

МИКРОСТРУКТУРА И СОСТАВ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ ИЗ ТРЕПЕЛА И ДРУГИХ ПЛАНШЕТОВ

Цельмович В.А.¹, Максе Л.П.²

¹ГО «Борок» ИФЗ РАН», Россия, tselm@mail.ru

²Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий, Могилев, Республика Беларусь, larissa_maxe@rambler.ru

Космическая пыль (КП), определяемая как микро- и нано размерные частицы, сформировавшиеся в космосе – основной внеземной компонент, пополняющий массу Земли. Вклад в массу Земли КП, часть которой по размерам относится к микрометеоритам, значительно больше, чем вклад массы метеоритных тел. В связи с этим геологические слои часто рассматриваются как набор информационных «планшетов» (далее планшетов), отражающих космические процессы, оказавшие глобальное влияние на Землю. Ценность планшетов палеоотложений КП зависит от степени сохранности частиц.

Планишеты-коллекторы и коллекции КП. Значительная часть КП – сферические частицы размером от нескольких до десятков и до сотен микрометров. К информативным планшетам-коллекторам, собирающим и нативную КП, и продукты плавления и сгорания метеорных тел в атмосфере, относят и пустыни (пески Сахары), и льды (Антарктики), а также осадочные породы, сформировавшиеся до появления техносферы. Для сравнения морфологии и состава частиц КП из коллекции месторождения «Стальное» были выбраны два контрастных по температуре планшета: пустынный с высокой температурой и Антарктический с низкой температурой пребывания частиц КП в земных условиях.

Итальянские ученые [Bignami et al., 2014] исследовали сферические частицы вещества космогенного происхождения, извлеченные из песка у границ относительно молодого метеоритного кратера Камил в пустынном регионе Египта. Пески пустыни у кратера Камил соответствуют критериям планшета-коллектора частиц КП, соответственно они имеют определенный информационный потенциал, особенно с учетом факта падения железного метеорита (на границе Египта и Судана). Результаты исследований позволили сформировать коллекцию сферических частиц – микрометеоритов и выявить особенности морфологии магнитных микросфер, содержащихся в песках внутри и за пределами кратера Камил.

Многовековые льды Антарктики представляют собой уникальный планшет-коллектор КП, поступавшей на Землю в прошлом и поступающей в настоящее

время. Авторы исследования антарктических льдов [Rojas et al., 2021] представили результаты изучения коллекции микрометеоритов из антарктического планшета вблизи станции Конкордия (Антарктида). Из сверхчистого льда отделяли частицы КП, идентифицировали 1280 микрометеоритов и 808 космических сфер диаметром от 30 до 350 мкм. Обнаружение места, над которым в Антарктиде в воздухе взорвался метеорит, сбор материала с планшета-коллектора и его исследование дали возможность другим авторам [Ginneken et al., 2021] получить частицы крупной КП с отличительной морфологией. Изучив продукты плавления и конденсации вещества метеорита, авторы указывают, что не все метеоритные взрывные события оставили кратеры на поверхности Земли. Авторы [Ginneken et al., 2021] считают, что следует искать частицы КП в морских осадках, в которых могли накопиться микросферы, образовавшиеся во время взрывов метеоритов над водой.

Осадочная порода – трепел – планшет-коллектор. Ранее авторами [Цельмович и др., 2020] было показано наличие Мт-микросфер в трепеле месторождения «Стальное» (Республика Беларусь, Хотимский район Могилевской области). Большое число обнаруженных в трепеле крупных и чистых, не поврежденных земными процессами, магнитных сфер предполагает обогащение некоторого стратиграфического уровня частицами КП. Была сформирована коллекция Мт-микросфер и других частиц КП, а также база данных коллекции (SEM изображения, элементный состав и др.).

Классификации микрометеоритов. Классификацию частиц КП, достигших Земли, предлагают авторы и коллективы различных стран, основываясь на своих коллекциях и данных. Обоснованная петролого-химическая классификация микрометеоритов предложена авторами [Genge et al., 2008]. Анализ структуры и морфологии КП, с учетом преобразований КП в атмосфере Земли, представлен в работе [Савельева и др., 2020].

Сравнительный анализ магнитных микросфер из трепела и других планшетов. Наиболее обсуждаемые исследователями варианты образования

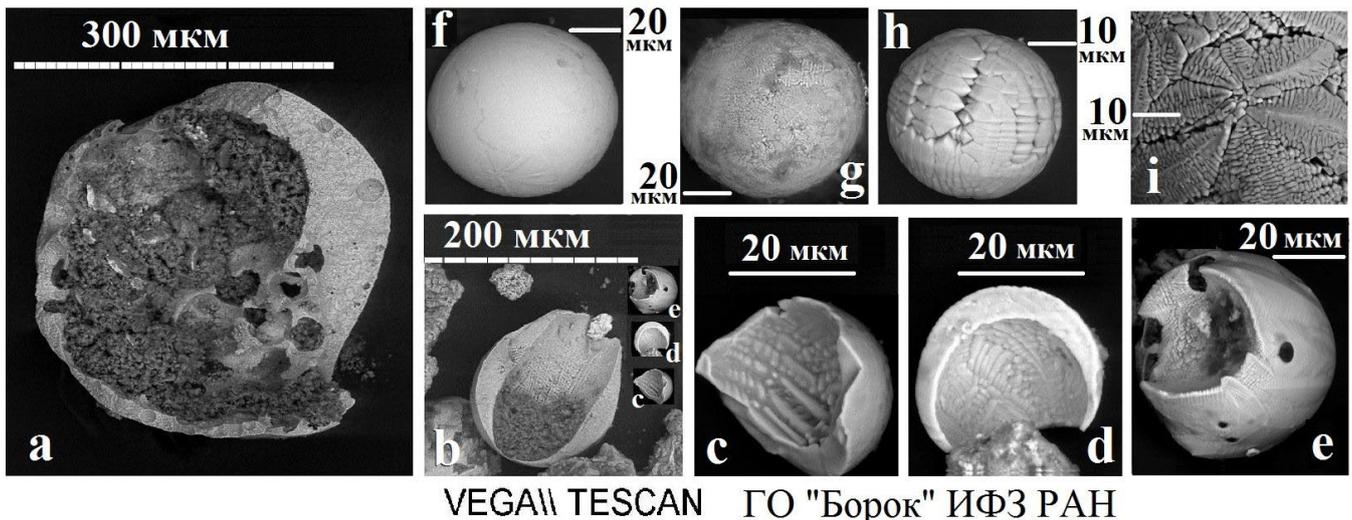


Рис. 1. Мт-микросферы из коллекции «Стальное»: а – крупная расколовшаяся сфера с включениями; б – расколовшаяся сфера с «выхлопом»; в – поврежденная полусфера со следами течения расплава; д – полусфера с асимметрией толщины стенок; е – сфера с асимметричным «выхлопом»; ф – абляционная сфера; г – сфера со смешанной структурой; h – сфера с дендритной структурой; i – фрагмент поверхности сферы с дендритной структурой

магнитных космогенных микросфер мы выбрали в качестве базовых для сравнения. Первый из вариантов – Мт-сферы, упавшие в воду. Это, исходно, преимущественно железные крупные частицы КП (сотни микрометров), они очень быстро (за 5 секунд примерно) пролетают атмосферу, разогреваясь до плавления, успевают окислиться, кристаллизуются, опускаются на дно. Второй вариант – это Мт-сферы, которые образовались при полном сгорании метеорных тел и стали шлейфами-россыпями КП во льдах. Третий вариант – взрывной, в этом случае могли, частично, образоваться Мт-сферы, сплавленные по две, три и даже более крупные образования, упав во льды, все хорошо сохранились, не подвергаясь деструкции. Четвертый вариант – Мт-сферы, аналогичные коллекции сфер, обнаруженных в песках пустыни (в кратере Камил), которые могут иметь смешанный характер. Используя SEM изображения, мы сравнили структуру, морфологию, состав Мт-микросфер в коллекции частиц, выделенных из планшета месторождения «Стальное», с указанными выше вариантами. В коллекции «Стальное» имеются крупные (более 250 мкм) и среднего размера Мт-микросферы (100 – 250 мкм) с выраженной дендритной структурой поверхности, а также зональной или смешанной. Часть средних и мелких Мт-микросфер (менее 100 мкм) имеет зональную кристаллическую поверхность. В то же время в коллекции «Стальное» мы выявили абляционные Мт-микросферы как мелкие, так и средние по размерам. В коллекции «Стальное» выявлено также присутствие расколотых Мт-микросфер, полых

внутри, с выраженной асимметрией Мт оболочки и следами течения магнитно закрученного расплава на внутренней поверхности. В крупной фракции коллекции «Стальное» имеются Мт-микросферы, сплавленные из двух и трех отдельных сфер. Среди Мт-микросфер коллекции «Стальное» встречаются поврежденные микровзрывом – это сферы с отверстиями, похожими на «выхлоп». Внутренности таких поврежденных взрывом Мт-микросфер заполнены продуктами, напоминающими шлак или биоповреждение. В коллекции «Стальное» отсутствуют микросферы, похожие на «выстреленные» Fe-Ni, но при этом обнаружены ленточные и нитевидные частицы Ni и сплавов.

Внутренняя часть дендритных Мт-микросфер напоминает усадочные раковины, которые образуются при кристаллизации металлов и сплавов. Истинная КП – частицы менее 50 мкм преодолевают атмосферу относительно спокойно. В коллекции «Стальное» имеется еще мало изученная фракция Мт-микросфер с минимальными размерами.

Плазмохимический синтез в атмосфере, консервация на дне. Анализируя структуры и морфологию Мт-микросфер из коллекции «Стальное» и песка пустыни, мы провели аналогии с промышленной технологией плазмохимического синтеза. В ходе плазмохимического процесса в атмосфере Земли от тела метеора, от наиболее раскаленной – расплавленной зоны, происходит отрыв, а фактически срезание, части – капли расплава, переохлаждение и кристаллизация. В капле одновременно может протекать и

термическое переохлаждение с теплоотводом и концентрационное, которое перераспределяет примеси в твердой и жидкой фазах. По мере удаления капли от источника с высокой температурой (области плазмы) она подвергается термическому переохлаждению, и скорость кристаллизации возрастает. Кристаллизация магнетита в капле протекает после сильного перегрева расплава (и окисления металла), но очень быстро. Большое концентрационное переохлаждение (большая концентрация примесей, достаточная ширина слоя) и медленная скорость кристаллизации (при малом температурном градиенте) создают условия для формирования дендритной структуры. При небольшом концентрационном переохлаждении, незначительном содержании примесей, но наличии большого градиента температур образуется ячеистая структура. Промежуточные варианты приводят к образованию смешанных структур – ячеисто-дендритных. Таким образом, в планшете месторождения «Стальное» собраны несколько групп микросфер, которые отличаются типом атмосферной плазмохимической «обработки». Одни образованы сгорающими в атмосфере метеорами, другие – взрывами метеорных тел, а третьи – из открытого космоса, сохранившие свой состав, морфологию, структуру. Консервации КП на дне способствовала биота древнего моря.

Выводы. В коллекции микрометеоритов – Мт-микросфер, извлеченных из трепела месторождения «Стальное», обнаружены сферы с дендритной, зональной смешанной структурой, абляциянные, сплавленные друг с другом Мт-микросферы, а также микросферы со следами «выхлопа» ядра наружу. Коллекция «Стальное» представляет широкий спектр частиц КП, входящих в различные классификации и группы, соответственно, месторождение «Стальное» можно считать консервирующим планшетом-коллектором КП, накапливавшейся около 30 миллионов лет. При сравнении частиц КП планшетов трепела, пустыни и Антарктиды морфология и состав в зна-

чительной степени совпадают, что указывает на единый космический механизм их происхождения.

Целенаправленное исследование стратиграфических уровней месторождения «Стальное» даст возможность получить полную фоновую и частные (по уровням) коллекции частиц КП.

Работа выполнена по гос. заданию ИФЗ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bignami L., Guaita C., Pezzotta F., and Zilioli M. Micro-spherules near the Kamil crater // Mem. S.A.It. Suppl. 2013. V. 75. P. 282–294.
2. Genge M.J., Engrand C., Gounelle M. and Taylor S. The classification of micrometeorites // Meteoritics & Planetary Science. 2008. V. 43. No. 3. P. 497–515.
3. Ginneken M. Van, Goderis S., Artemieva N., Debaille V., Decrée S., Harvey R.P. Huwig K.A., Hecht L., Yang S., Kaufmann F.E.D., Soens B., Humayun M., Van Maldeghem F., Genge M.J., Claeys P. A large meteoritic event over Antarctica ca. 430 ka ago inferred from chondritic spherules from the Sør Rondane Mountains // Sci Adv. 2021. Mar 31;7(14):eabc1008.
4. Rojas J., Duprat J., Engrand C., Dartois E., Delauche L., Godard M., Gounelle M., Carrillo-Sánchez J.D., Pokorný P., Plane J.M.C. The micrometeorite flux at Dome C (Antarctica), monitoring the accretion of extraterrestrial dust on Earth // Earth and Planetary Science Letters. 2021. V. 560. P. 116794.
5. Цельмович В.А., Максе Л.П. Микроструктура и состав частиц самородного железа космического происхождения. Труды Всероссийского семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ-2020). 2020. С. 278–281.
6. Савельева О.Л., Савельев Д.П., Москалёва С.В. Космогенные сферулы в океане // Природа. 2020. № 7. С. 31–36.
7. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032874X20070042>
8. URL: <https://www.libnauka.ru/item.php?doi=10.7868/S0032874X20070042>