

Научные статьи

УДК 549.261

<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2024-4-64-5-13>

ПЕРВОЕ ОПИСАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СФЕРУЛ IN SITU В ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВОЙ КОРКЕ С ГАЙОТА АЛЬБА (МАГЕЛЛАНОВЫ ГОРЫ)

© 2024 О.Л. Савельева, Д.П. Савельев, О.А. Зобенько, В.А. Рашидов

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

Поступила в редакцию 03.05.2024; после доработки 29.10.2024; принята в печать 25.12.2024

В полированных препаратах из железомарганцевой корки с гайота Альба (Магеллановы горы) обнаружено 9 космических сферул I-типа в ненарушенном залегании. Они состоят из оксидов Fe и иногда содержат ядро из сплава Fe и Ni. Размер сферул 40–250 мкм. Сферулы приурочены к пористому фосфатно-глинистому материалу, заполняющему промежутки между столбцами, сложенными оксигидроксидами Fe и Mn. Фосфаты в матриксе, вмещающем сферулы, представлены в основном костным детритом. Встречены зерна барита, цеолиты, фораминиферы. Нахождение сферул in situ в Fe-Mn корке исключает заражение при пробоподготовке и свидетельствует о том, что сферулы накапливались практически одновременно с вмещающим их слоем. Изучены также сферулы из раздробленных корок гайотов Альба и Федорова, отмечено присутствие у некоторых из них железомарганцевой оболочки с концентрически-слоистым строением.

Ключевые слова: космические сферулы, железомарганцевые корки, фосфатно-глинистый материал.

ВВЕДЕНИЕ

Космические сферулы (КС) в железомарганцевых образованиях и глубоководных осадках дна океанов изучаются более 100 лет (Brownlee et al., 1984; Finkelman, 1970; Halbach et al., 1989; Murray, Renard, 1891; Rudraswami et al., 2011). Некоторые авторы предпочитают называть частицы, поступающие из космоса, «внеземными» (Печерский и др., 2017). М.П. Торохов и М.Е. Мельников (2005) отмечают наличие в Fe-Mn корках «космогенных микросферул». В англоязычной литературе широко применяется термин «cosmic spherules» (Rudraswami et al., 2014), который перешел и во многие отечественные научные работы в виде обозначения «космические сферулы» (Бадюков и др., 2018). В настоящей работе мы также будем применять этот термин.

Наибольшими концентрациями КС среди океанских отложений обладают Fe-Mn корки, покрывающие вершины и склоны некоторых подводных возвышенностей, что связано с низ-

кими скоростями роста корок (<10 мм/млн лет) (Hein et al., 2013). Из глубоководных осадков сферулы извлекаются мощным магнитом — как при драгировании дна океанов, так и в лабораторных условиях из поднятого осадка (Rudraswami et al., 2011). Для выделения КС из Fe-Mn корок и конкреций их материал обычно подвергается дроблению и отмучиванию, а затем из него выделяется магнитная фракция, из которой вручную отбираются сферулы (Савельев и др., 2020). Между тем, Fe-Mn корки неоднородны по составу и структуре, и, чтобы лучше понять историю накопления сферул в корках, необходимо определить, где в них сосредоточены сферулы и как они соотносятся с другими компонентами корок. В связи с этим нами была предпринята попытка найти КС in situ — непосредственно в Fe-Mn корке без ее дезинтеграции. Предыдущими исследователями было установлено, что в Fe-Mn корках гайотов Магеллановых гор Тихого океана (рис. 1) отмечается значительная концентрация сферул — до тысячи на килограмм

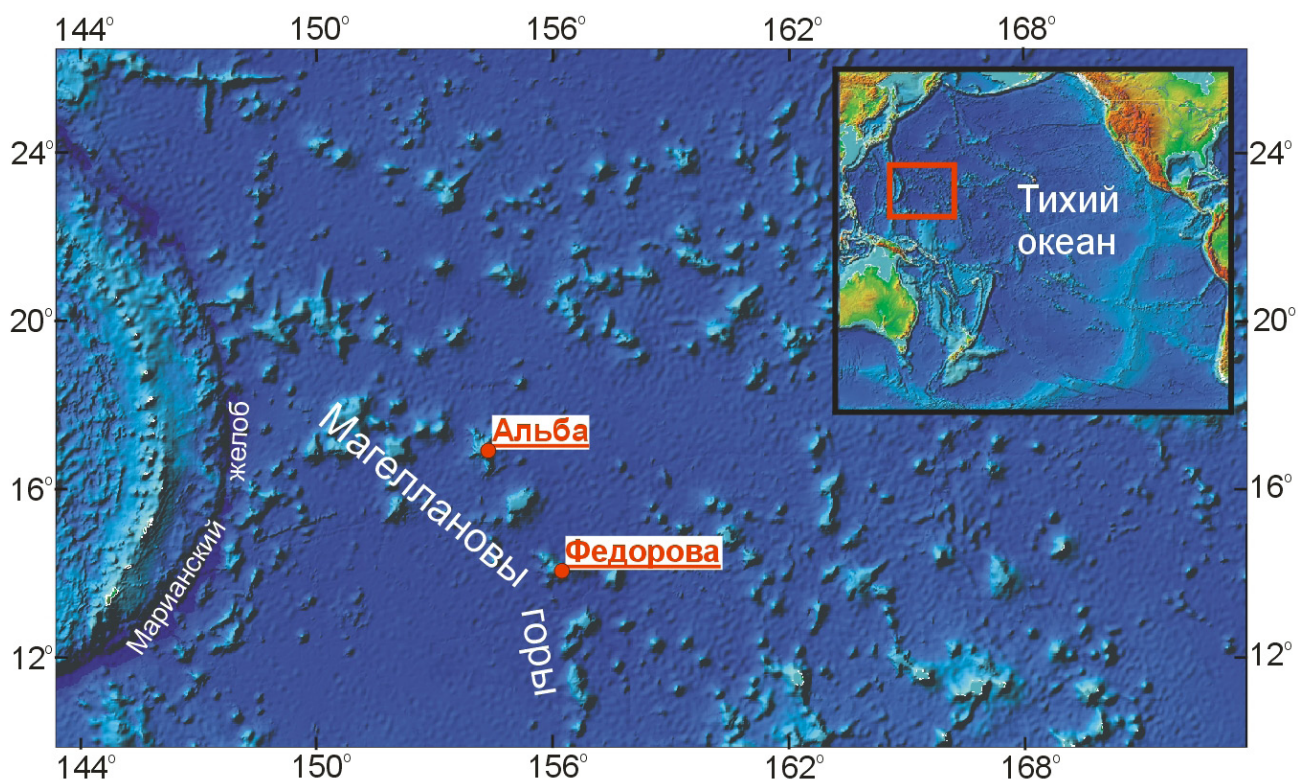


Рис. 1. Местоположение гайотов Альба и Федорова.

Fig. 1. Location of the Alba and Fedorov guyots.

(Торохов, Мельников, 2005). Для изучения нами была выбрана Fe-Mn корка с гайота Альба Магеллановых гор, поскольку наши предыдущие исследования показали, что именно этот образец наиболее богат КС (Савельев и др., 2022). В настоящей статье представлены результаты изучения КС *in situ* в данной корке.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образец с гайота Альба представляет собой двухслойную Fe-Mn корку мощностью 6 см на субстрате мощностью 4–6 см (рис. 2). Субстрат корки сложен брекчией: обломки глинистой с примесью кремнистого и фосфатного вещества породы (видимо, сильно измененного базальта) коричневатого-желтого и коричневого цвета размером до 5 см сцементированы бурым цементом, состоящим из оксигидроксидов Fe и Mn. Выше расположены два слоя мощностью 4 и 2 см, которые сопоставлены нами со слоями II и III стратиграфической колонки Fe-Mn корок Магеллановых гор, соответственно миоценового и плиоцен-четвертичного возраста (Мельников, 2005; Мельников, Плетнев, 2013). Далее в статье мы используем именно такую нумерацию слоев в изученной нами корке (рис. 2).

Текстура слоя II массивная, пятнистая, местами столбчатая. Преобладает рудное вещество черного и буровато-черного цвета. Неруд-

ный пористый фосфатно-глинистый материал коричневого цвета составляет 5–10 % объема слоя, он представлен вытянутыми скоплениями между столбцами оксигидроксидов Mn и Fe. В слое встречаются единичные неокатанные

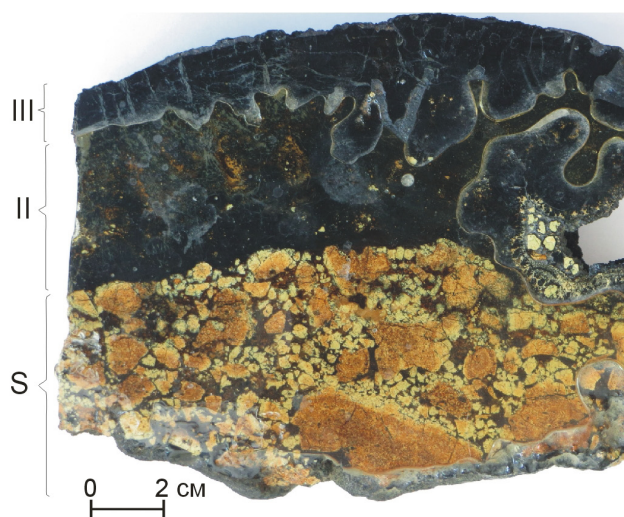


Рис. 2. Строение Fe-Mn корки с гайота Альба. S — субстрат корки, слой II и III показаны в соответствии с (Мельников, 2005; Мельников, Плетнев, 2013).

Fig. 2. Structure of the Fe-Mn crust from the Alba guyot. S — crust substrate; layers II and III are shown in accordance with (Melnikov, 2005; Melnikov, Pletnev, 2013).

обломки размером 1–2 мм коричнево-желтого цвета, аналогичные описанным в субстрате. Слой III имеет черный цвет со слабым буроватым оттенком, массивную текстуру. Поверхность слоя неровная, ботроидальная (мелкобугорчатая).

Для изучения был выбран слой II, наиболее богатый сферами по результатам предыдущих исследований (Савельев и др., 2022). Образец из этого слоя 5×5×4 см (весом около 200 г) был распилен на пластины толщиной 5 мм поперек напластования. Пластины были загрунтованы эпоксидной смолой во избежание их разрушения. Затем пластины стачивались на карбид-кремневой шлифовальной бумаге. После снятия каждые 10 мкм производился просмотр пластин под бинокляром. Таким методом на шлифованной поверхности было выявлено 9 сферул. Были выпилены фрагменты пластин, содержащие сфераулы, длиной и шириной 0.5–2 см. Наименее прочные фрагменты были помещены в дюймовые шашки с эпоксидной смолой и после затвердевания дошлифованы на мелком порошке и отполированы. Более прочные фрагменты были дополнительно загрунтованы эпоксидной смолой, дошлифованы и отполированы без помещения их в шашки. Полученные полированные шлифы были сфотографированы в Институте вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН цифровой камерой DS-Fi3 на оптическом микроскопе Nikon ECLIPSE LV100N POL в отраженном свете. Затем они были изучены с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA3 Tescan с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-MAX 80 mm² и программным обеспечением Aztec.

Кроме сферул *in situ*, были рассмотрены КС, выделенные нами ранее путем дробления образцов из Fe-Mn корок с гайотов Федорова и Альба (рис. 1). Эти сфераулы были помещены в шашки, пришлифованы, отполированы и изучены с помощью электронного микроскопа в ИВиС ДВО РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изученный образец слоя II двухслойной Fe-Mn корки с гайота Альба имеет столбчатое строение. Обнаруженные в полированных препаратах космические сфераулы приурочены к пористому фосфатно-глинистому материалу, заполняющему промежутки между столбцами оксигидроксидов Fe и Mn (рис. 3). Найденные 9 сферул принадлежат I-типу по (Genge et al., 2008) и состоят из оксидов Fe, иногда содержат ядро из сплава Fe и Ni (рис. 3e). Размер сферул 40–250 мкм.

Обнаруженные в полированных препаратах сфераулы сравнивались с КС, выделенными нами

ранее из дезинтегрированных образцов Fe-Mn корок с гайотов Альба и Федорова (Савельев и др., 2022). В отличие от сферул *in situ*, сфераулы, выделенные из раздробленных корок, принадлежат всем трем типам по (Genge et al., 2008). Сфераулы I-типа идентичны обнаруженным в полированных препаратах, они состоят из оксидов Fe, часть их имеет Fe-Ni ядро. Сфераулы G-типа состоят из оксидов железа, которые образуют скелетные кристаллы внутри силикатной основной массы, превратившейся в глину. Сфераулы S-типа сложены силикатами с примесью магнетита, которые замещены глиной и оксигидроксидами Fe. Исследование данных сферул всех типов под электронным микроскопом показало, что некоторые из них окружены оболочкой, имеющей концентрически-слоистое строение (рис. 4) и состоящей из оксигидроксидов Fe и Mn, сходных по составу с рудным веществом корок. Слои в разрезе в разной степени волнистые, облекают дефекты сферул. Размер сферул 110–150 мкм, а толщина их оболочки 15–50 мкм. Химический состав оболочек сферул, определенный с помощью микрозондового анализа на сканирующем электронном микроскопе, сходен с составом рудных столбцов в слое, вмещающем сфераулы.

Вмещающий КС фосфатно-глинистый материал неоднороден. Он содержит, кроме КС, еще множество форменных элементов. Наиболее обилён костный детрит, в составе которого наблюдались обломки различной формы размером от мельчайших до 450 мкм в длину (рис. 5). В значительно меньшей степени фосфаты представлены округлыми стяжениями размером от 30 до 210 мкм. Встречено зерно фосфата диаметром 5 мкм с очень высоким содержанием редкоземельных элементов (РЗЭ) (La+Ce+Nd 48 вес. %), а также зерно церианита ((Ce, Th)O₂) размером 8 мкм, видимо аллотипное. Встречены многочисленные зерна барита, преобладающий размер которых 3–5 мкм, отдельные зерна достигают 20 мкм. Наблюдаются кристаллы цеолитов и их сростки размером до 500 мкм, которые часто обрастают слоями оксигидроксидов Fe и Mn. Присутствуют известковые раковины фораминифер и их фрагменты размером до 200–300 мкм. Отмеченные единичные обломки представлены вулканическим титаномангнетитом, плагиоклазом, слюдой, вулканическим стеклом в форме рогулек. У некоторых обломков наблюдается оболочка из Fe-Mn оксигидроксидов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Космические сфераулы были обнаружены в данном исследовании непосредственно в образце Fe-Mn корки с гайота Альба, без ее дробления. Микроскопические исследования

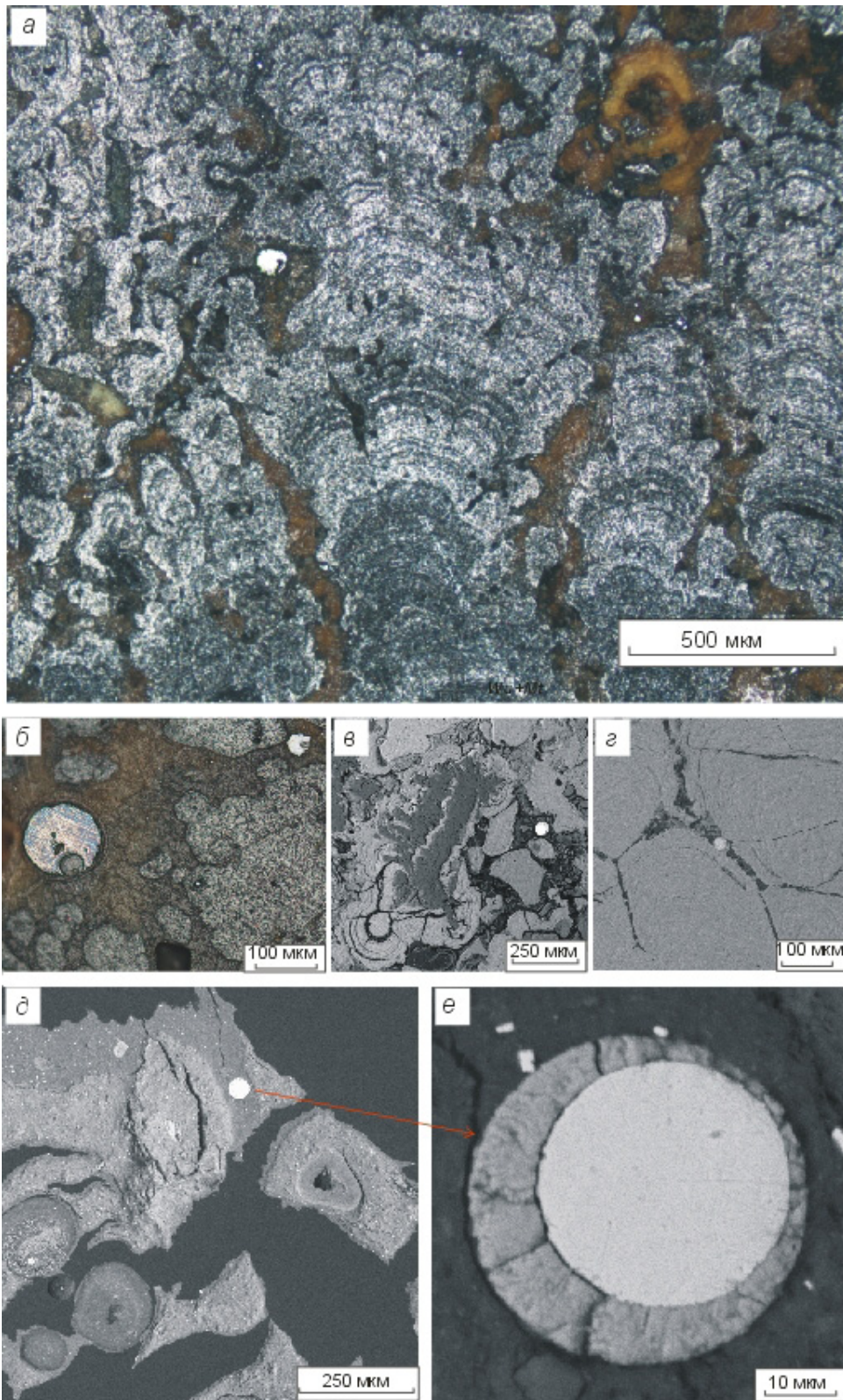


Рис. 3. Строение слоя II изученной корки и положение сферул в нем. Космические сферулы (белые пятна на рис. *a–d*) содержатся в фосфатно-глинистом веществе между столбцами оксигидроксидов Fe и Mn; *e* — сферула с Fe-Ni ядром (*a, б* — фотографии получены на оптическом микроскопе в отраженном свете; *в–e* — изображения получены методом электронной микроскопии с обратным рассеянием электронов).

Fig. 3. Structure of layer II of the studied crust and the position of spherules in it. Cosmic spherules (white spots in Fig. *a–d*) are contained in the phosphatic clay substance between columns of Fe and Mn oxyhydroxides; *e* — spherule with Fe-Ni core (*a, б* — photographs obtained with an optical microscope in reflected light; *в–e* — images obtained by electron microscopy with electron backscattering).

показали, что сферулы в слое II корки располагаются в фосфатно-глинистом веществе, заполняющем промежутки между столбцами оксигидроксидов Fe и Mn. По-видимому, сферулы попадали на поверхность железомарганцевых корок и накапливались в западинах их рельефа вместе с органогенными и биохемогенными фосфатами, а также глинистым веществом, образованным в основном за счет изменения вул-

канического, в том числе — гиалокластического материала.

Исходя из факта находки КС с многослойной Fe-Mn оболочкой, можно предположить, что, находясь в западинах рельефа корок, сферулы не сразу покрывались фосфатно-глинистым материалом и иногда успевали обрасти несколькими слоями гидрогенных оксигидроксидов Fe и Mn. Возможно, в этом процессе играла роль активная

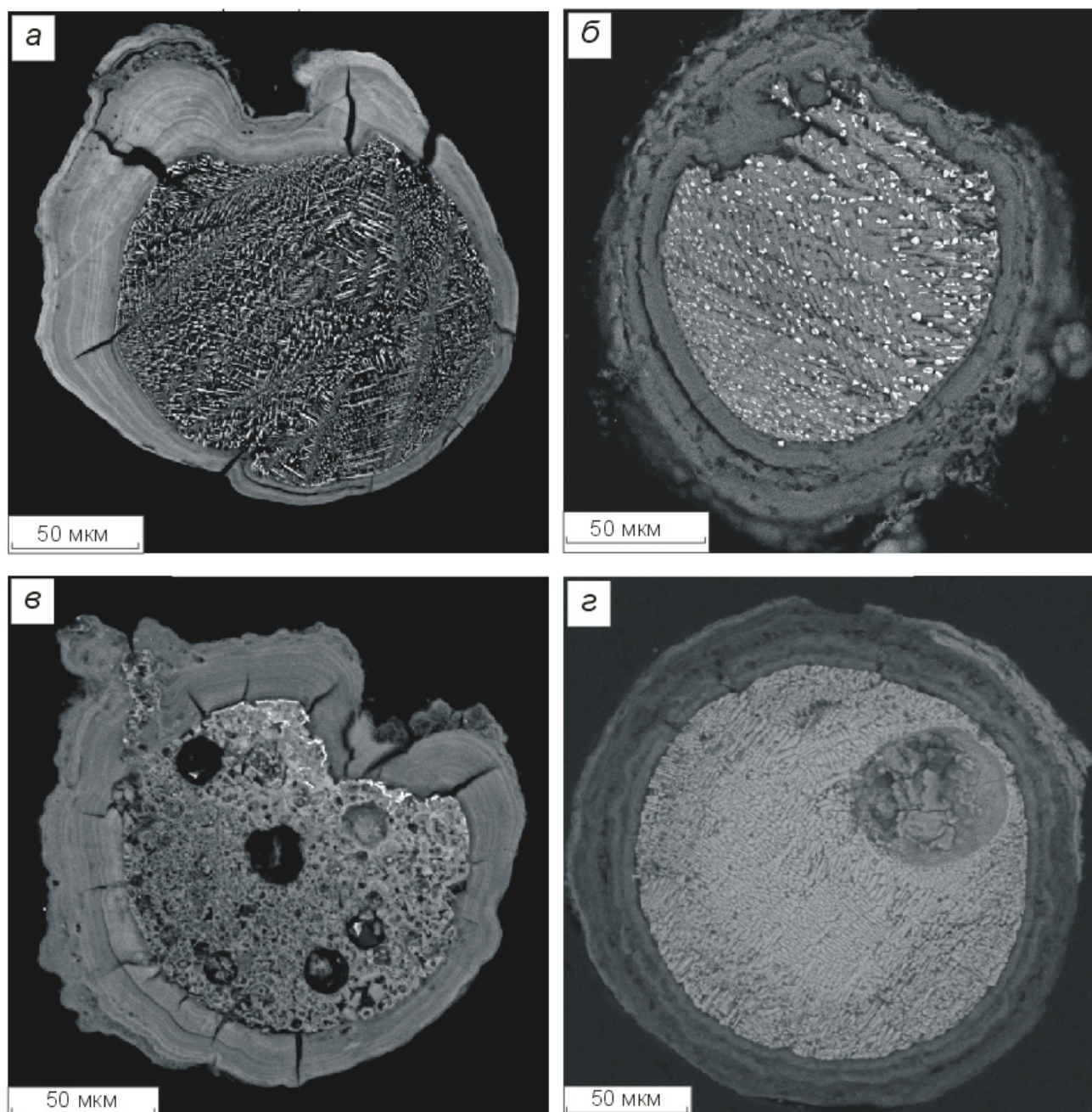


Рис. 4. Космические сферулы разных типов, извлеченные из Fe-Mn корок с гайотов Альба (*a* и *в*) и Федорова (*б* и *з*). Сферулы покрыты оболочкой оксигидроксидов Fe и Mn, имеющей концентрическое строение. Изображения получены методом электронной микроскопии с обратным рассеянием электронов.

Fig. 4. Cosmic spherules of different types extracted from Fe-Mn crusts from the Alba (*a* and *v*) and Fedorov (*b* and *z*) geyots. The spherules are covered with a shell of Fe and Mn oxyhydroxides having a concentric structure. The images were obtained by electron backscattering electron microscopy.

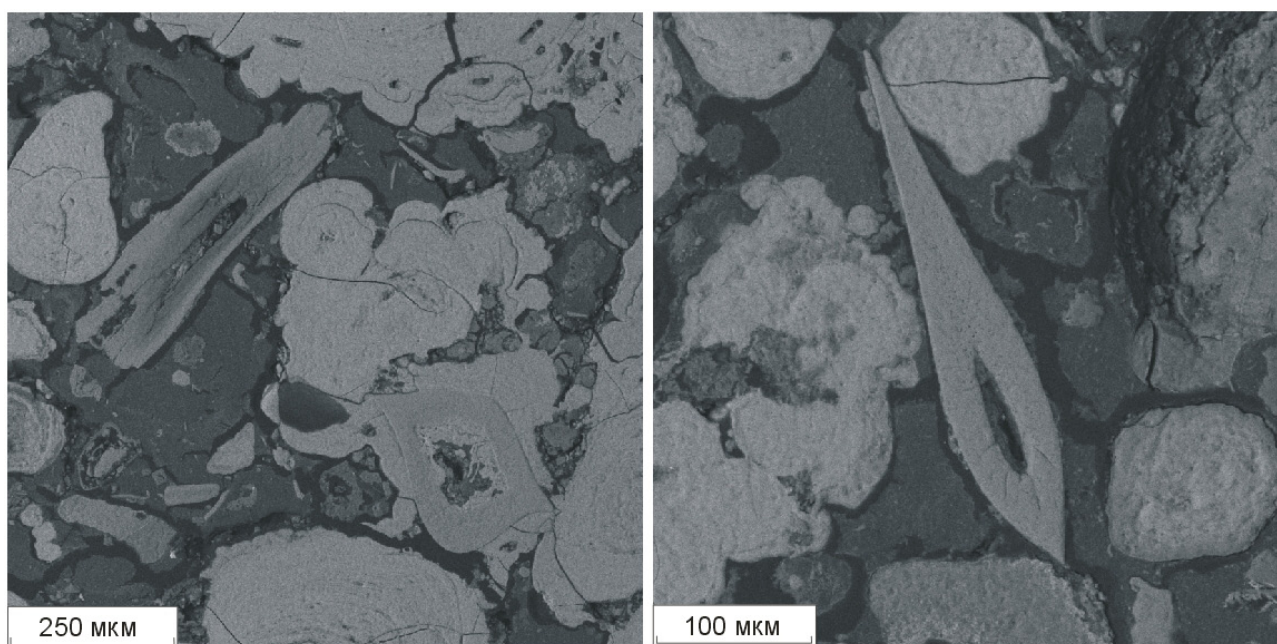


Рис. 5. Обломочный материал (преимущественно костный детрит) в фосфатно-глинистом матриксе, заполняющем промежутки между рудными столбцами Fe-Mn корки с гайота Альба (изображения получены методом электронной микроскопии с обратным рассеянием электронов).

Fig. 5. Clastic material (mainly bone detritus) in a phosphatic-clay matrix filling the gaps between Fe-Mn ore columns of the crust from the Alba guyot (images obtained by electron backscattering electron microscopy).

гидродинамика на поверхности подводных возвышенностей: сферула поворачивалась в своем ложе и обрастала оксигидроксидами относительно равномерно со всех сторон.

Механизм накопления сферул, связанный с расчлененным рельефом корок, давно описан (Halbach et al., 1989; Vonderhaar, McMurtry, 1990). При механической транспортировке течением разнообразного материала по поверхности корок сферулы, как и другие обломки большой плотности, улавливаются в неровности рельефа корок. Повышенная концентрация сферул в определенных слоях Fe-Mn корок, по-видимому, связана с перерывами в росте корок, а также с их разрушением и переотложением сферул (Halbach et al., 1989; Vonderhaar, McMurtry, 1990).

Этот же механизм работает и при накоплении в корках частиц благородных металлов и других тяжелых минералов (Торохов, Мельников, 2005; Glasby, 2010). В частности, М.П. Торохов и М.Е. Мельников (2005) выделили множество аксессуарных минералов из Fe-Mn корок гайотов Магеллановых гор. Минералы имели преимущественно обломочную форму и по своему парагенезису напоминали тяжелую фракцию образца базальта с поднятия Уэйк-Неккер. Это позволило предположить М.П. Торохову и М.Е. Мельникову (2005), что источником минералов были именно базальты.

У исследователей, занимавшихся изучением магнитных сферул в Fe-Mn образованиях и глу-

боководных осадках дна океанов (Brownlee et al., 1984; Finkelman, 1970; Halbach et al., 1989; Murray, Renard, 1891; Rudraswami et al., 2011) не возникало сомнений в космическом происхождении этих сферул. Однако, наличие авторов, декларирующих вулканогенное происхождение изученных ими сферул (Сандимирова и др., 2003), заставляет нас рассмотреть вопрос, не являются ли выделенные нами сферулы также обломочным материалом, полученным при подводном выветривании базальтов. Е.И. Сандимирова с соавторами (2003) считают, что магнитные сферулы имеют земное эндогенное происхождение. Они развиваются на стенках полостей вулканогенных пород, и их образование связано с потоками магматических газов, отделяющихся при застывании расплава под водой (Сандимирова и др., 2003). Учитывая огромный объем материала, который несут течения по поверхности корок, при изучении корок надо быть внимательными и помнить о возможном наличии в них сферул эдафогенного происхождения.

Выводы о генезисе сферул из Fe-Mn корки гайота Альба мы делаем не только на основе анализа девяти сферул, найденных *in situ* при проведении данного исследования, но и по результатам изучения 1800 магнитных сферул, выделенных ранее из этого же образца (Савельев и др., 2022). Сферулы, выделенные нами из Fe-Mn корки, отличаются от сферул, выделенных Е.И. Сандимировой с соавторами (2003) из пород

андезито-базальтового состава Курильских островов и Южной Камчатки. Прежде всего, содержание Ni в ядрах сферул из вулканогенных пород только 0.9%, а в наших сферулах 7.5–53%. Кроме того, в отличие от наших, сферулы из вулканитов Курильских островов и Камчатки имеют больший размер, в них нет вюстита, но имеются следы прикрепления к стенкам полостей.

Изученные нами сферулы, выделенные из Fe-Mn корок гайотов Магеллановых гор, обладают следующими признаками, присутствующими в неземном материалу (Бадюков и др., 2011; Genge et al., 2008; Suttle, Genge, 2017): (1) наличие вюстита; (2) присутствие в некоторых сферулах Fe-Ni ядра, отвечающего по составу тэниту (Савельев и др., 2020); (3) наличие микросамородков платиноидов, а также близкий к хондритовому спектр платиноидов в наиболее крупных самородках (кроме палладия) (Савельев и др., 2022). Отдельно взятые, эти признаки не могут однозначно указывать на космогенность сферул, но их совокупность дает, по нашему мнению, большую уверенность именно в этом источнике. Нами не встречены исследования, в которых был бы обоснован механизм образования Fe-Ni ядра и микросамородков платиноидов в его составе в сферических частицах в земных условиях. В то же время, условиям образования такого ядра в процессе прохождения частицы через атмосферу посвящена обширная литература (Bi et al., 1993; Dekov et al., 2007; Rudraswami et al., 2011; 2014). Дополнительным косвенным аргументом является то, что сферулы наиболее обильны в образованиях с наименьшей известной скоростью накопления. И, наконец, обнаруженные нами сферулы не отличаются по морфологии и химическому составу от сферул, обычных для глубоководных отложений, чье неземное происхождение давно подтверждено изотопными данными (Clayton et al., 1986; Enggrand et al., 2005; Herzog et al., 1999).

При поиске КС в дезинтегрированных корках есть опасность заражения проб сферулами, привнесенными извне или из другого слоя корок. У некоторых исследователей, познакомившихся с нашими работами (устные сообщения), возникал вопрос: не является ли такое большое количество сферул, выделенных из корки, результатом заражения при пробоподготовке. Найденные нами *in situ* КС и текстурные особенности сферул свидетельствуют о близости времени накопления космических сферул и вмещающего их слоя Fe-Mn корки, что доказывает их природное происхождение.

Изученный нами слой Fe-Mn корки (рис. 2, слой II) содержит много костного детрита. Костные фосфаты при длительной экспозиции в морской воде интенсивно концентрируют

РЗЭ (Батулин, 2004; Дубинин, 2006), что может влиять на содержание РЗЭ в общем анализе корки или конкретного слоя корки, содержащего фосфатный детрит.

Полученные нами результаты могут быть полезны при интерпретации геохимии Fe-Mn корок; в частности, с наличием костного детрита и богатых РЗЭ аллотигенных фосфатов может быть связана корреляция фосфора с РЗЭ в корках прикамчатской акватории (Савельева, Савельев, 2023).

Еще один важный вопрос, который затрагивает наше исследование — повышенные концентрации элементов платиновой группы (ЭПГ) в Fe-Mn корках относительно глубоководных осадков (Hein et al., 2013). Часть ЭПГ поступает в глубоководные осадки, и в частности в корки, вместе с космическими сферулами (Halbach et al., 1989). В связи с этим изучение приуроченности КС к определенным частям корок может быть полезно в рамках изучения механизмов обогащения корок ЭПГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В образце слоя II Fe-Mn корки с гайота Альба Магеллановых гор найдены космические сферулы *in situ*. В полированных препаратах обнаружено 9 космогенных сферул I-типа в ненарушенном залегании. Микроскопические исследования показали, что сферулы располагаются в фосфатно-глинистом веществе, заполняющем промежутки между столбцами оксигидроксидов Fe и Mn.

Доказательства попадания КС в Fe-Mn корки в процессе их роста получены также при изучении магнитных сферул, выделенных из дезинтегрированных корок гайотов Альба и Федорова. У некоторых из этих сферул отмечено присутствие железомарганцевой оболочки с концентрически-слоистым строением.

В ассоциации со сферулами в промежутках между рудными столбцами присутствуют фосфаты в виде костей и стяжений, зерна барита, раковины фораминифер, различные минеральные зерна вулканогенного происхождения. Наиболее вероятным является такой механизм накопления КС в Fe-Mn корках: сферулы попадали на поверхность железомарганцевых корок и накапливались в западинах их рельефа вместе с глинистым веществом и фосфатами.

Наблюдаемые особенности положения сферул внутри корки свидетельствуют о том, что КС накапливались практически одновременно с вмещающим их слоем, что исключает заражение проб.

Авторы благодарят рецензентов за конструктивные критические замечания, позволившие улучшить содержание статьи.

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

Список литературы [References]

- Бадюков Д.Д., Брандштеттер Ф., Тона Д.* Тонкозернистые шлаковидные и непереплавленные микрометеориты: их источники и связь с космическими сферами // *Геохимия*. 2018. № 11. С. 1027–1040. <https://doi.org/10.1134/S001675251811002X> [*Badyukov D.D., Brandstaetter F., Topa D.* Fine-grained scoriaceous and unmelted micrometeorites: sources and relationships with cosmic spherules // *Geochemistry International*. 2018. V. 56. P. 1071–1083. <https://doi.org/10.1134/S0016702918110022>].
- Бадюков Д.Д., Иванов А.В., Райтала Й., Хисина Н.Р.* Сферические микрочастицы из района Тунгусского события: может ли их источником быть Тунгусское космическое тело? // *Геохимия*. 2011. № 7. С. 675–689 [*Badyukov D.D., Ivanov A.V., Raitala J., Khisina N.R.* Spherules from the Tunguska event site: Could they originate from the Tunguska Cosmic Body? // *Geochemistry International*. 2011. V. 49. P. 641–653].
- Батулин Г.Н.* Фосфатонакопление в океане. М.: Наука, 2004. 464 с. [*Baturin G.N.* Phosphate accumulation in the Ocean / Moscow: Nauka, 2004. 464 p. (in Russian)].
- Дубинин А.В.* Геохимия редкоземельных элементов в океане / Под ред. Волкова И.И. М.: Наука, 2006. 360 с. [*Dubinin A.V.* Rare earth element geochemistry in the ocean / Moscow: Nauka, 2006. 360 p. (in Russian)].
- Мельников М.Е.* Месторождения кобальтоносных марганцевых корок. Геленджик: ФГУП ГНЦ «Южморгеология», 2005. 230 с. [*Mel'nikov M.E.* Deposits of cobalt-rich manganese crusts. Gelendzhik: Federal State Unitary Enterprise State Scientific Center «Yuzhmorgeologiya», 2005. 230 p. (in Russian)].
- Мельников М.Е., Плетнев С.П.* Возраст и условия формирования кобальтоносных марганцевых корок на гайотах Магеллановых гор // *Литология и полезные ископаемые*. 2013. № 1. С. 3–16 [*Melnikov M.E., Pletnev S.P.* Age and formation conditions of the Co-rich manganese crust on guyots of the Magellan seamounts // *Lithology and Mineral Resources*. 2013. V. 48. № 1. P. 1–13].
- Печерский Д.М., Кузина Д.М., Марков Г.П., Цельмович В.А.* Самородное железо на Земле и в космосе // *Физика земли*. 2017. № 5. С. 44–62. <https://doi.org/10.7868/S0002333717030085> [*Pechersky D.M., Kuzina D.M., Markov G.P., Tsel'movich V.A.* Native iron in the Earth and space // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2017. V. 53. P. 658–676. <https://doi.org/10.1134/S1069351317030089>].
- 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., Moskaleva 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 сферах 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.* Платиноносность железомарганцевых корок с гайотов и разломных зон прикамчатской акватории Тихого океана // *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. 176–178* [*Savelyeva O.L., Savelyev D.P.* Platinum content of ferromanganese crusts from guyots and fault zones of the near Kamchatka area of the Pacific Ocean // *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. 176–178*].
- Сандимирова 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 volcanic rocks of the Kuril Islands and southern Kamchatka // *Vestnik KRAUNTs*. 2003. № 1. P. 135–140 (in Russian)].
- Торохов М.П., Мельников М.Е.* Акцессорные минералы в гидrogenных железомарганцевых корках Тихого океана — россыпной механизм накопления // *Доклады Академии Наук*. 2005. Т. 405. № 4. С. 511–513 [*Torokhov M.P., Mel'nikov M.E.* Accessory minerals from hydrogenic ferromanganese crusts of the pacific ocean: placer accumulation mechanism // *Doklady Earth Sciences*. 2005. V. 405A. № 9. P. 1288–1290].
- 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., Bates D.A., Wheelock M.M.* Extraterrestrial platinum group nuggets in deep sea sediments // *Nature*. 1984. V. 309. № 5970. P. 693–695. <https://doi.org/10.1038/309693a0>
- Clayton R.N., Mayeda T.M., Brownlee D.E.* Oxygen isotopes in deep-sea spherules // *Earth and Planetary Science Letters*. 1986. V. 79. № 3–4. P. 235–240. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(86\)90181-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)90181-0)
- 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.* 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>
- Finkelman R.B.* Magnetic particles extracted from manganese nodules: Suggested origin from stony and iron meteorites // *Science*. 1970. V. 167. № 3920. P. 982–984. <https://doi.org/10.1126/science.167.3920.982>
- 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>
- Glasby G.P.* Incorporation of Transition and Platinum Group Elements (PGE) in Co-rich Mn Crusts at Afanasiy-Nikitin Seamount (AFS) in the Equatorial S Indian Ocean // *Resource Geology*. 2010. V. 60. № 2. P. 212–215. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2010.00128.x>
- 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.
- 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., Prasad M.S., Plane J.M.C. et al.* Refractory metal nuggets in different types of cosmic spherules // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2014. V. 131. P. 247–266. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.01.026>
- Suttle M.D., Genge M.J.* Diagenetically altered fossil micrometeorites suggest cosmic dust is common in the geological record // *Earth and Planetary Science Letters*. 2017. V. 476. P. 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.07.052>
- Vonderhaar D.L., McMurtry G.M.* A geochemical interpretation of two ferromanganese crusts from Schumann seamount in the Hawaiian Archipelago // *Atlas: Mineral Resource of the Sea Floor – Cobalt-Rich Manganese Crust*, Tokai University Press, Simizu, Japan, 1990. P. 114–119.

FIRST DESCRIPTION OF IN SITU COSMIC SPHERULES IN FERROMANGANESE CRUST FROM THE ALBA GUYOT (MAGELLAN SEAMOUNTS)

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

Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006

Received May 03, 2024; revised October 29, 2024; accepted December 25, 2024

Nine cosmic I-type spherules were found in undisturbed occurrence in polished preparations from the ferromanganese crust of the Alba guyot (Magellan Seamounts). They consist of Fe oxides and sometimes contain a core of Fe and Ni alloy. The spherules are 40–250 μm in size. The spherules are in porous phosphatic clay material filling the spaces between columns composed of Fe and Mn oxyhydroxides. Phosphates in the matrix containing the spherules are mainly represented by bone debris. Barite grains, zeolites, and foraminifers were found. The presence of spherules in situ in the Fe–Mn crust excludes contamination during sample preparation and indicates that the spherules accumulated almost simultaneously with the host layer. Spherules from crushed crusts of Alba and Fedorov guyots were also studied; the presence of a ferromanganese shell with a concentric-layered structure was noted in some of them.

Keywords: cosmic spherules, ferromanganese crusts, phosphate-clay material.