

СИЛИКАТНЫЕ СФЕРУЛЫ ИЗ КИМБЕРЛИТОВЫХ И ЛАМПРОИТОВЫХ ФОРМАЦИЙ МИРА

В. К. Маршинцев, И. Г. Яценко, В. Н. Зинченко



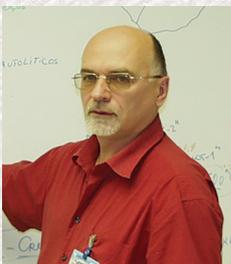
**Виктор Клавдиевич
Маршинцев,**

доктор геолого-минералогических наук, профессор, действительный член Академии наук РС(Я), г. Якутск



**Иван Германович
Яценко,**

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и геохимии горючих ископаемых НАН Украины, г. Львов



**Владимир Николаевич
Зинченко,**

кандидат геолого-минералогических наук, профессор Instituto Superior Politecnico Metropolitano de Angola, Республика Ангола

В кимберлитовых породах среди минералов магнитной фракции присутствуют образования в виде правильной округлой (шарики) или сферической (сферулы) форм различной морфологии. Встречаются также и немагнитные силикатные шарики и сферулы. Размер всех этих образований обычно менее 0,5 мм (0,01–0,45 мм), редко достигает 1–3 мм. Сферулы обнаружены также в шлихах, взятых из аллювия около десятка кимберлитовых трубок.

В данной работе представлены результаты изучения комплексов сферул (рис. 1) из кимберлитов Якутской (трубки «Мир», «Удачная», «Айхал»), Архангельской (трубки «Карпинская-1» и «Поморская»), Анголо-Конголеской (трубки «Катока» и «Чиузу») алмазонасных провинций, а также сферул из слабоалмазонасных взрывных¹ структур Украинского щита (лампроитовой трубки «Мрия», кимберлитовой трубки «Южная», кимберлитовой дайки «Щорсовская», взрывных кимберлитоподобных образований взрывных структур Зеленогайская и Грузская-Северная, переотложенных алмазонасных формаций Белокооровичской впадины и Путренецкого участка) [1, 2]. Используются также опубликованные данные по сферулам из алмазонасных пород Западного Урала [3].

К настоящему времени наиболее детально изучены сфероиды из кимберлитовых пород трубки «Удачная-Западная» [4, 5]. Отсутствие должного внимания к подобным сферулам объясняется, прежде всего, тем, что они рассматриваются как объекты промышленного или метеоритного происхождения.

Известно, что на земную поверхность ежегодно выпадают тысячи тонн (от $n \cdot 10^{-1}$ до $n \cdot 10^{-6}$) космичес-

кой пыли и шариков. Их находят над Тихим океаном, в горных ледниках, снежном покрове Антарктиды, почвах малонаселённых районов земного шара и в донных осадках морей. Из почвы и торфа районов падения Сихотэ-Алинского и Тунгусского метеоритов были извлечены магнитные и немагнитные шарики метеоритного происхождения. Их минеральный состав совпадает с составом внешней коры плавления метеоритов [6, 7]. Становится очевидным, что изучение различного рода сферических образований в природных объектах, тем более обнаруженных не только на поверхности геологических объектов, представляет несомненный интерес, прежде всего, для расшифровки их природы.

На примере трубки «Удачная-Западная» мы имели возможность проследить характер распределения сферул в объёме тела, по горным выработкам. Всего было изучено около 90 проб, взятых с разных глубин (по скважинам). Сферулы присутствовали от единичных зёрен до значительных количеств в 69 пробах. Был случай, когда шарики обнаруживались непосредственно в сколе керна кимберлита. Среднее содержание их составляет ~0,5 г/т. Отмечена определённая тенденция в распределении сферул: содержание их возрастает с приближением к контакту трубки с вмещающими её породами. В центральной части трубки содержание сферул, как правило, наименьшее. С глубиной содержание сферических образований приближается к среднему значению 0,8 г/т.

По минеральному составу сферулы можно разделить на две основные группы. Первая группа представлена магнитными сферулами, в составе которых в различных

¹ Взрыв – явление вулканического взрыва, обычно сопровождающееся выбросом большого количества пирокластического минерала и газов.



Рис. 1. Микрофотографии силикатных сферул (а – к – магнитные железо-оксидные сферулы; л – ь – ТМЖС-сферулы, ы – я – КС-сферулы):

а – в – Куонамский алмазоносный район, кимберлит (J₁); **г –** трубка «Поморская»; **д –** сферула из самородного железа, трубка «Мрия»; **е – ж –** трубка «Катока»; **и, й –** взрывная структура Грузская-Северная; **л –** Куонамский алмазоносный район, кимберлит (J₁); **м, н –** трубка «Карпинская-1»; **о, п –** трубка «Поморская»; **р, с –** трубка «Катока»; **т, у –** трубка «Мрия»; **ф –** трубка «Южная»; **х –** алмазные обломочные отложения, Белокоровичская структура; **ц, ч –** взрывная кимберлитоподобная структура Грузская-Северная; **ш, щ –** Зеленогайская взрывная структура, поперечный срез (щ); **ъ –** кимберлитовая дайка «Щорсовская»; **ы –** трубка «Удачная-Западная» (фото В. К. Маршинцева, 1990); **ь –** трубка «Катока»; **э –** алмазные обломочные отложения, Белокоровичская структура; **ю – я –** флюидизатно-взрывные образования, Путренецкий участок

пропорциях присутствуют самородное железо и оксиды железа. Среди них выделяются следующие основные разновидности:

скелетными кристаллами и дендритами армалколита, ильменита, ульвошпинели и шаровидными выделениями самородного железа. Наиболее распространённые

- сферулы, сложенные только оксидами железа: иоцитовые, магнетит-иоцитовые и магнетитовые. Их поверхность образована гранями кристаллов скелетного строения. Большинство сферул полая внутри или имеет множество округлых пор. Вокруг газовых включений и в поверхностных участках сферул магнетит часто замещён гематитом. Магнетит и иоцит проявляют аномальную анизотропию;

- сферулы зонально-концентрического строения, шаровидные ядра которых сложены самородным железом, а оболочки – иоцитом или иоцитом в сростках с магнетитом;

- сферулы самородного железа имеют желтовато-серый цвет, металлический блеск и однородную гладкую поверхность. Часто покрыты ржавчиной. Внутри сферул постоянно встречаются шаровидные включения, состоящие из скелетных кристаллов иоцита и стекла, выполняющего интерстиции между ними. Нередко внутри включений находятся газовые пузырьки.

По степени окисленности железа изученные магнитные сферулы можно расположить в ряд: самородное железо + иоцит → самородное железо + иоцит + магнетит (± гематит) → иоцит + магнетит + гематит → магнетит + гематит [4].

Вторая группа – это сферулы, состоящие из стекла с высоким содержанием оксидов металлов. Здесь можно выделить разновидности, обогащённые Ti, Mn, Fe (ТМФС-сферулы), и разновидности с высоким содержанием Ca и Al (КС-сферулы). Сферулы часто содержат ядро из самородного железа и (или) тонкодисперсную вкрапленность самородного железа сферической формы. Силикатная фаза может быть гомогенной, но в большинстве случаев содержит оксидную кристаллическую фазу распада, представленную скелетными и игольчатыми кристаллами ульвошпинели, армалколита, марганцевого ильменита (пирофанита), рутила, вюстита (рис. 2). Встречаются сростковые образования, состоящие из нескольких фаз, образующих графические сростания и включающие в себя мельчайшие (0,1 мм) шарики с сильной отражательной способностью. Состав подобных образований представлен

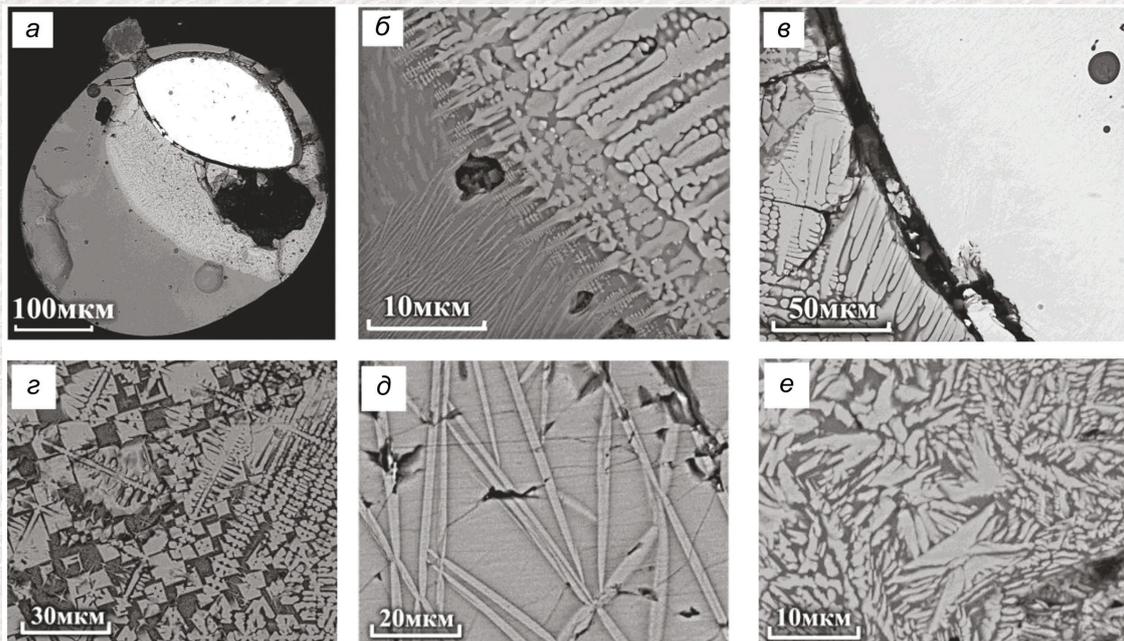


Рис. 2. Характерные формы роста кристаллической фазы в ТМЖС-сферулах (поперечное сечение, BSE изображение, а – б – трубка «Мрия», г – д – трубка «Карпинская-1»): а – общий вид сферулы – металлическое ядро (белый) окружено зоной развития вюстита (светло-серый), гомогенное стекло (серый); б – то же, крупным планом, скелетные кристаллы вюстита (светло-серый), ульвошпинели (серый), стекло (тёмно-серый); в – фрагмент ядра с включениями марганец-силикатного стекла; г – игольчатые кристаллы армоколита в стеклянном мезостазице; д – скелетные кристаллы ульвошпинели в стеклянном мезостазице; е – кристаллическая фаза, представленная пирофанитом в мезостазице из остаточного стекла

минеральные ассоциации подобных образований следующие: армоколлит + ильменит + самородное железо, ильменит ± армоколлит + самородное железо, ульвошпинель ± ильменит ± самородное железо, ульвошпинель ± иоцит. Повышенная примесь пирофанитового ($MnTiO_3$) минала в ильменитах, минимальная примесь Al_2O_3 указывают на сравнительно низкие температуру и давление при кристаллизации этого минерала. Возрастание роли Fe и Ti в шпинелидах при падении содержания Al и Ca свидетельствует, что минерал кристаллизуется на поздних этапах эволюции кимберлитовой магмы в условиях повышения окислительного потенциала. Ильменит и шпинель подобного состава присутствуют в основной массе кимберлитов. Состав самородного железа: Fe 99,1 %, в примесях – Mn и Ti. Весьма интересна находка армоколлита. Подобный минерал, соответствующий чистому железистому члену твёрдых растворов $FeTi_3O_5 - MgTi_2O_5$ по ферропсевдобрукиту, был обнаружен в качестве включения в алмазе [8]. Отмечается сходство ферропсевдобрукита с включениями ильменита из алмаза по примесям Mn, Mg и Ca, что, вероятно, свидетельствует о сходной геохимической среде их образования. Армоколлит ранее описан в кимберлитовых породах Куонамских (север Якутии) трубок и трубках Южной Африки [9] совместно с другими экзотическими

и химически изменёнными оксидами Ti, Cr и Fe. Впервые этот минерал был обнаружен в лунных образцах. В целом, охлаждение и кристаллизация вещества в подобных образованиях происходили очень быстро. Восстановительная обстановка среды способствовала восстановлению самородного железа из закислого.

Шарики могут быть полыми. При их дроблении выделялись зёрна оливина округло-овальной формы, розово-красного граната неправильной формы и чёрного блестящего минерала со ступенчатой поверхностью, хрупкого (возможно, это графит). Состав газов шариков из кимберлитов трубки «Айхал» оказался достаточно экзотическим (об. %): ($N_2 + p.g.$) – 57,7–96,5; углеводородов 20–25; $H_2 \sim 5$; $CO_2 - 10$. В промышленных образованиях состав газа иной (об. %): ($N_2 + p.g.$) – 71,3–71,5; $O_2 - 17,3-17,9$; $CO - 10,5-11,0$ [10].

По составу сферулы из кимберлитовых пород с высоким содержанием CaO и Al_2O_3 хорошо пересчитываются на формулу мелилита² [5]. В нескольких образцах наблюдалось высокое содержание TiO_2 и MnO при уменьшении количества SiO_2 , Al_2O_3 и CaO. Присутствие включений минералов кимберлита в силикатных сферулах, а также специфический состав газов позволяет допустить уникальный способ образования их непосредственно в кимберлитовой магме и в крайне восстановительной

² Мелилит – группа породообразующих силикатных минералов (так называемая «группа мелилита»).

среде, богатой углеводородами. Состав их также свидетельствует о потенциальной возможности кристаллизации мелилита в кимберлитах. Редкие находки этого минерала отмечаются в кимберлитах многих трубок. Известно, что кристаллизация мелилита осуществляется при температурах 700–750 °С при понижении давления CO₂. Верхний предел стабильности давления для чистого акерманита³ сильно уменьшается в присутствии избыточного CO₂ (предположительно растворённого в силикатных расплавах в виде карбоната). Это свидетельствует о том, что кристаллизация мелилита может подавляться в магмах, богатых карбонатами (например, кимберлитовой). Кроме того на стабильность мелилита,

вероятно, оказывает влияние содержание щелочных элементов в магме во время кристаллизации.

Силикатные сферулы в большинстве изученных случаев встречаются совместно с металлическими сферулами (Fe, Pb, Cu, Zn, Sn, As, Sb, Au) и безкислородными минералами (муассанит, кусонгит). Их можно рассматривать как компоненты взрывной мантийной минеральной ассоциации, для которой свойственны резко восстановительные условия образования [11].

Согласно химическому составу стекла (таблица) комплекс изученных силикатных сферул в различных типах пород можно разделить на два основных типа: титан-марганец-силикатные сферулы и кальций-

Средние значения состава петрогенных элементов в силикатных сферулах, масс. %

Тип сферул	№ п/п	К-во анализов	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
ТМС-сферулы	1	1	21,70	48,78	3,3	0,21	4,56	10,78	3,01	3,11	2,37	2,18
	2	3	16,79	47,16	3,63	0,28	8,64	10,71	3,75	6,06	1,14	1,84
	3	11	23,84	34,42	5,56	1,20	10,78	13,78	3,52	2,35	1,12	3,43
	4	8	16,04	38,83	4,21	0,11	16,45	12,95	3,40	5,71	1,01	1,29
	5	1	18,51	43,24	5,73	0,21	14,97	11,01	0,05	2,73	0,28	3,27
	6	1	14,49	36,05	4,46	0,63	29,67	8,77	0,00	3,62	0,24	2,07
	7	9	18,32	39,21	2,82	0,00	13,24	12,82	2,37	8,75	0,66	1,81
	8	2	20,36	38,12	6,17	0,31	11,14	10,23	3,86	6,22	2,12	1,47
	9		16,62	44,36	2,11	0,00	7,47	14,28	2,93	9,76	1,64	0,83
	10	2	21,39	36,93	8,03	0,55	11,59	10,50	4,59	1,53	1,83	3,06
	11	2	19,40	42,30	6,82	0,36	7,18	14,40	4,39	3,30	0,66	1,19
	12	3	20,49	38,29	7,53	0,24	10,21	11,45	4,47	2,43	1,65	3,24
	13		16,54	41,17	3,30	0,25	17,69	11,84	2,34	5,45	0,67	0,75
КС-сферулы	14	9	38,95	1,13	11,26	0,03	5,37	0,56	6,59	34,11	1,37	0,63
	15	1	39,79	0,38	10,60	0,06	1,28	0,29	4,85	40,21	1,12	1,42
	16	7	42,33	1,49	12,02	0,04	8,81	0,19	4,46	28,13	1,87	0,66
	17	1	42,09	1,58	10,30	0,00	5,25	0,55	12,66	25,04	1,57	0,96
	18	1	42,51	1,88	10,48	0,19	5,75	0,48	11,75	24,36	1,58	1,02
	19		33,01	6,33	14,39	0,00	0,63	0,60	9,83	34,63	0,04	0,54
	20	1	56,44	1,30	5,00	0,00	5,39	0,10	1,50	19,78	3,10	7,39
	21	4	43,90	0,28	7,96	0,00	0,91	0,69	4,24	40,24	0,86	0,92

Примечания. 1, 14 – трубка «Мир» [5]; 2, 16 – трубка «Удачная» [5]; 3 – кимберлит (J₁), Куонамский алмазоносный район; 4 – трубка «Карпинская-1»; 5, 17 – трубка «Катока»; 6, 18 – трубка «Чиузу»; 7 – трубка «Мрия»; 8 – трубка «Южная»; 9 – кимберлитовая дайка «Щорсовская»; 10 – Зеленогайская взрывная структура; 11 – взрывная структура Грузская-Северная; 12 – Белокозовичская впадина; 13, 19 – алмазоносные вишериты, Западный Урал [3]; 15 – трубка «Айхал» [5]; 20 – Ильинецкая взрывная структура; 21 – флюидизатно-взрывные образования, Пугренецкий участок.

³ Акерманит – островной диортосиликат из группы мелилита.

силикатные. В некоторых случаях встречаются разновидности сферул, в составе которых преобладают Al с Fe либо Mg. Стекло титан-марганец-силикатных и кальций-силикатных сферул содержит тонкодисперсную фазу в виде сферических включений самородного железа, а титан-марганец-силикатный тип может включать ядро, сложенное самородным железом. Стекло титан-марганец-силикатных сферул может быть однородным или содержать в различных соотношениях оксидную кристаллическую фазу [1] минералов титана, марганца и железа (пирофанит, армалколит, ульвошпинель, рутил); в этом случае состав остаточного силикатного расплава обедняется соответствующими элементами. В таблице представлен состав стекла сферул, близкий к первичному, поскольку были использованы исключительно данные анализа однородного стекла.

В большинстве случаев вместе с титан-марганец-силикатными сферами встречаются железные и оксидно-железные. Наблюдения показали, что их можно объединить в единый генетический тип, поскольку, вероятнее всего, они сформированы из единого источника гетерогенного силикатно-металлического расплава.

Эндогенная природа изученных типов сферул не вызывает сомнений. В первую очередь, об этом убедительно свидетельствуют геологические данные, подтвержденные статистически – титан-марганец-силикатные и кальций-силикатные сферулы являются стабильными компонентами эксплозивных пород эндогенной природы. Состав стекла сферул не сопоставим с составом метеоритного вещества, а также гипотетических продуктов витрификации⁴ материнских пород вследствие импактных процессов. Сферулы экстремально обогащены Ti (до 48 %) и Mn (до 14 %) либо Ca (до 40 %). Содержание титана и марганца в метеоритном веществе не превышает 0,5 %, содержание Ca 0,5–3,0 %. Характерным для метеоритного железа является присутствие Ni и Co и отсутствие Ti, Mn, Cr, Ca. Именно последние являются характерными примесями в железе титан-марганец-силикатных сферул и магнитных сферул из самородного железа с оксидной оболочкой. Изучение состава летучих компонентов показало резко восстановительный состав газовых компонентов с доминирующими азотом и водородом при отсутствии воды. Высокие температуры [3], резко восстановительные условия и своеобразный состав вещества, необходимые для образования первичного расплава титан-марганец-силикатных сферул, дают основание предложить модель эндогенного формирования такого расплава в переходной зоне «кора – мантия». Именно для этой зоны мы можем предполагать стабильное равновесное сосуществование силикатной фазы, обогащенной Ti, Mn (элементы, близкие к железу по устойчивости к кислороду), и металлической (самородное железо) фазы.

Список литературы

1. Яценко, I. Эндогенні Ti-Mn-Fe-Силікатні сферули із експлозивних структур та вулканогенно-осадових формацій України / I. Яценко, Г. Яценко, С. Бекеша, Н. Білик, О. Варичев, Л. Дручок // *Мінералогічний збірник*. – 2012. – № 62, вип. 1. – С. 83–100.
2. Zinchenko V., Dech V., Shafranovsky G. *Kimberlites and Diamonds of Catoca Pipe: Petrogenesis, Ore Genesis and Modeling the Distribution of Diamonds*. Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing. 2012. 277 p.
3. Чайковский, И. И. Эксплозивные минеральные фазы алмазоносных пирокластитов Западного Урала / И. И. Чайковский, О. В. Коротченкова // *Литосфера*. – 2012. – № 2. – С. 125–140.
4. Татаринцев, В. И. Закалённые частицы из кимберлитов Якутии / В. И. Татаринцев, С. Н. Цимбал, В. К. Гаранин [и др.] // *Доклады АН СССР*. – 1983. – Т. 270, № 5. – С. 1199–1203.
5. Маршинцев, В. К. Природа сфероидных образований в кимберлитах / В. К. Маршинцев // *Следы космических воздействий на Землю*. – Новосибирск : Наука, 1990. – С. 45–57.
6. Кринов, Е. Л. Метеоритная и метеорная пыль, микрометеориты / Е. Л. Кринов // *Сихотэ-Алинский железный метеоритный дождь*. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – Т. II. – С. 122–126.
7. Заславская, Н. И. Сбор и предварительные исследования образцов почвы из района падения Сихотэ-Алинского метеоритного дождя / Н. И. Заславская // *Метеоритика*. – М. : Наука, 1970. – Вып. 30. – С. 79–85.
8. Шестакова, О. Е. Минералогия и генезис включений силикатов и окислов в алмазах / О. Е. Шестакова, Г. П. Буланова, В. Ф. Махотко // *Генетические аспекты физических свойств и минералогия природного алмаза*. – Якутск : ЯФ СО АН СССР, 1981. – С. 43–51.
9. Haggerty S.E. *The chemistry and genesis of opaque minerals in kimberlites* // *Phys. Chem. Earth*. – Oxford et al., 1975. - V. 9. P. 295-307.
10. Шугурова, Н. А. Состав газовых включений в силикатных сферах различного происхождения / Н. А. Шугурова, Ю. А. Долгов, Г. М. Иванова // *Генетические исследования в минералогии*. – Новосибирск : ИГиГ СО АН СССР, 1976. – С. 3–8.
11. Яценко, И. Г. Сравнительный анализ силикатных сферул из кимберлитовых и лампроитовых формаций мира / И. Г. Яценко, В. Н. Зинченко, В. К. Маршинцев [и др.] // *Материалы Юбилейного съезда Российского минералогического общества «200 лет РМО»*. – СПб, 2017. – С. 261-263.

⁴ Витрификация – переход жидкости при понижении температуры в стеклообразное состояние.