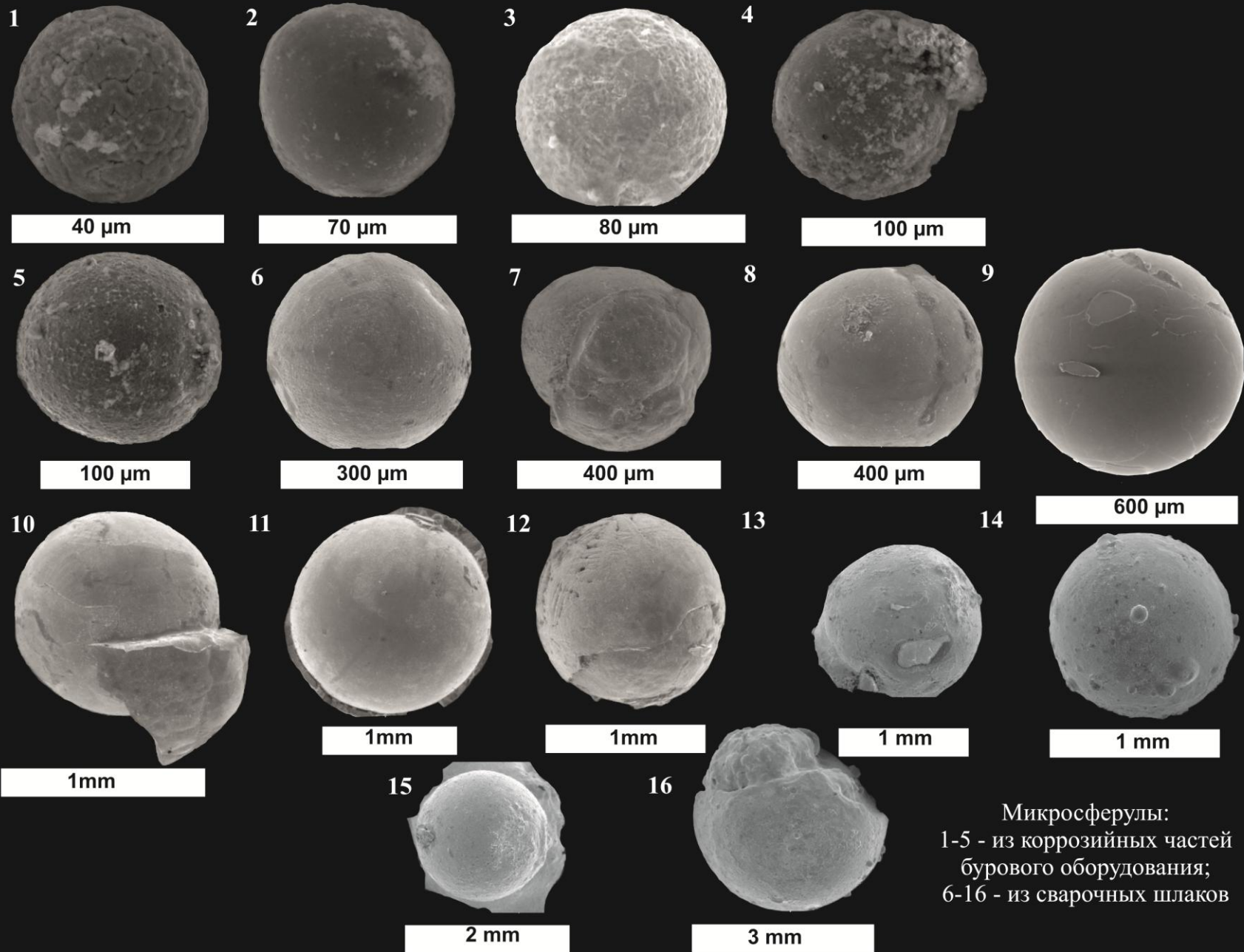
40  $\mu\text{m}$



60  $\mu\text{m}$

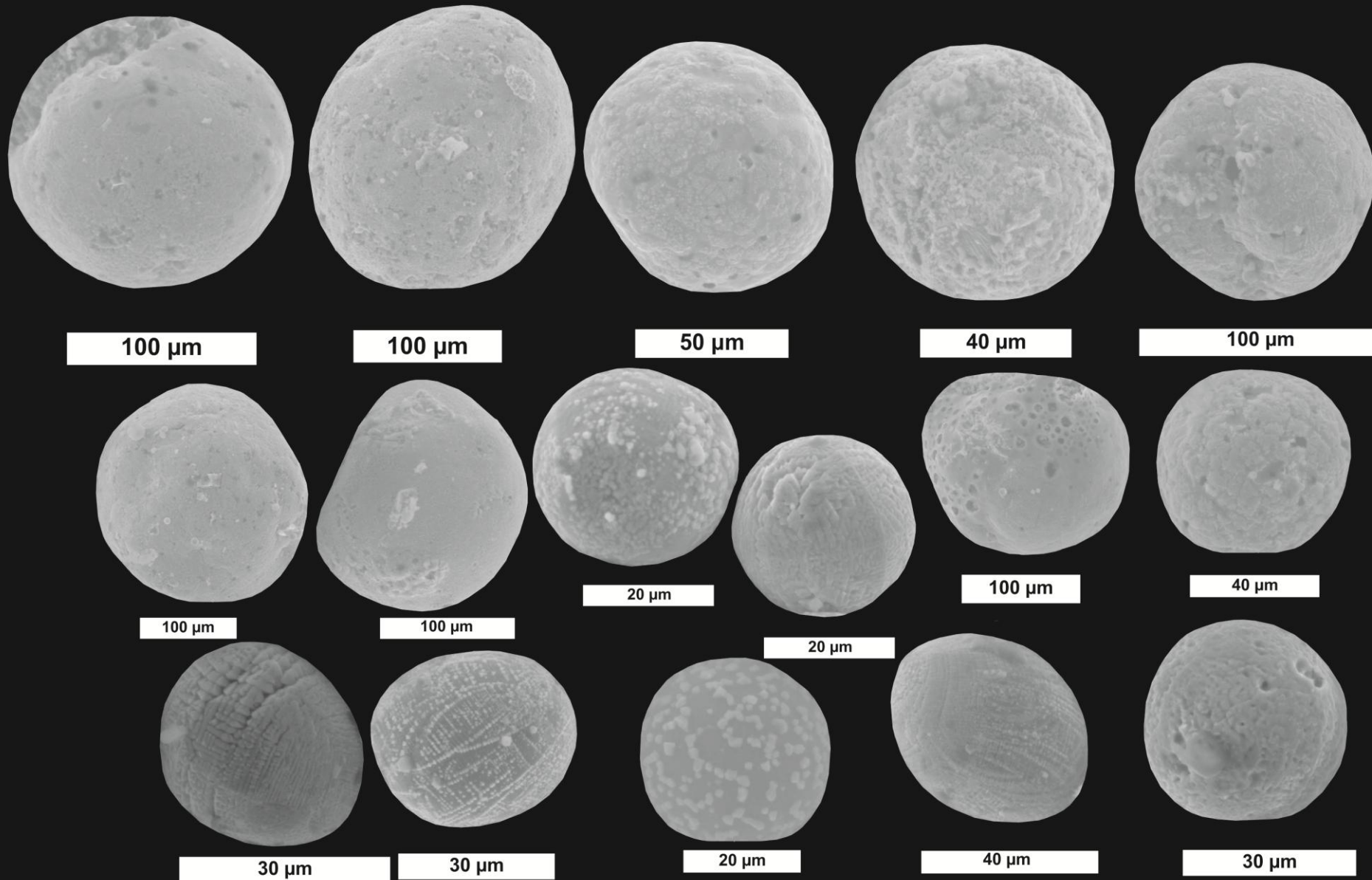


# Техногенные магнитные микросферы

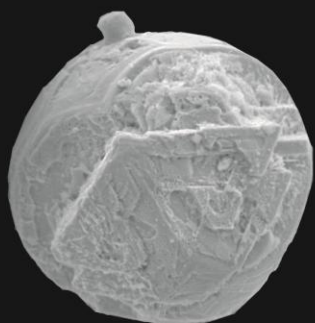


Микросферы:  
1-5 - из коррозионных частей  
бурового оборудования;  
6-16 - из сварочных шлаков

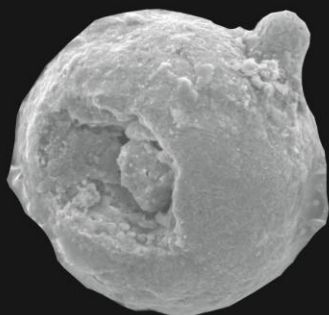
# Техногенные магнитные микросферы. Золы Нижне-Туринской ГРЭС. Свердловская область



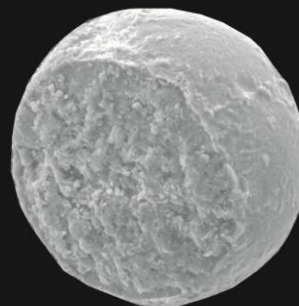
# Техногенные магнитные микросферы. Металлургические шлаки Среднеуральского медеплавильного завода



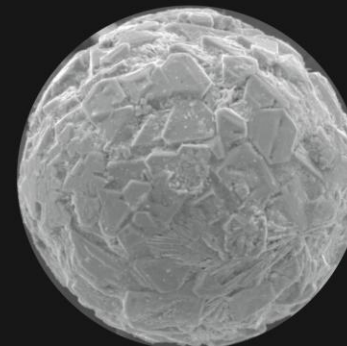
100  $\mu\text{m}$



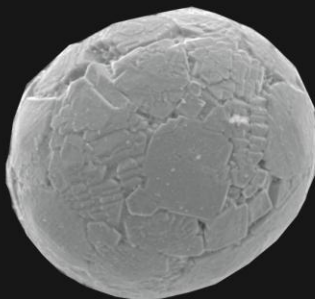
100  $\mu\text{m}$



100  $\mu\text{m}$



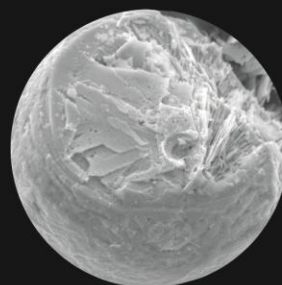
50  $\mu\text{m}$



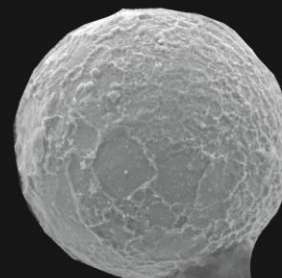
100  $\mu\text{m}$



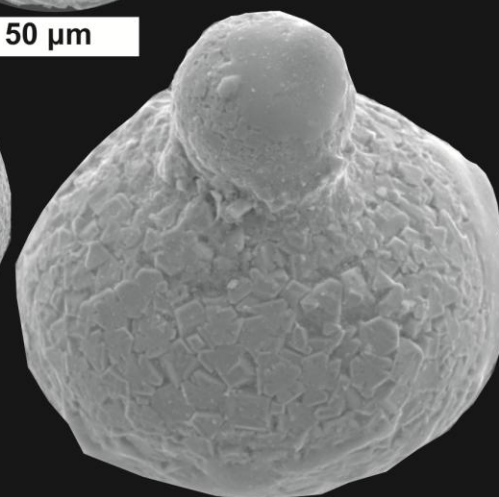
100  $\mu\text{m}$



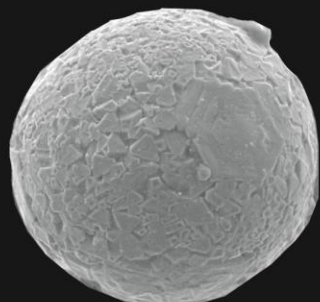
100  $\mu\text{m}$



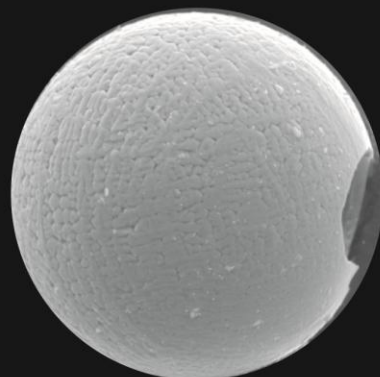
100  $\mu\text{m}$



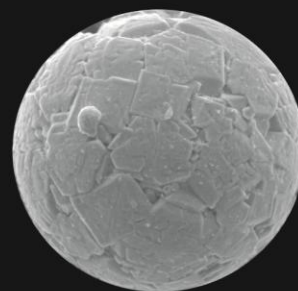
100  $\mu\text{m}$



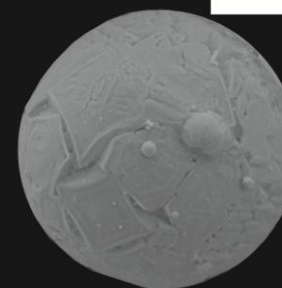
100  $\mu\text{m}$



20  $\mu\text{m}$

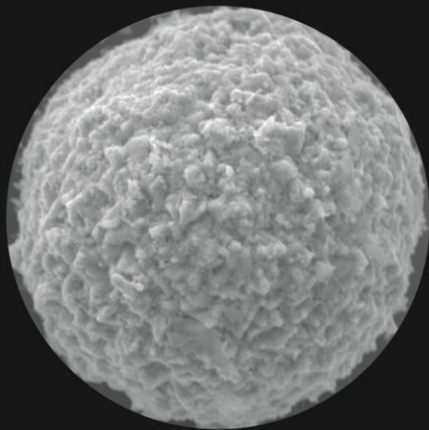


100  $\mu\text{m}$

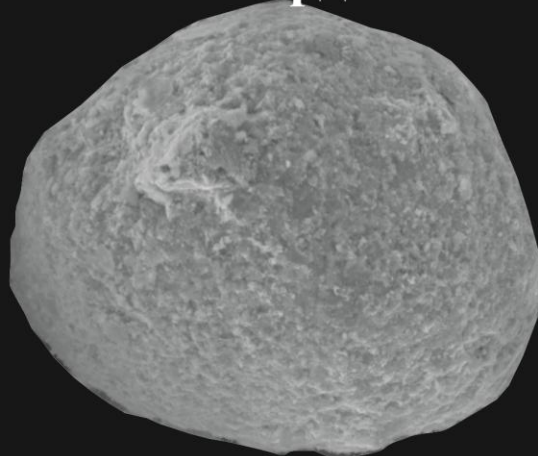


100  $\mu\text{m}$

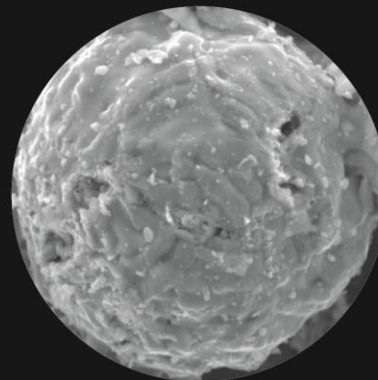
**Техногенные магнитные микросферы из «пиритных огарков».  
Металлургические шлаки Кировградского медеплавильного комбината  
Свердловская область**



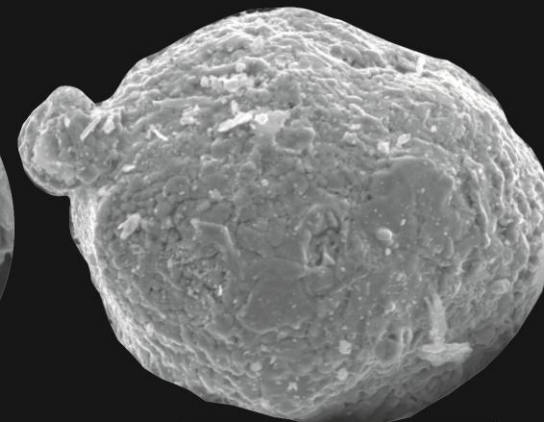
40  $\mu\text{m}$



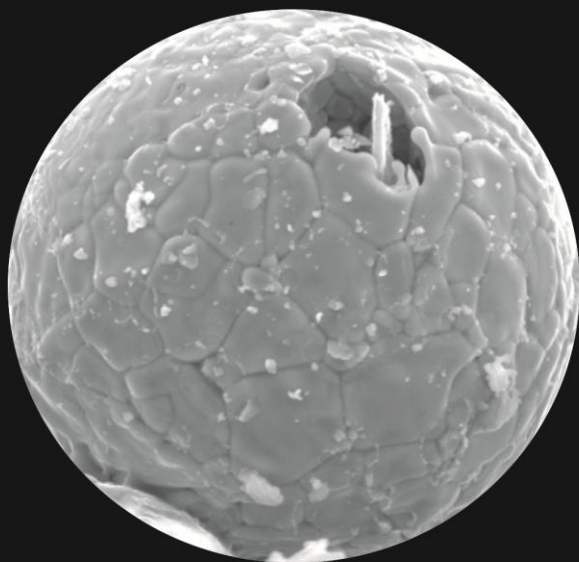
50  $\mu\text{m}$



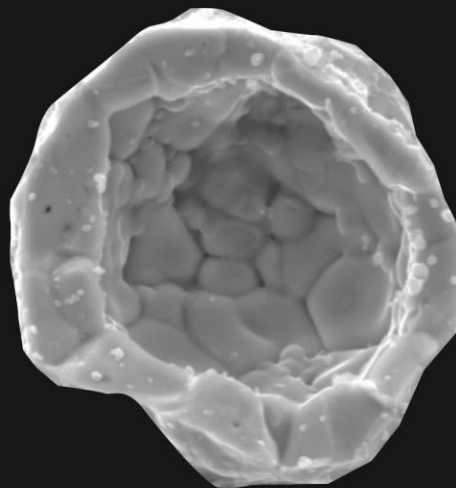
40  $\mu\text{m}$



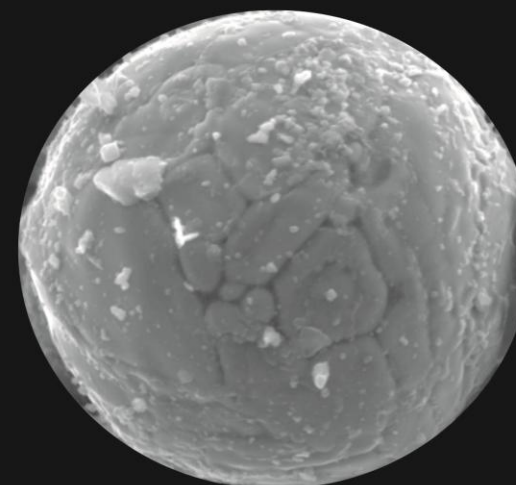
80  $\mu\text{m}$



40  $\mu\text{m}$



40  $\mu\text{m}$



40  $\mu\text{m}$

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

Химический состав магнитных микроферул

Состав поверхности ММ из калийно-магниевых солей Калининградско-Гданьского месторождения												
№ п/п	Оксиды, вес, %											Сумма
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	CuO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	ZnO	FeO	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	н.о.	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,6	100
2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	1,8	н.о.	96,6	100
3	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,7	100
4	1,6	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,3	100
5	1,8	2,0	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	94,6	100
6	1,5	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	0,8	н.о.	1,0	1,6	н.о.	93,4	100
7	1,4	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,5	100
8	1,1	2,3	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,5	100
9	1,7	2,0	1,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,9	н.о.	92,9	100
10	н.о.	1,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	96,9	100
11	н.о.	1,8	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,2	100
12	н.о.	2,2	н.о.	н.о.	0,6	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,4	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
13	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
14	н.о.	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,4	100
15	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,7	100
16	н.о.	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,2	100
17	н.о.	1,8	н.о.	н.о.	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,9	100
18	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
19	1,1	н.о.	0,9	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	95,9	100
Состав внутренней части ММ из калийно-магниевых солей Калининградско-Гданьского месторождения												
18	н.о.	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,5	100
19	н.о.	4,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,7	100
20	н.о.	2,0	н.о.	н.о.	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,4	100
21	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,0	100
22	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,3	100
23	2,9	1,7	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	94,8	100
24	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	0,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,2	100
25	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,0	100
26	2,9	2,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	94,9	100
27	н.о.	5,6	н.о.	н.о.	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	93,7	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
28	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,0	100
29	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,1	100
30	н.о.	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,7	100
31	1,6	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,4	100
32	1,6	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,2	100
33	1,8	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,1	100
Состав поверхности ММ из калийно-магниевых солей Верхнекамского месторождения												
34	1,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,5	100
35	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,0	100
36	0,8	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,8	100
37	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,2	100
38	0,7	2,2	н.о.	н.о.	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,1	100
39	0,5	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,9	100
40	0,4	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,3	100
41	1,2	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,5	100
42	2,9	1,7	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	94,8	100
43	0,4	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,0	100
44	3,5	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,2	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
45	2,6	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,8	100
46	0,4	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,0	100
47	1,1	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,1	100
48	8,3	12,4	н.о.	0,2	0,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	78,6	100
49	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,6	100
50	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,1	100
51	0,5	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	0,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,9	100
52	0,8	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,0	100
53	1	1,1	н.о.	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,9	100
54	3,4	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,6	100
55	5,8	1,3	н.о.	0,5	3,2	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	87,8	100
56	6,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	93,2	100
57	11,0	15,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	73,6	100
58	2,8	1,3	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,5	100
59	5,1	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	94,2	100
60	4,3	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	94,3	100
61	1,4	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,5	100
62	3,3	4,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	92,4	100
63	1,1	2,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,8	100



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
64	1,6	3,1	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.11	н.о.	94,6	100
Состав поверхности ММ из эвапоритов Камско-Устьинского месторождения												
65	9,7	1,4	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	87,7	100
66	1,8	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,5	100
67	1,3	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,4	100
68	3,8	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,4	100
69	5,6	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	92,9	100
70	6,4	2,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	90,5	100
71	6,5	4,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	89,4	100
72	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,4	100
73	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,4	100
74	0,8	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,7	100
75	0,7	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,7	100
76	1,1	1,2	0,4	н.о.	1,8	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	94,5	100
77	1,4	2,1	н.о.	0,2	н.о.	н.о.	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	95,9	100
78	2,5	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,9	100
79	2,3	1,1	0,2	н.о.	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,6	100
80	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
81	1,0	1,2	н.о.	0,5	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	2,5	н.о.	94,0	100
82	н.о.	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,8	н.о.	н.о.	н.о.	96,8	100
83	н.о.	2,2	н.о.	1,3	н.о.	1,6	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	93,3	100
84	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	1,0	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	96,4	100
85	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	96,5	100
86	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,9	н.о.	н.о.	н.о.	97,3	100
87	0,9	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,8	100
Состав внутренней части ММ из эвапоритов Камско-Устьинского месторождения												
88	2,3	2,2	н.о.	н.о.	н.о.	0,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,0	100
89	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,2	100
90	2,6	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,0	100
Состав поверхности ММ из эвапоритов Байматского месторождения												
91	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	1,7	н.о.	96,5	100
92	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,6	н.о.	97,3	100
93	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,3	н.о.	97,7	100
94	н.о.	2,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,2	н.о.	95,7	100
95	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	97,8	100
96	н.о.	2,7	н.о.	н.о.	н.о.	2,9	н.о.	н.о.	1,8	н.о.	92,6	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
97	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	1,7	н.о.	95,9	100
98	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,7	100
99	н.о.	1,1	н.о.	0,4	н.о.	0,8	н.о.	1,4	н.о.	н.о.	96,4	100
100	н.о.	1,5	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	96,8	100
101	н.о.	1,9	н.о.	н.о.	н.о.	2,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,3	100
102	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	1,3	н.о.	96,6	100
103	н.о.	1.0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,2	н.о.	97,8	100
104	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	1,3	н.о.	97,8	100
105	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,1	н.о.	97,9	100
106	1,1	4,5	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	1,8	н.о.	91,7	100
107	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	1,6	н.о.	96,4	100
108	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,7	н.о.	98,3	100
109	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
110	1,3	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,4	н.о.	96,0	100
111	н.о.	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	1,0	н.о.	96,9	100
112	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,7	н.о.	97,4	100
113	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	97,6	100
114	н.о.	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	2,0	н.о.	95,4	100
115	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	2,1	н.о.	97,0	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
116	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,0	н.о.	98,0	100
117	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,1	н.о.	97,1	100
118	н.о.	2,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,3	н.о.	95,6	100
119	н.о.	1,7	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	95,9	100
120	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	0,5	н.о.	н.о.	1,2	н.о.	97,4	100
121	н.о.	4,0	н.о.	н.о.	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	1,4	н.о.	93,5	100
122	1,9	2,9	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	92,8	100
123	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,1	н.о.	96,8	100
124	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	1,4	н.о.	96,3	100
125	2,1	3,6	н.о.	н.о.	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	1,2	н.о.	92,1	100
126	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	1,4	н.о.	96,8	100
127	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	1,6	н.о.	97,7	100
128	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,9	н.о.	98,1	100
129	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
130	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	1,8	н.о.	97,3	100
131	1,2	1,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,2	н.о.	95,1	100
132	0,7	2,3	н.о.	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	94,0	100
133	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	97,2	100
134	н.о.	4,1	н.о.	н.о.	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	93,4	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
135	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	96,9	100
136	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,1	н.о.	97,8	100
137	н.о.	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	1,4	н.о.	96,1	100
138	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,3	н.о.	97,6	100
139	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	2,1	н.о.	96,6	100
140	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	2,1	н.о.	96,6	100
141	1,3	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,0	н.о.	95,7	100
142	н.о.	2,7	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	1,7	0,6	н.о.	93,9	100
143	1,2	1,7	н.о.	н.о.	1,4	1,8	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	92,5	100
144	1,3	2,1	н.о.	н.о.	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	1,7	н.о.	94,1	100
145	2,3	4,6	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,4	н.о.	90,5	100
146	1,2	2,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	95,2	100
147	1,8	3,5	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	1,8	н.о.	91,9	100
148	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	1,4	н.о.	н.о.	1,9	н.о.	95,5	100
149	н.о.	2,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,0	н.о.	95,4	100
150	н.о.	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	2,1	н.о.	95,7	100
151	1,4	3,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	94,0	100
152	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,3	н.о.	97,7	100
153	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	1,8	н.о.	96,2	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
154	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	97,5	100
155	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,1	н.о.	96,7	100
156	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	2,1	н.о.	96,0	100
157	н.о.	2,6	н.о.	н.о.	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	1,7	н.о.	94,4	100
158	н.о.	2,2	н.о.	н.о.	н.о.	2,0	н.о.	н.о.	2,1	н.о.	93,7	100
159	н.о.	1,7	н.о.	н.о.	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	95,6	100
160	н.о.	2,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,0	н.о.	94,3	100
161	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,2	н.о.	96,5	100
162	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,1	н.о.	98,0	100
163	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	96,7	100
164	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	98,5	100
165	н.о.	1,7	н.о.	0,8	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	2,0	н.о.	94,6	100
166	1,0	2,2	н.о.	н.о.	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	1,4	н.о.	95,0	100
167	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	97,5	100
168	н.о.	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	96,9	100
169	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,1	1,6	н.о.	97,3	100
170	1,2	2,3	н.о.	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	94,1	100
171	н.о.	1,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,2	н.о.	96,0	100
172	н.о.	н.о.	1,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,1	н.о.	96,1	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
173	0,7	4,2	0,9	0,6	н.о.	1,8	н.о.	н.о.	1,1	н.о.	90,7	100
174	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	2,0	н.о.	97,2	100
175	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,6	н.о.	97,2	100
176	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,9	н.о.	97,3	100
177	н.о.	1,5	н.о.	2,7	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	2,3	н.о.	92,7	100
178	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,2	н.о.	97,8	100
179	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	2,2	н.о.	96,5	100
180	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,9	н.о.	98,1	100
181	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
182	0,3	0,4	н.о.	0,2	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,8	100
183	0,3	0,4	н.о.	0,2	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,8	100
184	0,3	1,1	н.о.	0,3	н.о.	1,2	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	96,8	100
185	0,2	0,4	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,0	100
186	0,1	0,1	0,1	1,1	н.о.	0,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,4	100
187	0,2	0,4	н.о.	0,5	н.о.	0,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,4	100
188	0,2	0,8	н.о.	0,4	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,7	100
189	0,2	0,3	0,1	0,9	н.о.		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,4	100
190	0,6	5,1	0,2	1,2	н.о.	0,6	н.о.	0,2	н.о.	н.о.	92,2	100
191	0,3	0,6	0,2	0,9	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,6	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
192	0,3	1,0	0,6	1,5	0,3	1,7	н.о.	14,6	2,5	н.о.	77,5	100
193	0,9	2,3	0,3	н.о.	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,2	100
194	0,3	0,4	0,2	0,5	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,6	100
195	0,2	0,5	н.о.	0,2	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,4	100
196	0,2	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,4	100
197	0,2	0,8	н.о.	0,1	н.о.	0,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,3	100
198	0,2	0,3	н.о.	0,2	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,9	100
199	0,2	0,9	0,4	0,4	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,4	100
200	0,2	0,2	н.о.	0,3	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,0	100
201	0,1	0,3	0,2	1,4	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,0	100
202	0,2	1,0	н.о.	0,2	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,7	100
203	0,2	0,4	н.о.	0,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,4	100
204	0,4	2,5	н.о.	5,0	0,9	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	90,2	100
Состав внутренней части ММ из эвапоритов Байматского месторождения												
205	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,3	100
206	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,1	100



Состав поверхности ММ из осадочных пород Усть-Черемшанского прогиба

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
207	2,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,7	100
208	2,3	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,4	100
209	1,7	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,0	100
210	1,7	2,3	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,2	100
211	1,7	1,6	н.о.	н.о.	1,3	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	94,5	100
212	1,8	1,9	н.о.	0,3	1,2	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	93,4	100
213	2,2	2,8	1,0	н.о.	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	93,4	100
214	2,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,0	100
215	3,2	3,6	1,3	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	91,3	100
216	2,7	3,0	1,1	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	92,4	100
217	н.о.	0,9	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,8	100
218	1,1	6,5	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	90,9	100
219	н.о.	2,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,0	100
220	0,6	1,2	0,6	0,6	0,8	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,3	100
221	0,2	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	0,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,7	100
222	0,6	2,4	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,5	100
223	1,9	4,2	0,8	0,8	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	92,0	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
224	1,4	6,1	1,1	н.о.	0,3	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	90,8	100
225	0,7	1,7	0,6	0,2	н.о.	0,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,3	100
226	1,3	3,7	1,3	1,1	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	91,8	100
227	1,8	5,4	0,5	0,3	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	91,7	100
Состав внутренней части ММ из осадочных пород Усть-Черемшанского прогиба												
228	2,0	1,1	н.о.	0,3	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,3	100
229	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,0	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,0	100
230	1,4	10,3	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	87,2	100
231	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,9	100
232	1,4	3,4	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	94,5	100
233	н.о.		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
234	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,1	100
235	н.о.	1,6	н.о.	н.о.	1,6	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,0	100
236	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
237	0,9	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,1	100
Состав поверхности ММ из осадочных пород разреза Усолка												
238	4,5	1,0	н.о.	н.о.	2,6	н.о.	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	91,4	100
239	1,6	0,9	н.о.	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	95,8	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
240	3,2	н.о.	н.о.	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,8	100
241	3,4	н.о.	н.о.	0,6	4,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	91,4	100
242	3,3	4,7	1,3	1,1	0,9	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	87,9	100
243	0,2	0,5	н.о.	0,1	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,6	100
244	0,2	0,5	н.о.	0,1	0,1	0,5	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	98,3	100
245	0,3	0,9	н.о.	0,1	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,9	100
246	0,2	0,6	0,2	н.о.	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,7	100
247	1,2	3,9	0,3	н.о.	0,3	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	93,2	100
248	3,3	8,4	0,9	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	86,4	100
249	0,4	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,8	100
250	0,1	0,4	0,1	н.о.	н.о.	0,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,1	100
251	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,7	100
252	0,2	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	0,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,2	100
253	н.о.	0,2	н.о.	н.о.	н.о.	0,1	н.о.	н.о.	0,1	н.о.	99,6	100
254	0,2	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,5	100
255	0,5	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	0,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,0	100
256	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,7	100
257	0,4	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,7	100
258	0,2	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,2	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
259	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,7	100
260	0,2	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,2	98,8	100
261	0,2	0,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,6	100
262	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,1	99,9	100
263	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,7	100
264	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,7	100
265	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,7	100
266	н.о.	0,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,8	100
267	н.о.	0,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,8	100
268	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,1	0,1	99,8	100
269	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,7	100
270	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
271	0,7	1,8	0,4	1,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,1	н.о.	95,2	100
272	0,3	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,0	100
273	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
274	0,4	0,6	0,3	2,3	0,2	0,2	н.о.	н.о.	н.о.	1,1	95,0	100
275	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
276	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,7	100
277	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	0,1	н.о.	99,6	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Состав внутренней части ММ из осадочных пород разреза Усолка												
278	0,3	1,3	0,4	0,3	0,6	0,4	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	96,4	100
279	1,1	7,4	3,5	5,0	0,4	1,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	80,8	100
280	0,3	2,3	0,2	0,7	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,9	100
281	0,5	1,8	н.о.	0,4	н.о.	1,3	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	95,7	100
282	0,5	2,5	0,3	0,8	н.о.	1,2	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	94,4	100
Состав поверхности ММ из осадочных пород Прикаспийской синеклизы												
283	0,1	1,7	0,5	н.о.	н.о.	0,7	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	96,6	100
284	0,4	0,5	0,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,3	н.о.	97,8	100
285	0,6	3,0	0,6	н.о.	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,2	100
286	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	0,8	н.о.	97,7	100
287	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,0	100
288	1,1	2,8	4,5	н.о.	0,5	2,0	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	87,7	100
289	0,3	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,9	100
290	1,3	3,6	н.о.	н.о.	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	1,4	н.о.	92,4	100
291	2,6	6,5	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,3	1,1	н.о.	88,6	100
Состав внутренней части ММ из осадочных пород Прикаспийской синеклизы												
292	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	72,7	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
293	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,8	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	71,2	100
294	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	71,4	100
Состав поверхности ММ из современного торфа												
295	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	99,7	100
296	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,0	н.о.	н.о.	97,0	100
297	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,5	н.о.	н.о.	98,5	100
298	н.о.	2,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,5	н.о.	н.о.	97,3	100
299	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,6	н.о.	н.о.	96,1	100
300	0,6	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	98,1	100
301	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	99,4	100
302	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	98,6	100
303	0,7	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	97,6	100
304	0,9	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	96,5	100
305	н.о.	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	97,6	100
306	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	99,2	100
307	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,2	н.о.	н.о.	99,8	100
308	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	4,3	н.о.	2,0	н.о.	н.о.	97,0	100
309	0,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	98,4	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
310	0,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	98,4	100
311	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,5	н.о.	н.о.	98,6	100
312	1,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	0,5	н.о.	н.о.	97,5	100
313	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,8	н.о.	2,6	н.о.	н.о.	96,1	100
314	0,6	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	98,1	100
315	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	99,4	100
316	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	98,6	100
317	0,7	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	4,3	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	97,6	100
318	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,7	100
319	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
320	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	н.о.	98,5	100
321	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
322	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,1	100
323	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	5,2	94,1	100
324	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	9,3	89,8	100
325	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,1	100
326	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	98,9	100
327	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,5	н.о.	н.о.	95,2	100
328	н.о.	0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,7	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
329	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	98,0	100
330	н.о.	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,6	100
331	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
332	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
333	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	99,2	100
334	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	99,1	100
335	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	99,1	100
336	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
337	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,0	100
338	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,8	100
339	0,6	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,6	100
340	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
341	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,4	100
342	0,7	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,9	100
343	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,7	н.о.	н.о.	97,6	100
344	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
345	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
346	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
347	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	99,3	100



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
348	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	97,8	100
349	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	99,1	100
350	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,0	100
351	0,6	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,6	100
352	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
353	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	3,2	н.о.	н.о.	96,8	100
354	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
355	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,4	н.о.	н.о.	97,6	100
356	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	99,1	100
357	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,6	н.о.	н.о.	98,4	100
358	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,1	н.о.	н.о.	97,9	100
359	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	3,0	н.о.	н.о.	97,0	100
360	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,8	н.о.	н.о.	98,2	100
361	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100,0	100
362	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	2,4	н.о.	н.о.	97,6	100
363	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,6	н.о.	н.о.	98,4	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
364	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,8	н.о.	н.о.	98,2	100
Состав поверхности ММ из импактитов кратера Попигай												
365	3,0	3,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	93,9	100
366	3,3	1,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,0	100
Состав поверхности ММ из импактитов кратера Рис												
367	2,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,0	100
368	2,2	1,9	0,3	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,2	100
369	2,7	1,5	н.о.	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,2	100
370	1,0	0,5	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,6	100
371	1,5	3,3	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	94,1	100
372	1,5	2,9	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	94,7	100
373	1,0	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,5	100
374	1,2	1,4	н.о.	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,7	100
Состав внутренней части ММ из импактитов кратера Рис												
375	0,7	7,4	н.о.	1,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	90,2	100
376	6,2	0,9	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	91,8	100
377	2,0	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,0	100
378	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,2	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
379	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,3	100
380	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,3	100
381	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,2	100
Состав поверхности ММ из зол уноса Нижнетуринской ГРЭС												
382	10,2	36,9	1,2	1,4	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	1,4	н.о.	48,1	100
383	10,4	32,6	н.о.	1,5	н.о.	2,2	н.о.	н.о.	1,6	н.о.	51,8	100
384	6,8	37,8	1,7	0,7	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	51,7	100
385	8,0	36,6	1,7	0,7	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	51,7	100
386	11,8	30,2	1,6	0,7	0,6	1,2	н.о.	н.о.	1,7	н.о.	52,2	100
387	8,6	21,4	3,5	0,6	н.о.	1,5	н.о.	н.о.	1,6	н.о.	62,7	100
388	7,7	28,2	2,6	1,0	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	1,7	н.о.	58,0	100
389	6,9	16,6	2,8	0,6	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	70,4	100
390	3,2	2,9	3,8	0,9	н.о.	1,9	н.о.	н.о.	1,5	н.о.	85,7	100
391	12,1	20,5	2,7	0,9	н.о.	1,4	н.о.	н.о.	1,7	н.о.	60,7	100
392	11,2	17,2	2,7	1,6	н.о.	1,6	н.о.	н.о.	2,1	н.о.	63,5	100
393	4,9	1,9	1,8	н.о.	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	1,7	н.о.	88,4	100
394	6,6	29,6	1,5	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,2	н.о.	60,5	100
395	5,6	18,8	2,5	0,5	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	1,8	н.о.	69,6	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
396	3,9	6,0	2,1	3,6	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	83,6	100
397	5,8	20,8	0,9	0,8	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	70,7	100
398	7,2	19,0	1,1	1,4	0,4	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	70,2	100
399	3,5	12,9	н.о.	0,9	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	81,6	100
400	3,2	11,3	1,8	1,7	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	80,9	100
401	6,5	18,1	0,9	0,9	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	72,8	100
402	2,9	12,9	1,2	0,5	0,5	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	80,7	100
403	6,7	12,2	1,1	1,6	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	77,5	100
404	2,9	8,4	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	88,2	100
405	7,6	21,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	71,4	100
406	4,2	16,3	0,7	0,5	1,1	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	76,4	100
407	3,2	23,6	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	72,8	100
408	8,5	10,6	2,5	1,4	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	76,1	100
409	4,2	6,1	1,5	0,7	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	86,5	100
410	3,3	3,1	0,9	0,7	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	90,9	100
411	3,2	2,0	н.о.	н.о.	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	93,5	100
412	10,9	23,8	1,4	2,4	0,5	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	60,4	100
413	9,7	13,6	0,8	0,5	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	74,7	100
414	5,9	20,8	0,9	0,8	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	70,7	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
415	7,2	18,3	1,1	1,4	0,4	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	70,7	100
416	3,5	12,9	1,4	0,9	н.о.	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	80,2	100
417	3,2	11,3	1,7	1,7	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	80,9	100
418	6,5	17,5	0,9	0,9	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	73,3	100
419	2,9	12,9	1,2	0,5	0,5	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	80,7	100
420	6,7	11,6	1,1	1,6	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	78,2	100
421	2,9	8,4	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	88,3	100
422	7,6	20,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	71,9	100
423	4,2	16,3	0,7	0,5	1,1	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	76,4	100
424	3,2	23,6	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	72,8	100
425	8,5	10,6	2,5	1,4	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	76,1	100
426	4,2	6,1	1,5	0,7	н.о.	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	86,5	100
427	3,3	3,1	0,9	0,7	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	90,9	100
428	3,2	2,0	н.о.	н.о.	н.о.	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	93,5	100
429	9,9	23,4	1,4	2,4	0,5	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	61,9	100
430	9,6	13,1	0,8	0,5	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	75,2	100
431	8,6	3,1	н.о.	1,1	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	86,0	100

Состав поверхности ММ из металлургических шлаков Среднеуральского медеплавильного завода

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
432	1,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	39,8	н.о.	н.о.	н.о.	58,5	100
433	5,8	4,1	0,8	н.о.	0,8	н.о.	2,8	н.о.	н.о.	н.о.	85,6	100
434	2,8	2,5	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	5,1	87,9	100
435	4,3	4,9	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	8,3	81,1	100
436	3,8	22,2	1,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	7,6	64,4	100
437	1,0	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	4,6	н.о.	н.о.	н.о.	93,4	100
438	1,7	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	6,9	н.о.	н.о.	н.о.	90,2	100
439	2,7	н.о.	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	3,1	н.о.	н.о.	4,3	88,7	100
440	2,0	1,4	н.о.	3,9	н.о.	н.о.	29,0	н.о.	н.о.	н.о.	63,7	100
441	1,3	2,9	н.о.	1,5	н.о.	н.о.	42,6	н.о.	н.о.	н.о.	51,7	100
442	2,2	2,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	9,9	н.о.	н.о.	н.о.	85,1	100
443	1,8	1,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	6,5	н.о.	н.о.	5,8	84,3	100
444	5,7	34,6	2,6	1,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	3,0	52,6	100
445	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
446	10,1	25,7	1,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	4,4	57,9	100
447	3,8	4,4	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	14,7	н.о.	н.о.	4,6	71,7	100
448	2,8	16,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	7,0	74,1	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
449	3,0	4,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	7,5	85,5	100
450	3,1	17,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,4	4,3	73,5	100
451		2,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	8,4	89,1	100
452	1,0	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,3	100
453	3,9	18,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	3,6	н.о.	1,5	4,6	68,3	100
454	4,4	11,6	1,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	11,5	70,9	100
455	3,2	24,4	1,7	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	6,3	63,7	100
456	2,7	13,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	31,6	н.о.	н.о.	5,1	47,4	100
457	6,3	11,1	3,7	1,2	н.о.	н.о.	9,6	н.о.	н.о.	н.о.	68,0	100
458	3,8	18,2	2,1	4,1	н.о.	н.о.	3,8	н.о.	1	4,3	62,7	100
459	0,8	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,1	100
460	7	11,7	1,0	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	79,9	100
461	3,6	12,3		0,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,0	6,9	75,9	100
462	6,2	3,5	2,8		н.о.	н.о.	8,0	н.о.	1,6	7,9	70,0	100
463	2,0	3,2	0,7	3,0	н.о.	н.о.	10,7	н.о.	0,8	н.о.	79,6	100
464	6,9	9,7	2,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,7	1,8	78,2	100
465	3,7	15,7	1,4	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,3	6,7	70,6	100
466	4,7	10,5	1,8	2,4	н.о.	н.о.	1,0	н.о.	0,9	4,7	74,0	100
467	1,3	1,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,0	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
468	10,3	17,0	2,9	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,1	н.о.	67,8	100
Состав внутренней части ММ из металлургических шлаков Среднеуральского медеплавильного завода												
469	н.о.	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,6	100
470	н.о.	1,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,3	100
471	0,8	1,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,4	100
472	1,2	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,8	100
473	0,5	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,4	100
474	н.о.	11,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	88,2	100
475	8,4	31,9	1,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	56,8	100
476	5,0	32,0	5,3	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	56,8	100
Состав поверхности ММ из металлургических шлаков Кировградского медеплавильного комбината												
477	2,0	9,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	88,9	100
478	1,4	1,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	97,3	100
479	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,6	100
480	1,0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	99,0	100
Состав внутренней части ММ из металлургических шлаков Кировградского медеплавильного комбината												
481	н.о.	100	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100
482	2,6	4,1	н.о.	1,5	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	91,8	100



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
483	4,8	12,3	н.о.	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	81,5	100
484	15,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	84,4	100
485	2,0	1,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,4	100
486	2,9	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,7	100
487	2,3	5,4	0,6	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	91,3	100
488	н.о.	10,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	89,8	100
489	31,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	68,1	100
490	2,1	н.о.	0,8	0,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,4	100
Состав поверхности ММ из сварочных шлаков												
491	1,9	4,3	1,4	1,9	н.о.	0,9	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	88,7	100
492	1,2	6,6	1,1	0,6	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	90,5	100
493	0,7	5,1	0,9	1,0	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	91,4	100
494	0,8	1,9	0,7	1,1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	95,5	100
495	1,3	2,7	0,8	2,2	н.о.	1,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	91,6	100
496	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
497	3,0	2,4	н.о.	1,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	92,8	100
498	1,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,8	100
499	н.о.	1,1	н.о.	0,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,1	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
500	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
501	3,6	1,3	н.о.	0,8	3,8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	90,5	100
502	н.о.	8,4	н.о.	н.о.	н.о.	7,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	83,9	100
503	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
504	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
505	1,2	7,8	н.о.	н.о.	1,9	7,3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	81,8	100
506	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
507	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1,7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	98,3	100
508	н.о.	0,9	н.о.	н.о.	1,5	0,9	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	96,7	100
509	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
Состав внутренней части ММ из сварочных шлаков												
510	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
511	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
512	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100
513	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	100

Примечание: н.о. – не обнаружено; все железо пересчитано на FeO.