

**КОСМИЧЕСКИЕ СФЕРУЛЫ ИЗ ЛЕДНИКОВОГО ЩИТА НОВОЙ ЗЕМЛИ:
ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ПО ДАННЫМ
ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ**

Бадюков Д.Д. (ГЕОХИ РАН), Вирт Р. (Геол. исслед. центр, Потсдам),

Хисина Н.Р. (ГЕОХИ РАН)

badyukov@geokhi.ru; тел.: (495) 939 70 70

Ключевые слова: *микрометеориты, космические сферулы, кристаллизация*

Основная масса поступающего космического вещества на Землю состоит из частиц, не превышающих по размеру первые миллиметры. Поток этого вещества оценивается в 30 000 тонн в год на всю поверхность Земли в год [1], из которых в виде микрометеоритов (ММ) выпадает примерно 2700–14000 тонн [2], что существенно превосходит поток метеоритов, составляющий около 50 тонн в год [3]. Предполагаются два основных источника ММ – частицы, образующиеся при дроблении астероидов [4] и твердая компонента ядра комет [5].

При входе в атмосферу Земли со скоростями 12 км/сек и выше, микрометеороид взаимодействует с ней, что выражается в его нагреве, плавлении и испарении. Микрометеориты подвергаются этим процессам в разной степени – одни испытывают лишь слабый нагрев не выше 100 °С (непереплавленные ММ), другие нагреваются до температур порядка 800°С (шлаковидные ММ), остальные плавятся (переплавленные ММ или космические сферулы). Содержание космических сферул (КС) в коллекциях ММ, собранных в различных обстановках, составляет от 70 до 30 % от общего числа ММ [2, 6, 7]. Обращает на себя внимание большое количество непереплавленных ММ, испытавших минимальный нагрев при пролете через атмосферу, что противоречит результатам моделирования торможения микрометеороидов в атмосфере [4].

Среди переплавленных ММ по структурным и выделяются различные типы сферул, среди которых по количеству преобладают т.н. полосчатые (banded) сферулы (рис.1а) с колосниковой структурой, сложенные кристаллами оливина в полностью стекловатой или частично раскристаллизованной матрице. Считается, что они претерпели интенсивный нагрев в атмосфере, вызвавший их полное плавление и частичное испарение, приведшее к потере легко и умеренно летучих элементов, вплоть до кремния. Однако, среди этих сферул выделяются веретенообразные сферулы, имеющие характерную ямку (рис.1б), иногда заполненной металлом или ферригидритом (рис.1в). Также некоторые подобные сферулы содержат повышенные содержания Na и K и внеземной воды [5]. Поэтому можно предположить, что эти сферулы возникли в ходе процессов плавления на их родительском теле и были доставлены на Землю подобно непереплавленным ММ. В данной работе приводятся предварительные результаты изучения методом просвечивающей электронной микроскопии 2-х КС из коллекции ММ, собранной на ледниковом щите архипелага Новая Земля.

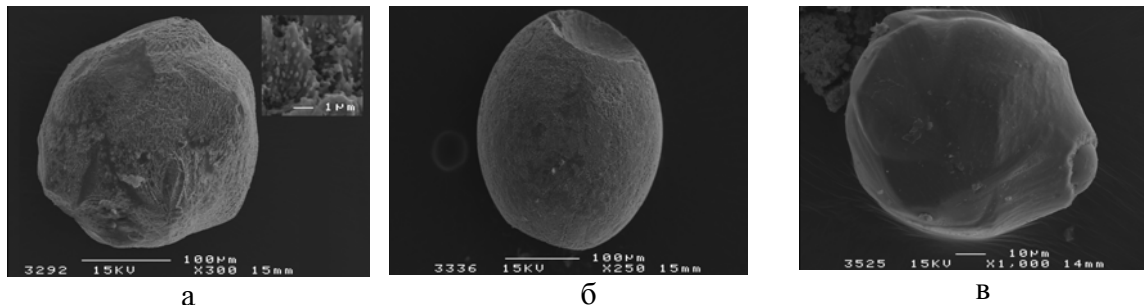


Рис.1. Электронно-микроскопические изображения полосчатых КС во вторичных электронах. а - типичная полосчатая КС; б – веретенообразная КС с ямкой наверху; в - веретенообразная КС с шарообразным включением ферригидрита (справа)

Методы изучения. В качестве объектов исследования нами была выбрана КС NZ8-bn4-25,7, представляющая собой типичную полосчатую сферулу и веретенообразная КС NZ8-bn4-25,9.

Методом травления ионами Ga вырезались пленки толщиной ~ 100 nm размером примерно 15×5 μm из краевых и центральных частей сферул. Пленки исследовались на просвечивающем электронном микроскопе с применением EDX HAADF детектора.

Результаты и обсуждение. КС NZ8-bn4-25,7 сложена округлыми удлиненными кристаллами оливина Fa_{20} размерами менее 2 μm и идиоморфными Mg-Al-Si-содержащими кристаллами магнетита размером 0.5 μm и меньше, погруженными в стекло состава 60 вес.% SiO_2 , 12 % Al_2O_3 , 11.5 % FeO , 3 % MgO и 13.5 % CaO с незначительным содержанием Na. (рис 3а). Судя по структурным взаимоотношениям первым из расплава кристаллизовался оливин. В целом структура данной КС характеризуется скоплениями (кластерами) субпараллельно ориентированных кристаллов оливина вдоль направления $[101]$. Кластеры занимают области размером от микронов до первых десятков микрон, корреляции между ориентациями кристаллов оливина в соседних кластерах не наблюдается. Подобная структура отличается от типичной колосниковой структуры оливиновых хондр в метеоритах, для которой характерно кристаллизация оливиновой каймы на поверхности хондры и дальнейший рост от нее внутрь удлиненных дендритовых кристаллов. В данном случае нами предполагается, что происходила гомогенная кристаллизация в объеме расплава и рост дендритовых агрегатов из центров кристаллизации. Земное изменение этой КС выражается в преимущественном растворении кристаллов оливина.

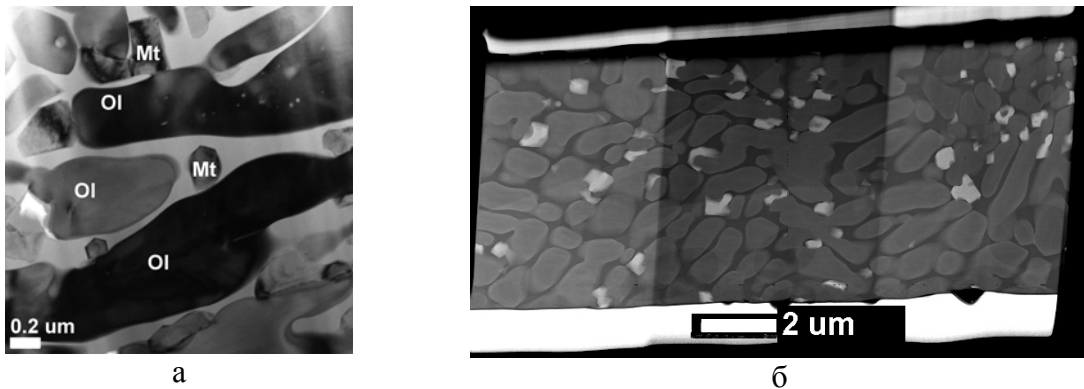


Рис.2. Электронно-микроскопические фотографии центральной части КС NZ8-bn4-25,7 (а - светлпольное изображение; б – обзорное изображение, HAADF детектор)

КС NZ8-bn4-25,9 сложена идиоморфными кристаллами оливина в матрице стекла с составом 45–60 вес.% SiO_2 , 3.5–8 % Al_2O_3 , 5–10% FeO , 27–31 % MgO , 5–6 % CaO . В стекле присутствуют симплектитовые агрегаты хромита, приуроченные к кристаллам оливина. Стекло пористое с размером пор в первые десятки нанометров (рис.4а). Некоторые грани кристаллов оливина имеют фестончатый облик, что свидетельствует о существовании пор в расплаве на стадии кристаллизации. Обращает на себя внимание строго параллельная ориентировка кристаллов оливина (рис. 3б) по плоскости (010) . Это трактуется нами как гомогенная кристаллизация из переохлажденного расплава, причем центры кристаллизации имели параллельную кристаллографическую ориентировку, вероятно, вследствие развивающейся молекулярной упорядоченности жидкости.

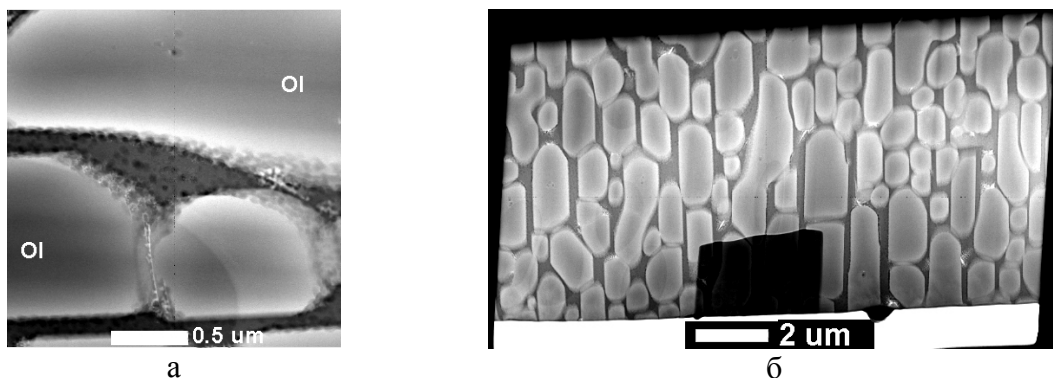


Рис.3. Электронно-микроскопические фотографии пленки, вырезанной из центральной части КС NZ8-bn4-25,9. HAADF детектор

Структура и минералогия частиц свидетельствует о том, что они испытали полное плавление. Для выяснения степени нагрева при прохождении микрометеороида через земную атмосферу нами моделировалось вхождение частиц в диапазоне размеров 0,5–0,05 мм при скоростях входа 30–12 км/сек и разных зенитных углах. Наибольшие температуры достигаются при скоростях 30 км/сек и составляют около 1800°C (рис. 4а), что при углах входа менее 50° относительно нормали к поверхности Земли приводит к полному испарению частиц. Вместе с этим частица при торможении испытывает сильное кажущееся ускорение, достигающее в максимуме -3000 g, а при температурах, превышающих температуру плавления КС – сотни g. Подобные нагрузки для ряда случаев должны эффективно приводить к разделению фаз с различной плотностью, например газа и жидкости. Однако присутствие пор в частице NZ8-bn4-25,9 предполагает, что при плавлении она испытала значительно меньшие кажущиеся ускорения, если вообще подвергалась им.

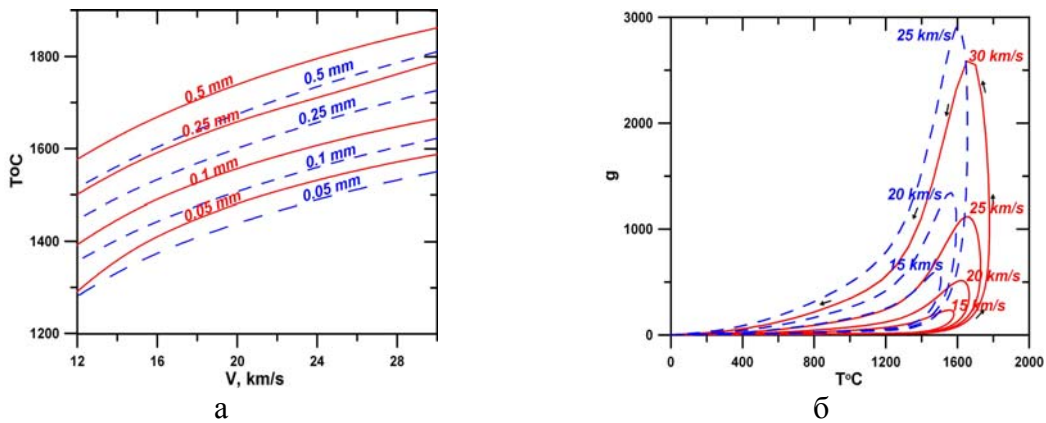


Рис.4. а – пиковые температуры для частиц различного радиуса, входящих с различным углом относительно нормали к поверхности Земли 60° и принятой теплоте испарения $2 \cdot 10^7$ кДж/кг (сплошные линии) и угле 45° и теплоте испарения $5,7 \cdot 10^7$ кДж/кг (прерывистые линии); б – кажущиеся ускорения и температуры, испытываемые частицей с радиусом 0,5 мм при угле входа 75° для разных скоростей (сплошные линии) и то же для частицы с радиусом 0,5 мм при угле входа 45° (прерывистые линии)

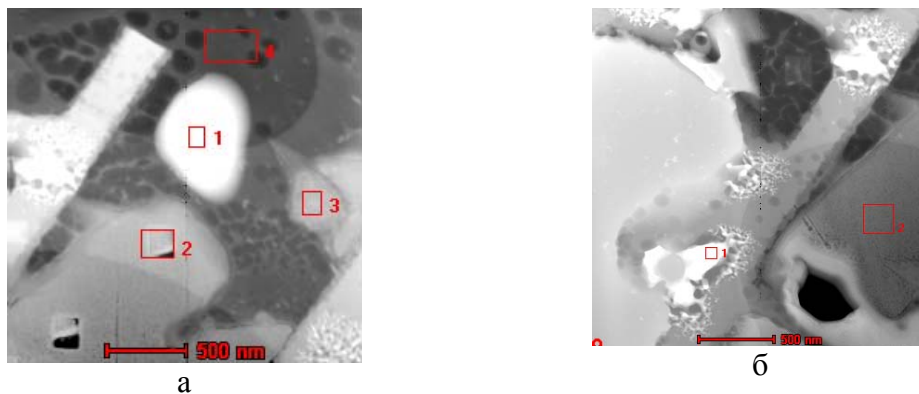


Рис.5. Электронно-микроскопические изображения пленки, вырезанной из периферийной части КС NZ8-bn4-25,9. HAADF детектор. а. 1 – оливин, 2 – КСl, 3 – (К,Na)Сl, 4 – углеродистое вещество; б. 1 – хромит, 2 – КСl

Можно предположить, что источник тепла для плавления этой КС носил вероятно другой характер, нежели торможение в атмосфере, например ударное плавление на безатмосферном теле (астероиде) и доставка этой частицы на Землю по механизму доставки непереплавленных ММ. Весьма примечательной особенностью этой КС является присутствие на периферии включений КСl и (К,Na)Сl с примесью кремния (рис. 5 а,б). Образование этих включений в процессах, действовавших на частицу на поверхности ледника или при препарировке образца представляется крайне маловероятным, возможно, что эти галиды или а) являются следами биоло-

гической активности при земном изменении сферулы или б) были захвачены из аэрозоля земной атмосферы или из газо-пылевого импактного облака, если эта КС была образована в результате ударного события на поверхности астероида или ядра кометы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-05-00444)

Литература

1. Love S. G.; Brownlee D. E. A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust // *Science*. 1993. 262. P. 550-553.
2. Toru T. et al. The global accretion rate of extraterrestrial materials in the last glacial period estimated from the abundance of micrometeorites in Antarctic glacier ice // *Earth Planets. Space*. 2004. 56. P. 67-79.
3. Halliday I., et al. The flux of meteorites on the Earth's surface // *Meteoritics*. 1989. 24. P. 173-178.
4. Love S.G., Brownlee D.E. Heating and thermal transformation of micrometeoroids entering the Earth's atmosphere // *Icarus*. 1991. 89. P. 26-43.
5. Maurette M. Micrometeorites and the Mysteries of Our Origins. - *Advances in Astrobiology and Biogeophysics*. ISBN 3-540-25816-7 // Springer. 2006.
6. Taylor S. et al. Types of micrometeorites accreting at the South Pole. *Antarctica*. 2007. 38th LPSC # 1338 (abstract).
7. Duprat J. et al. Micrometeorites from Central Antarctic snow: The CONCORDIA collection // *Advances in Space Research*. 2007. 39. P. 605-611.

Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(27) 2009

Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2009 года (ЕСЭМПГ-2009)

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2009/informbul-1_2009/planet-7.pdf

Опубликовано 1 сентября 2009 г.

© Вестник Отделения наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2009

При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала, ссылка на «Вестник Отделения наук о Земле РАН» обязательна