

РЕЛЬЕФНЫЕ ФОРМЫ НА ПОВЕРХНОСТИ КОСМОГЕННЫХ СФЕРУЛ КАК ПРИЗНАК ИХ ПРОИСХОЖДЕНИЯ

© 2023 О.Л. Савельева, Д.П. Савельев, О.А. Зобенько

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006; e-mail: savelyeva@kscnet.ru*

Поступила в редакцию 01.06.2023 г.; после доработки 28.07.2023 г.; принята в печать 26.09.2023 г.

При исследовании вещественного состава осадочных образований возникает проблема идентификации внеземного вещества, в частности различения космогенных сферул от техногенных и вулканогенных. По результатам изучения коллекции из 482 объемных сферул, выделенных из железомарганцевых корок со дна Тихого океана, предлагается дополнительный признак такой идентификации, основанный на рельефных формах на поверхности сферул. В статье дано подробное описание таких рельефных форм, возникающих при прохождении космическими частицами верхних слоев земной атмосферы, обособлении и отделении от сферул Fe-Ni ядра. Наличие круглой полусферической полости на уплощенной стороне сферулы, впадины с концентрическими кругами или «кнопочной» структуры, так же как и наличие Fe-Ni ядра — достаточный, но не необходимый признак, чтобы считать сферулу космогенной.

Ключевые слова: космогенные сферулы, Fe-Ni ядро, формы рельефа поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Микрометеориты (ММ) — это частицы космической пыли, достигшие земной поверхности, размером от 10 мкм до 2 мм (Rubin, Grossman, 2010). Изучение ММ позволяет получить новую информацию об источниках и потоках внеземной пыли, падающей на Землю, и о процессах, происходящих при вхождении частиц в атмосферу (Badyukov, 2023; Genge et al., 2008; 2020; Van Ginneken et al., 2016). Также ММ вносят вклад в состав медленно накапливающихся осадков, в том числе в обогащение их благородными металлами (Brownlee et al., 1984; Halbach et al., 1989). Значительная часть ММ нагревается и плавится во время прохождения через атмосферу, что приводит к образованию космогенных сферул (КС). При исследованиях осадочных пород часто встает вопрос об идентификации внеземного вещества и об отличиях КС от сферических частиц антропогенного и вулканогенного происхождения. Космогенные частицы можно уверенно отличить по изотопному составу He, Mn, Fe, Ni, Cr, Be, Al (Engrand et al., 2005; Herzog et al. 1999; Raisbeck, Yiou 1987). Однако часто трудно собрать достаточно материала

для изотопного анализа, к тому же этот метод дорогостоящий, и частицы при анализе разрушаются. Поэтому на практике внеземное вещество обычно идентифицируют по химическому и минеральному составу. Используют следующие признаки: близкий к хондритовому состав, оболочка из магнетита с примесью Ni, наличие вюститита (FeO) и других характерных минералов (Badyukov, 2023; Genge et al., 2008, 2017), наличие в Fe-оксидной матрице микросамородков платиноидов (Brownlee et al., 1984; Rudraswami et al., 2014).

Для техногенных и вулканогенных сферул четкие критерии идентификации пока не выработаны. Некоторые признаки приводятся в отдельных статьях, и, например, указано, что для техногенных сферул характерно низкое соотношение Fe^{3+}/Fe_{total} и высокое содержание ZnO (Zhang et al., 2014), а также высокое содержание Mn и Cr (Bi et al., 1993). Среди сферул, найденных в вулканических породах (туфах, тефрах), вулканогенными можно считать частицы, для которых доказано сходство состава с вмещающими вулканитами или синхронными накоплению пород пепловыми частицами, поскольку любые отложения на поверхности Земли могут быть

заражены космогенным материалом. Вулкано-генные сферулы описаны в работе С.Н. Рычагова с соавторами (2023), которые приводят сравнение составов найденных стеклянных шариков, частиц каплевидной и гантелевидной формы с составом стекол из пепла конкретного вулканического извержения.

Морфология сферических частиц обычно не является критерием их космогенности, поскольку техногенные частицы, ударные сферулы и вулканическая пыль могут иметь сходный облик (Genge et al., 2008). И лишь один структурно-морфологический признак с уверенностью указывает на космогенное вещество — наличие у сферулы Fe-Ni ядра (Genge et al., 2017).

Наибольшая концентрация сферул установлена в океанских гидрогенных Fe-Mn корках (Halbach et al., 1989), из-за очень медленного роста этих корок (менее 10 мм за 1 млн лет). Fe-Mn корки покрывают поверхности, лишенные осадка, на подводных горах и хребтах на глубине от 400 до 7000 м (Hein et al., 2013). Для получения представительной коллекции космогенных сферул иногда достаточно одного кг

материала корки (Halbach et al., 1989). Ранее мы изучили коллекцию магнитных сферул размером 40–200 мкм из железомарганцевых корок с двух гайотов Магеллановых гор (Савельев и др., 2020, 2022). Значительное количество изученных сферул обладает Fe-Ni ядром. Механизм образования металлического ядра и его отделения от силикатной или оксидной оболочки описан в (Савельева и др., 2021; Brownlee et al., 1984).

В настоящей статье приводится подробное описание рельефных форм, возникающих на поверхности сферул при прохождении ими верхних слоев земной атмосферы, обособлении и отделении от сферулы Fe-Ni ядра. Мы предлагаем использовать эти морфологические особенности сферул как еще один признак их внеземного происхождения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследования послужили два образца Fe-Mn корок, драгированных с гайотов Магеллановых гор (рис. 1).

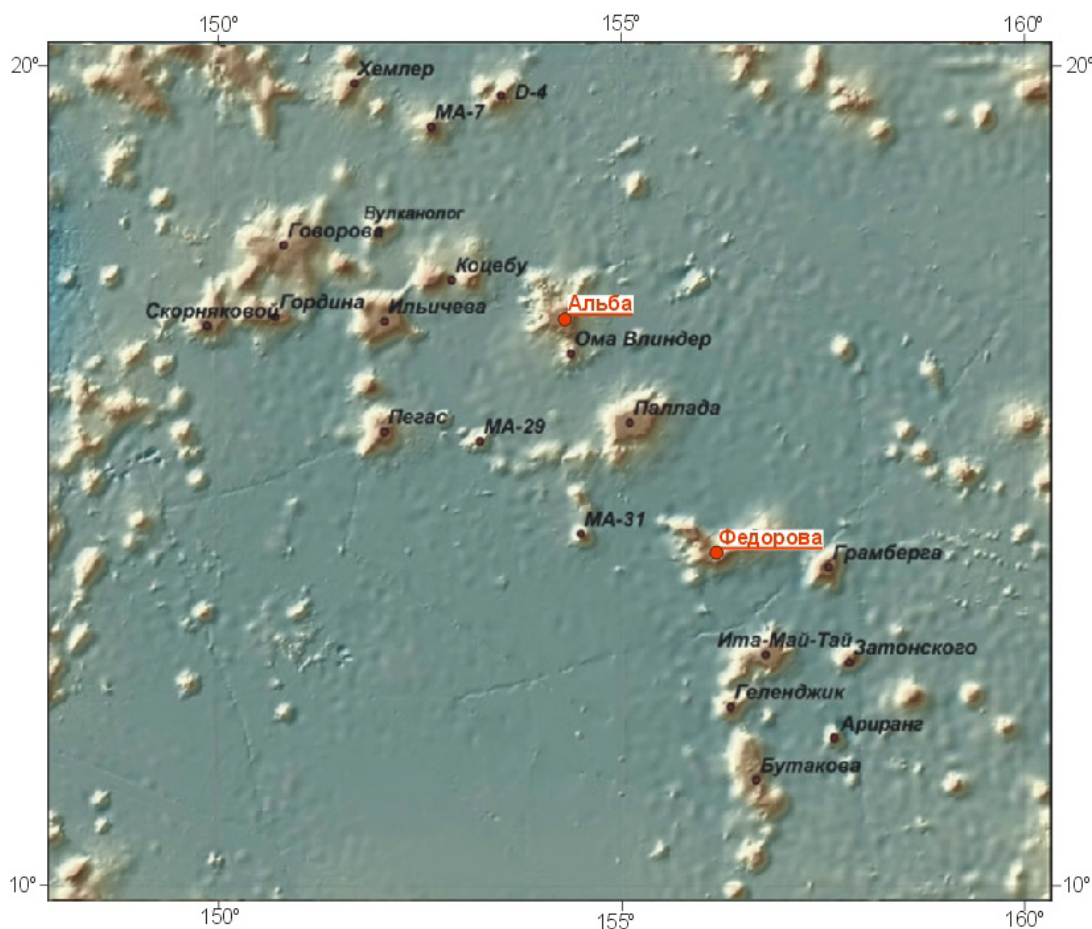


Рис. 1. Гайоты Магеллановых гор (<http://guyot.ocean.ru>). Названия гайотов, с которых драгированы исследованные образцы, показаны красным цветом.

Fig. 1. Guyots of the Magellan Seamounts (<http://guyot.ocean.ru>). The names of the guyots from which the studied samples were dredged are shown in red.

Образец с гайота Федорова (35Д159) представлен Т.Е. Пузанковой, с гайота Альба — из коллекции В.А. Рашидова.

Образцы Fe-Mn корок, из которых выделены сферулы, описаны нами в работах (Савельев и др., 2020, 2022). Методика разделения материала основана на том, что космогенные сферулы содержат магнитные минералы, в отличие от немагнитного аутигенного матрикса Fe-Mn корок. Образцы были издроблены до 0.5 мм вручную с использованием мраморных ступки и пестика. Для удаления глинистой фракции издробленные пробы были обработаны в ультразвуковой ванне, отмучены и затем высушены. Мощным неодимовым магнитом была выделена магнитная фракция. С помощью стальной иглы из магнитной фракции были отобраны сферулы (частицы сферической или близкой к сферической формы, в отличие от кристаллов и обломков кристаллов магнитных минералов), размер которых варьировал от 40 до 200 мкм. В данной статье рассмотрены 482 объемные сферулы. Выделенные сферулы были помещены на электропроводящий скотч и изучены под электронным микроскопом VEGA3 с аналитической приставкой X-MAX80 в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский (Савельев и др., 2020, 2022).

РЕЛЬЕФНЫЕ ФОРМЫ НА ПОВЕРХНОСТИ СФЕРУЛ

Большинство выделенных КС относится к двум типам (из трех типов КС по классификации (Genge et al., 2008)). Первый тип (G-тип по (Genge et al., 2008)) состоит из оксидов железа, которые образуют скелетные кристаллы внутри силикатной основной массы, превратившейся в глину. Второй тип сферул (I-тип по (Genge et al., 2008)) состоит из оксидов железа (вюстит и магнетит) с примесью никеля и кобальта. Внутри сферул обоих типов иногда присутствует металлическое ядро из сплава Fe и Ni. При анализе ядер было определено, что железо составляет от 8 до 93%, также кроме никеля постоянно присутствует примесь Co (Савельев и др., 2022). Меньшая часть выделенных объемных КС принадлежит S-типу, состоящему преимущественно из силикатов. Разделить G- и S-типы в объемных формах сферул не всегда возможно. По результатам изучения выделенной из данных образцов коллекции сферул в полированных препаратах (Савельев и др., 2020, 2022), более половины относится к I-типу, примерно 30% — к G-типу, менее 20% — к S-типу.

При изучении объемных сферул без дальнейшей полировки обычно неясно, присутствует ли внутри них Fe-Ni ядро. Иногда наблюдаются экземпляры с полостями от выпавших ядер,

а также сферулы с другими формами поверхности, генетически связанными с ядрами. Такие сферулы составляют в нашей коллекции 13.3% (64 экз.). На поверхности сферул выделяются следующие формы: (1) полусферические полости; (2) круглые концентрические впадины; (3) «кнопочные» структуры; (4) складки в форме полумесяца.

Полусферические полости (рис. 2а–в) имеют отношение диаметра к диаметру сферулы примерно от 1/3 до 1/2 и разную глубину. Нередко со стороны полости поверхность сферулы уплощена.

Круглые неглубокие впадины с концентрическим строением (рис. 2г–е) обычно сопряжены с уплощением поверхности сферулы. Центральное углубление в них окружено дополнительными концентрическими углублениями, напоминающими расходящиеся волны. Поверхность таких рельефных форм не отличается от поверхности остальной сферулы. Однако в некоторых случаях в центре или на периферии концентрических впадин из-под оксидной оболочки на поверхность выходит металлическое ядро (рис. 2г, 2е).

Структуры, называемые рядом авторов «кнопочными» (Bi et al., 1993; Dekov et al., 2007; Folco, Cordier, 2015), характеризуются наличием круглого возвышения на поверхности КС с отношением от 1/3 до 2/3 к диаметру сферулы с дополнительным кратерообразным углублением в центре и/или кольцевым углублением по периферии (рис. 2ж–и). Иногда наблюдается другая разновидность «кнопочной» структуры: круглая впадина с выпуклым, а не вогнутым дном (рис. 2к). Поверхность «кнопочных» рельефных форм гладкая, в отличие от остальной поверхности сферул.

Складки в форме полумесяца (рис. 2л, 2м) сходны с «кнопочными» структурами без дополнительных углублений, однако они не имеют центра симметрии и выглядят смещенными.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже было сказано, наличие у сферулы Fe-Ni ядра является достаточным признаком, чтобы отнести ее к космогенным. Fe-Ni ядра наблюдаются во всех трех (каменном, стеклянном, железном) типах космических сферул, произошедших от хондритовых частиц. Такие ядра распространены среди сферул I- и G-типов, но встречаются лишь в небольшом количестве полосчатых сферул S-типа (Brownlee, 1985; Rudraswami et al., 2014; Taylor et al., 2000). Космические сферулы с Fe-Ni ядрами были впервые обнаружены в глубоководных Fe-Mn конкрециях экспедицией корвета «Челленджер» 1872–1876 гг. (Murray, Renard, 1891). Уже тогда были отмечены

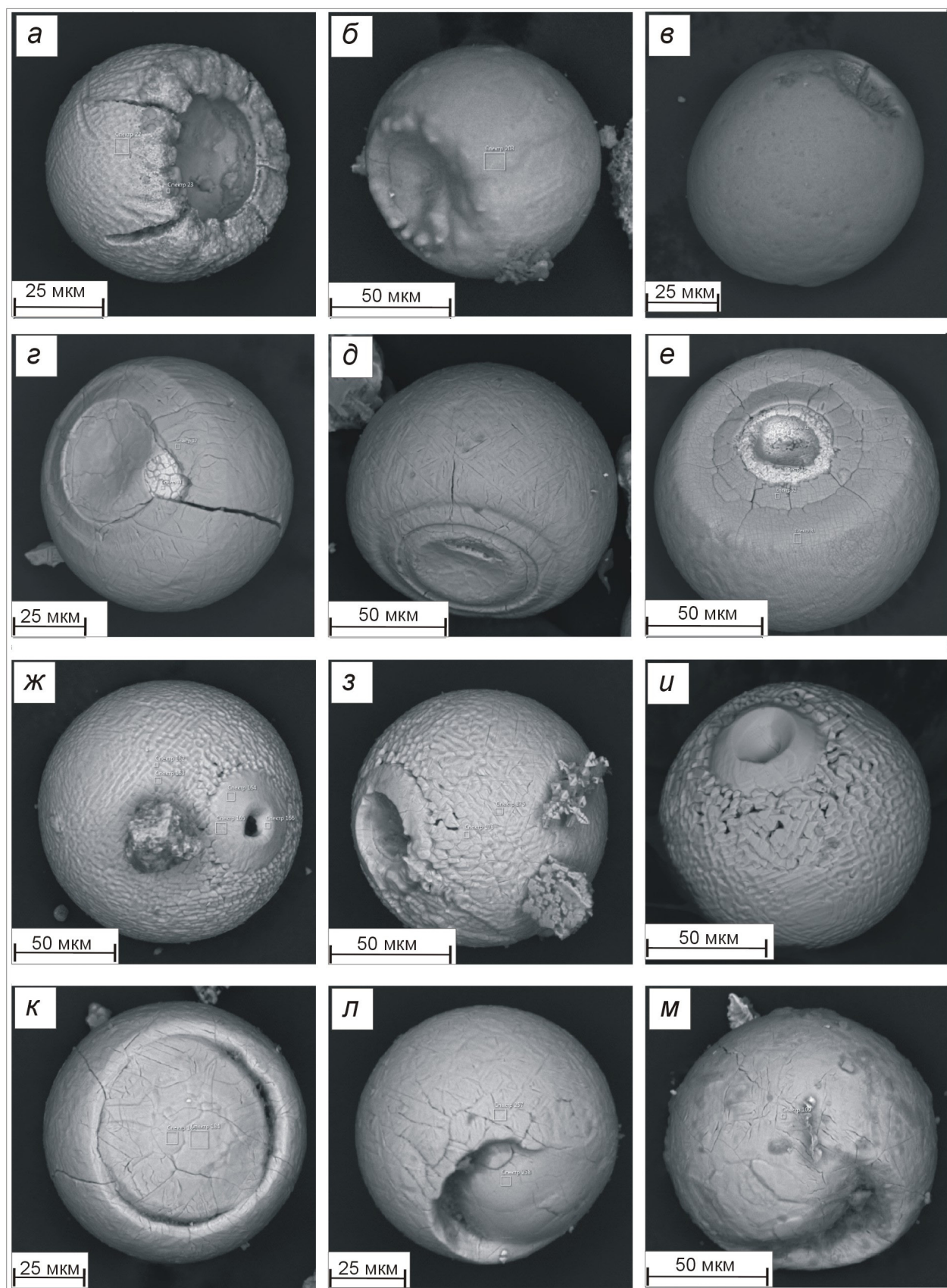


Рис. 2. Рельефные формы на поверхности космогенных сферул: а–в — полусферические полости; г–е — впадины с концентрическим строением; ж–к — «кнопочные» структуры; л, м — складки в форме полумесяца.

Fig. 2. Relief forms on the surface of cosmic spherules: а–в — hemispherical cavities; г–е — depressions with concentric structure; ж–к — «button» structures; л, м — crescent-shaped folds.

экземпляры с полостями от удаленных из сферул ядер — «купулами» (от франц. *cupula* — чаша). Последующие исследования выявили во всех подробностях детали возникновения Fe-Ni ядер и покидания ими сферул (Bi et al., 1993; Brownlee et al., 1984; Dekov et al., 2007; Genge et al., 2008; Rudraswami et al., 2014).

Микрометеориты состава углистых хондритов различных классов взаимодействуют с верхней частью атмосферы на высоте ~120 км, подвергаются нагреву, расплавляются или частично расплавляются. Углерод при этом сгорает, создавая восстановительную среду внутри частицы, восстановленный металл отделяется от силикатной жидкости из-за их несмесимости. Из-за большой разницы в плотности металлическая и силикатная фракции разделяются силами инерции. Железо-никелевый шарик является предшественником для сферул I-типа, а оставшаяся оболочка формирует силикатную сферулу (Rudraswami et al., 2011). Далее Fe в металлической сферуле начинает окисляться, и образуется оболочка из оксида железа. Оставшийся неокисленным металл формирует Fe-Ni ядро с высоким содержанием никеля ($Ni > 10$ мас.%) и других тугоплавких металлов. Ядро может смещаться от центра или выступать на поверхности сферулы из-за инерционных и центробежных сил, образуя «кнопочную» структуру. Металлическое ядро может быть выброшено из вмещающего оксида железа, в результате чего образуются металлическая Ni-Fe сферула и сферула из оксида железа с полостью. Весь процесс дифференциации первичной частицы происходит в течение нескольких секунд.

Таким образом, возникновение полусферических полостей (рис. 2а–в) на поверхности КС связано с вылетом ядра. Уплотнение сферул со стороны полости возникает при плавлении и застывании в верхних слоях атмосферы. Доказательством этого процесса служит то, что границы полостей ровные, и обрамление полостей состоит из обычного материала КС: магнетита и вюстита (в случае сферул I-типа) или дендритов магнетита в силикатной матрице (в случае сферул G-типа). Уплотнение возникает, по-видимому, в тот момент, когда частица летит ядром вперед, и ее поверхностный слой на фронтальной стороне подвергается абляции и испарению. Большинство сферул застывают до или сразу после вылета ядра, но наиболее скоростные частицы успевают в расплавленном состоянии развернуться полостью назад и вырастить по ее краям конический «хвост» из материала, перемещенного при абляции из передней части (Dekov et al., 2007). В нашей коллекции сложных сферул с «хвостами» мы не обнаружили.

В тех случаях, когда сферула застывает до вылета ядра, возникает еще ряд рельефных

форм на ее поверхности. Круглые неглубокие впадины с концентрическим строением (рис. 2г–е) связаны с абляцией и испарением материала сферулы на ее переднем конце, к которому смещено ядро. Концентрические углубления в форме волн связаны с зональным строением, которое характерно для некоторых КС; разные слои сферулы в разной степени подвергаются абляции и испарению. Ядро может в некоторых случаях подвергаться абляции и испарению, но чаще оно находится еще слишком глубоко внутри КС. И только в случае механического разрушения оксидной оболочки в процессе выветривания в наземных условиях мы видим под ней металлическое ядро (рис. 2г, 2е).

«Кнопочная» структура (рис. 2ж–к) возникает, когда ядро смещено еще больше и уже готово покинуть сферулу. В этом случае ядро частично подвергается абляции и испарению вместе с оксидной оболочкой. Кроме того, часть ядра, выступающая за пределы оболочки, еще в расплавленном состоянии окисляется и покрывается оксидной пленкой. Оксидная пленка на поверхности металлического ядра силикатной сферулы описана в работе (Genge et al., 2017), а на поверхности сферулы I-типа — в работе (Rudraswami et al., 2014). Оксидная пленка на ядре имеет гладкую поверхность, в отличие от ранее образованной оксидной оболочки самой сферулы. В нашей коллекции (рис. 2ж–к) поверхности частиц с «кнопочной» структурой также целиком покрыты оксидами, а выступающие ядра угадываются лишь по их округлым очертаниям. Отверстия в центре выступающих ядер могут быть первичными, связанными с абляцией, но также могут возникнуть вследствие выветривания на земной поверхности. При этом металл подвергается выветриванию в гораздо большей степени, чем магнетит, замещаясь оксигидроксидами железа (Van Ginneken et al., 2016), поэтому ядро может оказаться разрушенным в своей внутренней части, в то время как оксидная пленка на его поверхности сохранится, образуя возвышение с полостью под ним.

Складки в форме полумесяца (рис. 2л, 2м) подобны «кнопочным» структурам и, по-видимому, образуются, если ядро смещается не только вперед, но и вбок из-за вращения частицы.

Сферулы, изученные нами, извлечены из внутренних слоев глубоководных Fe-Mn корок, не содержащих примеси техногенного материала и с небольшой примесью эолового материала. Поэтому, так же как и коллекция сферул из глубоководных осадков (Rudraswami et al., 2014), она может служить эталоном для выделения признаков космогенных сферул. Описанные особенности рельефа поверхности КС могут помочь распознавать их и отличать от сферул техногенного и вулканогенного происхождения.

Почти все описанные структуры, связанные с обособлением и инерционным вылетом Fe-Ni ядра, однозначно свидетельствуют о космогенном материале. Только в случае полусферических отверстий необходимо соблюдать осторожность в выводах. Круглые полости (везикулы) могут образоваться в частицах любого происхождения при дегазации насыщенного летучими расплава. Они описаны и в техногенных сферулах (Zhang et al., 2014), и в сферулах из вулканогенных пород (Сандиминова и др., 2003). Встречаются такие везикулы и в КС (например, Genge et al., 2020), есть они и в нашей коллекции. Как правило, полости от дегазации множественны и имеют менее четкие очертания, чем возникшие в результате вылета Fe-Ni ядра. В спорных случаях необходимо применять другие критерии идентификации космогенного материала, в первую очередь вещественный состав.

ВЫВОДЫ

По результатам изучения коллекции из 482 объемных сферул, выделенных из Fe-Mn корок, предлагается дополнительный признак внеземного происхождения сферул, основанный на рельефных формах их поверхности. Наличие форм, связанных с выделением из силикатной или оксидной матрицы Fe-Ni ядра — круглой полусферической полости на уплощенной стороне сферулы, впадин с концентрическими кругами или «кнопочной» структуры — является признаком космогенности. Поскольку наличие Fe-Ni ядра в сферуле является достаточным (но не необходимым) признаком космического происхождения, то и перечисленные выше формы поверхности сферул являются также достаточным, но не необходимым признаком.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-27-00068), <https://rscf.ru/project/23-27-00068/>.

Список литературы [References]

- Рычагов С.Н., Кравченко О.В., Сандиминова Е.И., Филофова Т.М. Вулканическое стекло в цеолит-кремнистых отложениях Паужетского геотермального месторождения (Южная Камчатка) // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXVI ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 30-31 марта 2023 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2023. С. 168–171 [Rychagov S.N., Kravchenko O.V., Sandimirova E.I., Phyllosofova T.M. Volcanic glass in zeolite-siliceous deposits of the Pauzhetsky geothermal field (South Kamchatka) // Volcanism and related processes. Proceedings of the XXVI annual scientific conference dedicated to the Volcanologist Day, March, 30-31, 2023. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2023. P. 168–171 (in Russian)].
- Савельев Д.П., Савельева О.Л., Москалева С.В., Рашидов В.А. Состав космогенных сферул из железомарганцевых корок Магеллановых гор // Геохимия. 2022. Т. 67. № 5. С. 413–422. <https://doi.org/10.31857/S0016752522050090> [Savelyev D.P., Savelyeva O.L., Moskaeva S.V., Rashidov V.A. Composition of Cosmic Spherules from Ferromanganese Crusts of the Magellan Seamounts // Geochemistry International. 2022. V. 60. № 5. P. 411–420. <https://doi.org/10.1134/S0016702922050081>].
- Савельев Д.П., Ханчук А.И., Савельева О.Л. и др. Первая находка платины в космогенных сферулах железомарганцевых корок (гайот Федорова, Магеллановы горы, Тихий океан) // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 491. № 2. С. 15–19. <https://doi.org/10.31857/S2686739720040155> [Savelyev D.P., Khanchuk A.I., Savelyeva O.L. et al. First Find of Platinum in Cosmogenic Spherules of Ferromanganese Crusts (Fedorov Guyot, Magellan Seamounts, Pacific Ocean) // Doklady Earth Sciences. 2020. V. 491. № 2. P. 199–203. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20040157>].
- Савельева О.Л., Савельев Д.П., Москалева С.В. Космогенные сферулы в океане // Природа. 2020. № 7. С. 31–36. [Savelyeva O.L., Savelyev D.P., Moskaeva S.V. Cosmogenic Spherules in the Ocean // Priroda. 2020. № 7. P. 31–36 (in Russian)]. <https://doi.org/10.7868/S0032874X20070042>
- Сандиминова Е.И., Главатских С.Ф., Рычагов С.Н. Магнитные сферулы из вулканогенных пород Курильских островов и Южной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2003. № 1. С. 135–140 [Sandimirova E.I., Glavatskikh S.F., Rychagov S.N. Magnetic Spherules from Volcanogenic Rocks of the Kuril Islands and Southern Kamchatka // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2003. № 1. P. 135–140 (in Russian)].
- Badyukov D.D. Micrometeorites from the Novaya Zemlya Ice Sheet // Advances in Geochemistry, Analytical Chemistry, and Planetary Sciences: 75th Anniversary of the Vernadsky Institute of the Russian Academy of Sciences. Cham: Springer International Publishing, 2023. P. 323–334. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09883-3_17
- Bi D., Morton R.D., Wang K. Cosmic nickel-iron alloy spherules from Pleistocene sediments, Alberta, Canada // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1993. V. 57. № 16. P. 4129–4136. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90359-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90359-5)
- Brownlee D.E. Cosmic dust: Collection and research // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1985. V. 13. № 1. P. 147–173.
- Brownlee D.E., Bates D.A., Wheelock M.M. Extraterrestrial Pt-group nuggets in deep sea sediments // Nature. 1984. V. 309. № 5970. P. 693–695. <https://doi.org/10.1038/309693a0>
- Dekov V.M., Molin G.M., Dimova M. et al. Cosmic spherules from metalliferous sediments: A long journey to the seafloor. // Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen: Journal of Mineralogy and Geochemistry. 2007. V. 183. № 3. P. 269–282. <https://doi.org/10.1127/0077-7757/2007/0073>
- Engrand C., McKeegan K.D., Leshin L.A. et al. 2005. Isotopic compositions oxygen, iron, chromium, and nickel in cosmic spherules: Toward a better comprehension of atmospheric entry heating effects // Geochimica et

- Cosmochimica Acta. 2005. V. 69. № 22. P. 5365–5385. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.07.002>
- Folco L., Cordier C. Micrometeorites // European Mineralogical Union Notes in Mineralogy. 2015. V. 15. Ch. 9. P. 253–297.
- Genge M.J., Engrand C., Gounelle M., Taylor S. The classification of micrometeorites // Meteoritics and Planetary Science. 2008. V. 43. № 3. P. 497–515. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2008.tb00668.x>
- Genge M.J., Larsen J., Van Ginneken M., Suttle M.D. An urban collection of modern-day large micrometeorites: Evidence for variations in the extraterrestrial dust flux through the Quaternary // Geology. 2017. V. 45. № 2. P. 119–122. <https://doi.org/10.1130/G38352.1>
- Genge M.J., Van Ginneken M., Suttle M.D. Micrometeorites: Insights into the flux, sources and atmospheric entry of extraterrestrial dust at Earth // Planetary and Space Science. 2020. V. 187. P. 104900. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104900>
- Halbach P., Kriete C., Prause B., Puteanus D. Mechanisms to explain the platinum concentration in ferromanganese seamount crusts // Chemical Geology. 1989. V. 76. № 1–2. P. 95–106. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(89\)90130-7](https://doi.org/10.1016/0009-2541(89)90130-7)
- Hein J.R., Mizell K., Koschinsky A., Conrad T.A. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources // Ore Geology Reviews. 2013. V. 51. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.12.001>
- Herzog G.F., Xue S., Hall G.S. et al. Isotopic and elemental composition of iron, nickel, and chromium in type I deep-sea spherules: Implications for origin and composition of the parent micrometeoroids // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1999. V. 63. № 9. P. 1443–1457. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00011-3)
- Murray S., Renard A.F. Report on deep-sea deposits based on the specimens collected during the voyage of H.M.S. Challenger in the years 1872 to 1876. London: Neill and Co, 1891. 525 p. hdl:10013/epic.45942
- Raisbeck G.M., Yiou F. 10Be and 26Al in micrometeorites from Greenland ice // Meteoritics. 1987. V. 22. P. 485.
- Rubin A.E., Grossman J.N. Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions // Meteoritics and Planetary Science. 2010. V. 45. № 1. P. 114–122. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2009.01009.x>
- Rudraswami N.G., Parashar K., Shyam Prasad M. Micrometer- and nanometer-sized platinum group nuggets in micrometeorites from deep-sea sediments of the Indian Ocean // Meteoritics and Planetary Science. 2011. V. 46. № 3. P. 470–491. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2011.01169.x>
- Rudraswami N.G., Shyam Prasad M., Babu E.V.S.S.K., Vijaya Kumar T. Chemistry and petrology of Fe-Ni beads from different types of cosmic spherules: Implication for precursors // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2014. V. 145. P. 139–158. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.09.029>
- Taylor S., Lever J.H., Harvey R.P. Numbers, types, and compositions of an unbiased collection of cosmic spherules // Meteoritics and Planetary Science. 2000. V. 35. № 4. P. 651–666. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2000.tb01450.x>
- Van Ginneken M., Genge M.J., Folco L., Harvey R.P. The weathering of micrometeorites from the Transantarctic Mountains // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2016. V. 179. P. 1–31. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.11.045>
- Zhang H., Shen S.Z., Cao C.Q., Zheng Q.F. Origins of microspherules from the Permian–Triassic boundary event layers in South China // Lithos. 2014. V. 204. P. 246–257. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.02.018>

RELIEF FORMS ON THE SURFACE OF COSMOGENIC SPHERULES AS A SIGN OF THEIR ORIGIN

O.L. Savelyeva, D.P. Savelyev, O.A. Zobenko

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006;
e-mail: savelyeva@kscnet.ru*

Received June 01, 2023; revised July 28, 2023; accepted September 26, 2023

When studying the material composition of sedimentary formations, the problem of identifying extraterrestrial matter arises, in particular, distinguishing cosmic spherules from technogenic and volcanogenic ones. Based on the results of study of a collection of 482 volumetric spherules separated from ferromanganese crusts from the Pacific Ocean floor, an additional feature of such identification based on relief forms on the surface of spherules is proposed. The article gives a detailed description of such relief forms arising during the passage by cosmic particles through the upper layers of the Earth's atmosphere, isolation and separation of the Fe-Ni cores from the spherules. The presence of a round hemispherical cavity on the flattened side of the spherule, a depression with concentric circles, or a «button» structure, as well as the presence of a Fe-Ni core is a sufficient but not necessary sign to consider a spherule cosmogenic.

Keywords: cosmogenic spherules, Fe-Ni core, surface relief forms.