



Микрофрагменты метеорита Саратов в магнитной фракции современных почв: поиск и идентификация

А.В.Иванов^{1,2,3}, Р.Р.Габдуллин^{1,4}, С.И.Меренкова^{5,6}✉, А.А.Самсонов¹, А.В.Чистякова⁶, Д.Ф.Аяцков⁷,
М.А.Винник¹, Е.Ю.Погожев¹, А.Е.Тельнов¹, Ю.А.Чуриков¹, Н.Н.Анисимов¹, Н.В.Бадулина¹

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

² Институт географии РАН, Москва, Россия

³ Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

⁴ Институт геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН, Москва, Россия

⁵ Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва, Россия

⁶ Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия

⁷ Центр развития Саратовской агломерации и промышленных парков, Саратов, Россия

Как цитировать эту статью: Иванов А.В., Габдуллин Р.Р., Меренкова С.И., Самсонов А.А., Чистякова А.В., Аяцков Д.Ф., Винник М.А., Погожев Е.Ю., Тельнов А.Е., Чуриков Ю.А., Анисимов Н.Н., Бадулина Н.В. Микрофрагменты метеорита Саратов в магнитной фракции современных почв: поиск и идентификация // Записки Горного института. 2026. Т. 280. С. 131-144. [EDN VJCGAG](#)

Аннотация

Статья посвящена проблеме идентификации микроскопических следов метеоритного вещества в почвах спустя более чем 100 лет после падения. В качестве объекта исследований выбран район Саратовского метеоритного дождя 6 октября 1918 г. В 2024 г. вдоль исторической траектории полета отобраны почвенные пробы, из которых методом шлихового опробования выделена магнитная фракция. Комплекс методов (оптическая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионным анализом, рамановская спектроскопия) позволил изучить морфологию и состав выделенных частиц. Показано, что основная масса магнитных сферул, вероятно, имеет техногенное происхождение. Однако в пробах обнаружены микрофрагменты пород, содержащие фаялит и оливин с примесями Ni и Cr, а также плагиоклаз с пониженной степенью кристалличности. Их состав и морфология сопоставимы с литературными данными по метеориту Саратов. Полученные результаты доказывают принципиальную возможность обнаружения микрофрагментов метеоритного вещества в современных почвах и демонстрируют эффективность комплексного минералого-геохимического подхода для реконструкции ареалов метеоритных дождей.

Ключевые слова

метеорит Саратов; сферулы; магнитная сепарация; микрозондовый анализ; рамановская спектроскопия

Финансирование

Экспедиционные работы с опробованием выполнены при финансовой поддержке государственных заданий Музея землеведения МГУ АААА-А16-116042010089-2 и АААА-А16-116042710030-7 в рамках темы Государственного задания ИГ РАН FMWS-2026-0005. Материал для исследования получен в ходе научно-просветительской экспедиции «Флотилия плавучих университетов». Исследования SEM-EDX и рамановская спектроскопия проведены в ЦКП ИФЗ РАН при поддержке Государственного задания ИФЗ РАН. Частичное финансирование за счет средств Государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0020). Пробоподготовка и интерпретация аналитических данных выполнены при финансовой поддержке Государственного задания ГЕОХИ РАН и в рамках темы Государственного задания МГУ имени М.В.Ломоносова № АААА-А16-116033010119-4.

Поступила: 20.01.2026

Принята: 28.04.2026

Онлайн: 01.09.2026

Опубликована: 10.09.2026

Введение

Изучение космического вещества в почвах и горных породах уже давно является активно развивающимся направлением. Однако трансформация и сохранность микрофрагментов метеоритов в течение длительных временных интервалов, возможность идентификации в отложениях и почвах по оси пролета метеорита, отделение космогенного микроматериала от техногенных «двойников» (особенно в современных почвах) по-прежнему представляются актуальными и перспективными.

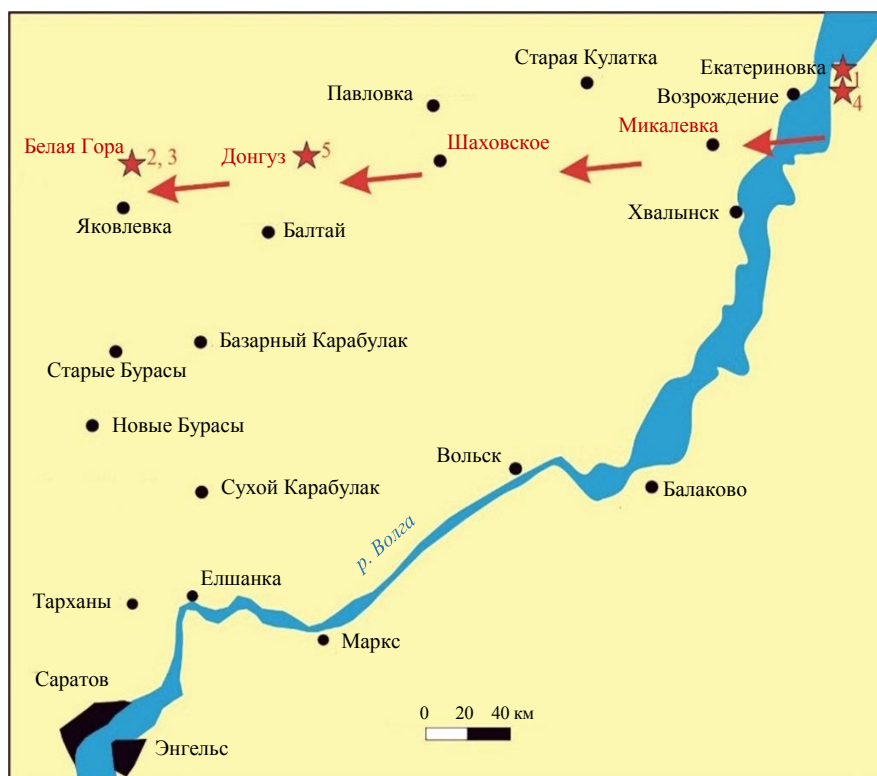


Рис.1. Схема распределения основных известных локаций сборов макрофрагментов метеорита Саратов и точки отбора проб
Красные стрелки – траектория пролета метеорита Саратов; названия красным цветом – населенные пункты, где были обнаружены известные находки метеорита Саратов; красные звезды – места отбора проб и их номера

В качестве модельного полигона исследований определен район Саратовского метеоритного дождя 6 октября 1918 г., расположенный на севере правобережья Саратовского Поволжья (рис.1). Материал метеорита Саратов собирался местными жителями при падении тела, а затем специальной экспедицией под руководством Л.А.Кулика при активном содействии населения, прежде всего краеведческого и научно-образовательного сообщества [1, 2]. Масса фрагментов метеорита, найденных в нескольких локациях по оси пролета (рис.1), ныне распределена по различным музеям России (Музей землеведения МГУ, Музей землеведения Саратовского университета и др.). В течение XX в. метеоритный материал изучался многими исследователями, в том числе на предмет геохимико-минералогических характеристик [3-5], физических свойств тела [5, 6], структурных особенностей, спектральной отражательной способности вещества [7] и т.д. Метеорит Саратов вызывает живой интерес и современных исследователей в XXI в. [8-10]. Особое внимание данной теме непосредственно с момента космического события уделяли работавшие в Саратовском университете представители школы В.И.Вернадского – П.П.Пилипенко и его ученик В.С.Васильев [5, 11].

Целью работы является тестирование гипотезы идентификации метеоритного вещества в магнитной фракции современных почв как инструмента для исследований ареала метеоритного дождя. Задачи исследования включали:

- сбор шлиховых почвенных проб по траектории пролета метеорита Саратов;
- отмывка и исследование шлиховых проб комплексом методов;
- интерпретация данных комплекса исследований.

При фрагментации метеорита образуются метеороиды, не подвергшиеся абляции (*unablated meteoroids*), частично расплавленные космические сферулы (*cosmic spherules*) и метеорные фрагменты (*meteoric fragments*), которые осаждаются под действием гравитации в соответствии с их размерами [12]. В процессе же абляции атомы металлов (*ablated metal atoms*) окисляются, образуя различные соединения (оксиды, гидроксиды и карбонаты), которые затем конденсируются,



формируя частицы «метеорного дыма» (meteoric smoke particles – MSP) [12, 13]. Из-за значительно более мелкого размера частицы MSP не так быстро осаждаются под действием гравитации и циркулируют в атмосфере до нескольких лет [12, 14, 15]. Наше исследование сконцентрировано на поиске микрофрагментов, возникших в результате фрагментации, преимущественно сохранивших состав «родительского» тела, а также сферул абляции с характерными признаками космогенного происхождения.

Ожидаемые особенности первичного шлихового материала определялись, в частности, наблюдениями предыдущих исследователей. Изменения метеоритного вещества идентифицированы и описаны уже в течение года после падения. П.Н.Чирвинский писал про исследуемый материал: «Другие кусочки несколько побурели, так как пролежали зиму в поле» [5, с. 103]. Как отметил В.С.Васильев, «хондры в образце Белые Горы имеют 1-2 мм и редко 10 мм в поперечнике. Основная масса непрочная; с некоторым усилием ее можно истирать на ладони в пепловидный порошок и отделять хондры и вкрапления железа» [5, с. 112]. В таком случае через 100 лет в шлихе вероятнее всего встретить «проржавевшие» отдельные хондры или их фрагменты.

Существуют различные модели для фазы атмосферного разрушения и торможения тел диаметром ~10-100 м: «блинчиковая» модель (*Pancake Model*, расширяется перпендикулярно траектории под действием аэродинамического давления); модель облака обломков (*Debris Cloud Model*, тело непрерывно дробится, и облако мелких осколков расширяется с постоянной скоростью, пропорциональной скорости движения); модель цепной реакции (*Chain Reaction Model*, тело прогрессивно дробится на все более мелкие и прочные фрагменты, а скорость расширения зависит от текущей прочности фрагментов) [16]. По данным исследователей, для точного предсказания поля рассеяния конкретного тела необходимо максимально сузить диапазон его исходных физических параметров, которые влияют сильнее, чем различия между самими моделями. Крупные и прочные фрагменты имеют большую массу к площади поперечного сечения (большую баллистическую стойкость) и могут пролететь дальше по траектории, формируя «головную» часть эллипса с самыми крупными метеоритами, а частицы пылевой размерности и наименее прочные фрагменты тормозятся и абляционно теряются в атмосфере раньше, формируя «хвостовую» часть.

Установлено, что каменные метеориты имеют среднюю ширину поля рассеяния 3,8 км, большинство около 2-4 км [17]. При этом сам термин «эллипс рассеяния» некоторыми исследователями подвергается критике: по результатам моделирования и наблюдений основной вклад в форму, размер и местоположение поля рассеяния вносят атмосферные ветры (если бы форма и ориентация фрагментов играли решающую роль, эффект ветрового дрейфа не был бы так очевиден). Наиболее типичная форма – длинная узкая изогнутая область, а не симметричный эллипс, где изгиб вызван изменением направления ветра с высотой [17]. Для ряда метеоритов было показано, что атмосферная фрагментация часто является неполной и основное тело сохраняется как крупнейший фрагмент, при этом распределение массы найденных фрагментов сильно зависит от полноты коллекции, особенно от учета самых крупных обломков, и имеет искажения из-за редких находок мелких фрагментов [18, 19]. Метеорит Саратов в этих работах использован как физический материал для эксперимента. В нашем исследовании для преодоления необходимости модельных расчетов материал отбирался вблизи населенных пунктов, где были обнаружены известные крупные фрагменты метеорита Саратов (рис.1).

На территории Саратовского метеоритного дождя на поверхность выходят терригенные породы палеоцена (глауконито-кварцевые пески-песчаники и алевроиты-алевролиты сызранской и саратовской свит). В крайней восточной части территории наблюдаются нижнемеловые отложения: аптский ярус (пески, песчаники, глины с уровнями ожелезнения и сидеритовых конкреций верхазовской свиты) и альбский ярус (пески, песчаники, глины парамоновской свиты). Представлены верхнемеловые отложения: сеноманский, туронский, коньякский, сантонский, кампанский и маастрихтский ярусы (мел-мергельные и песчано-глинистые толщи меловатской, банновской, сенгилеевской и радищевской свит). Четвертичные отложения выражены разнообразными генетическими типами с преобладанием локально развитых делювия и пролювия. Моренные и флювиогляциальные отложения, из которых потенциально возможны фрагменты кристаллических пород, содержащих в том числе оливин, развиты преимущественно западнее, в районах городов Ртищево и Аткарск.



Материалы и методы

Отбор точечных шлиховых проб по оси пролета метеорита Саратов осуществлялся в рамках работы специального отряда научно-просветительской экспедиции «Флотилия плавучих университетов» в 2024 г. [20]. Методика отбора опиралась на инструкцию* по поискам метеоритного вещества, в которой предлагается брать по 10 см почвы с 1 м², отмывать, а затем «травить» магнитом оставшуюся фракцию. Такая методика наиболее подходит для выявления мини-фрагментов небесного тела, в том числе известных сферул метеоритного вещества. При отборе конкретной пробы применялся «метод конверта», предполагающий частичный отбор материала в нескольких локациях единой площадки с последующим объединением в единой таре. Срезался интервал в пределах верхних 10 см мощности почвенного слоя, что явно соответствует интенсивности процессов естественного почвообразования в данной местности. При этом отслеживались структурные особенности слоя для исключения возможных изменений за последние 100 лет – смыв, эрозия и т.п.

В процессе полевых работ (рис.1) отобраны пять проб массой около 50 кг каждая по оси полета метеорита – села Екатериновка (левый берег р. Волга, две пробы), Донгуз и Белая Гора (две пробы). В названных локациях (кроме с. Екатериновка) находили макрофрагменты метеорита Саратов в первые годы после его падения.

Отмывка шлихов выполнена на кафедре геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова. Частицы, предположительно космической природы, выделялись путем разделения пробы верхнего почвенного горизонта на немагнитную и магнитную фракции. Далее из магнитной фракции при помощи оптического микроскопа отбирались сферулы и сростки магнетита с другими минералами. Магнитная фракция выделена на электромагнитном сепараторе при 0,5 А прибором УЭМ-1. Дочищалась фракция постоянным магнитом.

Микрофотографии и рентгеноспектральный микроанализ выполнены на базе Центра коллективного пользования ИФЗ РАН [21] на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCAN MIRA LMS, оснащенный энергодисперсионным (EDX) спектрометром Ultim Max 65 с интегрированным программным обеспечением AZtecLive Automated (Oxford Instruments). Исследования проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ и рабочем расстоянии 15 мм. Для проведения СЭМ-исследований зерна из магнитной фракции выкладывались рядами, затем заливались эпоксидной смолой, далее шайбы для микронзондовых исследований шлифовались и полировались.

Дополнительная идентификация минералов проводилась в Центре коллективного пользования ИФЗ РАН методом рамановской спектроскопии (спектроскопии комбинационного рассеяния) с использованием спектрометра EnSpectr R532, совмещенного с прямым оптическим микроскопом Olympus BX53 M. Ключевые технические характеристики рамановского спектрометра EnSpectr R532: длина волны лазера – 532 нм, решетка – 1800 штрихов/мм, входная щель – 20 мкм, фокусное расстояние – 75 мм. Съемка спектров проводилась с использованием 50-кратного объектива (общее увеличение ×500) при мощности лазера 2,2 мВт, накопление спектров – в режиме усреднения 20-50 измерений с экспозицией 0,5-2 с.

Результаты

Состав магнитной фракции. Во всех шлихах выделены ферромагнитные фракции одного порядка – массой от 2,2 до 10 г. Фракция представлена сферулами (преимущественно магнетита), угловатыми фрагментами магнетита, покрытыми окислами гематита, средне окатанными фрагментами магнетита. Содержание указанных составляющих приведено в табл.1, рис.2. Выявлены определенные закономерности в изменении состава материала по направлению траектории полета метеорита, требующие дальнейшего подтверждения. Установлена тенденция к увеличению концентрации сферул (с 0,5-1 до 5 %) и их средних размеров (от 50 до 300 мкм) в направлении к головной части роя разброса, соответствующей району Белая Гора. Аналогичная тенденция свойственна концентрации угловатых зерен магнетита. Для всех проб отмечается исключительно

* Васильев Н.В. Инструкция к исследованию метеоритных кратеров // Сибирская комиссия по метеоритам и космической пыли СО АН СССР. Ф. 1718. Оп. 1. Ед. хр. 83.



широкий разброс размеров частиц магнетита – вплоть до одного-двух порядков величины в пределах одной пробы (например, с. Екатериновка – от 50 мкм до 5 мм). Происхождение этих частиц остается неясным, поскольку подстилающие почвенные породы в местах отбора проб различны. Распределение же окатанных зерен магнетита вдоль оси является относительно равномерным. Возможно, их формирование связано с техногенными процессами.

Таблица 1

Распределение составляющих ферромагнитной фракции по оси полета метеорита

Тип	с. Екатериновка (шлих 1)	с. Белая Гора (шлих 2)	с. Белая Гора (шлих 3)	с. Екатериновка (шлих 4)	с. Донгуз (шлих 5)
Сферулы	До 50 мкм / 1 %	50-300 мкм / 2 %	50-150 мкм / 5 %	До 50 мкм / 0,5 %	50 мкм / 2 %
Магнетит (угловатые)	200-1000 мкм	200-1000 мкм	50-200 мкм	До 50 мкм, единичные до 5 мм	20-100 мкм, единичные 2 мм
Магнетит (окатанный)	50-100 мкм	5-100 мкм	5-100 мкм	20-100 мкм	20-100 мкм

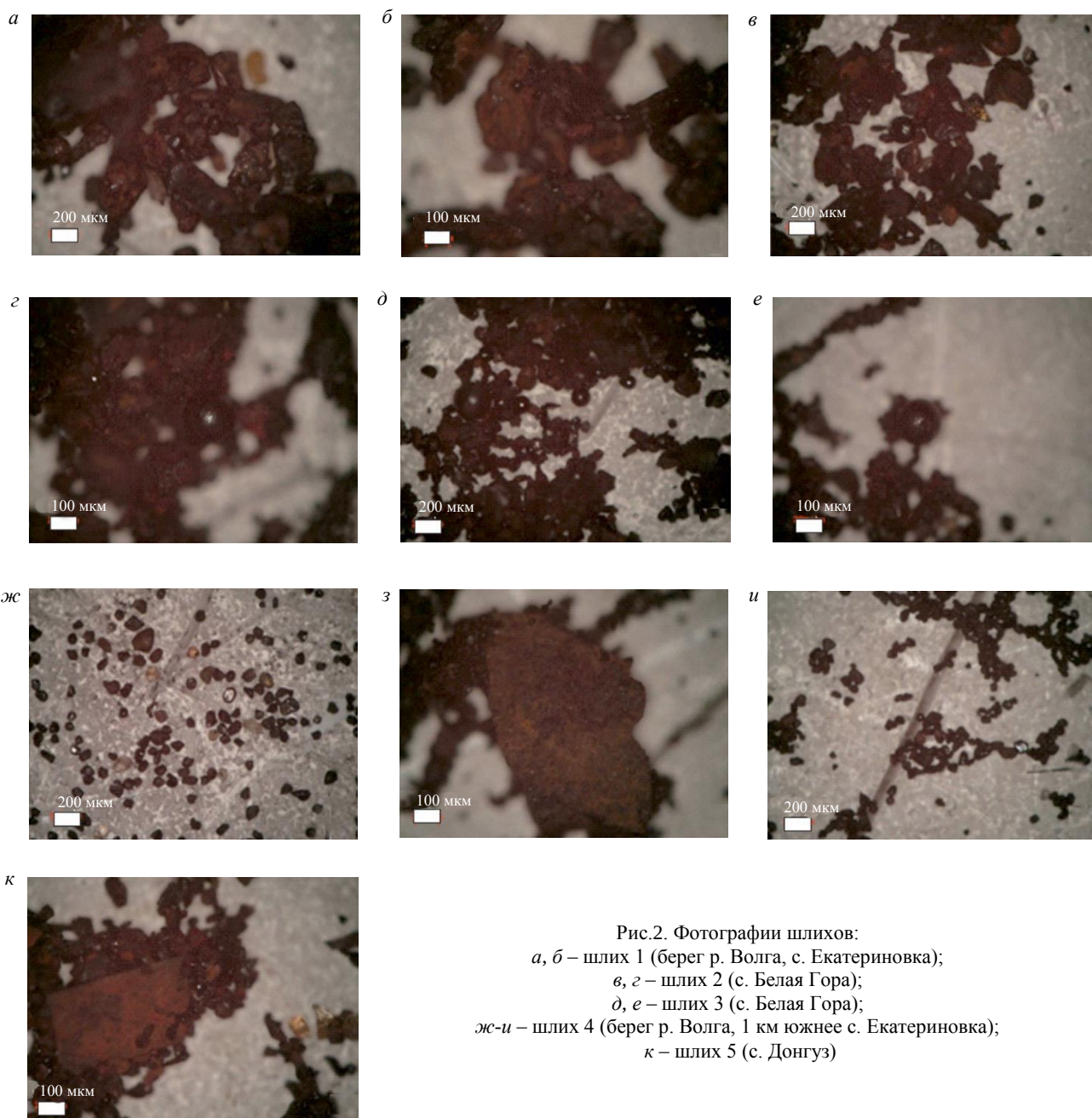


Рис.2. Фотографии шлихов:

а, б – шлих 1 (берег р. Волга, с. Екатериновка);
в, г – шлих 2 (с. Белая Гора);
д, е – шлих 3 (с. Белая Гора);
ж-и – шлих 4 (берег р. Волга, 1 км южнее с. Екатериновка);
к – шлих 5 (с. Донгуз)



Немагнитная фракция состоит из кварца, КППШ и амфиболов. Ферромагнитная фракция представлена в основном магнетитом угловатой (200-1000 мкм) и средне окатанной (50-100 мкм) формы. Зерна угловатой формы покрыты гематитом. Цвет окислов бурый или красный. Цвет магнетита железно-черный со слабым металлическим блеском. В оптический микроскоп хорошо различимы сферулы магнетита без следов окисления, отличающиеся по блеску (от яркого металлического до черного железного). Содержание таких сферул в магнитной фракции около 5 %.

По данным электронной микроскопии установлено присутствие в магнитной фракции хромита, титаномагнетита, обломков самородного железа, а также, вероятно, хромферрида. Также различимы фрагменты породы/сростки кристаллов немагнитных и слабомагнитных минералов с магнетитом. Обнаруженные в шлихах сферулы более детально исследованы на предмет их морфологии и химического состава.

Морфология и состав сферул. Отобранные сферулы представляют магнетит или вюстит с примесью Mn, Cr или Ti. Между кристаллами магнетита «прорастают» соединения с примесью кремния, титана и кальция в виде дендритов, что, вероятно, является отражением распространенного процесса сфенизации магнетита. В большинстве своем сферулы полые внутри, но в нескольких обнаружено железное ядро (рис.3, г). Как правило, состав сферул неоднороден. В табл.2 представлены средние концентрации для основной магнетитовой массы и отдельно для прожилок.

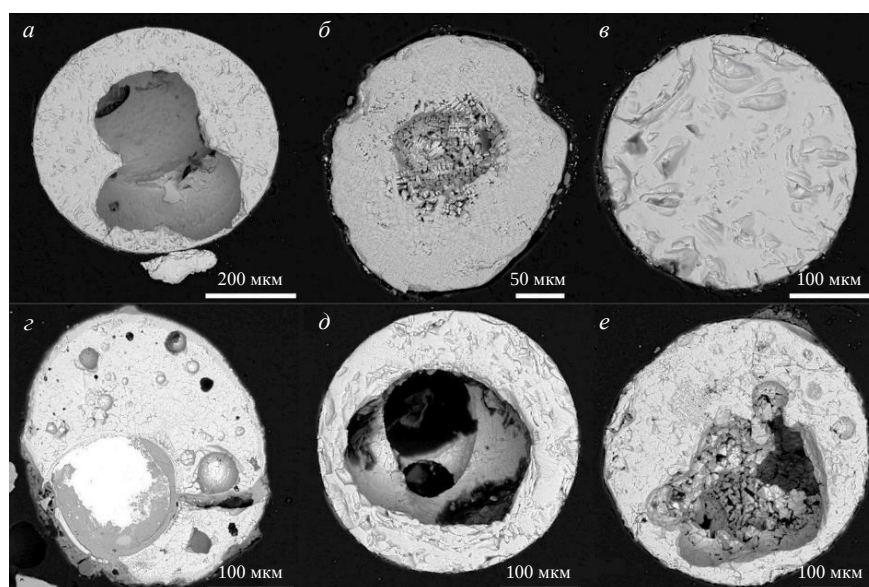


Рис.3. Сферулы магнетита из шлихов с. Белая Гора (SEM BSE): а-в – шлик 2, г-е – шлик 3

Таблица 2

Состав сферул магнетита, мас. %

Метка спектра	Магнетит			Прожилки		
	n = 16			n = 13		
	Min	Max	Median	Min	Max	Median
O	17,06	28,81	22,93	19,64	34,87	28,04
Mg	0	0,72	—	нпо	нпо	нпо
Al	0,31	1,8	1,12	0,28	0,74	0,44
Si	нпо	нпо	нпо	1,17	14,64	8,72
K	нпо	нпо	нпо	0,34	0,49	0,41
Ca	нпо	нпо	нпо	0,36	16,58	4,55
Ti	0,81	7,56	3,12	8,05	9,67	8,82
Cr	0,24	0,39	0,33	нпо	нпо	нпо
Mn	0,39	2,55	0,96	0,33	2,47	1,37
Fe	56,3	76,13	70,48	31,05	72,11	49,00

Примечание. Прочерк – Mg определен достоверно только в одном образце;
нпо – ниже предела обнаружения.



Фрагменты пород. Наибольшее количество фрагментов пород/сростков кристаллов немагнитных и слабомагнитных минералов с магнетитом обнаружено в шлихе 2. Опишем состав наиболее представительных из них. В первом фрагменте (рис.4) достаточно четко идентифицируются магнетит, кварц и барит, слагающий мелкие прожилки. Для более точного определения минерала, слагающего основную массу, выполнена рамановская спектроскопия. Элементный состав и рамановские спектры последнего соответствуют группе клинопироксенов, вероятно эгирину.

Второй фрагмент (табл.3, 4, рис.5) сложен фаялитом (Fa 81) с примесью Mg и Mn (EDX-спектр 92), магнетитом (спектры 24, 30, 31) и плагиоклазом (EDX-спектры 26-29) с пониженной степенью кристалличности (плохо раскристаллизованным), что выражается в уширении рамановских пиков. Спектры оливинов и плагиоклазов сравнивались с литературными данными [22-24].

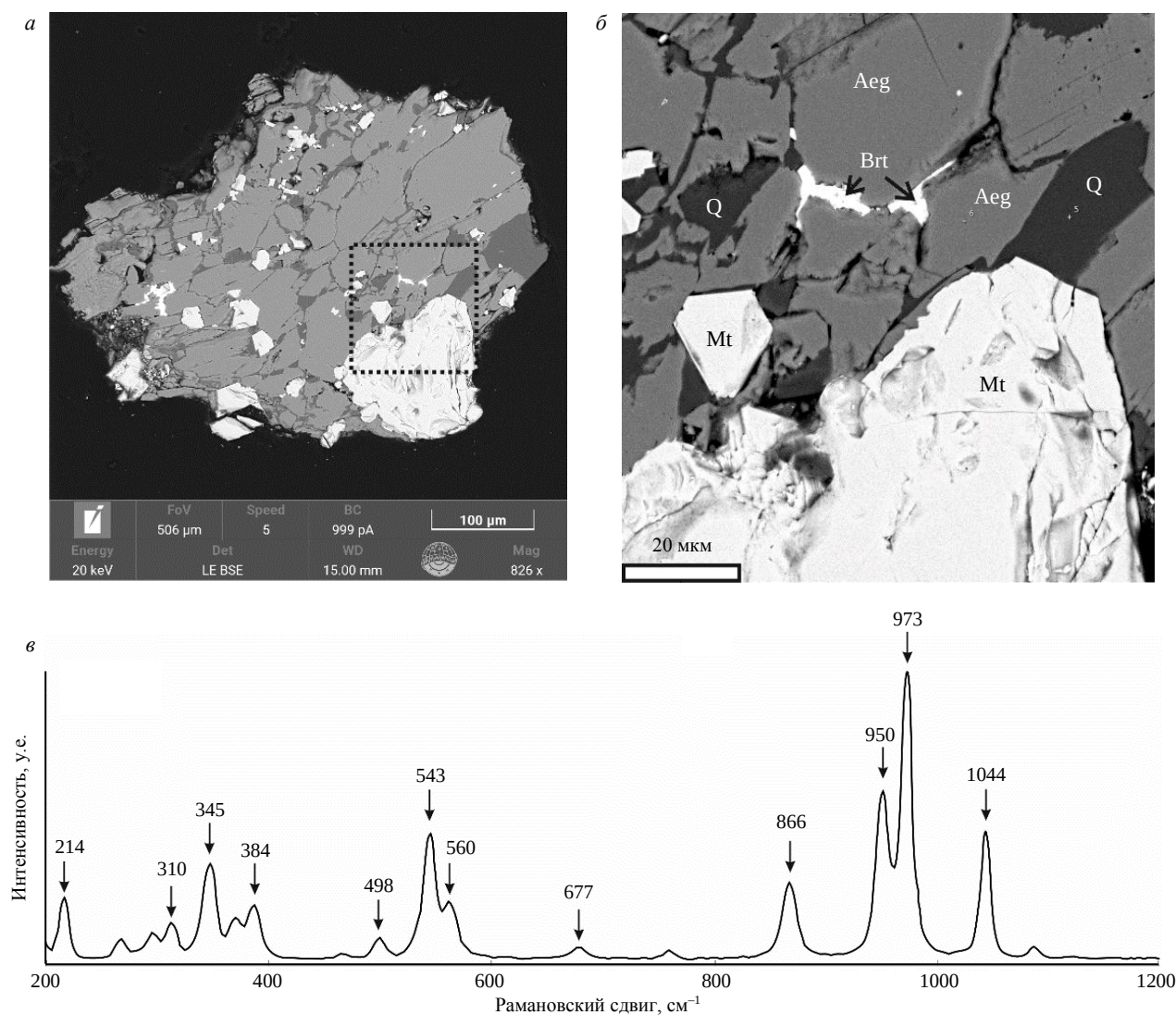


Рис.4. Общий вид первого фрагмента (SEM BSE) (а); слагающие его минеральные фазы (б) и рамановский спектр эгирина из фрагмента (в)

Mt – магнетит; Aeg – эгирин; Brt – барит. Контур пунктиром – область изучаемого фрагмента

Таблица 3

Содержание главных оксидов в плагиоклазах, мас. %

Метка спектра	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	P ₂ O ₅	Σ
Спектр 28	38,11	3,42	28,51	1,92	20,63	0,6	6,82	100
Спектр 29	39,05	3,16	29,27	2,12	19,72	0,5	6,18	100



Таблица 4

Состав основных фаз, составляющих второй фрагмент, мас. %

Метка спектра	Спектр 92	Спектр 24	Спектр 25	Спектр 26	Спектр 27	Спектр 28	Спектр 29	Спектр 30	Спектр 31
O	31,5	20,67	29,07	43,27	42,65	40,32	39,93	21,46	20,24
Na	нпо	нпо	нпо	0,81	0,56	нпо	нпо	нпо	нпо
Mg	4,52	0,4	0,62	нпо	нпо	0,36	0,3	нпо	нпо
Al	нпо	2,25	1,6	13,16	12,09	1,81	1,66	2,59	1,94
Si	15,45	0,95	15,55	23,06	24,21	17,87	18,15	2,29	нпо
P	нпо	нпо	3,7	нпо	нпо	2,99	2,68	нпо	нпо
K	нпо	нпо	нпо	3,09	6,15	нпо	нпо	нпо	нпо
Ca	0,92	0,21	17,19	6,27	1,91	14,79	14,01	1,2	нпо
Ti	нпо	0,42	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0,45	0,3
Mn	3,4	0,77	1,26	нпо	нпо	1,49	1,63	0,66	0,61
Fe	43,65	67,56	19,31	2,36	1,46	20,69	21,05	63,74	69,12
Sr	нпо	нпо	нпо	2,43	2,49	нпо	нпо	нпо	нпо
Ba	нпо	нпо	нпо	4,6	9,4	нпо	нпо	нпо	нпо
Σ	99,44	93,24	88,31	99,05	100,92	100,33	99,41	92,38	92,21

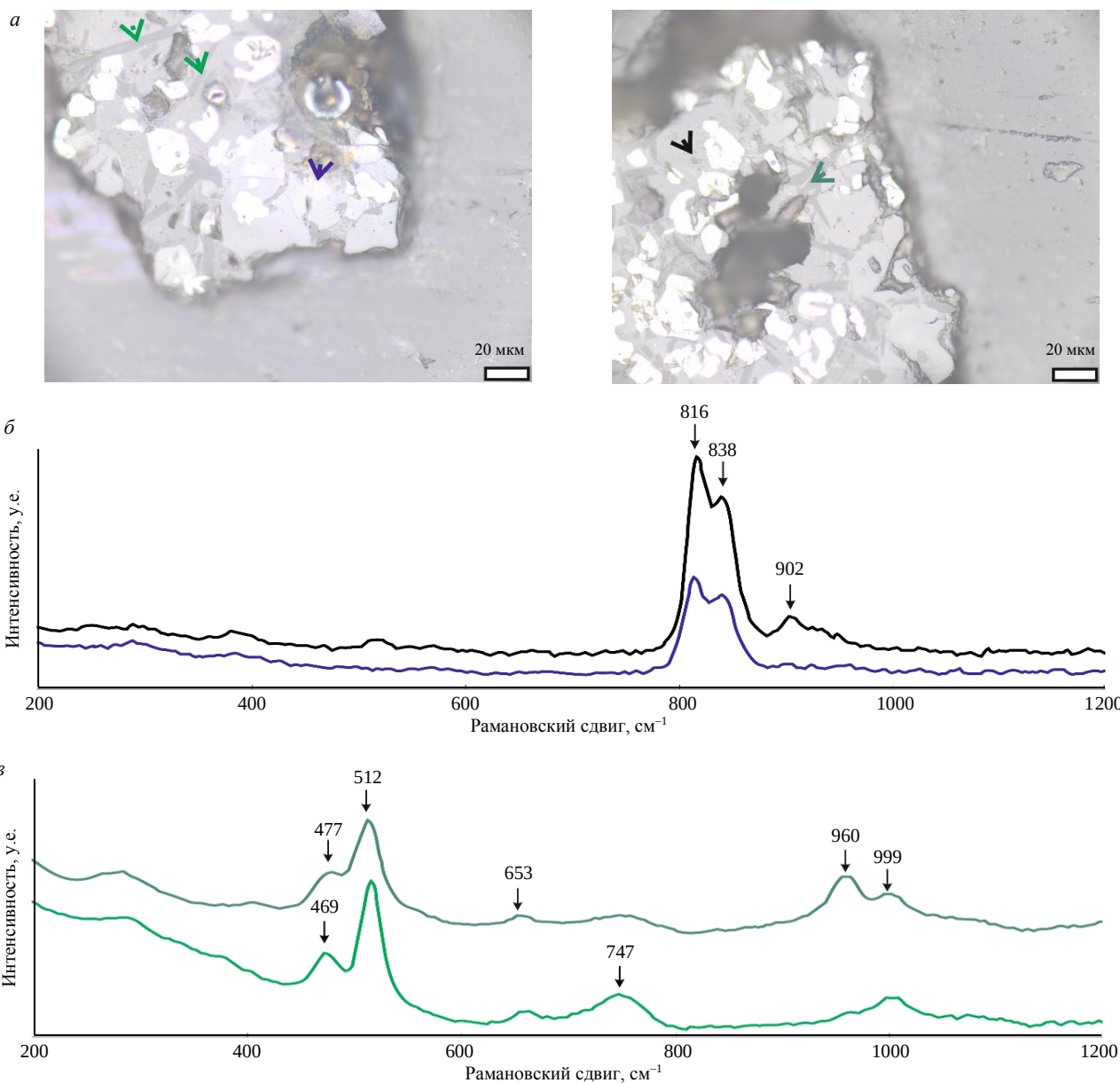


Рис.5. Общий вид второго фрагмента (а), рамановские спектры для оливинов (б) и плагиоклазов (в).
Цветными стрелками отмечены проанализированные участки в соответствии с цветом спектров



На элементной карте (рис.6) наглядно продемонстрировано взаимное расположение фаз. Выделяются призматические кристаллы плагиоклазов («палочки»).

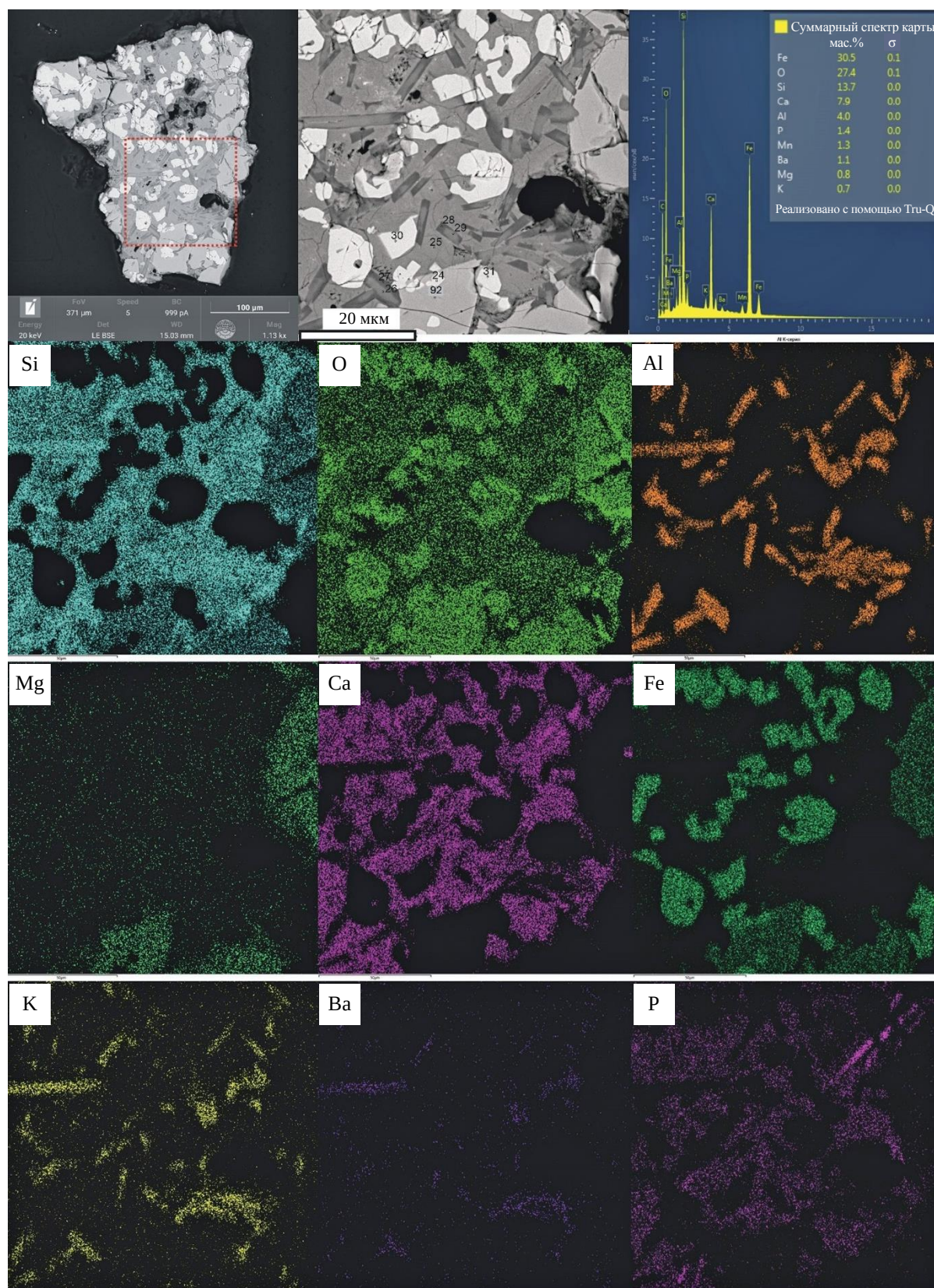


Рис.6. Элементные карты для второго фрагмента (контур пунктиром).
Точками обозначены участки микрозондовых исследований и соответствующие номера спектров в табл.4

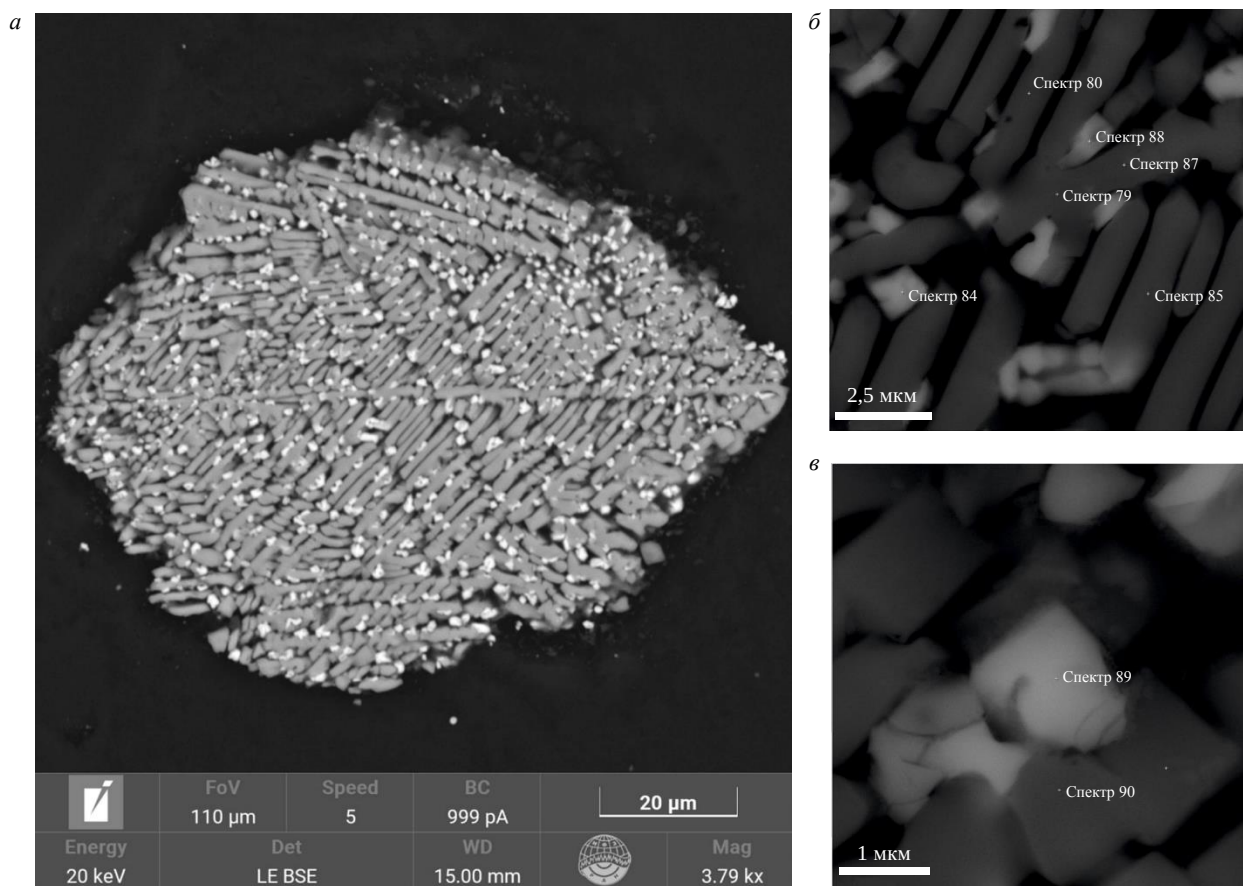


Рис.7. Третий фрагмент (SEM BSE) (а) и участки микрозондовых исследований (б, в)

Наиболее интересным является третий фрагмент со специфичной морфологией (рис.7). Это сферическое образование, не превышающее 80 мкм по длине оси, сложено оливином с примесями Cr и Ni (табл.5). Состав его неоднороден. Часть кристаллов имеет форстерит Fo 62-73, при этом у включения со спектром 89 Fo 37 (у аналогичных на другом участке (спектры 84 и 88) Fo 65-71).

Таблица 5

Состав оливина третьего фрагмента, мас. %

Метка спектра	O	Mg	Al	Si	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Σ
Спектр 79	41,6	21,34	0,36	16,5	0,18	0,42	0,24	20,15	нпо	1,49	102,27
Спектр 80	38,97	18,55	0,43	13,69	0,14	0,68	0,24	26,08	нпо	1,3	100,1
Спектр 84	37,4	18,07	0,47	13,74	0,12	0,56	0,17	22,74	нпо	1,42	94,69
Спектр 85	37,79	18,93	0,22	15,53	0,16	0,29	0,21	17,91	нпо	1,25	92,3
Спектр 87	39,97	20,5	нпо	16,81	0,18	0,31	0,23	17,45	нпо	1,41	96,84
Спектр 88	38,6	19,33	0,2	16,04	0,16	0,28	0,26	17,76	нпо	1,33	93,96
Спектр 89	33,45	10,92	1,33	6,5	0,08	1,43	0,19	43,03	0,49	1,22	98,64
Спектр 90	36,88	15,53	0,51	10,81	0,11	0,74	0,25	33,97	0,4	1,21	100,41

Примечание. Дефицит суммы вызван рельефом образца.

Обсуждение

Идентификация метеоритного вещества. При изучении сферул, имеющих потенциально космогенное происхождение, следует рассмотреть возможные генетические типы. Это могут быть микрометеориты, сферулы абляции или сферулы импактного плавления. Микрометеориты вносят значительный вклад в поток внеземного вещества, попадающего на Землю, и более распространены в осадочной летописи (в том числе современных глубоководных осадках), чем фрагменты крупных метеоритов [25-27], а также несут важную информацию о палеогеографических условиях прошлого [28-30]. Рассмотрим критерии идентификации микрометеоритов [31] – наличие частичной



или полной оболочки из магнетита вокруг микрометеоритов [32, 33]; самородного никелистого железа; химического состава, близкого к хондриту [34]. Второстепенные признаки – наличие оливина с высоким содержанием CaO , Cr_2O_3 и очень низким содержанием FeO , что не характерно для земных пород [35]; свидетельства нагрева поверхности (вследствие проникновения в атмосферу); сферическая морфология частиц. Обсуждаемые нами сферулы из магнитной фракции теоретически могут отвечать по морфологии и составу микрометеоритам типа I [31]. В микрометеоритах такого типа преобладает FeO с небольшой примесью других оксидов (в основном MgO и SiO_2), минералогически же они сложены вюститом и магнетитом, иногда с ядром из никелистого железа или элементов платиновой группы [31]. При этом сферулы типа I часто могут быть лишены такого ядра и быть полыми внутри.

Существуют метеоритные абляционные сферы, образовавшиеся при входе в атмосферу более крупных тел [36], и микротектиты, сконденсированные из паровых шлейфов [37] или отделенные от ударного расплава, образовавшегося при столкновении космических тел с Землей [38]. Образование абляционных сферул связано с разогревом поверхности, плавлением, испарением, окислением вещества и сдувом расплава набегающим атмосферным потоком [39].

Техногенные сферулы, импактные сферулы, сферулы абляции могут иметь схожую морфологию, а промышленные сферулы из магнетита минералогически неотличимы от некоторых расплавленных микрометеоритов [31]. Причем «земные» сферулы весьма разнообразны [34]. Отсутствие Ni в частицах оксидов железа, как правило, является доказательством «земного» или техногенного происхождения сферул магнетита [40]. В исследуемых сферулах Ni отсутствует либо находится ниже предела обнаружения методом, что не позволяет однозначно трактовать их происхождение. Хотя сферулы с железным ядром, подобные рис. 3, 2, но обогащенные Co и Ni , описаны как микрометеориты в работах [28, 41], вероятно, изученные сферулы магнетита являются скорее техногенными образованиями.

Обсуждая состав магнитной фракции, стоит упомянуть, что минералы Fe-Ni даже в пустынном аридном выветривании обыкновенных хондритов окисляются, превращаясь в парамагнитные оксигидроксиды железа (акаганэит), а на более поздних стадиях образуются небольшие количества ферромагнитных оксидов (магнетит/маггемит) [42]. Можно предположить, что обильно представленные в шлихах оксиды и оксигидроксиды железа частично являются продуктами выветривания метеоритных фрагментов. В связи с этим гораздо большего внимания заслуживают обломки пород. Кварц и барит не обнаружены в неизмененных метеоритах, но для них возможно альтернативное происхождение как в результате изменения в земных условиях, так и при изменении на родительских телах [43]. При этом отличить от кварца коэсит и стишовит – минералы ударного воздействия в метеоритах – не представляется возможным. Генезис первого фрагмента остается спорным.

Геохимические особенности оливина метеорита Саратов ранее представлены в работе К.Г.Сухановой и соавторов [8]. Согласно данным исследователей, состав оливина соответствует форстериту и довольно неоднороден (Fo 73-77), но различий между оливином хондр и матрицы по составу главных элементов не установлено. В изученных нами фрагментах оливин соответствует фаялиту (Fa 81), хотя и имеет примеси Mg . При этом фаялит и оливины $(\text{Mg, Fe})_2(\text{SiO}_4)$ встречаются во многих типах метеоритов [43]. Плаггиоклазы с пониженной степенью кристалличности, вероятно, являются «плохо раскристаллизованным мезостазисом олигоклаз-лабрадоритового состава» [8]. Можно предположить принадлежность второго фрагмента к метеориту Саратов или продуктам его изменения.

Третий фрагмент по своему составу (примеси Ni) и морфологии, вероятно, является непорфировой хондрой (barred/dendritic olivine chondrules по [44]). Состав слагающего третий фрагмент оливина неоднороден, но в отдельных точках определяется Fo 71-73 (спектры 79, 85, 87, 88). Таким образом, в магнитной фракции современных почв на месте падения метеорита Саратов можно идентифицировать его отдельные микрофрагменты и/или продукты их изменения.

Д.М.Печерский с соавторами [45] показали, что метеориты (изученных ими типов) имеют идентичный состав первичных магнитных минералов (камасит, тэнит, шрейберзит) и различаются лишь концентрацией. Камасит из метеоритов полностью соответствует по составу камаситу из космической пыли в земных осадках, что указывает на их единое происхождение из ядер родительских планет. На основе термомангнитного и микрозондового анализов четвертичных отложений



Дархатской впадины (Северная Монголия) установили отсутствие корреляции с содержанием магнетита и пирита, а также отрицательную корреляцию со скоростью осадконакопления, что в совокупности с данными по другим регионам Евразии и Атлантики свидетельствует о преимущественно космическом происхождении частиц самородного железа в осадках [46]. Установлено, что в метеоритах чистое железо, камасит и тэнит образуют три обособленные группы с разрывами в содержании Ni. Это объясняется спецификой кристаллизации и распада Fe-Ni-сплавов в космосе [47]. Самородное железо без никеля в земных породах (мантийных ксенолитах, траппах, базальтах) и в метеоритах имеет единую природу, а его глобальное распространение в осадках связано с космической межпланетной пылью из пояса астероидов [48]. Фрагменты самородного железа (96-97 % Fe с примесями Mn, Cr менее 1 % и Si 2,4 %) обнаружены в магнитной фракции изученных почвенных шлиховых почвенных проб, но отсутствие никеля в составе и разумный скепсис не позволяют определить его генезис как космогенный.

Геохимия метеоритного вещества и биогенные функции. Согласно данным [4] о химическом составе метеорита Саратов, в магнитной фракции (в растворимой в горячей царской водке форме) содержатся, %: Fe 67,74-71,26; Ni 7,79-9,16; Co 0,2-0,43; SiO₂ 0,38-3,38; CaO 0,72-1,54; MgO 3,71-7,73; MnO 0,06-0,07; P₂O₅ 0,17-0,18; S_{общ} 0,29-1,77; TiO₂ и Al₂O₃ – следы. Для той же магнитной фракции, но в нерастворимой в горячей царской водке форме отмечаются, %: FeO 1,03-2,03; SiO₂ 7,23-8,85; Al₂O₃ 0,46-0,58; Cr₂O₃ 0,3-0,31; CaO 0,48-0,87; MgO 1,93-2,22; MnO 0,04; P₂O₅ 0,01.

Фундаментальным свойством почвы как биокосной системы является ее способность аккумулировать в твердой фазе продукты собственного функционирования, что приводит к формированию устойчивых педогенных признаков и перестройке ее морфологического облика. Как отмечают В.О.Таргульян и М.А.Бронникова, именно накопление и распределение твердофазных продуктов составляют сущность элементарных почвообразовательных процессов и формируют «память» почвы [49]. Продукты разрушения метеоритного вещества в почве по-разному подвержены процессам накопления и миграции химических элементов, входящих в их состав. Как правило, кобальт, хром и никель являются маркерами космогенного петрофонда. При этом избыток этих тяжелых металлов является токсичным для растений. В связи с этим представляется перспективным дальнейшее изучение почв и растений в пределах ареала рассеяния метеоритного вещества и конкретно точках шлихового опробования магнитной фракции, где идентифицированы Ni- и Cr-содержащие (хромит, хромферрид, некоторые оливины) по результатам нашего исследования.

Заключение

В почвенной пробе из района Белая Гора обнаружено зерно минерала фаялита, которое с высокой степенью вероятности может рассматриваться как фрагмент хондрового образования метеорита-хондрита (именно к таковым относится метеорит Саратов). В ряде зерен обнаружены единичные оригинальные структуры полевого шпата (морфологически описанные в середине XX в. в метеорите Саратов профессором Саратовского университета В.С.Васильевым).

Следы метеорита Саратов возможно обнаружить через 100 лет после падения космического тела на уровне микрофрагментов. Даже при отсутствии детальных привязок к местности прежних многих обломков тела и находок макрофрагментов возможно эффективно исследовать особенности метеоритного дождя, комплексируя методики геохимии, минералогии и почвоведения. В перспективе планируется более обширное применение комплексной методики работы с почвами района падения небесного тела, оконтуривание ареала рассеяния осколков и пылевых выпадений, что позволит оценить особенности события и параметры одного из крупнейших в мире метеоритных дождей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулик Л.А. К падению метеорита в Саратовской губернии в сентябре 1918 года // Мирозведение. 1921. № 1 (40). С. 71.
2. Кулик Л.А. Отчет Метеоритной экспедиции о работах, произведенных с 19 мая 1921 г. по 29 ноября 1922 г. // Известия Российской академии наук. 1922. Т. 16. С. 391-410.
3. Куплетский Б.М., Островский И.А. Материалы к микроскопическому исследованию метеоритов СССР. 6. Каменный метеорит Саратов // Метеоритика. 1941. Вып. II. С. 77-81.



4. Селиванов Л.С. Химический анализ метеорита «Саратов» // Доклады Академии наук СССР. 1940. Т. 26. № 4. С. 397-400.
5. Чирвинский П.Н. Химико-минералогический состав и микроструктура каменного метеорита Саратов // Метеоритика. 1951. Вып. 9. С. 102-116.
6. Воларович М.П., Леонтьева А.А. Исследование вязкости метеоритов и тектитов // Метеоритика. 1941. Вып. 1. С. 33-41.
7. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность образца № 308 метеорита «Саратов» 1918 г. // Астрономический журнал. 1937. Т. 14, № 4. С. 356-363.
8. Суханова К.Г., Кузнецов А.Б., Галанкина О.Л. Особенности кристаллизации оливина в обыкновенных хондритах (метеорит Саратов): геохимия редких и редкоземельных элементов // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 149-157. DOI: [10.31897/PMI.2022.39](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.39)
9. Суханова К.Г., Скублов С.Г., Галанкина О.Л. и др. Геохимия редких элементов в минералах порфировых и непорфировых хондр равновесных обыкновенных хондритов // Геохимия. 2023. Т. 68. № 5. С. 454-470. DOI: [10.31857/S0016752523050072](https://doi.org/10.31857/S0016752523050072)
10. Bezaeva N.S., Badjukov D.D., Rochette P. et al. Experimental shock metamorphism of the L4 ordinary chondrite Saratov induced by spherical shock waves up to 400 GPa // Meteoritics & Planetary Science. 2010. Vol. 45. Iss. 6. P. 1007-1020. DOI: [10.1111/j.1945-5100.2010.01069.x](https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2010.01069.x)
11. Иванов А.В. Роль учеников и последователей В.И. Вернадского в развитии геонаучной школы региона (на примере Саратовского Поволжья) // Жизнь Земли. 2023. Т. 45. № 1. С. 138-152. DOI: [10.29003/m3159.0514-7468.2023_45_1/138-151](https://doi.org/10.29003/m3159.0514-7468.2023_45_1/138-151)
12. James A.D., Pace F., Sikora S.N.F. et al. The importance of acid-processed meteoric smoke relative to meteoric fragments for crystal nucleation in polar stratospheric clouds // Atmospheric Chemistry and Physics. 2023. Vol. 23. Iss. 3. P. 2215-2233. DOI: [10.5194/acp-23-2215-2023](https://doi.org/10.5194/acp-23-2215-2023)
13. Plane J.M.C., Wuhu Feng, Dawkins E.C.M. The Mesosphere and Metals: Chemistry and Changes // Chemical Reviews. 2015. Vol. 115. Iss. 10. P. 4497-4541. DOI: [10.1021/cr500501m](https://doi.org/10.1021/cr500501m)
14. Brooke J.S.A., Wuhu Feng, Carrillo-Sánchez J.D. et al. Meteoric Smoke Deposition in the Polar Regions: A Comparison of Measurements With Global Atmospheric Models // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2017. Vol. 122. Iss. 20. P. 11112-11130. DOI: [10.1002/2017JD027143](https://doi.org/10.1002/2017JD027143)
15. Dhomse S.S., Saunders R.W., Tian W. et al. Plutonium-238 observations as a test of modeled transport and surface deposition of meteoric smoke particles // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40. Iss. 16. P. 4454-4458. DOI: [10.1002/grl.50840](https://doi.org/10.1002/grl.50840)
16. McMullan S., Collins G.S. Uncertainty quantification in continuous fragmentation airburst models // Icarus. 2019. Vol. 327. P. 19-35. DOI: [10.1016/j.icarus.2019.02.013](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.02.013)
17. Moilanen J., Gritsevich M., Lyytinen E. Determination of strewn fields for meteorite falls // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2021. Vol. 503. Iss. 3. P. 3337-3350. DOI: [10.1093/mnras/stab586](https://doi.org/10.1093/mnras/stab586)
18. Brykina I.G., Egorova L.A. Describing the fragment mass distribution in meteorite showers // Planetary and Space Science. 2024. Vol. 241. № 105838. DOI: [10.1016/j.pss.2024.105838](https://doi.org/10.1016/j.pss.2024.105838)
19. Брыкина И.Г., Егорова Л.А. О степенном индексе при описании распределений по массам фрагментов разрушенных метеороидов и астероидов // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. 2025. № 4. С. 43-51. DOI: [10.55959/MSU0579-9368-1-66-4-6](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9368-1-66-4-6)
20. Иванов А.В., Яиков И.А., Смуров А.В. и др. Организация комплексных экспедиций в Поволжье: десятый сезон «Флотилии плавучих университетов» // Жизнь Земли. 2025. Т. 47. № 2. С. 266-278. DOI: [10.29003/m4694.0514-7468.2020_47_2/266-278](https://doi.org/10.29003/m4694.0514-7468.2020_47_2/266-278)
21. Веселовский Р.В., Дубиня Н.В., Пономарев А.В. и др. Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. № 0579. DOI: [10.5800/GT-2022-13-2-0579](https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579)
22. Kuebler K.E., Jolliff B.L., Wang A., Haskin L.A. Extracting olivine (Fo–Fa) compositions from Raman spectral peak positions // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2006. Vol. 70. Iss. 24. P. 6201-6222. DOI: [10.1016/j.gca.2006.07.035](https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.07.035)
23. Freeman J.J., Wang A., Kuebler K.E. et al. Characterization of natural feldspars by Raman spectroscopy for future planetary exploration // The Canadian Mineralogist. 2008. Vol. 46. № 6. P. 1477-1500. DOI: [10.3749/canmin.46.6.1477](https://doi.org/10.3749/canmin.46.6.1477)
24. Mouri T., Enami M. Raman spectroscopic study of olivine-group minerals // Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. 2008. Vol. 103. Iss. 2. P. 100-104. DOI: [10.2465/jmps.071015](https://doi.org/10.2465/jmps.071015)
25. Rojas J., Duprat J., Engrand C. et al. The micrometeorite flux at Dome C (Antarctica), monitoring the accretion of extraterrestrial dust on Earth // Earth and Planetary Science Letters. 2021. Vol. 560. № 116794. DOI: [10.1016/j.epsl.2021.116794](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116794)
26. Pandey M., Rudraswami N.G., Singh V.P., Viegas A. Geochemical evaluation of cosmic spherules collected from the Central Indian Ocean Basin // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2023. Vol. 200. № 104153. DOI: [10.1016/j.dsr.2023.104153](https://doi.org/10.1016/j.dsr.2023.104153)
27. Singh V.P., Rudraswami N.G. Spatial variation of micrometeorite abundance in global ocean // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2025. Vol. 222. № 104533. DOI: [10.1016/j.dsr.2025.104533](https://doi.org/10.1016/j.dsr.2025.104533)
28. Suttle M.D., Campanale F., Folco L. et al. Fossil micrometeorites from Monte dei Corvi: Searching for dust from the Veritas asteroid family and the utility of micrometeorites as a palaeoclimate proxy // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2023. Vol. 355. P. 75-88. DOI: [10.1016/j.gca.2023.06.027](https://doi.org/10.1016/j.gca.2023.06.027)
29. Габдуллин Р.Р., Бадулина Н.В., Иванов А.В. Астроклиматические реперы стратиграфической корреляции для неоген-четвертичных отложений // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2024. № 6. С. 61-71. DOI: [10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-61-71](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-6-61-71)
30. Ruggiu L.K., Villeneuve J., Da Silva A.-C. et al. Diversity among fossil micrometeorites in the late Devonian // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2025. Vol. 405. P. 114-131. DOI: [10.1016/j.gca.2025.07.016](https://doi.org/10.1016/j.gca.2025.07.016)
31. Genge M.J., Engrand C., Gounelle M., Taylor S. The classification of micrometeorites // Meteoritics & Planetary Science. 2008. Vol. 43. Iss. 3. P. 497-515. DOI: [10.1111/j.1945-5100.2008.tb00668.x](https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2008.tb00668.x)
32. Toppani A., Libourel G., Engrand C., Maurette M. Experimental simulation of atmospheric entry of micrometeorites // Meteoritics & Planetary Science. 2001. Vol. 36. Iss. 10. P. 1377-1396. DOI: [10.1111/j.1945-5100.2001.tb01831.x](https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2001.tb01831.x)



33. *Toppani A., Libourel G.* Factors controlling compositions of cosmic spinels: application to atmospheric entry conditions of meteoritic materials // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2003. Vol. 67. Iss. 23. P. 4621-4638. DOI: [10.1016/S0016-7037\(03\)00383-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00383-1)
34. *Wozniakiewicz P.J., Alesbrook L.S., Bradley J.P. et al.* Atmospheric collection of extraterrestrial dust at the Earth's surface in the mid-Pacific // *Meteoritics & Planetary Science*. 2024. Vol. 59. Iss. 10. P. 2789-2817. DOI: [10.1111/maps.14251](https://doi.org/10.1111/maps.14251)
35. *Brearley A.J., Jones R.H.* Chondritic Meteorites // *Reviews in Mineralogy*. Mineralogical Society of America, 1998. Vol. 36. P. 3-001-3-398.
36. *Genge M.J., Alesbrook L., Almeida N.V. et al.* The fusion crust of the Winchcombe meteorite: A preserved record of atmospheric entry processes // *Meteoritics & Planetary Science*. 2024. Vol. 59. Iss. 5. P. 948-972. DOI: [10.1111/maps.13937](https://doi.org/10.1111/maps.13937)
37. *Velázquez V.-F., Gomes C.B., Mansueto M. et al.* Morphological aspects, textural features and chemical composition of spherules from the Colônia impact crater, São Paulo, Brazil // *Solid Earth Sciences*. 2021. Vol. 6. Iss. 1. P. 27-36. DOI: [10.1016/j.sesci.2020.12.004](https://doi.org/10.1016/j.sesci.2020.12.004)
38. *Genge M.J., Davies B., Suttle M.D. et al.* The mineralogy and petrology of I-type cosmic spherules: Implications for their sources, origins and identification in sedimentary rocks // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2017. Vol. 218. P. 167-200. DOI: [10.1016/j.gca.2017.09.004](https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.09.004)
39. *Стулов В.П., Мирский В.Н., Вислый А.И.* Аэродинамика болидов. М.: Наука. Физматлит, 1995. 240 с.
40. *Бадюков Д.Д., Райтала Й.* Абляционные сферулы Сихотэ-Алинского метеорита и условия их формирования // *Петрология*. 2012. Т. 20. № 6. С. 574-582.
41. *Савельев Д.П., Савельева О.Л., Москалева С.В., Рашидов В.А.* Состав космогенных сферул из железомарганцевых корок Магеллановых гор // *Геохимия*. 2022. Т. 67. № 5. С. 413-422. DOI: [10.31857/S0016752522050090](https://doi.org/10.31857/S0016752522050090)
42. *Кузина Д., Гаттачека Ж., Гуёе У. и др.* Влияние земного выветривания на магнитные свойства метеоритов из пустыни Атакама // *Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки*. 2025. Т. 167. Кн. 2. С. 353-366 (in English). DOI: [10.26907/2542-064X.2025.2.353-366](https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.2.353-366)
43. *Иванов А.В., Ярошевский А.А., Иванова М.А.* Минералы метеоритов – новый каталог // *Геохимия*. 2019. Т. 64. № 8. С. 869-932. DOI: [10.31857/S0016-7525648869-932](https://doi.org/10.31857/S0016-7525648869-932)
44. *Jones R.H., Villeneuve J., Libourel G.* Thermal Histories of Chondrules. Petrologic Observations and Experimental Constraints // *Chondrules: Records of Protoplanetary Disk Processes*. Cambridge University Press, 2018. P. 57-90. DOI: [10.1017/9781108284073.003](https://doi.org/10.1017/9781108284073.003)
45. *Печерский Д.М., Марков Г.П., Цельмович В.А., Шаронова З.В.* Внеземные магнитные минералы // *Физика Земли*. 2012. № 7-8. С. 103-120.
46. *Печерский Д.М., Гильманова Д.М., Казанский А.Ю. и др.* Самородное железо в четвертичных отложениях Дархатской впадины, Северная Монголия // *Геология и геофизика*. 2013. Т. 54. № 12. С. 1923-1941.
47. *Печерский Д.М., Марков Г.П., Цельмович В.А.* Чистое железо и другие магнитные минералы в метеоритах // *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*. 2015. Т. 49. № 1. С. 65-75. DOI: [10.7868/S0320930X14060073](https://doi.org/10.7868/S0320930X14060073)
48. *Печерский Д.М., Кузина Д.М., Нургалиев Д.К., Цельмович В.А.* Единая природа самородного железа в земных породах и метеоритах. Результаты микрозондового и термомагнитного анализов // *Физика Земли*. 2015. № 5. С. 140-155. DOI: [10.7868/S0002333715050105](https://doi.org/10.7868/S0002333715050105)
49. *Таргульян В.О., Бронникова М.А.* Память почв: теоретические основы концепции, современное состояние и перспективы развития // *Почвоведение*. 2019. № 3. С. 259-275. DOI: [10.1134/S0032180X19030110](https://doi.org/10.1134/S0032180X19030110)

Авторы: Алексей Викторович Иванов, канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), старший научный сотрудник (Институт географии РАН, Москва, Россия), доцент (Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия), <http://orcid.org/0000-0003-2788-0215>, Руслан Рустемович Габдуллин, д-р геол.-минерал. наук, профессор (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), ведущий научный сотрудник (Институт геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН, Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-8296-7191>, Софья Ивановна Меренкова, канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник (Институт океанологии им. П.П.Шириова РАН, Москва, Россия), младший научный сотрудник (Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия), koshelevasof@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3204-4393>, Алексей Андреевич Самсонов, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), <https://orcid.org/0009-0007-4637-0399>, Альвина Владимировна Чистякова, научный сотрудник (Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0001-5959-9327>, Дмитрий Федорович Аяцков, д-р ист. наук, профессор (Центр развития Саратовской агломерации и промышленных парков, Саратов, Россия), <https://orcid.org/0009-0007-6829-6820>, Михаил Анатольевич Винник, д-р пед. наук, ведущий научный сотрудник (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), <https://orcid.org/0009-0006-6970-7567>, Евгений Юрьевич Погожев, канд. биол. наук, старший научный сотрудник (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), <https://orcid.org/0009-0003-3018-930X>, Афанасий Евгеньевич Тельнов, аспирант (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), <https://orcid.org/0009-0002-7428-8097>, Юрий Антонович Чуриков, аспирант (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), <https://orcid.org/0009-0001-2402-7414>, Никита Николаевич Анисимов, аспирант (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), <https://orcid.org/0009-0007-9881-1969>, Наталья Викторовна Бадулина, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), <https://orcid.org/0000-0002-1465-2996>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.