

УДК 549 : 550.4

© Д. чл. А. В. ГРЕБЕННИКОВ

**ЭНДОГЕННЫЕ СФЕРУЛЫ МЕЛ-ПАЛЕОГЕНОВЫХ
ИГНИМБРИТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ
ЯКУТИНСКОЙ ВУЛКАНО-ТЕКТОНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ
(ПРИМОРЬЕ)**

*Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
690022, Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159;
e-mail: greandr@hotmail.com*

В статье обсуждаются микросферические образования, обнаруженные в мел-палеогеновых игнимбритовых комплексах Якутинской вулканической структуры (Приморье). Проведенные исследования и анализ опубликованных данных о таких сферулах, представленных в различных геодинамических обстановках, привели к заключению об их вулканической природе. Сопоставление минералого-геохимических особенностей у сферул в игнимбритовых комплексах различного возраста предполагает смену флюидного режима: с водородного на углеродный режим, в процессе самого формирования вулканической структуры. Предполагается механизм ликвационного выделения сферул, были выявлены и особенности их взаимоотношения с вулканическими породами определенных фациальных типов.

Ключевые слова: сферулы, когенит, самородное железо.

A. V. GREBENNIKOV. ENDOGENE SPHERULES OF CRETACEOUS-PALEOGENE IGNI-MBRITE COMPLEXES OF YAKUTINSKAYA VOLCANE-TECTONIC STRUCTURE (PRIMORYE)

The paper discusses the microspheric formation found in the Cretaceous-Paleogene ignimbrite-forming complexes of Yakutinskaya volcanic-tectonic structure (Primorye). The carried out investigations, together with analysis of published data on such spherules in different geodynamic setting, have allowed making conclusion about their volcanic origin. The comparative analysis of the mineralogical-geochemical features of the spherules in ignimbrite complexes of different-age suggest the change of the fluid regime from hydrogen to the hydrocarbon one during formation of the structure. There is assumed mechanism of the liquation separation of spherules, relationship of these spherules to volcanic rocks of particular facial type is revealed also.

Key words: spherules, cohenite, native iron.

Исследования сферических образований, сложенных самородными металлами и встречаемых в самых различных геологических обстановках (Новгородова, 1983; Terrestrial..., 2000; Stankowski et al., 2006; Сандиминова, 2008, и др.), продолжают привлекать к себе внимание в связи со сложностью и противоречивостью взглядов на их происхождение. Выводы о генезисе подобных образований, несомненно, играют важную роль в обеспечении процессов формирования магматических пород, выявлении условий флюидного режима и расшифровке механизмов образования геологических структур.

В научной литературе частицы, характеризующиеся небольшими размерами (в среднем 2—2 мм), пористым строением, содержащие ядро из самородного железа и в отдельных случаях стекловатую оболочку со скелетными прорастаниями шпинели-

дов и ильменита, описаны как сферулы (spherules), сферы (spheres), шарики, оолиты, глобулы (globules) и иные образования сферической формы, а также — с учетом их предполагаемого генезиса — как закаленные частицы, гепоксиды, микрометеориты, хондры и зольные остатки (fly ash). По способу образования сферулы можно подразделить на техногенные (продукты сжигания углей и проч.), космические (космическая пыль, обломки метеоритов, продукты абляции метеоритного вещества) и эндогенные (магматические и гидротермальные).

К техногенным образованиям относятся сферулы, образующиеся при сжигании углей на крупнейших теплоэлектростанциях Южного Уэльса, Австралия (Ramsden and Shibaoka, 1982), Челябинска (Sokol et al., 2000), штата Индиана, США (Giere et al., 2003) и других. Их происхождение связано с плавлением силикатов (присутствующих в составе углей) в высоко восстановленном газовом потоке и дальнейшим его распылением. Для большинства сферических частиц (fly ash), отобранных на этих теплоэлектростанциях, характерны малые размеры (до 13 мкм) и значительные вариации химического состава, в первую очередь SiO_2 (48—66 мас. %) и Al_2O_3 (25—8 мас. %), а также высокие содержания Be, Zn, As, Cd, Tl, Pb и U.

Силикатные и металлические сферулы, обнаруженные в образцах лунного грунта (Григорьев, 1972; Фрондел, 1978) на месте падения крупных метеоритов (Krinov, 1960; Сапронов, Соболенко, 1975) и в тектитах (O'Keefe, 1963; McCall, 2001) образуют группу внеземного (космического) происхождения. Обычно критерием отнесения частиц к данной группе служат их оплавленная форма и высокое содержание никеля и кобальта (Stankowski et al., 2006).

Сферулы эндогенного (земного) происхождения встречаются в самых разнообразных по составу и возрасту породах: в альпийских ультрамафитах Корякского нагорья (Рудащевский и др., 1987); в трапповых интрузивах междуречья Енисея и Лены (Округин и др., 1981); в стекловатых андезит-базальтовых лавах Русской платформы (Данилов, Юшкин, 1979); в эруптивных брекчиях Приазовского массива (Цымбал и др., 1985); в вулканитах Северной Армении (Мнацакян, 1965), Южного Сихотэ-Алиня (Филимонова и др., 1989), Курило-Камчатский островной дуги (Карпов и др., 1984; Рычагов и др., 1996) и Примагаданья (Хенкина, 1978); в интрузивных породах кислого состава Алтая (Баженов и др., 1991) и Зайсанской складчатой области (Ермолов, Королюк, 1978); в продуктах эксгаляций Толбачинского вулкана (Главатских, Генералов, 1996); в пеплах, отобранных непосредственно в период активных извержений вулканов Карымского, Шивелуч (Карпов, Мохов, 2004) и Этны (Сицилия) (Lefe`vre R et al., 1986) и многих других.

К образованиям неясного генезиса можно отнести сферулы, обнаруженные в глобоководных морских осадках и льдах Гренландии и Антарктики, островах Тихого океана, аккумулятивных песчаных пляжах Флориды и Бразилии (Fredrilsson, Martin, 1963; Taylor, Brownlee, 1991).

В данной работе изложены результаты изучения сферул, обнаруженных в вулканических породах Якутинской вулканоструктуры (Приморье). Приведены оригинальные данные о составе сферул, проведено сравнение сферул из разновозрастных вулканических комплексов и рассмотрен механизм их образования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Выделение сферул проводилось как непосредственно в поле, отмывкой тяжелой фракции из элювия пород на деревянном лотке, так и магнитной сепарацией из протолок. В состав орудий обработки проб никогда не входили изделия, изготовленные на основе чистых металлов. Принадлежность сферул к первичному материалу подтверждена находками их непосредственно в шлифах и в сростках с вулканическим стеклом.

Анализ минералов и стекла проводился в Дальневосточном геологическом институте на электронно-зондовом микроанализаторе JXA 8100 (Япония) с тремя волновы-

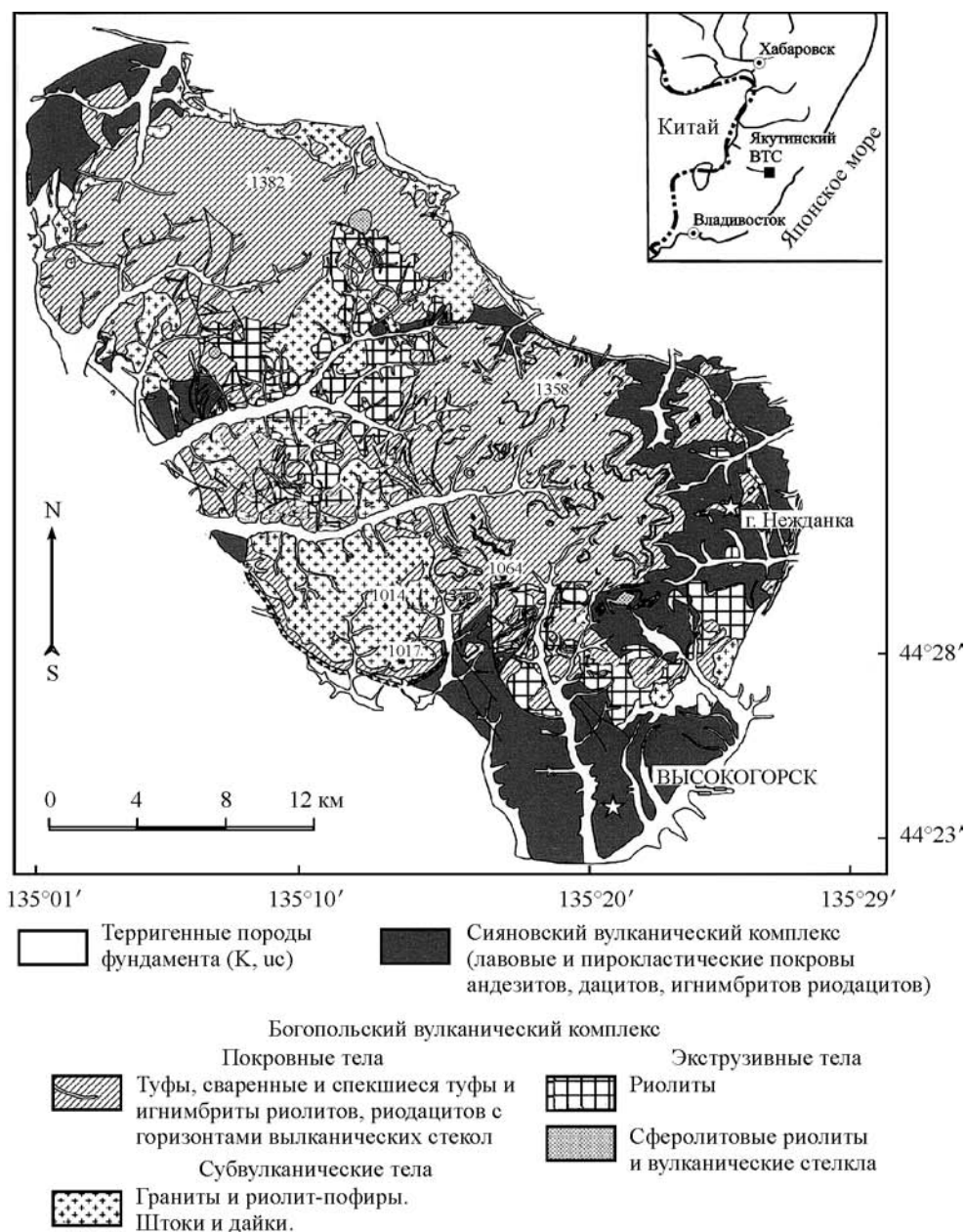


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Якутинской ВТС.

Звездочками показаны места отбора проб.

Fig. 1. Geological sketch map of Yakutinskaya volcano-tectonic structure (VTS). Asterisks indicate sampling places.

ми спектрометрами и энергодисперсионной приставкой INCA (OXFORD, Англия), позволяющих анализировать элементы от В до U. Ускоряющее напряжение и ток на образцах — 15—20 кВ и 20 нА соответственно. Разрешение СПД — 137 эВ. В качестве стандартов использовались неоднократно апробированные во многих лабораториях природные и синтезированные минералы. Для количественного анализа углерода

образцы и эталоны напылялись золотом. С целью исключения возможности загрязнения проб в процессе изготовления микрозондовых шашек использовались абразивные материалы, не содержащие органического углерода (алмазные полировальные гибкие диски и алмазные микропорошки), а в процессе анализа контрольные измерения производились на материале, заведомо не содержащие углерода (эталон, матрица металлостержателя и обоймы).

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Якутинская вулcano-тектоническая структура (ВТС) располагается в тыловой (западной) части Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса (Дальнегорский рудный район). Со всех сторон она ограничена прямолинейными и дугowymi разломами, круто падающими к ее центру, часто выполненными дайками и субвулканическими телами риолит-порфиров (рис. 1). В истории формирования ВТС выделяются два этапа.

В первый этап (маастрихт) образовались покровные и вулcanoгенно-обломочные образования, слагающие основание структуры. Они представлены лавами андезитов и риолитов, туфами и игнимбритами дацитов и риодацитов, выделенными в сияновский вулканический комплекс. Маастрихтский возраст свиты подтвержден находками флоры в вулcanoгенно-осадочных образованиях (Михайлов, 1989). В целом для этого комплекса характерны бимодальный (андезит-риолитовый) состав вулканитов, значительное развитие слоистых пепловых туфов, их тесная пространственная и генетическая связь с экструзивными и жерловыми образованиями, значительная степень вторичных изменений пород.

Во второй этап (даней—эоцен) сформировались мощные толщи богопольского вулканического комплекса, сложенные туфами и игнимбритами риолитов и риодацитов, экструзивно-жерловыми образованиями вулканических стекол и риолитов, а также субвулканическими и дайковыми телами гранит-порфиров. Данный комплекс характеризуется высококремнеземистым составом магматических пород, широким развитием вулканических стекол, преобладанием игнимбритов и спекшихся туфов. Согласно Rb-Sr изохронным данным (Grebennikov, Maksimov, 2006), он образовался в интервале 59.7—52.9 млн лет.

Установлено, что формирование исходных магматических расплавов Якутинской ВТС происходило в условиях крайне низкой фугитивности кислорода (Гребенников, 2003; Grebennikov, Maksimov, 2006). Этим обусловлен необычный, высокожелезистый состав минералов-вкрапленников — фаялита (Fe_{95-99}), феррогеденбергита ($\text{Ca}_{44}\text{Mg}_2\text{Fe}_{54}$), высокожелезистой роговой обманки, биотита и, наконец, сферических образований с металлическим железом, для которых вне зависимости от гипотезы их происхождения принят крайне восстановительный режим образования.

Сферулы были обнаружены автором практически во всех разновидностях пород Якутинской ВТС. Однако наибольшее их количество отмечено в экструзивных сферолитовых риолитах богопольского вулканического комплекса (г. Нежданка, N 44°32.42', E 135°24.98') и сферолитовых лавах риолитов сияновского вулканического комплекса (N 44°17.05', E 135°17.97') (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изученные сферулы вне зависимости от места отбора представляют собой зерна почти идеальной круглой, реже каплевидной, гантелеобразной, иногда неправильной формы (рис. 2). Их размер варьирует от 0.1 до 0.5 мм. Шарики хрупкие и сильно магнитные. Большинство из них имеет полую центральную часть и содержит газовые пустотки (поры). Форма пор шаровидная, стенки гладкие. По строению поверхности выделяются следующие морфологические типы сферул: 1) блестящие черные с гладкой

Таблица 1

Химический состав сферолитовых риолитов
Якутинской ВТС (мас. %)

Chemical composition of spherulite rhyolites
of Yakutinskaya volcano-tectonic structure (VTS), wt %

Элемент	Сияновский вулкани- ческий комплекс		Богояпольский вулкани- ческий комплекс	
	АВ-67/8	П-306/13	АВ-24/5	АВ-24/6
SiO ₂	77.82	73.99	77.68	77.40
TiO ₂	0.08	0.19	0.09	0.08
Al ₂ O ₃	11.71	15.22	12.60	12.82
Fe ₂ O ₃	1.58*	0.93	0.00	0.13
FeO		0.30	0.45	0.31
MnO	0.04	0.00	0.00	0.00
MgO	0.04	0.31	0.05	0.05
CaO	0.12	0.14	0.16	0.06
Na ₂ O	2.15	2.77	2.97	1.38
K ₂ O	5.79	4.13	4.85	6.54
P ₂ O ₅	0.01	0.04	0.00	0.00
H ₂ O ⁻	0.00	0.00	0.10	0.10
П.п.п.	1.38	1.54	0.72	0.75
Сумма	100.71	99.56	99.67	99.62

Примечание. *⁻ Общее железо дано в виде Fe₂O₃.

Поверхность сферул первого типа (рис. 3, а, б) образована пластинами кубических кристаллов магнетита. Рентгеноспектральные исследования содержащегося в них ядра выявили его гетерогенный состав, варьирующий от магнетита (табл. 2, ан. 7-1) до гематита (ан. 7-2, 12, 16, 21). В ядре установлена примесь марганца, составляющая менее 1 мас. % при отсутствии или низком содержании Ni (табл. 2).

Второй тип (рис. 3, в), крайне редко встречающийся среди описываемых разновидностей, представлен как округлыми, так и гантелеобразными частицами светло-серого цвета с шероховатой поверхностью и газоотводными каналами, напоминающими при большом увеличении «грязевые вулканы». Внутренняя часть этих сферул однородна и сложена фазами, по составу отвечающими силицидами железа с примесью Mn и Cr (табл. 2, ан. 24, 27).

Третий тип представлен темно-серыми, шлаковидными образованиями овальной формы (рис. 3, г), условно относящимися к сферическим образованиям. Изучение внутреннего строения этих сферул выявило наличие металлического ядра идеально круглой формы и разбитой на сегменты оболочки. Ядро состоит из самородного железа без каких-либо примесей (табл. 2, ан. 34-1, 36-1, 36-2). Дефицит суммы, возможно, обусловлен наличием кислорода, который

поверхностью и алмазно-стеклянным блеском; 2) светло-серые с шероховатой поверхностью и «оловянным» блеском; 3) тусклые темно-серые, «оплывшие», шлаковидные, овальной формы. Отмечены виды, испещренные полосками на поверхности. Иногда на них наблюдаются наросты таких же шариков меньшего диаметра или фрагменты вмещающего стекла; в отдельных случаях от поверхности зерен отщепляется «ножка». Изучение внутреннего строения сферул в породах богояпольского и сияновского вулканических комплексов позволило выявить ряд существенных отличий.

Сияновский вулканический комплекс. В сферолитовых риолитах комплекса встречены все три морфологических типа сферул. Последние состоят из металлического ядра и содержат округлые поры — следы газовых пузырей, часто выполняющие центральную часть сферул (рис. 3).

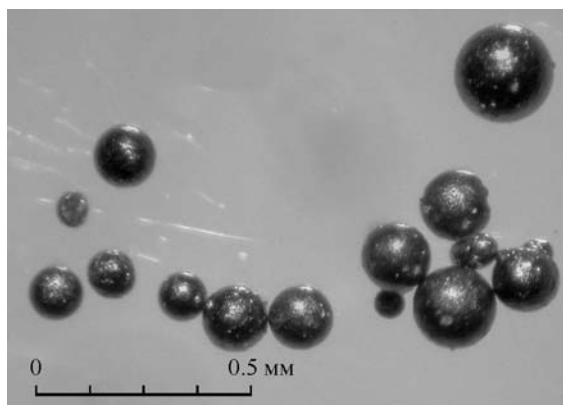


Рис. 2. Внешний вид магнитных сферул Якутинской ВТС.

Fig. 2. External view of magnetic spherules in Yakutinskaya VTS.

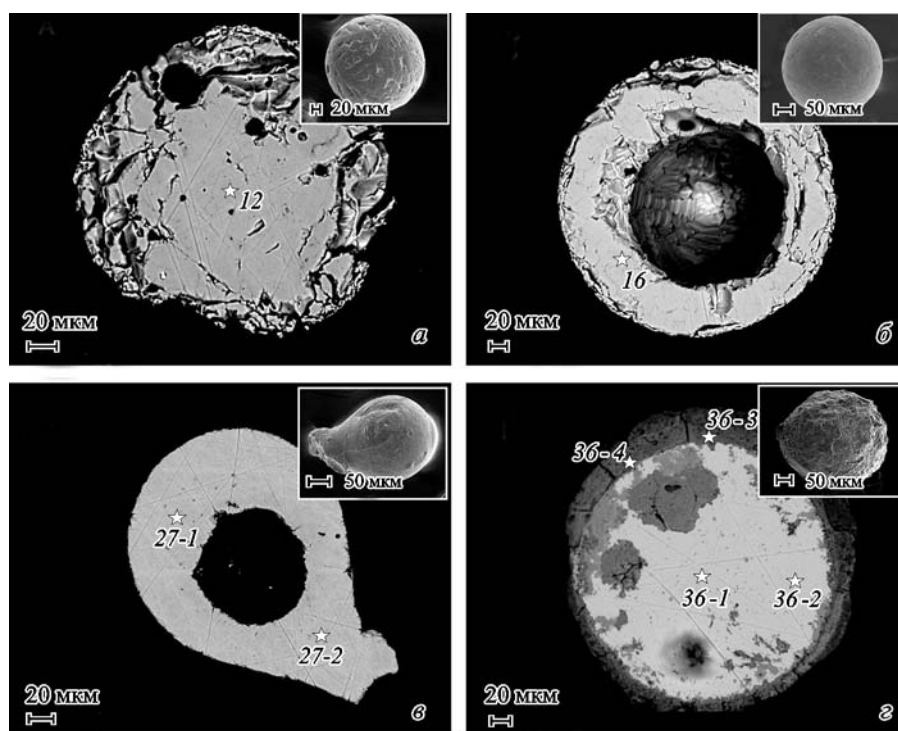


Рис. 3. Морфология и внутреннее строение магнитных сферул сияновского вулканического комплекса. Звездочками показаны точки анализов, приведенных в табл. 2, 3. EVO 50-XVP (Германия), JXA-8100 (Япония). Вторичные электроны.

Fig. 3. Morphology and internal structure of magnetic spherules in Siyanovsky volcanic complex. Asterisks on the diagram indicate points of analyses given in tables 2 and 3.

связывает часть железа в форме иоцита (FeO). В ядре выделяются округлые эмульсионные обособления размером от 1 до 30 мкм, тяготеющие к зонам трещиноватости ядра. По составу они соответствуют смеси $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{MnO} + \text{SiO}_2$ с незначительной примесью Cr (табл. 2, ан. 34-2). Зоны наиболее сильных вторичных изменений состоят из гематита и водных окислов железа группы гётита (табл. 2, ан. 34-4, 34-5). Микрондовый анализ оболочки (табл. 3, ан. 36-3, 36-4) показал, что наряду с оксидами железа присутствуют примеси петрогенных компонентов (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Na_2O и K_2O), характерных для вмещающих пород.

Богопольский вулканический комплекс. В экструзивных риолитах горы Нежданка выделены черные, блестящие сферулы с гладкой поверхностью и алмазно-стеклянным блеском. Они состоят из ядра и (в отличие от сферул сияновского вулканического комплекса) симплектитовой оболочки (рис. 4). Ядро, обладающее сильным металлическим блеском, часто шаровидной формы располагается в центре шарика, реже смещено к его краю. Обычно к ядру («капле») примыкает одна крупная или несколько мелких округлых пор (рис. 4, б, в). Внешняя оторочка сложена симплектитовым агрегатом кварца, стекла и магнетита, напоминающим структуру дендритов. Минеральный состав сферул подтвержден рентгеноспектральным и рентгеноструктурным анализами. Вокруг пор и на поверхности шариков структура симплектита становится тонкозернистой. Травлением HCl и рентгеновским микроанализом установлена неоднородность в распределении углерода в металлической части сферул. Состав ядра варьирует от малоуглеродистого чугуна ($\text{Fe}_9\text{C}—\text{Fe}_5\text{C}$) до когенита (Fe_3C) (табл. 2), в отдельных случаях с незначительной примесью Ni. Характерно присутствие примеси Mn, содержания которого возрастают в мельчайших (до 5 мкм) округлых углублениях

Химический состав металлической части сферул
 Chemical composition of the metallic part of spherules (detected)

Анализ	Богопольский вулканический комплекс (палеоген)						Сияновский вулканический комплекс (верхний мел)							
	С	Si	Mn	Fe	Ni	Сумма	Анализ	О	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Сумма
1-1	7.47	—	—	92.16	1.34	100.97	3-1	29.44	—	—	0.33	70.76	—	100.59
1-2	27.10	—	—	71.91	0.99	100.00	3-3	59.15	—	—	0.19	40.65	—	100.00
1-3	6.87	—	—	91.79	1.21	97.87	7-1	30.58	—	—	—	70.84	—	101.43
1-4	25.58	—	—	73.50	0.92	100.00	7-2	60.11	—	—	—	39.89	3.74	100.00
1-5	6.46	—	—	91.52	1.27	99.25	7-2	26.81	—	—	—	69.96	—	100.51
2-1	24.46	—	—	74.56	0.98	100.00	12	56.00	—	—	—	41.86	2.13	100.00
2-2	7.31	—	—	90.02	1.35	98.68	16	29.67	—	—	—	68.42	1.92	100.01
2-3	27.13	—	—	71.85	1.02	100.00	21	59.58	—	—	—	39.36	—	100.00
2-4	6.69	—	—	90.88	1.40	98.96	24	29.70	—	—	0.30	69.32	1.05	99.33
2-5	25.21	—	—	73.71	1.08	100.00	27-1	59.82	—	—	0.18	40.00	—	100.00
2-6	4.58	—	—	95.37	0.57	100.52	27-2	29.53	—	—	0.36	69.84	—	99.73
2-7	18.16	—	—	81.37	0.47	100.00	34-1	59.49	—	—	0.21	40.30	—	100.00
2-8	4.12	—	—	95.75	0.49	100.42	34-2	29.65	—	—	0.95	68.86	—	99.45
2-9	16.58	—	—	82.93	—	100.00	34-4	59.72	15.68	—	0.56	39.73	—	100.00
2-10	4.10	—	—	94.62	0.59	99.31	34-5	—	27.77	—	0.19	80.89	—	96.75
2-11	16.69	—	—	82.82	0.49	100.00	36-1	—	14.23	—	0.17	72.06	—	100.00
2-12	4.15	—	—	95.13	—	99.76	36-2	—	26.75	—	0.74	79.59	—	95.04
2-13	16.78	—	—	82.79	—	100.00	36-2	—	25.92	—	0.69	72.92	—	100.00
2-14	3.17	0.33	0.43	97.94	—	101.93	36-2	—	14.77	—	0.54	79.47	—	95.16
3-1	12.90	0.57	0.83	85.79	—	100.00	36-2	—	26.75	—	0.50	72.39	—	100.00
3-2	2.38	0.30	0.91	96.47	—	99.77	36-2	—	—	—	—	96.94	—	99.46
3-3	10.17	0.55	0.85	88.43	—	100.00	36-2	2.52	—	—	—	91.69	—	100.00
3-4	3.84	0.30	0.87	96.57	—	101.28	36-2	8.31	0.36	—	3.82	70.69	—	100.25
3-5	15.41	0.51	0.76	83.32	—	100.00	36-2	25.14	0.44	—	2.38	43.29	—	100.00
3-6	3.57	0.24	0.59	96.76	—	100.03	36-2	53.73	—	—	—	66.69	—	101.09
3-7	14.52	0.42	0.52	84.54	—	100.00	36-2	34.41	—	—	—	35.70	—	100.00
3-8	5.80	0.11	0.05	92.23	—	98.08	36-2	64.30	—	—	—	65.79	—	98.32
3-9	22.51	0.18	0.04	76.99	—	100.00	36-2	32.52	—	—	—	36.69	—	100.00
3-10	6.92	0.11	0.07	92.35	—	99.34	36-2	63.31	—	—	—	96.87	—	99.28
3-11	25.65	0.18	0.06	73.65	—	100.00	36-2	2.41	—	—	—	92.02	—	100.00
3-12	6.64	0.31	0.83	90.51	—	97.98	36-2	7.98	—	—	—	96.32	—	98.47
3-13	25.00	0.49	0.68	73.26	—	100.00	36-2	2.15	—	—	—	92.76	—	100.00

Примечание. В числителе — мас. %, в знаменателе — ат. %, прочерк — не обнаружено. Аналитик А. А. Карабцов.

Таблица 3

Химический состав силикатной части сферул (мас. %)
Chemical composition of the silicate part of spherules (wt %)

Тип сферул	Анализ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
Богопольский вулканический комплекс (палеоген)									
I	1-7	2.18	—	88.68	1.80	—	—	—	92.64
	2-8	2.63	0.79	87.82	0.37	—	—	—	92.05
	4-1	1.89	0.61	88.75	0.22	—	—	—	91.46
	4-2	2.96	0.75	88.83	—	—	—	—	92.54
	4-3	3.67	0.81	88.03	0.60	—	—	0.33	92.85
	4-4	2.04	0.81	88.82	0.33	—	—	—	91.83
	4-5	1.42	—	90.57	—	—	—	—	92.32
	4-6	1.51	—	89.68	—	—	—	—	91.18
II	4-7	2.16	0.67	90.12	—	—	—	—	92.94
	4-11	11.00	1.21	79.43	0.98	—	—	0.78	93.40
III	4-12	10.99	1.19	79.76	0.95	—	—	0.85	93.74
	1-9	27.79	2.55	64.83	1.46	—	1.05	1.01	98.69
	1-10	27.62	2.27	66.45	1.33	—	0.85	1.16	99.67
	1-11	28.05	2.49	65.55	1.41	—	1.01	1.01	99.52
	2-11	26.83	2.95	66.73	1.38	—	1.01	1.17	100.07
	2-12	27.58	2.97	63.71	1.28	—	0.77	1.19	97.49
	3-8	26.06	3.21	65.44	1.20	—	0.89	1.42	98.23
	3-9	28.71	3.36	62.45	1.02	—	1.05	1.21	97.80
	4-8	25.52	2.40	69.37	0.98	—	0.32	1.57	100.15
	4-9	23.32	2.02	68.20	1.32	—	0.38	1.56	96.81
	4-10	24.46	2.55	64.32	1.36	—	—	2.05	94.74
	4-13	26.47	4.66	58.09	1.06	—	—	3.33	93.61
	4-14	28.27	4.68	56.59	1.42	—	—	2.25	93.21
	Сияновский вулканический комплекс (верхний мел)								
IV	36-3	13.59	0.59	60.25	—	0.59	1.17	0.64	82.78
	36-4	10.23	—	65.75	—	—	—	0.43	78.80

Примечание. I — магнетит+кварц; II — симплектит (сканирование 5×6 мкм); III — стекло+магнетит+кварц (точечные анализы); IV — стекло+гидрогетит+кварц (точечные анализы); прочерк — не обнаружено. Аналитик А. А. Карбцов.

железистой матрицы. В этом случае в них появляются примеси P и S, слагающие минеральные пленки газовых пор. Следует также отметить, что в низкоуглеродистых разновидностях устанавливаются устойчивая примесь кремния и отсутствие Al, Na и K.

Ядро на контакте с симплектитом окаймляется выдержанной по мощности каемкой стекла (рис. 4, а, в). Ее состав ввиду малой мощности можно оценить лишь качественно — помимо Fe и C (элементы ядра) здесь присутствуют K, Al и Si, характерные для калиевых стекол. В симплектите удалось проанализировать как сами дендриты, так и силикатную часть (табл. 3). Дендриты представлены высокомарганцовистым магнетитом, свободным от примесей других элементов (Ti, Cr, V, Al, Mg). Состав силикатной части определен площадным (5 × 6 мкм) сканированием и точечными анализами (табл. 3). Согласно первому методу, силикатная часть симплектита имеет кварц-полевошпатовый состав. Согласно выполненным расчетам [методика которых приведена в статье (Щека, Гребенников, 2009)], валовый состав симплектита включает около 80 % магнетита, а силикатная составляющая представляет собой кварц

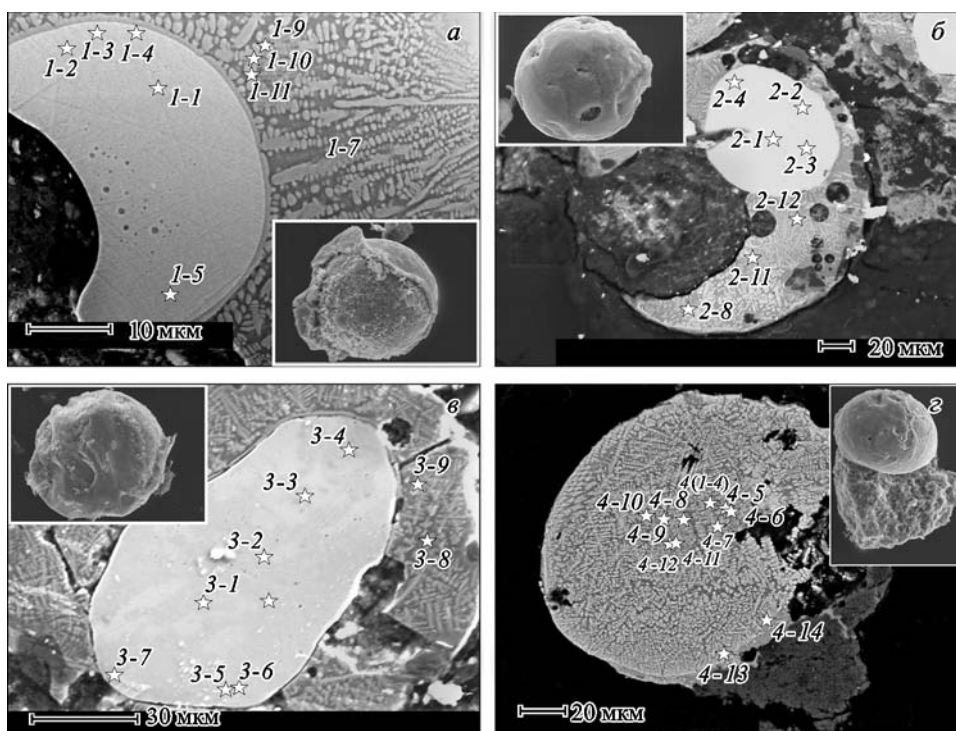


Рис. 4. Морфология и внутреннее строение магнитных сферул богопольского вулканического комплекса.

Звездочками показаны точки анализов, приведенных в табл. 2, 3. EVO 50-XVP (Германия), JXA-8100 (Япония). Вторичные электроны.

Fig. 4. Morphology and internal structure of magnetic spherules in Bogopolsky volcanic complex. Asterisks on the diagram indicate points of analyses given in tables 2 and 3. Secondary electrons.

(60 %) и калишпат (40 %). Такой же состав на основе точечных анализов имеет и каемка вокруг сферулы (табл. 3, ан. 4-13 и 4-14; рис. 4, г). Характерно, что он близок к составу вмещающих пород.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выявленные особенности состава и строения микросферических образований Якутинской структуры позволяют предположить эндогенную природу их образования. Космическое происхождение сферул, видимо, исключается. Четкие различия в минеральном и химическом составе космической пыли и сферул вулканических комплексов ВТС отражены на треугольной диаграмме $Fe-O-(Ni + Co + Cr) \times 5$ (рис. 5, а). Конечно, само по себе содержание никеля и кобальта не является доказательством земного генезиса сферул, однако именно соотношения содержаний Ni и Mn, отмеченные в мел-палеогеновых образованиях Якутинской ВТС, являются показательными (табл. 2). Известно, что карбонатитовые хондриты содержат 0.9 % Mn, 1.3 % Cr и 5/2 % Ni. Трудно допустить какой-либо процесс фракционирования, способный сохранить содержания такого подвижного элемента, как марганец, способствующий удалению других инертных компонентов путем преобразования исходного состава до представленного в табл. 2.

Отбор сферолитов в отдаленной ненаселенной местности среди однотипных вулканических пород, использованные способы обработки проб, размерность частиц,

особенности химического состава, в частности отсутствие в шариках Pb, Zn, Ag и других тяжелых элементов, позволяют исключить предположение и об их техногенном происхождении. На тройной диаграмме SiO_2 — $(\text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO})$ — $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ точки составов изученных сферул образуют поле, обособленное от точек составов подобных образований, отобранных на различных теплоэлектростанциях (рис. 5, б). Кроме того, эндогенное происхождение подтверждено находками их непосредственно в шлифах и в виде сростков с вмещающим вулканическим стеклом, которое в условиях металлургических процессов должно было расплавиться первым.

Приуроченность сферул к высокотемпературным производным игнимбритовых расплавов Якутинской ВТС, шаровидная или каплевидная формы выделений самородного железа и его карбидов, сростки с обычными породообразующими минералами, состав продуктов окисления железа, наличие газовых полостей свидетельствуют об их кристаллизации непосредственно из магматического расплава в условиях крайне низкой активности кислорода и быстрой кристаллизации в потоке газонасыщенных флюидов. Низкая степень окисленности вмещающих сферулы пород Якутинской ВТС, аномальная железистость Fe-Mg минералов-вкрапленников, преобладание ильменита над магнетитом и результаты хроматографического анализа газовых вытяжек из минералов игнимбритов также указывает на крайне восстановленный характер магматического флюида и на преобладание водорода как основного газового компонента (Гребенников, 2003; Grebennikov, Maksimov, 2006).

Появление подобных каплевидных железистых фаз в силикатных расплавах в результате ликвации при избытке водорода экспериментально подтверждено Дж. Кеннеди (Kennedy, 1948), Э. Реддером (Roedder, 1951), А. В. Манаковым и В. Н. Шараповым (1983). К подобному заключению приходят А. А. Маракушев и Н. И. Безмен (1983) на примере изучения метеоритных хондритов, базальтов и реголитов Луны, а также В. Б. Наумов с соавторами (Naumov et al., 1993), изучившие расплавные включения в кварцевых фенокристаллах игнимбритов Кураминских гор (Тянь-Шань).

В риолитах сияновского комплекса основная часть сферул сложена самородным железом. Его образование может быть обусловлено металлизацией силикатного магматического расплава (Олейников, 1981) под действием существенно водородного флюида. На смену восстановительному этапу минералообразования приходило раннемагматическое окисление, как отмечено в работе А. В. Округина и соавторов (1981). Данный процесс сопровождался структурной перестройкой вещества, сопряженной с образованием минеральных фаз с большим объемом элементарной ячейки по схеме α -железо \rightarrow иоцит \rightarrow магнетит \rightarrow гематит \rightarrow гетит вследствие повышения парциального давления кислорода и окисления самородного железа. Таким образом, разный состав минеральных фаз сферул сияновского комплекса отражает определен-

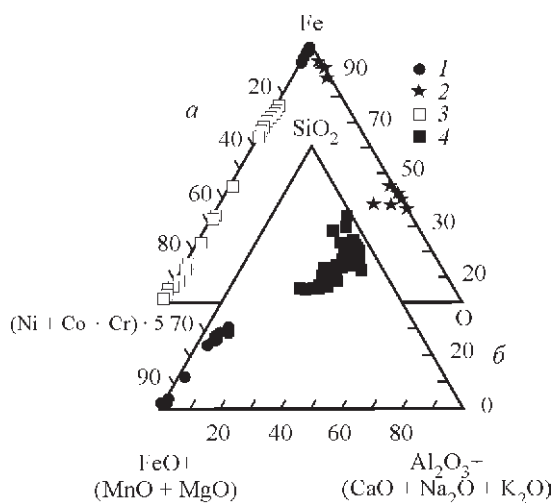


Рис. 5. Диаграммы состава сферических образований различного генезиса.

1 — богопольский комплекс; 2 — сияновский вулканический комплекс; 3 — космическая пыль из различных районов мира (Грачев А. Ф. и др., 2008); 4 — зольные остатки различных теплоэлектростанций мира (Ramsden, Shibaoka, 1982; Sokol et al., 2000; Giere et al., 2003).

Fig. 5. Triple diagram of compositions of spherules with different genesis: 1) Bogopolsky, and 2) Siyanovsky volcanic complexes; 3) — cosmic dust in different regions of the world (Grachev et al., 2008); 4) — ash waste from various thermal power plants (Ramsden, Shibaoka, 1982; Sokol et al., 2000; Giere et al., 2003).

ную стадию такого процесса. Отмеченные в сферулах примесные содержания марганца также не случайны. Низкая фугитивность кислорода на ранней стадии окисления железа благоприятствует вхождению в структуру вещества Mn, обладающего более высоким, чем железо, сродством к кислороду (Олейников и др., 1985).

Металлическая часть палеоценовых сферул богопольского комплекса, окружающая газовую пору, имеет состав от малоуглеродистого чугуна ($\text{Fe}_9\text{C}—\text{Fe}_5\text{C}$) до когениита (Fe_3C). Это позволяет предполагать, что в данном случае восстановителем («металлизатором») силикатного расплава является уже углеводородная смесь $\text{H}_2—\text{CH}_4$ (доля CO и CO_2 при фугитивности кислорода в условиях буфера $\text{Fe}—\text{FeO}$ ничтожно мала). Окружающий металлическую фазу магнетит—стекло—кварцевый симплектит, скорее всего, представляет промежуточный продукт ликвации вмещающего силикатного расплава на контакте с газовым «пузырем». Именно факт образования дендритоподобного магнетита без Ti и других элементов, характерных для высокотемпературных магматических магнетитов (Щека и др., 1980), не противоречит его появлению в результате ликвационного распада кремне-железистого расплава. Необходимо отметить, что состав стекла в симплектите резко отличается (с учетом магнетитовой составляющей) от состава вмещающей породы. Такое различие характерно для сферолитов и вмещающего их матрикса в экструзиве горы Нежданка. Ликвационный механизм образования последних не вызывает сомнений (Гребенников, 2003).

Механизм формирования сферул, по мнению автора, может выглядеть следующим образом. Зародившиеся в флюидонасыщенном магматическом расплаве микросферические образования растут по мере продвижения магмы к поверхности в условиях снижения давления и разогрева (расширения) газовых включений в минеральных частицах. Те сферулы, в которых внутреннее давление газа уравнивается силами поверхностного натяжения (в экструзивных и интрузивных фациях), образуют полые шарики либо остаются сплошными и пористыми. В эффузивных фациях, обусловленных фрагментацией ювенильного материала, за счет роста внутреннего давления, превосходящего силу поверхностного натяжения, происходит разрыв капель. Последним фактом могут быть объяснены крайне редкие находки сферул в продуктах пирокластических извержений.

ВЫВОДЫ

Рассмотренные силикатно-металлические микросферулы характеризуются четкими геохимическими отличиями от космических и техногенных образований и представляют собой производные игнимбритообразующего магматического очага Якутинской ВТС. Минералого-геохимический состав сферул обусловлен флюидным режимом различных магматических циклов структуры. Их образование происходило в процессе ликвации кремнекислого магматического расплава в сильно восстановительных условиях существенно водородного (для мелового сияновского комплекса) и водородно-метанового флюида (для палеоценового богопольского комплекса). Дальнейшее обособление сферул и различия их внутренних структур связаны с механизмом роста внутреннего давления расширяющихся газов и типом проявления вулканической активности. Крайне низкие содержания сферических образований, по всей видимости, связаны с разрывом их сплошности в процессе «эффузивных» типов извержения.

Автор выражает особую благодарность сотрудникам ДВГИ ДВО РАН — д. г.-м. н. С. В. Высоцкому, В. К. Попову и проф. С. А. Щека, чей опыт и критические замечания позволили значительно улучшить качество данного материала, и к. г.-м. н. А. А. Карабцову за консультации и проведение аналитических работ.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов ДВО РАН 09-III-A-08-401 и 09-III-A-08-407.

Список литературы

- Баженов А. И., Полуэктова Т. И., Новоселов К. Л.* Ферротитанистые оксидные глобулы из гранитоидов Элекмонарского массива // Геология и геофизика. **1991**. № 12. С. 50—57.
- Главатских С. Ф., Генералов М. Е.* Когенит из минеральных ассоциаций, связанный с высокотемпературными газовыми струями БТТИ (Камчатка) // Докл. РАН. **1996**. Т. 346. № 6. С. 797—799.
- Гребенников А. В.* Петрогенезис игнимбригов Якутинской вулканоструктуры (Приморье) / Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Владивосток, **2003**. 33 с.
- Григорьев Д. П.* Проблемы космической минералогии // ЗВМО. **1972**. Вып. 3. С. 264—280.
- Данилов М. А., Юшкин Н. П.* Первая находка олигоценовой лавы с самородным железом на севере Русской платформы // Докл. АН СССР. **1979**. Т. 249. № 6. С. 1430—1432.
- Ермолов П. В., Королюк В. Н.* Состав и строение магнитных шариков гранитоидов // Докл. АН СССР. **1978**. Т. 240. № 1. С. 155—158.
- Карпов Г. А., Киреев Ф. А., Ероцаев-Шак В. А.* Самородное железо в гидротермальной системе Камчатки // Докл. АН СССР. **1984**. Т. 274. № 6. С. 1440—1443.
- Карпов Г. А., Мохов А. В.* Акцессорные самородные рудные минералы эруптивных пеплов андезитовых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. **2004**. № 4. С. 41—49.
- Монаков А. В., Шаранов В. Н.* Механизм и кинетика обособления магматизма в базитовых расплавах // Докл. АН СССР. **1983**. Т. 272. № 3. С. 670—674.
- Маракушев А. А., Безмен Н. И.* Эволюция метеоритного вещества, планет и магматических серий. М.: Наука, **1983**. 184 с.
- Михайлов В. А.* Магматизм вулcano-тектонических структур южной части Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса. Владивосток, **1989**. 164 с.
- Мнацакян А. Х.* Акцессорно-минералогические и геохимические особенности меловых вулканических серий Северной Армении как индикаторы комагматичности металлогенической специализации вулканических комплексов / Акцессорные минералы и элементы как критерий комагматичности и металлогенической специализации магматических комплексов. М.: Наука, **1965**. С. 39—78.
- Новгородова М. И.* Самородные металлы в гидротермальных рудах. М.: Наука, **1983**. 287 с.
- Округин А. В., Олейников Б. В., Заякина Н. В., Лескова Н. В.* // Самородные металлы в траппах Сибирской платформы // ЗВМО. **1981**. Вып. 2. С. 186—204.
- Олейников Б. В.* Металлизация магматических расплавов и ее петрологические и рудогенетические следствия / Самородное минералообразование в магматическом процессе. Якутск: Якутский филиал СО АН СССР. **1981**. С. 5—15.
- Олейников Б. В., Округин А. В., Томишин М. Д. и др.* Самородное металлообразование в платформенных базитах. Якутск. Якутский филиал СО РАН, **1985**. 188 с.
- Рудавский Н. С., Мочалов А. Г., Дмитренко Г. Г., Меньшиков Ю. П.* Самородные металлы и карбиды в альпинотипных ультрамафитах Корякского нагорья // Минер. журн. **1987**. Т. 9. № 4. С. 71—82.
- Рычагов С. Н., Главатских С. Ф., Сандимирова Е. И.* Рудные и силикатные магнитные шарики как индикаторы структуры, флюидного режима и минералорудообразования в современной гидротермальной системе Баранского (о-в Итуруп) // Геология рудных месторождений. **1996**. Т. 38. № 1. С. 31—40.
- Сандимирова Е. И.* Сферические минеральные образования вулканических пород курильских островов и Камчатки / Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Петропавловск-Камчатский, **2008**. 24 с.
- Сапронов Н. Л., Соболенко В. П.* Некоторые черты геологического строения Куликовского палеовулкана нижнетриасового возраста (район падения Тунгусского метеорита 1908 г.) / Проблемы метеоритики. Новосибирск: Наука, **1975**. С. 13—19.
- Филимонова Л. Г., Арапова Г. А., Боярская Р. В., Трубкин Н. В.* О типоморфных особенностях магнитных сферул орогенных вулканитов Южного Сихотэ-Алия // Тихоокеанская геология. **1989**. № 4. С. 78—84.
- Фрондел Дж.* Минералогия Луны. М.: Мир, **1978**. 334 с.
- Хенкина С. Б.* Продукты ликвации в породах мелового-палеогенового возраста Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП) и особенности их металлоносности // Докл. АН СССР. **1978**. Т. 238. № 2. С. 433—436.
- Цымбал С. Н., Татаринцев В. И., Гаранин В. К., Кудрявцева Г. П., Колодько А. А.* Закаленные частицы из эруптивной брекчии зоны сочленения Приазовского массива с Донбассом // ЗВМО. **1985**. Вып. 2. С. 224—228.
- Щека С. А., Пятков А. Г., Врожосек А. А., Левашев Г. Б., Октябрьский Р. А.* Парагенезисы микроэлементов магнетита. М.: Наука, **1980**. 147 с.
- Щека С. А., Гребенников А. В.* Силикатно-металлические хондры как индикаторы флюидного режима игнимбритообразующих расплавов // Электронный журнал «Исследовано в России». **2009**. С. 883—893. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2009/066.pdf>.
- Fredriksson K., Martin R.* The origin of black spherules found in Pacific islands, deep-sea sediments, and Antarctic ice // Geochim. et Cosmochim. Acta. **1963**. Vol. 27. P. 245—248.

- Gierys R., Carleton L. E., Lumpkin G. R.* Micro- and nanochemistry of fly ash from a coal-fired power plant // *Amer. Miner.* **2003**. Vol. 88. P. 1853—1865.
- Grebennikov A. V., Maksimov S. O.* Fayalite rhyolites and a zoned magna chamber of the Paleocene Yakutinskaya volcanic depression in Primorye, Russia — *J. Miner. and Petrol. Sci. (Japan)*. **2006**. Vol. 101. N 2. P. 69—88.
- Kennedy G. C.* Equilibrium between volatiles and iron oxides in igneous rocks // *Amer. J. Sci.* **1948**. Vol. 246 (9). P. 529—549.
- Krinov E. L.* Principles of Meteoritics. Oxford: Pergamon Press. New York, **1960**. 535 p.
- Lefeuvre R., Gaudichet A., Billon-Galland M. A.* Silicate microspherules intercepted in the plume of Etna volcano // *Nature*. **1986**. Vol. 322. P. 817—820.
- McCall G. J. H.* Tektites: Showers of Glass from the Sky. Geological Society. London, **2001**. 256 p.
- Naumov V. B., Solovova I. P., Kovalenker V. A., Rusinov V. L.* Immiscibility in acidic magmas; evidence from melt inclusions in quartz phenocrysts of ignimbrites // *Eur. J. Miner.* **1993**. Vol. 5. N 5. P. 937—941.
- O'Keefe J. A.* (Ed.) Tektites. University of Chicago Press. Chicago, IL, **1963**. 36 p.
- Ramsden A. R., Shibaoka M.* Characterization and analysis of individual fly-ash particles from coal-fired power stations by a combination of optical microscopy, electron microscopy and quantitative electron microprobe analysis // *Atmosph. Environ.* **1982**. Vol. 16. N 9. P. 2191—2206.
- Roedder E.* Low temperature liquid immiscibility in the system $K_2O-FeO-Al_2O_3-SiO_2$ // *Amer. Miner.* **1951**. Vol. 36. P. 282—286.
- Sokol E. V., Maksimova N. V., Volkova N. I., Nigmatulina E. N., Frenkel A. E.* Hollow silicate microspheres from fly ashes of the Chelyabinsk brown coals (South Urals, Russia) // *Fuel Processing Tech.* **2000**. Vol. 67. P. 35—52.
- Stankowski W. T. J., Katrusiak A., Budzianowski A.* Crystallographic variety of magnetic spherules from Pleistocene and Holocene sediments in the Northern foreland of Morasko-Meteorite Reserve // *Planetary and Space Science*. **2006**. Vol. 54. P. 60—70.
- Taylor S., Brownlee D. E.* Cosmic spherules in the geological record // *Meteoritics*. **1991**. Vol. 26. P. 203—211.
- Terrestrial and Cosmic Spherules / Proceedings of the 1998 Annual Meeting Tecos by Tecos Meeting (1998 Budapest, Hungary)*, **2000**. 132 p.

Поступила в редакцию
30 мая 2010 г.