

Научная статья
УДК 549-1+549.02(571.63)
DOI: 10.31857/S0869769824050074
EDN: HPLQCSJ

Сферические формы вещества в минеральных комплексах Приморья

П. П. Сафронов✉, С. О. Максимов, И. Ю. Чекрыжов

Петр Петрович Сафронов

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
psafronov@mail.ru
<http://orcid.org/0009-0001-2034-0833>

Сергей Олегович Максимов

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
hangar7@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-7705-8524>

Игорь Юрьевич Чекрыжов

научный сотрудник
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
chekr2004@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-0319-8759>

Аннотация. Приводятся результаты изучения методами аналитической растровой электронной и оптической микроскопии разнообразных вещественных систем сферической, глобулярной морфологии. Исследованы их микроструктура и химический состав. Установлено несколько генетических типов сфероидов: космогенные железо-оксидные микросферы из мест падения Сихотэ-Алинского метеорита; близкие по составу, но безникелевые железо-оксидные сферулы из позднепермских базитов о-ва Попова и из позднеолигоценых кислых эксплозивных отложений Южного Приморья; сфероидные образования из континентальных Fe–Mn микрокорок; сферические алюмосиликатные и железо-марганцевые конденсатные глобулиты на поверхности газовых каналов и полостей в базальтах; микросфероиды кремнезема в ликвационных центрах кислого вулканического стекла; шаровидные конкреции-фрамбоиды пирита из углеродсодержащих осадков; наносферические образования в структуре благородного опала из месторождения Радужное (Приморье). Состав сфероидов предположительно метеоритного генезиса преимущественно магнетитовый с примесями Ni. Лишь некоторые из них имеют вюститовый (FeO) состав. Близким составом характеризуются и сфероиды из пирокластических пород, но в них отсутствует никель. Сфероиды, выявленные в риолитовых стеклах, имеют кварцевый состав и состоят из ядра и оболочки. Сфероиды, обнаруженные в рудных корках, характеризуются гидроалюмосиликатным и Fe–Mn составами. Последние часто содержат высокие концентрации Co, Ba, Se, иногда Pb – типовых элементов океанического рудогенеза. Распространены также моноцерийнитовые (CeO₂) и фосфатно-редкоземельные сферические образования. Идеальные шарики в благородном опале состоят из чистого кремнезема и молекул воды. При всем разнообразии

условий и сред образования сферических форм вещества управляющими механизмами являются силы поверхностного натяжения (в условиях жидких гетерогенных сред), фактор гравитации и конденсатные явления в условиях закрытых камер. Кооперативность процесса определяет единое состояние вещества и его морфологию.

Ключевые слова: сфероидальные образования, турбулентность, поверхностное натяжение, синергетика, самоорганизация, энергетическая выгодность

Для цитирования: Сафронов П.П., Максимов С.О., Чекрыззов И.Ю. Сферические формы вещества в минеральных комплексах Приморья // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 5. С. 103–123.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824050074>

Original article

Spherical forms of matter in mineral complexes of Primorye

P. P. Safronov, S. O. Maksimov, I. Yu. Chekryzhov

Petr P. Safronov

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Senior Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
psafronov@mail.ru
<http://orcid.org/0009-0001-2034-0833>

Sergey O. Maksimov

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Senior Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
hangar7@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-7705-8524>

Igor Yu. Chekryzhov

Researcher
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
chekr2004@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-0319-8759>

Abstract. The results of studying various mineral systems of spherical and globular morphology using analytical scanning electron microscopy are presented. Their microstructure and chemical composition have been studied. Several genetic types of spheroids have been established: cosmogenic iron-oxide microspherules from the fall sites of the Sikhote-Alin meteorite; similar in composition, but nickel-free iron-oxide spherules from the Late Permian mafic rocks of Popov Island and from the Late Oligocene acidic explosive deposits of Southern Primorye; spheroid formations from continental Fe-Mn microcrusts – spherical aluminosilicate and ferro-manganese condensate globulites on the surface of gas channels and cavities in basalts, silica microspheroids in segregation centers of acidic volcanic glass; nanosphere formations in the structure of noble opal from the Raduzhnoe deposit (Primorye). The composition of the spheroids, presumably of meteorite origin, is predominantly magnetite with Ni impurities. Only a few of them have a wüstite composition (FeO). Spheroids from pyroclastic rocks are also characterized by a similar composition, but they lack nickel. Spheroids identified in rhyolite glasses have a quartz composition and consist of a core and a shell. Spheroids found in ore crusts are characterized by hydroaluminosilicate and Fe-Mn compositions. The latter often contain high concentrations of Co, Ba, Ce, and sometimes Pb, which are typical elements of oceanic ore genesis. Monoclinianite (CeO₂) and phosphate-rare earth spherical formations are also common. The ideal beads in noble opal are composed of pure silica and water molecules. With all the variety of conditions and environments for the formation of spherical forms of matter, the controlling mechanisms

are surface tension forces (in conditions of liquid heterogeneous media), the gravitational factor and condensation phenomena in closed chambers. The cooperativity of the process determines the unified state of the substance and its morphology.

Keywords: spheroidal formations, turbulence, surface tension, synergetics, self-organization, energy benefit

For citation: Safronov P.P., Maksimov S.O., Chekryzhov I.Yu. Spherical forms of matter in mineral complexes of Primorye. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(5):103–123. (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824050074>

Введение

Сферичность форм природного вещества определяется проявлением разнообразных сил, и прежде всего поверхностного натяжения, которое стремится минимизировать поверхность по всем направлениям. Как известно, единственной формой, создающей при заданном объеме минимальную площадь замкнутой поверхности, является сфера. Молекулы поверхностного слоя жидкости обладают избыточной по сравнению с молекулами внутри жидкости потенциальной энергией. Согласно законам классической механики равновесному состоянию отвечает минимум поверхностной энергии, поэтому поверхность жидкости стремится приобрести сферическую форму, имеющую минимальную площадь. На планетарном уровне сферичность планет объясняется центростремительными силами гравитации, заставляющими вещество сжиматься по всем направлениям. Сферические, шаровидные формы – это единственный морфологический тип, присущий планетам.

При многолетних исследованиях преимущественно методами растровой электронной микроскопии различных природных минеральных комплексов установлена широкая распространенность сферических образований разнообразного состава и условий происхождения. Большинство подобных объектов имеет либо конденсатную природу, либо отвечает условиям переохлаждения и несмесимости. Основной целью настоящей работы являлось на примере разнообразных геологических комплексов показать выполнение главного физического принципа эволюции вещества при его фазовых переходах – стремление к минимизации энергетического потенциала, приобретению наиболее выгодной, устойчивой морфологии. Подобное явление особенно наглядно проявляется с переходом от макро- к микро- и нанообъектам, когда определяющее значение приобретает роль поверхностной энергии фаз. Этим обусловлена уникальность морфологии «микромира», часто доступная изучению только методами электронной и силовой (атомарной) микроскопии.

Наиболее полно изучены образования сферической формы эндогенной природы из различных геологических обстановок: микросферы в игнимбритовых комплексах Якутинской вулкано-тектонической структуры (Приморье) [1, 2], в рудах и пирокластике Костеньгинского железорудного месторождения (Дальний Восток России) [3, 4], в вулканогенных железных рудах Эл Лако (Чили) [5], в вулканических породах Курило-Камчатской островной дуги [6, 7, 8], в пирокластических продуктах кальдерного озера Баромби Мбо (Западный Камерун) [9], в гранитоидах Алтая [10], в вулканитах Южного Сихотэ-Алиня [11], в альпийских ультрамафитах Корякского нагорья [12], в эруптивных брекчиях Приазовского массива [13] и т.д. Состав этих образований может быть различным – от металлического и силикатного до смешанного.

Актуальность выполненных исследований заключается в расширении знаний об этих удивительных объектах, часто встречающихся на Земле и несущих генетическую информацию о геологических процессах. Научный интерес представляет проявление сферичности новообразований в различных геологических средах и уникальная когерентность системы, когда она ведет себя как единое целое и как если бы она была вместилищем действующих сил и каждая ее молекула была «информирована» о состоянии системы в целом согласно законам синергетики [14]. Фактически происходит пространственное клонирование первичной флуктуации с мгновенным образованием сферических форм по всему объему вещества.

В настоящей статье приведен обзор особенностей морфологии, размерности и химического состава сферических образований различных природных минеральных систем и сделана попытка объяснить механизм их образования.

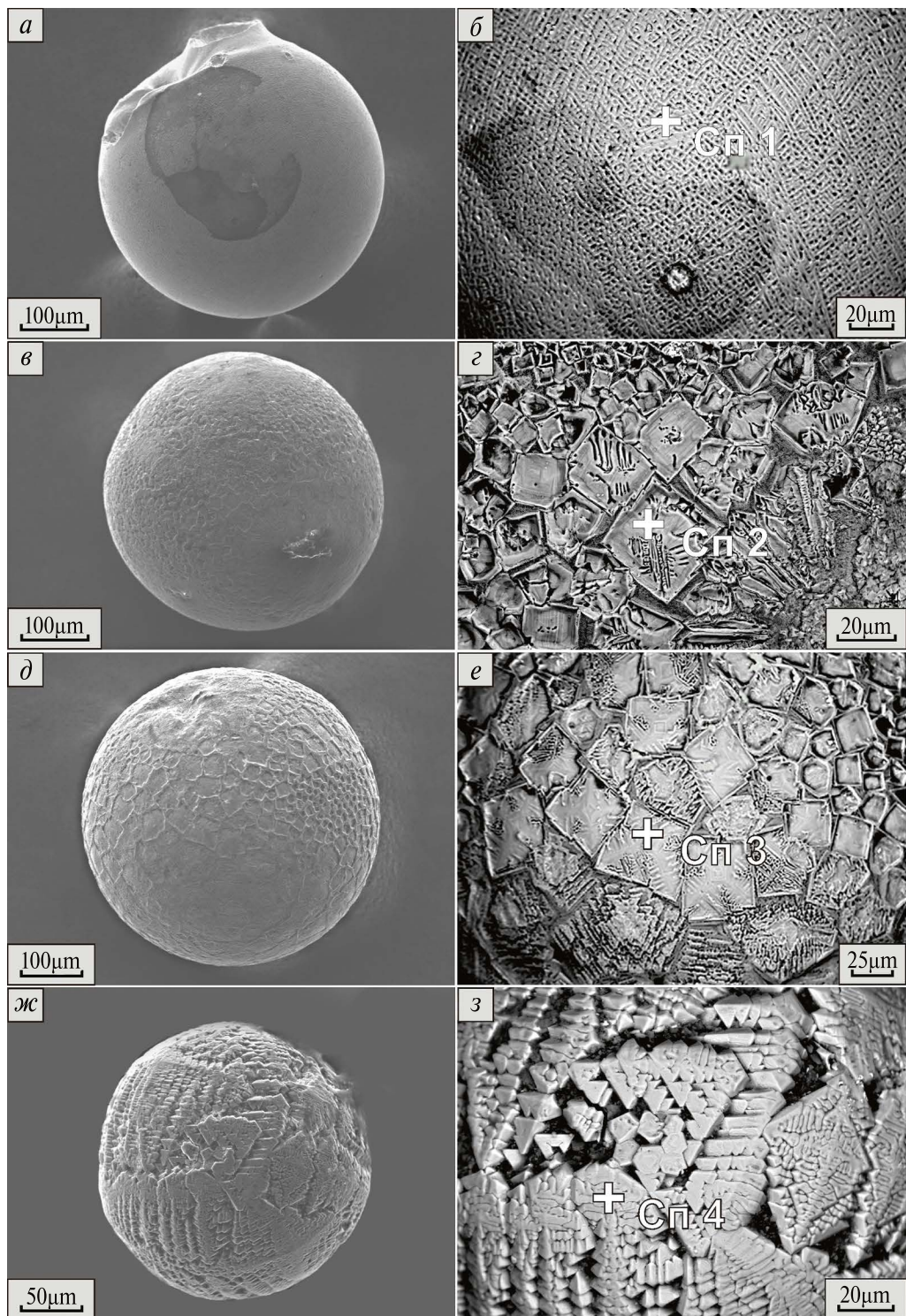


Рис. 1. Микроснимки Fe-оксидных сферул метеоритного происхождения и их микроструктуры: *а, б* – тонкостенная сферула; *в–з* – толстостенные сферулы. Сп1–Сп4 – точки ЭДР анализа. Фото *а, в, д, ж* получены во вторичных электронах; *б, з, е, з* – в упруго-рассеянных электронах

Материал и методы исследования

В качестве материала для исследований использовались образцы, отобранные на различных геологических объектах Приморья. Исследования микроструктурных особенностей и элементного состава проводились методами оптической и растровой электронной микроскопии, а также рентгеноспектрального микроанализа на электронных микроскопах EVO 40XVP и EVO 50XVP (фирмы Carl Zeiss, Германия), оснащенных системами энергодисперсионного рентгеновского (ЭДР) анализа «INCA Energy» (фирмы Oxford instruments, Великобритания). Основная часть работ выполнялась в Центре электронной микроскопии Национального научного центра морской биологии имени А.В. Жирмунского ДВО РАН, часть – в Центре коллективного пользования Дальневосточного геологического института ДВО РАН. Образцы, не проводящие ток, подвергались напылению углеродом. Исследования выполнялись в режимах вторичных и упруго-рассеянных электронов и энергодисперсионного рентгеноспектрального (ЭДР) микрозондирования при различных увеличениях и ускоряющем напряжении электронного пучка 20 кВ.

Результаты исследования

Микросферулы метеоритного происхождения (Сихотэ-Алинь, Приморье)

Fe-оксидные микросферулы метеоритного происхождения (предоставлены чл.-корр. РАН В.Г. Сахно из мест падения в 1947 г. Сихотэ-Алинского метеорита) подразделяются на два вида: с тонкой и толстой внешней оболочкой [15]. Эти полые металлооксидные образования характеризуются разнообразием микроструктур поверхности (рис. 1). Наиболее тонкостенные из них с толщиной оболочки $d \sim 1-3$ мкм обладают субмикронной решетчатой структурой поверхности с заметно выделяющейся концентрической штриховкой (рис. 1, б). Толстостенные сфероиды сложены из микрокристаллитов, структурные формы которых различны: дендритовидные, пилообразно-скелетные, псевдокубические, псевдогексагональные, смешанные и др. (рис. 1, г, е, з). Состав сферул с тонкими внешними оболочками отвечает вюститу (FeO), состав остальных сферул с более толстыми оболочками – магнетитовый (Fe_3O_4). Во всех образцах содержится примесь Ni ($\sim 1-7$ мас. %) (табл. 1), что характерно для метеоритного вещества.

Микросферулы интрузивных образований острова Попова (Приморье)

Изучена морфология микросферул из базитовых позднепермских интрузивов острова Попова (Приморье) [16]. Установлено, что большинство этих микрообъектов

Таблица 1
Состав Fe-оксидных сфероидов метеоритного происхождения (рис. 1, Сп1–Сп4)

Элемент	Спектр							
	Сп 1 (рис. 1, б)		Сп 2 (рис. 1, г)		Сп 3 (рис. 1, е)		Сп 4 (рис. 1, з)	
	мас. %	ат. %	мас. %	ат. %	мас. %	ат. %	мас. %	ат. %
O	21,86	49,48	26,51	57,07	25,73	54,81	27,82	57,49
Fe	73,49	47,65	72,13	42,17	69,89	42,65	64,66	38,29
Ni	4,65	2,87	1,37	0,76	4,38	2,54	7,52	4,22
Сумма	100,00		100,00		100,00		100,00	
Минерал	Вюстит		Магнетит		Магнетит		Магнетит	

отвечает идеальным сфероидам, реже наблюдаются слабо деформированные образования с микрократерными воронками и конусами. Их размеры колеблются от ~200 до ~700 мкм, при этом они обладают различной микроструктурой поверхности, но сходным магнетитовым составом (рис. 2, табл. 2). В одних частицах микроструктура состоит из относительно крупных блоков мозаики различной конфигурации (рис. 2, б), в других – из полиэдров сходных очертаний (рис. 2, з). Характерна также тонкая структура с концентрической направленностью (рис. 2, е). В остальных поверхность слагается дендритоидами и различных форм полиэдрами (рис. 2, ж, з). На поверхности ряда сфероидов установлены почти идеальные дендриты. Среди сфероидов встречаются пустотелые образования, толщина их оболочки обычно составляет около 20 мкм и выше. Другие сфероиды имеют толстые стенки.

Химический состав сфероидов удивительно однообразен и отвечает в основном магнетиту Fe_3O_4 (табл. 2). Лишь в некоторых из них помимо оксида железа зафиксированы десятые доли процента марганца. Кроме того, в некоторых сфероидах встречаются ничтожно малые участки вюститового состава (FeO).

Следует отметить значительное сходство состава и микроструктур сферул из базитов о-ва Попова и эндогенных сферул, обнаруженных в игнимбритовых комплексах Якутинской вулcano-тектонической структуры Приморья [1], а также их безникелевый состав в отличие от космогенных сферул.

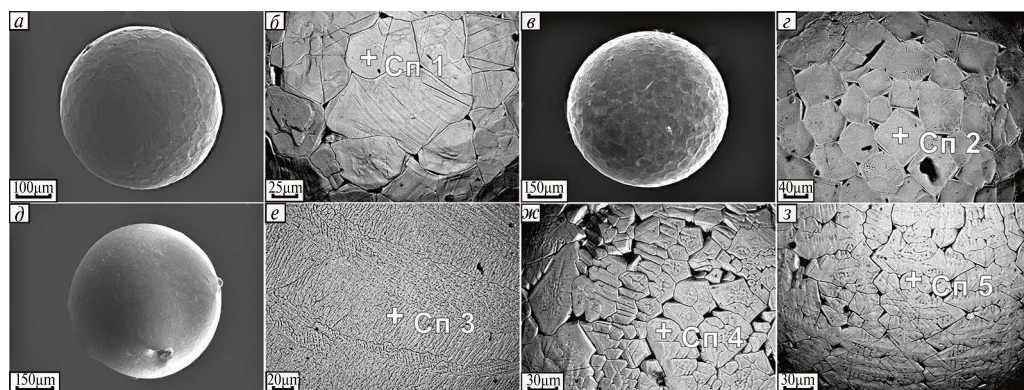


Рис. 2. Микроснимки сферул (а, в, д) и их микроструктуры поверхности (б, з, е, ж, з). Сп1–Сп5 – точки ЭДР анализа. Снимки а, в, д получены во вторичных электронах; снимки б, з, е, ж, з – в упругорассеянных электронах

Таблица 2

Состав Fe-оксидных сфероидов из базитовых комплексов острова Попова Приморья (рис. 2, Сп1–Сп5)

Элемент	Спектр (микроснимки)									
	Сп 1 (рис. 2, б)		Сп 2 (рис. 2, з)		Сп 3 (рис. 2, е)		Сп 4 (рис. 2, ж)		Сп 5 (рис. 2, з)	
	мас. %	ат. %	мас. %	ат. %	мас. %	ат. %	мас. %	ат. %	мас. %	ат. %
О	27,64	57,15	27,86	57,40	27,62	57,11	27,66	57,17	27,63	57,14
Fe	72,36	42,85	71,40	42,15	71,65	42,45	72,34	42,83	72,37	42,86
Mn	–	–	0,74	0,44	0,73	0,44	–	–	–	–
Сумма	100,00		100,00		100,00		100,00		100,00	
Минерал	Магнетит		Магнетит		Магнетит		Магнетит		Магнетит	

Микросферулы из эксплозивных образований Южного Приморья

В кайнозойских кислых эксплозивных образованиях Южного Приморья также обнаружены микросферулы железо-оксидного состава размером 300–400 мкм (рис. 3, *a*). Их верхняя оболочка состоит из полиэдров, либо полиэдров и дендритовидных образований (рис. 3, *б*), что указывает на быструю раскристаллизацию расплава при охлаждении. Состав этих сфероидов отвечает магнетиту Fe_3O_4 (табл. 3, Сп1).

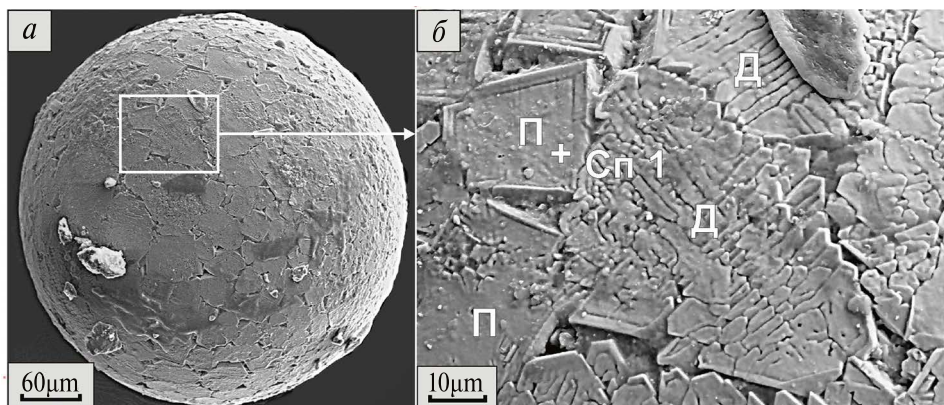


Рис. 3. Микроснимки Fe-оксидной сферулы (*a*) и ее микроструктуры (*б*), состоящие из полиэдров (П) и дендритоидов (Д). Сп1 – точка ЭДР анализа. Снято во вторичных электронах

Таблица 3

Состав сферулы из пирокластических пород Южного Приморья (рис. 3, Сп1)

Ед.	O	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Сумма
Мас. %	27,85	1,70	0,65	0,38	0,35	69,08	100,00
Ат. %	56,31	2,26	0,78	0,44	0,20	40,01	

В этих же породах встречены сферические и эллипсоидальные образования с относительно гладкой поверхностью, имеющие смешанный алюмосиликатно-металлический состав (рис. 4, Сп1, Сп2; табл. 4). Самые мелкие из них размером в несколько микрометров обнаружены на поверхности Fe-оксидных сферул (рис. 4, *a*, *б*). Соотношение в подобных образованиях главных химических элементов имеет необычный для природных земных расплавов (нестехиометричный) состав (табл. 4).

В палеогеновых кислых вулканических породах Приморья присутствуют сфероиды, распределенные в стекловатой матрице (рис. 5, *a*). Они состоят из ядра округлой формы и обрамляющей его сферической оболочки (рис. 5, *б*). Диаметр ядра колеблется от 7–8 до 20–25 мкм. У некоторых сфероидов ядра вообще не просматриваются. Ширина оболочек варьирует в пределах 8–25 мкм. Ядро состоит из микрокристаллической массы, упакованной в шар. Здесь отмечены примеси Cl и Na (Сп1). Скорее всего, ядро состоит из мелкодисперсной смеси кварца SiO_2 и галита NaCl, служившего затравкой (солевая рапа) при подобном ликвационном расслоении расплава. Сфероидальная оболочка имеет весьма плотную структуру и состоит из беспримесного кремнеземистого агрегата (Сп2).

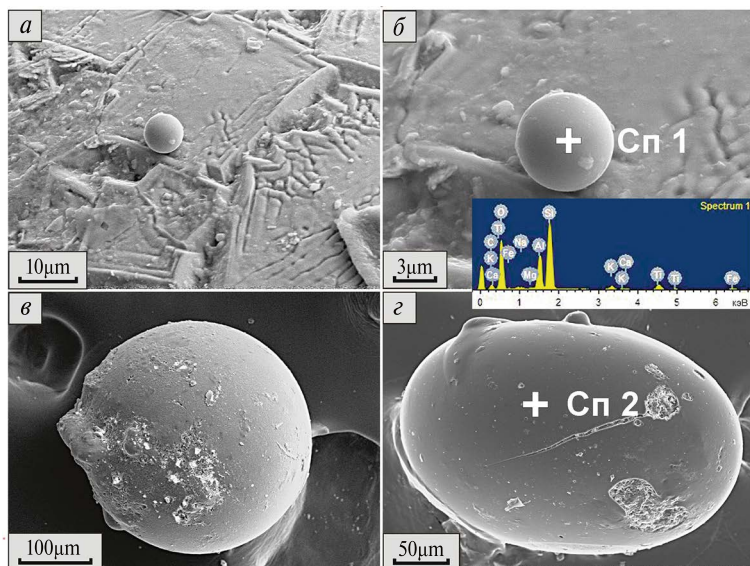


Рис. 4. Микроснимки алюмосиликатных шариков: *а* – шарик на поверхности крупного Fe-оксидного сфероида; *б* – он же при большем увеличении; *в* – алюмосиликатный шарик; *г* – эллипсоидальное железо-алюмосиликатное образование; Сп1 и Сп2 – точки ЭДР анализа. Спектр 1 показан на рисунке. Снято во вторичных электронах

Таблица 4

Состав эллипсоидного образования (рис. 4, Сп2)

Ед.	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Fe	Сумма
Мас. %	48,42	0,69	1,23	9,51	23,90	0,27	1,32	6,11	0,46	8,09	100,00
Ат. %	64,95	0,65	1,08	7,57	18,26	0,18	0,73	3,27	0,21	3,11	

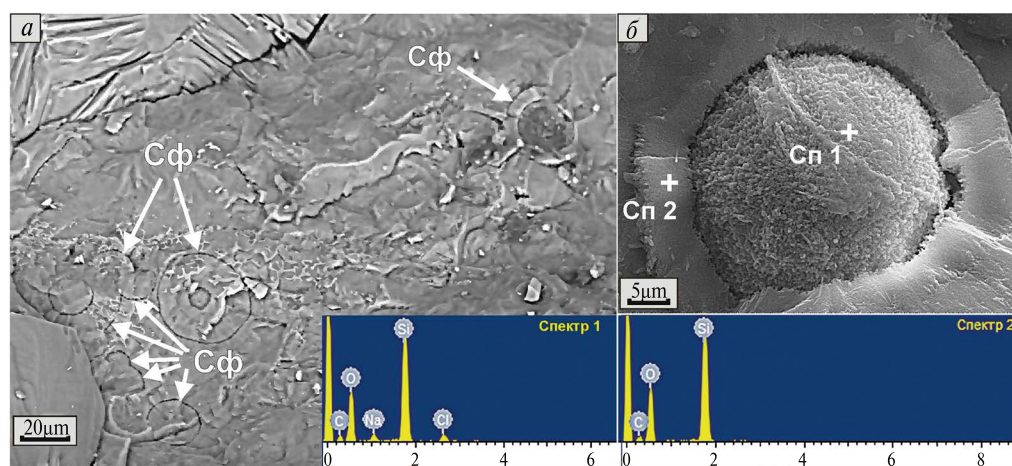


Рис. 5. Сфероидные образования (Сф) в стекловатой вулканической породе (*а*) и отдельный препарированный индивид (*б*) с точками ЭДР анализа Сп1 и Сп2. Снято во вторичных электронах

Сферические формы вещества в газовых полостях и полостях флюидного углекислотного выщелачивания

Исследованы продукты флюидной углекислотной деструкции широкого спектра силикатных пород (базальтов, риолитов, зеленых сланцев), представленные гидроалюмосиликатным матриксом и железомарганцевыми, первично коллоидными, стяжениями, корками, микроконкрециями конденсатной природы, обогащенными Co, Ni, Ba, Ce, Pb [17, 18, 19]. В них установлены сфероидальные и близкие к ним по структуре обособления, размерностью от ~1–5 до 100–200 мкм. Интересен агрегат (рис. 6), состоящий из множества сросшихся сфероидов Co–Ni–Fe–Mn–O состава (табл. 5), выполняющий газовые полости в базальтах Борисовского вулкана (Западное Приморье).

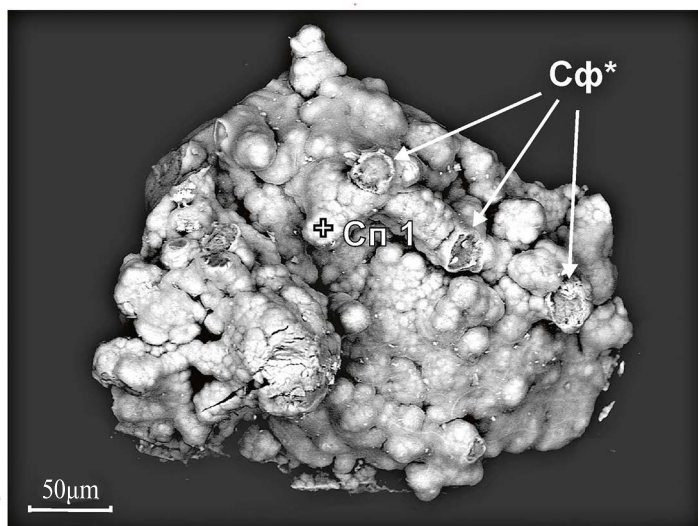


Рис. 6. Глобулярная структура Co–Ni–Fe–Mn–O корки по аргиллизированному базальту. На некоторых сфероидах (Сф*) деформирована внешняя оболочка и обнажено ядро. Снято в упруго-рассеянных электронах

Таблица 5

Состав Co–Ni–Fe–Mn–O корки по аргиллизированному базальту (рис. 6, Сп1)

Ед.	O	F	Mg	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe	Co	Ni	Сумма
Мас. %	32,98	1,93	1,83	8,54	9,27	0,23	2,23	29,68	8,14	1,48	3,69	100,00
Ат. %	55,39	2,73	2,03	8,51	8,87	0,19	1,49	14,52	3,92	0,67	1,69	

Встречаются континентальные железомарганцевые корки, стяжения, состоящие из сфероидальных выделений Co–Fe–Mn–O и Co–Ni–Fe–Mn–O состава, покрытых густой сетью жгутиковых новообразований аналогичного состава (рис. 7).

Среди кобальто-никелевых Fe–Mn корок, развитых по базальтам Борисовского вулкана, распространены разновидности, где первично коллоидное вещество, образует агрегат сросшихся сфероидальных образований с порфиоровыми выделениями кристаллов гидрооксидов, близких по составу голландиту (Co–Ni–Ba–Fe–Mn–O) (рис. 8, табл. 6) и в целом подобных составу основной матрицы.

В полостях газовых каналов в базальтах Барановского вулкана установлены участки конденсатного отложения площадью ~400–500 мкм с микро- и наноглобулярными новообразованиями гидроалюмосиликатного и металл-гидрооксидного состава (рис. 9, а).

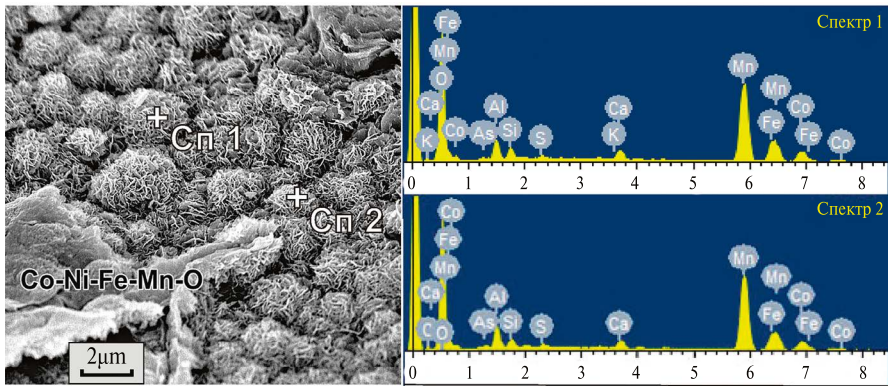


Рис. 7. Микроснимок участка кобальтоносной железомарганцевой корки по базальту, образованной тесно скомпонованными сфероидами, состоящими из ядра и внешней моховидной оболочки. На матрице отложилось Co–Ni–Fe–Mn-гидрооксидное вещество. Сп1 и Сп2 – точки ЭДР анализа. Снято в упруго-рассеянных электронах

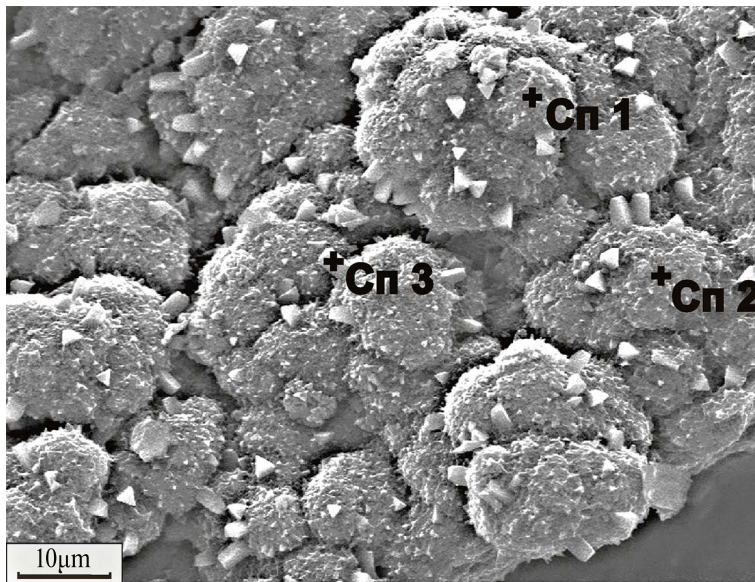


Рис. 8. Сфероидальные микрообразования Ni–Co–Ba–Fe–Mn-гидрооксидной корки с порфиroidной структурой. Сп1, Сп2 и Сп3 – точки ЭДР анализа. Снято во вторичных электронах

Таблица 6

Элементный состав Ni–Co–Ba–Fe–Mn-гидрооксидной корки, состоящей из сфероидальных образований и порфировых выделений голландита (рис. 8, Сп1, Сп2, Сп3)

Спектр	Ед.	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe	Co	Ni	Ba	Сумма
1	Мас. %	39,98	3,42	1,40	1,94	0,45	1,99	44,40	1,78	1,19	1,11	2,33	100,00
	Ат. %	67,21	3,78	1,40	1,85	0,31	1,34	21,74	0,86	0,54	0,51	0,46	
2	Мас. %	33,43	3,59	0,79	0,98	0,45	2,10	50,35	2,00	2,05	1,26	2,99	100,00
	Ат. %	61,54	4,35	0,86	1,03	0,34	1,54	26,99	1,05	1,02	0,63	0,64	
3	Мас. %	37,94	4,28	0,81	0,78	0,72	2,39	48,59	1,26	1,17	0,96	1,10	100,00
	Ат. %	65,25	4,84	0,82	0,76	0,51	1,64	24,33	0,62	0,55	0,45	0,22	

При увеличении видно, что микрокорки состоят из микросфероидного агрегата широкого размерного ряда от ~ 2 мкм до 20–50 мкм (рис. 9, б–д). Участок 1 – состав Fe–Mn-гидрооксидный с примесями Ba и Ce (табл. 7, Сп1, Сп2). Участок 2 на том же рисунке имеет гидроалюмосиликатный состав с повышенным содержанием Mn и Fe (табл. 7, Сп3, Сп4). Кроме того, в газовой полости базальта (рис. 9, а) наблюдается участок 3 с выделениями микро-, наноглобулярного Ce–Co–Ba–Fe–Mn-гидрооксидного конденсата. Среди массы субсферических выделений Fe–Mn-гидрооксидного состава размером от долей микрометра

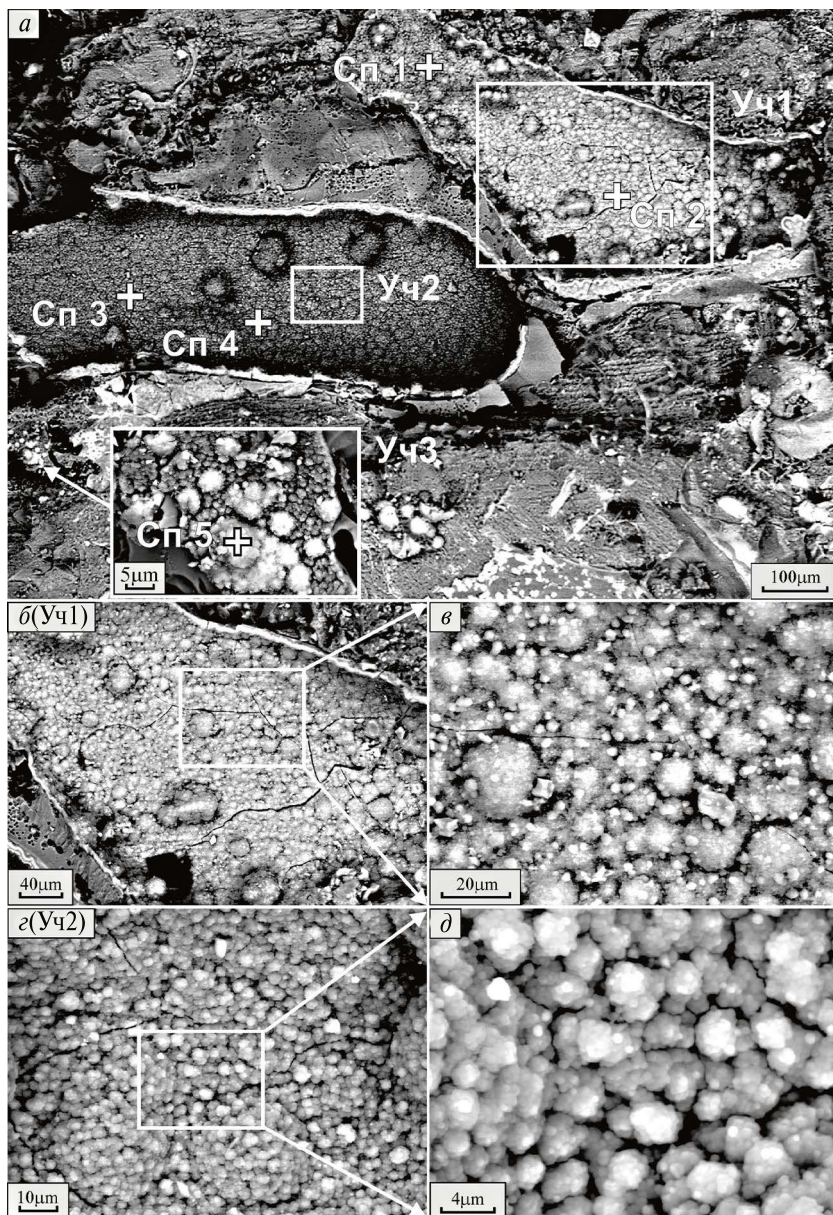


Рис. 9. Микроснимки полости газового канала в базальте, выстланного микро- и наноглобулярными новообразованиями гидроалюмосиликатного и металл-гидрооксидного состава: а – общий вид полости с выделенными для изучения участками Уч1, Уч2, Уч3; б(Уч1) – участок 1 при большем увеличении, в нем выделен участок, показанный при большем увеличении на снимке в; з(Уч2) – участок 2 при большем увеличении, в нем выделен участок, показанный при большем увеличении на снимке д; Участок 3 – микро-, наноглобулярный Ce–Co–Ba–Fe–Mn-гидрооксидный конденсат. Сп1–5-0 Сп5 – точки проведения ЭДР анализов. Снято в упруго-рассеянных электронах

Составы глобулярных выделений в полости газового канала (рис. 9, Сп1–Сп5)

Спектр	O	F	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Co	Ba	Ce	Сумма
Состав, мас. %															
1	29,92	–	–	8,64	12,57	0,77	0,50	1,67	3,27	24,95	11,81	–	4,65	1,25	100,00
2	25,03	1,05	–	7,00	11,75	0,65	–	2,00	4,30	26,30	14,57	–	4,56	2,80	100,00
3	55,61	–	0,40	16,94	18,45	–	0,22	0,36	0,32	6,28	1,42	–	–	–	100,00
4	52,22	–	0,48	17,11	18,51	–	0,51	0,46	0,56	8,70	1,45	–	–	–	100,00
5	31,62	–	–	3,95	6,34	0,59	–	1,35	1,25	38,09	7,20	1,29	6,52	1,81	100,00
Состав, ат. %															
1	53,53	–	–	9,16	12,81	0,71	0,37	1,19	1,95	13,00	6,05	–	0,97	0,25	
2	48,12	1,69	–	7,98	12,87	0,65	–	1,53	2,76	14,73	8,03	–	1,02	0,62	
3	70,39	–	0,34	12,71	13,30	–	0,11	0,18	0,14	2,32	0,51	–	–	–	
4	68,04	–	0,41	13,22	13,74	–	0,27	0,24	0,24	3,30	0,54	–	–	–	
5	59,32	–	–	4,40	6,77	0,58	–	1,01	0,78	20,81	3,87	0,66	1,43	0,39	

до 2–4 мкм встречаются более крупные обособления размером ~6–10 мкм, содержащие Ce, Co и Ba (табл. 7, Сп5).

Следует отметить, что тенденция к образованию сферических форм в Fe-Mn первично коллоидных корках – широко распространенное явление. На рис. 9, з, д показаны типичные участки с многочисленными сфероидальными образованиями в одной из базальтовых полостей. Здесь на матриксе, состоящем из плотно сросшихся наноглобул, расположены многочисленные более крупные глобулы гидроалюмосиликатного состава.

Приведенный пример флюидной деструкции остывающего базальтового расплава отражает уникальное явление, когда в относительно закрытой системе при взаимодействии флюид–порода, за счет базальтового вещества образуется рудный коллоидный конденсат, близкий по составу типовым океаническим кобальтоносным Fe-Mn коркам, фактически представляя модель океанического рудогенеза с учетом дальнейшего рециклинга образовавшегося рудного вещества через толщу океанических вод [19].

Из других типов сферических новообразований отметим глобулярные конденсатные выделения аморфного кремнезема на поверхности щелочного базальта (рис. 10). Здесь же присутствует глобула солевой фазы $\text{Na}_{0,73}\text{K}_{0,27}(\text{Cl}_{0,98}\text{P}_{0,02})$.

Церианитовые (CeO_2) субсферические выделения распространены в аргиллизированном матриксе зеленых сланцев из фундамента Павловского угольного месторождения (рис. 11, а). Размеры этих частиц колеблются от ~4 мкм до первых сотен нанометров. Их состав (табл. 8, Сп1) высокоцериевый с концентрацией Ce до 37,31 мас.%. Здесь же встречены обособленные идеальные шарики, состоящие из гидроксидов редкоземельных элементов La и Ce (рис. 11, б).

В полостях выщелачивания углекислотно аргиллизированных базальтов на Гусевском месторождении каолина (Южное Приморье) распространены смектитовые сфероидные агрегаты, состоящие из ядра и относительно тонкой оболочки (рис. 12, а). Их размеры варьируют в диапазоне от ~5–10 мкм до ~60–80 мкм. Установлены также скопления шаровидных частиц смектит-сидеритового состава (рис. 12, б; 13, в).

Встречаются участки рудных корок площадью в несколько десятков сантиметров, состоящие из слившихся относительно крупных сфероидов широкого размерного ряда (рис. 13, а). В кайнозойских туфогенно-осадочных отложениях усть-суйфунской свиты (Южное Приморье) установлены Ce-Fe-Mn-гидроксидные микроконкреции в виде сфероидов диаметром до первых миллиметров (рис. 13, б).

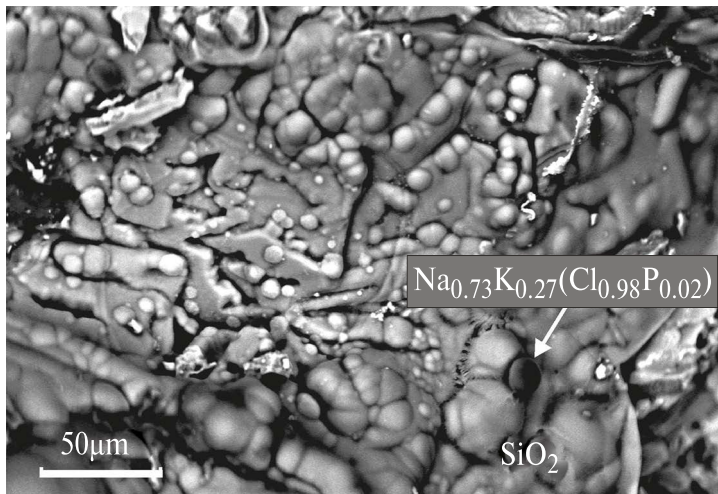


Рис 10. Глобулярные образования конденсата аморфного кремнезема на поверхности щелочного базальта (Борисовский вулкан). Зафиксирована глобула галоидной солевой фазы $\text{Na}_{0,73}\text{K}_{0,27}(\text{Cl}_{0,98}\text{P}_{0,02})$. Снято в упруго-рассеянных электронах

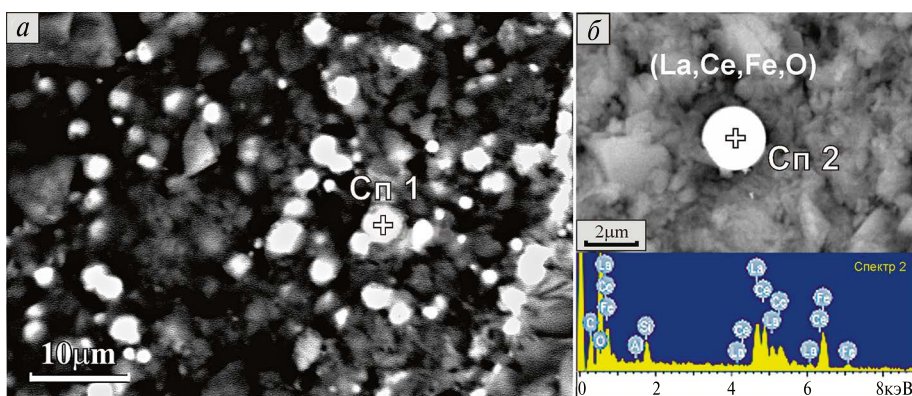


Рис. 11. Церианитовые (CeO_2) сферические выделения в аргиллизированном матриксе зеленого сланца (область Павловского угольного месторождения) (а); б – шарик La-Ce-Fe-гидрооксидного состава в гидроалюмосиликатной матрице, внизу его ЭДР спектр. Снимки (а) и (б) в упруго-рассеянных электронах

Таблица 8

Состав церианитовых выделений в аргиллизированном матриксе зеленых сланцев (рис. 11, а, Сп1)

Спектр	Ед.	O	Al	Si	P	Ca	Mn	Fe	Ni	Ce	Сумма
1	Мас. %	34,74	11,79	12,04	0,89	0,41	1,67	1,12	0,03	37,31	100,00
	Ат. %	63,99	12,88	12,63	0,85	0,30	0,89	0,59	0,02	7,85	

Сферические фрамбонды пирита

В Fe-сульфатном, частично гидратированном матриксе алюмосиликатного состава из углеродсодержащих кайнозойских отложений Приморья, встречены целые поля

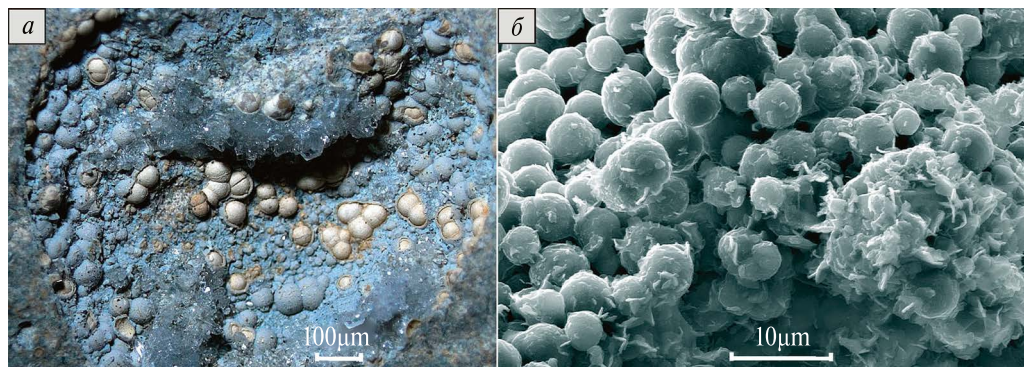


Рис. 12. Сметитовые сфероидные агрегаты из полостей в углекислотно аргиллизированном базальте (а); б – шаровидные выделения сметит-сидеритового состава (Гусевское месторождение каолина). Снимок (а) получен в оптических лучах, снимок (б) – во вторичных электронах

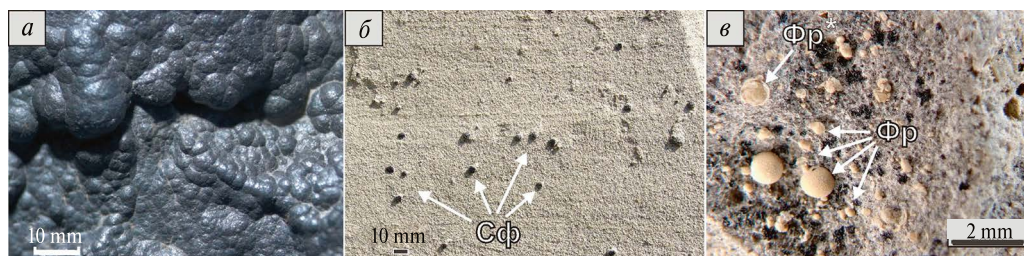


Рис. 13. Сферические формы в различных вещественно-минеральных комплексах: а – морфология гетит-алюмо-ферросигитовой фосфор-ванадиевой корки из полостей выполнения (Павловское угольное месторождение); снимок получен на световом микроскопе; б – сфериды (Сф) зарождающихся Се-Fe-Mn-гидрооксидных микроконкреций в кайнозойских туфогенно-осадочных отложениях; в – фрамбониды (Фр) карбонат-монтмориллонитового состава в углекислотно аргиллизированном базальте (Гусевское месторождение каолина). Снято на световом микроскопе

(~200–300 мкм²) скоплений изометрических, почти округлых частиц пирита размером от нескольких сотен нанометров до 1–2 мкм (рис. 14, а). Среди этого множества выделений пирита наблюдаются шаровидные и близкие к ним образования фрамбонидов размером от 10 до 25 мкм (рис. 14, а, б). Природная сборка кристалликов пирита FeS₂ в шаровидные образования ранее отмечалась во многих работах, например [20, 21]. Фрамбониды пирита

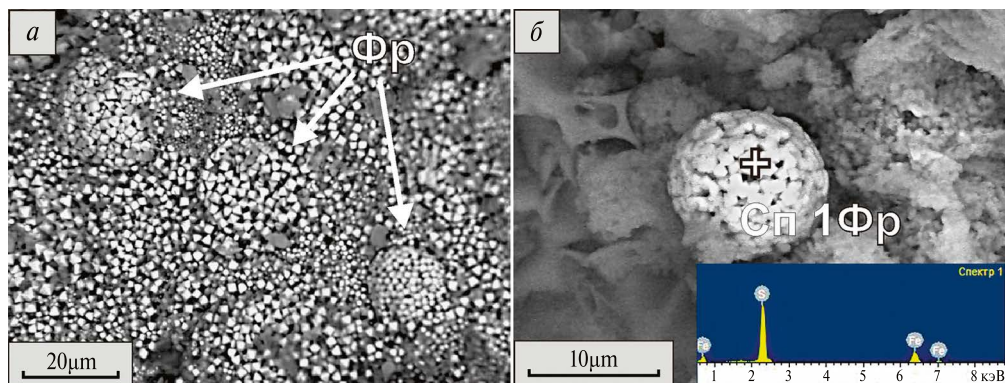


Рис. 14. Фрамбониды пирита (Фр) среди массовых выделений микрокристалликов пирита (а); б – обособленный фрамбонид пирита с точкой ЭДР анализа Сп1. Снято в упруго-рассеянных электронах

часто встречаются в почвах и различных осадочных породах и считаются продуктами бактериальной или термохимической сульфат-редукции [21].

Сферическая наноструктура благородного опала

Изучено внутреннее строение благородного опала месторождения Радужное, (Приморье) [22, 23]. На электронном микроскопе зафиксирована наноглобулярная структура этого минерала (рис. 15). Наблюдается закономерное послойное строение кристалла. Каждый слой в нем состоит из множества шариков, имеющих одинаковые размеры ~ 170 нм в диаметре.

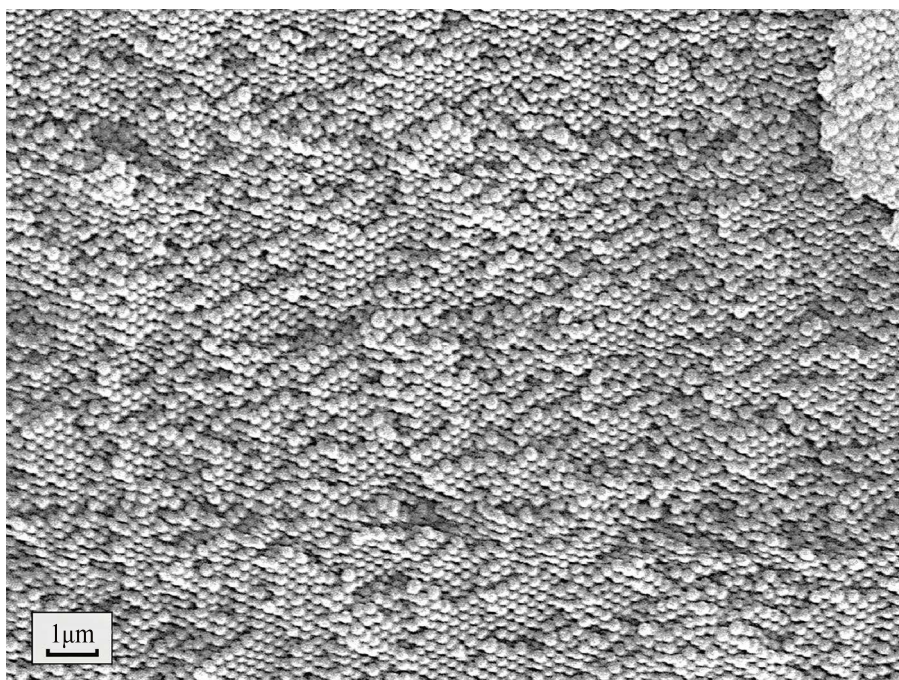


Рис. 15. Микроструктура благородного опала. Снято во вторичных электронах. Образец предоставлен д.г.-м.н. С.В. Высоцким

Обсуждение результатов

Исследование сферических форм вещества показало существование различных генетических групп сфероидов. Среди почти двух десятков рассмотренных типов первый имеет космическое происхождение, остальные – земное. Их генезис различный, хотя механизмы образования могут быть сходными и с точки зрения энергетической выгоды сферических форм они подобны. При этом в группе земного происхождения для каждого из видов сферических образований четко проявлены свои особенности микроморфологии, обусловленные различным составом вещества и разными физико-химическими условиями. Согласно [14, 24–28] массовое образование частиц сферической формы отражает элементы самоорганизации вещества.

Для объяснения генезиса микросферул Fe-оксидного состава из мест падения Сихотэ-Алинского метеорита обратимся к физическому понятию турбулентности, возникающей в газовых, жидких либо гетерофазных средах. Впервые количественные условия перехода к турбулентности были экспериментально исследованы О. Рейнольдс в 1883 г. [29] при изучении течения воды в трубах. В дальнейшем вопросами турбулентности в различных средах занимались многие ученые [30–33].

Отметим, что эти полые металлооксидные образования имеют разную толщину внешних оболочек, т.е. подразделяются на тонкостенные и толстостенные (рис. 1), и обладают разным составом (табл. 1): первые имеют вюститовый состав FeO , вторые – магнетитовый Fe_3O_4 . Кроме того, они характеризуются разнообразием микроструктур поверхности. У одних сферул она относительно гладкая, у других обладает мозаичной микроструктурой (рис. 1, б, г, е, з). Установленные для этих двух групп сфероидов признаки – разная толщина оболочек, характер их морфологического строения и специфический состав позволили реконструировать генезис этих округлых частиц. По-видимому, эти сферулы образовались при столкновении раскаленного железного метеорита с Землей или с ее относительно плотной атмосферой. Тонкостенные сфероиды с решетчатой микроструктурой и концентрической штриховкой, обладающие вюститовым составом, вероятно, образовались во время удара метеорита путем разбрызгивания «раскаленной» его периферической части, наиболее жидкой и менее вязкой поверхностной оболочки. Жидкие капли в виде «мыльных пузырей» отделялись от метеорита и разлетались с высокой кинетической скоростью. При их движении в воздушной среде в зоне их полета возникла турбулентность (завихрения) воздушных масс, приводящая к вращению капель, вследствие чего последние приобрели практически идеальную шаровидную форму. Двигаясь далее с высокой линейно-вращательной скоростью в воздушной среде, шарики окислялись, быстро охлаждались и закаливались с фиксацией возникшего микрорельефа поверхности и соответствующего оксидного состава железа. Толстостенные сфероиды с мозаично-кристаллитным строением и магнетитовым составом произошли примерно таким же способом, но их источником служили относительно более глубокие слои метеорита, не прогретые до температуры плавления и, следовательно, обладавшие большей вязкостью. Подвергнутые абляции «полужидкие» частицы (капли) имели более толстые стенки, обладали существенно большей массой, чем тонкостенные, и поэтому остывали после отрыва во время движения в воздушной среде гораздо дольше, что и обусловило особенности их микроструктур и значительно большую степень окисленности (до Fe_3O_4). Во всех изученных образцах содержится ~1–7 мас. % Ni – дополнительное свидетельство их космического (метеоритного) происхождения. Безусловно, другая часть сфероидов возникла в результате сдувания капель с раскаленной поверхности метеорита (абляции [34]) еще на стадии его приближения к земной поверхности. Наличие мозаичной микроструктуры на поверхности шариков (сфероидов) указывает на их расплавленное происхождение.

Fe-оксидные сфероиды из позднепермских базитов о-ва Попова (рис. 2) и из кайнозойских кислых эксплозивных образований Южного Приморья (рис. 3) подобны сферулам, обнаруженным в игнимбритовых комплексах Якутинской вулкано-тектонической структуры Приморья [1] и, видимо, так же как и последние, имеют эндогенный генезис. По сравнению с космогенными сферулами (рис. 1), они, обладая почти аналогичной микроструктурой поверхности (рис. 2, 3) и сходным химическим составом, не содержат никель.

Показательно, что все изученные сфероиды, несмотря на их образование в различных природных средах, имеют близкие размерные параметры в несколько сотен микрометров, что также может указывать на сходный механизм (но, вероятно, не природу) образования. С другой стороны, находки подобных сферул в кислых вулканических породах [1, 2], в вулканических пеплах Камчатки [6], как и в тефроидных отложениях усть-суйфунской свиты Южного Приморья в ассоциации с нестехиометричной алюмосиликатно-железо-титанистой фазой, предполагают и иной их генезис. В литературных источниках для различных природных ассоциаций часто приводятся данные о парагенезисе магнетитовых сферул с силикатными шариками, эллипсоидами колбочками стекла подобного экзотического состава. Природа их образования лежит, по-видимому, в основе единого механизма формирования и металлических сферул и может быть обусловлена кавитационными явлениями, согласно [35]. В экспериментах, проведенных с базальтами, в результате их резкого шокового перегрева в высокобарической области также обнаружено интересное явление массового образования подобных сфероидов железа [36].

Механизмы ликвационного распада силикатных расплавов с формированием характерных глобулярных структур хорошо изучены экспериментально при исследованиях природных и технических стекол и также свидетельствуют о выполнении определяющего физического закона: минимизации поверхности двух несмешивающихся жидкостей, приобретении ими или одной из них сферических форм.

Сфероидальные формы установлены в Fe–Mn рудных корках континентального генезиса, образованных по различным силикатным породам в процессе их флюидной (углекислотной) деструкции (аргиллизации) (рис. 6–13). Распространенность сферических форм в подобных образованиях отражает конденсатную природу отложения вещества в полостных камерах, кавернах. Одновременно специфическая микроструктура поверхности этих гидрооксидных и алюмосиликатных сферических новообразований с развитием волокнистых, игольчатых, жгутиковых форм фиксирует переохлажденное состояние и, соответственно, рост скелетных форм кристаллов. Подобные рудные гидрооксидные конденсаты характеризуются кобальтоносным железомарганцевым составом, иногда с высокими содержаниями церия и бария.

Встречаются относительно крупные глобулярные агрегаты Co–Ba–Fe–Mn гидрооксидного состава (~1–2 мм), состоящие из целой группы слившихся между собой сфер, размеры которых варьируют в широком диапазоне – от нескольких сотен микрометров до 2–5 мм (рис. 13, а). Формирование таких структур происходит, вероятно, по следующему механизму. Сначала возникает несколько центров конденсации вещества, из которых растут сферулы. Но при высокой скорости его притока начальные шарики не успевают вырасти до больших размеров. На их внешней оболочке возникают новые центры нуклеации, из которых вырастают подобные микросферы, и этот процесс продолжается до тех пор, пока не прекратится приток вещества, либо пока не изменятся P–T условия.

Сферичность, глобулярность вещества – характерная структурная особенность для испытанных ликвацию, высокофлюидизированных кислых вулканических пород. Причем она создается мгновенно по всему объему. Устанавливается размерный шаг зарождения центров глобулей, как будто их нуклеация задается дальнедействующими силами. При ликвационном распаде расплавов важную роль в определении сферичности играет такая физическая функция, как краевой угол смачивания. При его величине более 60° лквирующая фаза приобретает сферическую форму.

Особый класс округлых образований установлен в полостях базальтовых пород (рис. 9, 12, 13, а), возникающих в результате газовой продувки либо флюидной деструкции, аргиллизации базальтового вещества под воздействием наложенных процессов углекислотного выщелачивания с массовым образованием свободного пространства. Это происходит в неравновесных условиях при интенсивном взаимодействии флюид–порода, экстракции компонентов из базальтовой матрицы и поступлении вещества извне в составе флюида. Отложение конденсата осуществляется на стенках полостей с проявлением минимизации поверхностной энергии образующихся фаз, приобретением ими сферичности.

Главную роль в образовании сферических, глобулярных структур играет энергетическая выгодность процесса, так как сфера является прямым отражением стремления вещества к минимизации поверхностной энергии. Отметим также, что по мере уменьшения размерности конденсатных новообразований их морфология приобретает все более идеальные сферические формы. Наиболее наглядно законы синергетики проявлены на примере кристаллической структуры благородного опала (рис. 15). Здесь хорошо видна слоистая структура этого минерала, причем каждый слой состоит из идеальных плотно упакованных шариков. При кристаллизации минерала происходит фрактальное развитие объекта с повторением структур (упорядочением) и увеличением его размера. В целом фрактальность относится к любому типу кристаллов. Фактически идет копирование и клонирование кристаллической ячейки. Важен и другой пример самоорганизации вещества. Скопления микрофаз пирита, имеющих часто идеально сферические формы (рис. 14, а), самоорганизуются в более крупные подобные сферические образования (фрамбонды) размером ~10–25 мкм и более, иногда распределенные в матрице с определенным шагом в несколько десятков микрометров.

Заключение

Методами главным образом аналитической растровой электронной микроскопии охарактеризованы разнообразные сферические формы вещества из различных вещество-минеральных комплексов Приморья. Распространенность глобулярных структур и дисперсных сфероидов, образовавшихся в нестационарных условиях, связанных с флюидной

деструкцией, конденсатным отложением вещества, а также в высокодисперсных средах, обладающих огромной поверхностной энергией, свидетельствует, что главный управляющий механизм сферичности для подобных систем определялся энергетической целесообразностью – минимизацией энергетического потенциала для приобретения наиболее стабильного устойчивого состояния. На примере исследованных природных объектов отчетливо проявляется и другой природный механизм – стремление к самоорганизации: агрегированию, укрупнению возникших микрочастиц, в данном случае глобулярного вещества. В принципе он лежит в основе главного рудообразующего процесса и также отражает стремление к минимизации энергетического потенциала, приобретению стабильного состояния выделившихся из кристаллических решеток минералов рудных элементов-примесей, рудных кластеров. Увеличение массы вещества за счет переноса и агрегирования, скопления родственных частиц – единственный способ в таких условиях обеспечить подобную минимизацию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гребенников А.В. Эндогенные сферулы мел-палеогеновых игнимбритовых комплексов Якутинской вулcano-тектонической структуры (Приморье) // Записки РМО. 2011. Т. 140, № 3. С. 56–68.
2. Гребенников А.В., Щека С.А., Карабцов А.А. Силикатно-металлические сферулы и проблема механизма игнимбритовых извержений (на примере Якутинской вулcano-тектонической структуры) // Вулканология и сейсмология. 2012. № 4. С. 3–22.
3. Бердников Н.В., Невструев В.Г., Кепежинская П.К. и др. Силикатные, железо-окисные и золото-медь-серебряные микросферулы в рудах и пирокластике Костеньгинского железорудного месторождения (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. 2021. Т. 40, № 3. С. 67–84.
4. Коновалова Н.С., Бердников Н.В., Невструев В.Г. Микросферулы в рудах и пирокластике Костеньгинского железорудного месторождения (Малый Хинган, Дальний Восток России) // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит: материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием (Владивосток, 19–22 сентября 2023 г.). Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2023. С. 264–267. ISBN 978-5-7444-5547-7.
5. Nystrom J.O., Henriquez F., Naranjo J.A. et al. Magnetite spherules in pyroclastic iron ore at El Laco, Chile // American Mineralogist. 2016. Vol. 101. P. 587–595.
6. Сандиминова Е.И., Главатских С.Ф., Рычагов С.Н. Магнитные сферулы из вулканогенных пород Курильских островов и Южной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. 2003. № 1. С. 135–140.
7. Сандиминова Е.И. Сферические минеральные образования вулканических пород Курильских островов и Камчатки: автореф. дис. ... к.г.-м.н. Владивосток, 2008. 25 с.
8. Главатских С.Ф., Генералов М.Е. Когенит из минеральных ассоциаций, связанный с высокотемпературными газовыми струями БТТИ (Камчатка) // Доклады АН. 1996. Т. 346, № 6. С. 796–799.
9. Cornen G., Bandet Y., Gresse P. et al. The nature and chronostratigraphy of Quarternary pyroclastic accumulations from Lake Barombi Mbo (West-Cameroon) // J. of Volcanology and Geothermal Research. 1992. № 51. P. 357–374.
10. Баженов А.И., Полуэктова Т.И., Новоселов К.Л. Ферротитанистые оксидные глобулы из гранитоидов Элекмонарского массива // Геология и геофизика. 1991. № 12. С. 50–57.
11. Филимонова Л.Г., Арапова Г.А., Боярская Р.В. и др. О типоморфных особенностях магнитных сферул орогенных вулканитов Южного Сихотэ-Алиня // Тихоокеанская геология. 1989. № 4. С. 78–84.
12. Рудашевский Н.С., Мочалов А.Г., Дмитренко Г.Г. и др. Самородные металлы и карбиды в альпинотипных ультрамафитах Корякского нагорья // Минералогический журнал. 1987. Т. 9, № 4. С. 71–82.
13. Цымбал С.Н., Татаринцев В.И., Гаранин В.К. и др. Закаленные частицы из эруптивной брекчии зоны сочленения Приазовского массива с Донбассом // Записки ВМО. 1985. Т. 114, вып. 2, С. 224–228.
14. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. М.: Прогресс, 1986. 432 с.
15. Сафронов П.П., Сахно В.Г. Результаты электронно-микроскопического изучения микроструктуры и состава Fe-оксидных сфероидов метеоритного происхождения // XXIV Российская конференция по электронной микроскопии (РКЭМ-12): тезисы докладов (Черноголовка, 29 мая – 1 июня, 2012 г.). С. 375–376. ISBN 978-5-89589-060-8.

16. Сафронов П.П., Гаврилов А.А., Максимов С.О. Микроструктуры поверхности Fe-оксидных сфероидов из базитовых комплексов острова Попова (Приморье): материалы XVI Российского симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (Черноголовка, 29 мая – 2 июня 2009 г.). М., 2009. С. 206.
17. Максимов С.О., Сафронов П.П., Чекрыжов И.Ю., Кузьмина Т.В. Флюидная природа углеродизации и объемной аргиллизации на Гусевском месторождении фарфоровых камней (Южное Приморье) // Доклады АН. 2012. Т. 444, № 4. С. 434–439.
18. Максимов С.О., Сафронов П.П. Образование кобальтоносных железомарганцевых корок при флюидной деструкции силикатного вещества // Доклады АН. 2016. Т. 466, № 4. С. 467–472.
19. Максимов С.О., Сафронов П.П. Геохимические особенности и генезис континентальных кобальтоносных железомарганцевых образований // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 7. С. 931–950.
20. Савельева О.Л., Савельев Д.П., Чубаров В.М. Фрамбоиды пирита в углеродистых породах Смагинской ассоциации п-ова Камчатский мыс // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2013. № 2. С. 144–151.
21. Ивлев А.А. Образование толщ, богатых органическим веществом, в свете новой модели глобального цикла углерода // Геология нефти и газа. 2019. № 5. С. 83–90. DOI: 10.31087/0016-7894-2019-5-83-90.
22. Высоцкий С.В., Карабцов А.А., Курявый В.Г., Сафронов П.П. Благородные опалы месторождения Радужное (северное Приморье, Россия): проблема строения и генезиса // Перспективные направления развития нанотехнологий в ДВО РАН. Владивосток, 2007. С. 140–154.
23. Высоцкий С.В., Баркар А.В., Курявый В.Г., Чусовитин Е.А., Карабцов А.А., Сафронов П.П. Гидротермальные благородные опалы: проблемы строения и генезиса // Записки РМО. 2009. № 6. С. 62–70.
24. Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. 230 с.
25. Haken H. The Science of Structure: Synergetics. New York: Van Nostrand Reinhold, 1984. 255 p. ISBN 100442237030. OCLC9644102.
26. Хакен Г. Синергетика. М.: Прогресс, 1986.
27. Хакен Г. Информация и самоорганизация. М., 1991.
28. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах: от диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. М.: Мир, 1979. 512 с.
29. Reynolds O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels // Phil. Trans. Roy. Soc. London. 1883. Vol.174.
30. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение / пер. с англ. В.Ф. Алымова, В.В. Альтова, В.С. Войтешонка, А.М. Дуюбинского, А.М. Кудина; под ред. Г.С. Глушко. М.: Мир, 1974.
31. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 414 с. ISBN 5-286-00059-2.
32. Аджемян Л.Ц., Налимов М.Ю. Принцип максимальной хаотичности в статистической теории развитой турбулентности. 1. Однородная изотропная турбулентность // Теоретическая и математическая физика. 1992. Т. 91, № 2. С. 294–308.
33. Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели. Изд. 2-е, испр. и доп. М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2010. 332 с.
34. Саченко А.В. Абляция // Физика твердого тела: энциклопедический словарь / гл. ред. В.Г. Барьяхтар. Киев: Наукова думка, 1996. Т. 1. 656 с. ISBN 5-12-003771-2.
35. Новгородова М.И., Гамянин Г.Н., Жданов Ю.Я., Агаханов А.А., Дикая Т.В. Микросферулы алюмосиликатных стекол в золотых рудах // Геохимия. 2003. № 1. С. 83–93.
36. Генштафт Ю.С., Цельмович В.А., Гапеев А.К. Кристаллизация Fe-Ti оксидных минералов в системе «базальт–ильменит» при высоких давлениях и температурах // Физика Земли. 1999. № 2. С. 25–34.

REFERENCES

1. Grebennikov A. V. Ehdogennye sferuly mel-paleogenovykh ignimbritovykh kompleksov Yakutinskoi vulkano-tektonicheskoi struktury (Primor'e). *Zapiski RMO*. 2011;(3):56–68. (In Russ.).
2. Grebennikov A. V., Shcheka S. A., Karabtsov A. A. Silikatno metallicheskie sferuly i problema mekhanizma ignimbritovykh izverzenii (na primere Yakutinskoi vulkano-tektonicheskoi struktury). *Vulkanologiya i Seismologiya*. 2012;(4):3–22. (In Russ.).

3. Berdnikov N. V., Nevstruev V. G., Kepezhinskas P. K. i dr. Silikatnye, zhelezo-okisnye i zoloto-med'-serebryanye mikroferuly v rudakh i piroklastike Kosten'ginskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya (Dal'nii Vostok Rossii). *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2021;40(3):67–84. (In Russ.).
4. Konovalova N. S., Berdnikov N. V., Nevstruev V. G. Mikroferuly v rudakh i piroklastike Kosten'ginskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya (Malyi Khingan, Dal'nii Vostok Rossii) // *Geologicheskie protsessy v obstanovkakh subduksii, kollizii i skol'zheniya litosfernykh plit*. VI Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem (Vladivostok, 19–22 sentyabrya 2023g., Materialy konferentsii). Vladivostok: Izd-vo DVFU; 2023. S. 264–267. (In Russ.). ISBN 978-5-7444-5547-7.
5. Nystrom J. O., Henriquez F., Naranjo J. A. et al. Magnetite spherules in pyroclastic iron ore at El Lago, Chile. *American Mineralogist*. 2016;101:587–595.
6. Sandimirova E. I., Glavatskikh S. F., Rychagov S. N. Magnitnye sferuly iz vulkanogennykh porod Kuril'skikh ostrovov i Yuzhnoi Kamchatki. *Vestnik KRAUNTs*. 2003;(1):135–140. (In Russ.).
7. Sandimirova E. I. Sfericheskie mineral'nye obrazovaniya vulkanicheskikh porod Kuril'skikh ostrovov i Kamchatki: Avtoreferat dissertatsii ... k.g.-m.n. Vladivostok; 2008. 25 s. (In Russ.).
8. Glavatskikh S. F., Generalov M. E. Kogenit iz mineral'nykh assotsiatsii, svyazannyy s vysokotemperaturnymi gazovymi struyami BTTI (Kamchatka). *Doklady AN*. 1996;346(6):796–799. (In Russ.).
9. Cornen G., Bandet Y., Giresse P. et al. The nature and chronostratigraphy of Quaternary pyroclastic accumulations from Lake Barombi Mbo (West-Cameroon). *J. of Volsanology and Geothermal Research*. 1992;(51):357–374.
10. Bazhenov A. I., Poluehktova T. I., Novoselov K. L. Ferrotitanistye oksidnye globuli iz granitoidov Ehlekmonarskogo massiva. *Geologiya i Geofizika*. 1991;(12):50–57. (In Russ.).
11. Filimonova L. G., Arapova G. A., Boyarskaya R. V. i dr. O tipomorfnnykh osobennostyakh magnitnykh sferul orogennykh vulkanitov Yuzhnogo Sikhoteh-Alinya. *Tikhookeanskaya Geologiya*. 1989;(4):78–84. (In Russ.).
12. Rudashevskii N. S., Mochalov A. G., Dmitrenko G. G. i dr. Samorodnye metally i karbidy v al'pitopnykh ul'tramafitakh Koryakskogo nagor'ya. *Mineralogicheskii Zhurnal*. 1987;9(4):71–82. (In Russ.).
13. Tsymbal S. N., Tatarintsev V. I., Garanin V. K. i dr. Zakalennyye chastitsy iz ehruptivnoi brekchii zony sochleneniya Priazovskogo massiva s Donbassom. *Zapiski VMO*. 1985;114(2):224–228. (In Russ.).
14. Prigozhin I., Stengers I. Poryadok iz khaosa. Novyy dialog cheloveka s prirodoy. M.: Progress; 1986. 432 s. (In Russ.).
15. Safronov P. P., Sakhno V. G. Rezul'taty ehlektronno-mikroskopicheskogo izucheniya mikrostrukturny i sostava Fe-oksidnykh sferoidov meteoritnogo proiskhozhdeniya. *XXIV Rossiiskaya konferentsiya po ehlektronnoi mikroskopii (RKEHM-12)*. Tezisy dokladov (Chernogolovka, 29 maya – 1 iyunya, 2012). S. 375–376. (In Russ.). ISBN 978-5-89589-060-8.
16. Safronov P. P., Gavrilov A. A., Maksimov S. O. Mikrostrukturny poverkhnosti Fe-oksidnykh sferoidov iz bazitovykh kompleksov ostrova Popova (Primor'ye). *Materialy XVI Rossiiskogo Simpoziuma po rastrovoi ehlektronnoi mikroskopii i analiticheskim metodam issledovaniya tverdykh tel* (Chernogolovka, 29 maya – 2 iyunya 2009). M.; 2009. S. 206. (In Russ.).
17. Maksimov S. O., Safronov P. P., Chekryzhov I. Yu., Kuz'mina T. V. Flyuidnaya priroda uglerodizatsii i ob'emnoi argillizatsii na Gusevskom mestorozhdenii farforovykh kamnei (Yuzhnoe Primor'ye). *Doklady AN*. 2012;444(4):434–439. (In Russ.).
18. Maksimov S. O., Safronov P. P. Obrazovanie kobal'tonosnykh zhelezomargantsevykh korok pri flyuidnoi destruktzii silikatnogo veshchestva. *Doklady AN*. 2016;466(4):467–472. (In Russ.).
19. Maksimov S. O., Safronov P. P. Geokhimicheskie osobennosti i genezis kontinental'nykh kobal'tonosnykh zhelezomargantsevykh obrazovaniy. *Geologiya i Geofizika*. 2018;59(7):931–950. (In Russ.).
20. Savel'eva O. L., Savel'ev D. P., Chubarov V. M. Framboidy pirita v uglerodistykh porodakh Smaginskoi assotsiatsii p-ova Kamchatskii mys. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 2013;22(2):144–151. (In Russ.).
21. Ivlev A. A. Obrazovanie tolshch, bogatykh organicheskimi veshchestvom, v svete novoi modeli global'nogo tsikla ugleroda. *Geologiya Nefti i Gaza*. 2019;(5):83–90. (In Russ.). DOI: 10.31087/0016-7894-2019-5-83-90.
22. Vysotskii S. V., Karabtsov A. A., Kuryavyy V. G., Safronov P. P. Blagorodnye opaly mestorozhdeniya Raduzhnoe (severnoe Primor'ye, Rossiya): problema stroeniya i genezisa. Perspektivnye napravleniya razvitiya nanotekhnologii v DVO RAN. Vladivostok; 2007. S. 140–154. (In Russ.).
23. Vysotskii S. V., Barkar A. V., Kuryavyy V. G., Chusovitin E. A., Karabtsov A. A., Safronov P. P. Gidrotermal'nye blagorodnye opaly: problemy stroeniya i genezisa. *Zapiski RMO*. 2009;(6):62–70. (In Russ.).

24. Letnikov F.A. Sinergetika geologicheskikh sistem. Novosibirsk: Nauka; 1992. 230 s. (In Russ.).
25. Haken H. The Science of Structure: Sinergetics. New York: Van Nostrand Reinhold; 1984. 255 p. ISBN 100442237030. OCLC9644102
26. Khaken G. Sinergetika. M.: Progress; 1986. (In Russ.).
27. Khaken G. Informatsiya i samoorganizatsiya. M.; 1991. (In Russ.).
28. Nikolis G., Prigozhin I. Samoorganizatsiya v neravnovesnykh sistemakh: ot dissipativnykh struktur k uporyadochennosti cherez fluktuatsii. M.: Mir; 1979. 512 s. (In Russ.).
29. Reynolds O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. *Phil. Trans. Roy. Soc., London.* 1883;174.
30. Brehdshou P. Vvedenie v turbulentnost' i ee izmerenie. M.: Mir; 1974. (In Russ.).
31. Obukhov A.M. Turbulentnost' i dinamika atmosfery. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1988. 414 s. (In Russ.). ISBN 5-286-00059-2.
32. Adzhemyan L.Ts., Nalimov M.Yu. Printsip maksimal'noi khaotichnosti v statisticheskoi teorii razvitoi turbulentnosti. 1. Odnorodnaya izotropnaya turbulentnost'. *Teoreticheskaya i Matematicheskaya Fizika.* 1992;91(2):294–308. (In Russ.).
33. Frik P.G. Turbulentnost': podkhody i modeli. Izd. 2-e, ispr. i dop. Moskva; Izhevsk: Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika; 2010. 332 s. (In Russ.).
34. Sachenko A.V. Ablyatsiya. In: *Fizika tverdogo tela: Ehntsiklopedicheskii slovar'*. Kiev: Naukova Dumka; 1996. T. 1. 656 s. (In Russ.). ISBN 5-12-003771-2.
35. Novgorodova M.I., Gamyarin G.N., Zhdanov Yu.Ya, Agakhanov A.A., Dikaya T.V. Mikrosferuly alyumosilikatnykh stekol v zolotykh rudakh. *Geokhimiya.* 2003;(1):83–93. (In Russ.).
36. Genshaft Yu.S., Tsel'movich V.A., Gapeev A.K. Kristallizatsiya Fe-Ti oksidnykh mineralov v sisteme "bazal't–il'menit" pri vysokikh davleniyakh i temperaturakh. *Fizika Zemli.* 1999;(2):25–34. (In Russ.).