

УДК 621.384.62; 629.7
EDN: IWXHIR

PACS: 87.65.+y, 96.50.Pw

Анализ состава и источников поступления осадка на поверхности МКС© Л. М. Василяк^{1*}, А. В. Пеклевский², С. П. Прокопович², В. Н. Чикирев²,
Е. В. Шубралова²¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия
* E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru² АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,
Московская обл., г. Королёв, 141070 РоссияСтатья поступила в редакцию 9.12.2025; после доработки 23.01.2026; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 1.3.1

В составе мелкодисперсного осадка, доставленного с поверхности Международной космической станции (МКС), обнаружены частицы космической пыли, частицы метеороидного, вулканического и морского происхождения, обогащенные органикой. Эти частицы присутствуют в экзосфере Земли и в условиях корпускулярного, рентгеновского и ультрафиолетового облучения являются агрессивным агентом для материалов поверхности орбитальных станций. Анализ элементного состава осадка на поверхности МКС позволил оценить влияние обнаруженных элементов на стойкость конструкционных материалов орбитальных объектов, а также установить источники их поступления на поверхность МКС.

Ключевые слова: международная космическая станция, мелкодисперсный осадок, экзосфера.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-7-12

Введение

Возможными источниками регулярного поступления мелкодисперсного осадка на поверхность орбитальной станции могут быть частицы метеороидов и кометных хвостов, доставляющие из космического пространства адсорбированные ими молекулы межзвёздной среды и частицы космической пыли [1–7]. Данные по 36 регулярным потокам кометных хвостов, пересекающих околоземное пространство, хорошо известны, скорости движения частиц находятся в диапазоне от 18 до 70 км/с. Телескоп «УФ атмосфера» на МКС регистрирует микрометеориты, попадающие в зону надира. В это время МКС находится в зоне потока частиц кометного хвоста и регистрация свечения метеороидов телескопом «УФ атмосфера» является признаком возможной встречи частиц с поверхностью МКС.

Это доказывает, что экзосфера Земли включает непрерывно движущиеся к Земле мельчайшие частицы космического происхождения [3], которые попадают на поверхность орбитального объекта. Кроме этого, в экзосфере могут присутствовать и частицы, из Земли в результате вулканической деятельности и подъема микрочастиц в электрических полях глобальной электрической цепи Земли [1, 7]. Все эти частицы могут присутствовать в осадке на поверхности МКС, а также могут присутствовать продукты деструкции материала станции. С 2010 по 2024 годы по программе «Тест» проводился отбор проб мелкодисперсного осадка с внешней поверхности гермокорпуса российского сегмента МКС и проведение дисперсного, химического и геолого-минералогического анализов доставленных на Землю проб. На основе анализа осадка с разных элементов МКС можно сделать выводы о

составе осадка, а также об его источниках. Кроме того, можно сделать выводы о возможной опасности осадка для материалов станции или для космонавтов.

Анализ состава осадка

Для получения результатов послеполетного физико-химического анализа мелкодисперсного вещества на поверхностях элементов устройства «Тест-экспонат» после длительного нахождения в открытом космосе используются следующие методы: масс-спектрометрия, атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, спектрометрия электронного парамагнитного резонанса, электронно-растровая микроскопия. В эксперименте, завершившемся в 2024 году, в ходе выполненных исследований по программе «Тест» был изучен элементный состав загрязнителя на фторопластовом корпусе устройства «Тест-экспонат», находившимся на внешней поверхности модуля «Поиск» 3,5 года. Количественный и элементный состав определялся методом оптико-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (метод ИСП-ОЭС) как наиболее воспроизводимый и метрологически обеспеченный. Система микроволнового разложения пробы позволяет переводить в раствор все элементы, содержащиеся на различных носителях.

На микрофотографиях поверхности корпуса можно наблюдать характер выпадения осадка (рис. 1). Загрязнение содержится на любых неровностях и шероховатостях, оставляемых фрезой в процессе обработки фторопласта. При этом на поверхности материала не обнаружено каких-либо частиц. Для исследования с помощью электронного сканирующего микроскопа был выполнен срез (рис. 1) загрязнённого поверхностного слоя фторопласта с корпуса пробоотборника № 17А. Следует отметить, что контраст электронно-растрового изображения обусловлен различием в электропроводности материала. Трещины образованы в результате деформации среза (рис. 1) и не содержат загрязнения. Остальная поверхность материала и особенно поры в нём загрязнены осадком, вследствие чего имеют некоторую электропроводность, и как следствие, отразились тёмным цветом.

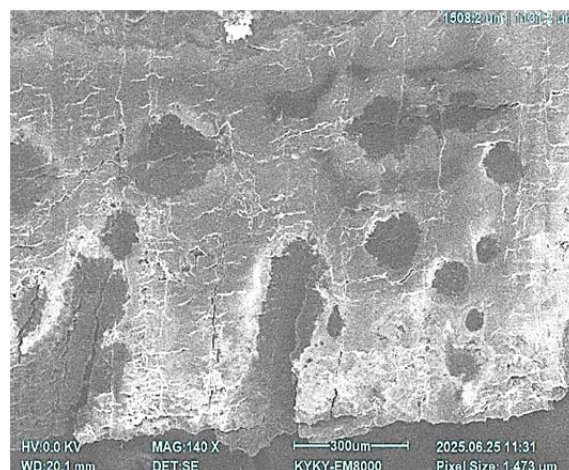


Рис. 1. Микрофотография фторопластового фрагмента, полученная методом ИСП-ОЭС

Исследования элементного состава загрязнителя на фторопластовом корпусе устройства «Тест-экспонат» (рис. 2) обладают рядом преимуществ, поскольку фторопласт не изменяется при последующей подготовке проб и содержат минимальное количество минеральных примесей. Контрольный образец фторопластового соскоба получен из того же самого корпуса. Исходный фторопласт содержит крайне мало посторонних включений, а погрешность метода можно оценить единственным фактором, который сложно учитывать в данном эксперименте – степень контаминации руками и запылённость образца обычной пылью. Данные загрязнения, как правило, вносят в образец кальций, в меньшей степени магний и кремний, что и прослеживается в результатах анализа.

Среди 65 химических элементов, выявленных в составе мелкодисперсного осадка на поверхностях МКС период с 2010 по 2024 годы, наиболее распространенным элементом являлось железо, практически не используемое в конструктивных элементах станции. Причем, железо не было выявлено только в 5 из 46 проб, исследованных по программе «Тест». Анализ содержания относительного количества в пробах железа и никеля позволяет прояснить происхождения железа в осадке. Согласно полученным результатам исследования экспонированных корпусов устройства «Тест-экспонат» [2] железо обнаружено в значительных количествах: 536 мкг/мл. Пик уровня содержания никеля также обнаружен на ОЭС спектре, но его содержание меньше: 1,6 мкг/мл. Таким образом, соотношение железо/никель в исследованном образце составляет 335, а в об-

разцах метеоритного происхождения, как хорошо известно, соотношение железо/никель практически постоянное и составляет от 11,5

до 14, а в среднем 12. Это позволяет сделать вывод, что частицы железа имеют не только метеоритное происхождение.

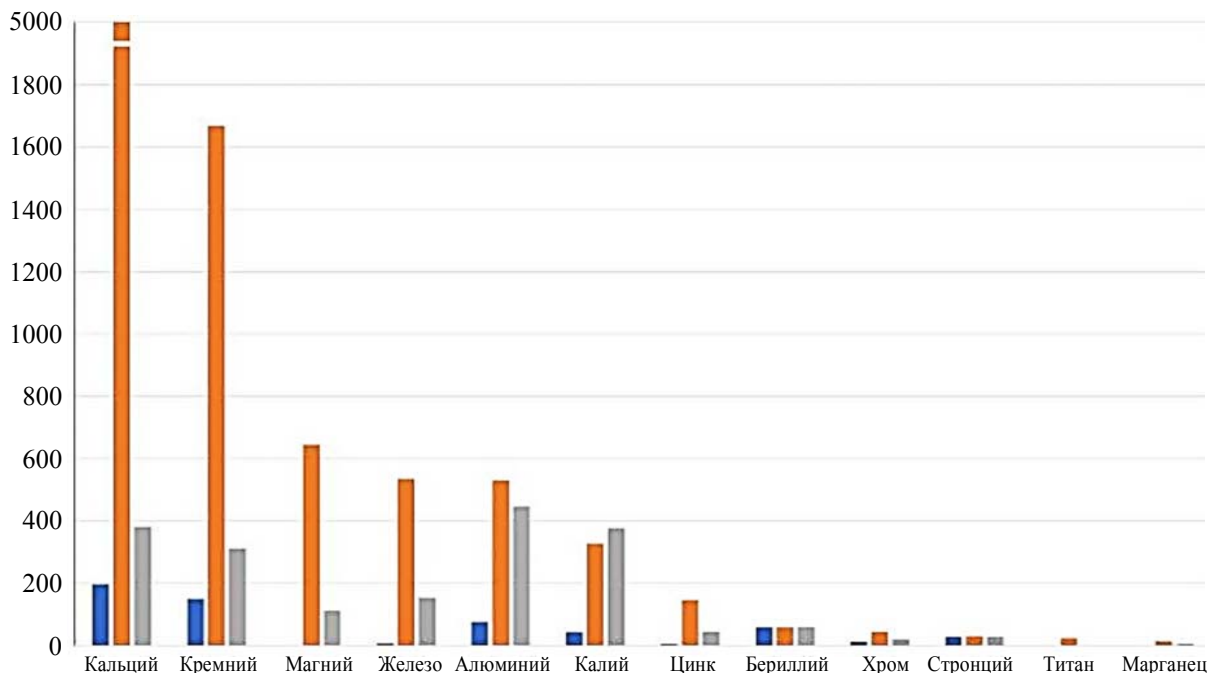


Рис. 2. Элементный состав соскоба с фторопластовых корпусов.

Левый синий столбик – чистый фторопласт, средний рыжий – пробник 17А, правый серый – пробник 18А

Элементный состав космической пыли, собранной с поверхности МКС ранее, позволяет предположить значительный вклад смешанного тропосферного аэрозоля терригенного и морского происхождения [6, 7]. В вулканических газах, поднимающихся за пределы атмосферы, может присутствовать хлорид железа, выделяющийся при высоких температурах из магматического расплава. Присутствие хлоридов железа в вулканических газах связано с реакцией магмы с хлорсодержащими соединениями, которые также могут выделяться при извержении. Летучим становится безводный хлорид железа (III) ($FeCl_3$), который при сильном нагревании переходит в газообразное состояние, образуя мономеры ($FeCl_3$) и димеры (Fe_2Cl_6).

Исследования физико-химических свойств мелкодисперсного осадка на поверхности МКС подтвердили возможность его активного участия в развитии микродеструкции элементов конструкции МКС. При взаимодействии хлорида железа с компактным алюминием корпуса МКС происходит накопление ионов железа, завершающееся выделением железа в свободном состоянии и появление ферромагнитных частиц, что было обнаружено на

поверхности фторопласта. Хлорид ионы мигрируют через оксидную пленку к металлу, прежде всего по дефектным местам, увеличивая скорость коррозии и микродеструкцию элементов МКС.

В 27 из 46 проб мелкодисперсного осадка выявлены элементы высокого сродства к электрону, в том числе Cl, F, S. Эти элементы не являются постоянными элементами космической пыли, но в газовых выбросах вулканов они всегда присутствуют, составляя до 5 % их общего объема. Установлено, что химические процессы с участием элементов высокого сродства к электрону негативно влияют на герметичность паронитовых уплотнений в конструкциях иллюминаторов.

Количество выявленного магния превышает содержание железа и алюминия не только в пробах фторопластового устройства, которое экспонировалось в течение 3,5 лет, но и в других пробах с поверхности МКС. В результате отбора пробы на гермокорпусе МКС в 2012 году под экранно-вакуумной теплоизоляцией был получен следующий результат уровня содержания элементов (мкг/мл) Mg – 181,55; Al – 39,85; Mn – 2,18. Эти данные свидетельствуют о значительном (в 4,5 раза) пре-

вышении содержания магния в пробе по сравнению с алюминием, например, в составе сплава АМг6: Mg – 6,8 %; Al – 93,68 %; Mn – 0,8 % [7].

Известно, что концентрация магния в морских и океанских аэрозолях может варьироваться от нескольких единиц до нескольких десятков или даже сотен микрограммов на кубический метр воздуха, и магний является одним из основных компонентов аэрозолей морского происхождения, достигающих высоты орбиты по глобальной электрической цепи [1]. Динамическое равновесие экзосферы Земли достигается непрерывным потоком аэрозолей по глобальной электрической цепи с Земли и непрерывно движущимися в околоземном пространстве потоками частиц кометных хвостов и космической пыли, возникающей в результате столкновений комет, астероидов и других тел в Солнечной системе.

Космическая пыль состоит из мелких частиц твёрдого вещества, состоящих из двухатомных окислов MgO, SiO, CaO, FeO. Магний почти полностью находится в твердой фазе (в составе пылевых частиц), а не в газовой. Соотношение изотопов магния-26 (Mg) и обычного магния-24 (Mg) в метеоритах позволяет датировать их формирование [4, 5, 6]. Изотоп 26(Mg) является продуктом распада радиоактивного алюминия-26 (Al), который присутствовал в ранней Солнечной системе. Его период полураспада составляет 717 тысяч лет. В железных метеоритах этого изотопа по сравнению с обычным магнием много, а в хондритах его практически нет. Это говорит о том, что хондриты возникли несколько позже, когда алюминия-26 в породах уже было совсем мало. По оценкам, это произошло примерно через два-три миллиона лет после возникновения Солнечной системы. Таким образом, хондриты — метеориты второго поколения. Содержание в частицах метеорного происхождения типа хондритов составляет в среднем: O (33,24 %), Fe (27,24), Si (17,19), Mg (14,29), S (1,93), Ni (1,64), Ca (1,27), Al (1,22), Na (0,64), Cr (0,29), Mn (0,25), P (0,11), K (0,08 %).

Железо является одним из самых распространенных элементов во Вселенной после легких элементов, таких как водород, углерод и кислород. Железо чаще всего находится в газообразной форме в звездах, таких как

Солнце, и в конденсированной форме на планетах, в составе микрометеоритов. Астрофизики обнаруживают только низкие уровни железа газообразного типа [4, 5, 6]. Это подразумевает, что оно существует и в твердой форме или молекулярном состоянии, однако идентификация остается пока неразрешенной и изучаемой в течение десятилетий задачей. Рабочая гипотеза предполагает, что межзвездное железо соединилось с молекулами углерода и образовало молекулярные цепи, называемые псевдокарбинами железа. Спектры этих цепочек идентичны гораздо более распространенным цепочкам углеродных молекул, пребывание которых в межзвездном пространстве давно известно [6].

В эксперименте «Тест» выявлены частицы железа на поверхности МКС в составе мелкодисперсного осадка из космического пространства, который предположительно попал на поверхность в результате взаимодействия с электрическими полями станции:

1. Электрические поля на поверхностях космических аппаратов (КА) образуются из-за накопления на них заряженных частиц, таких как электроны и ионы из окружающей плазмы. Если поверхности КА покрыты диэлектрическими материалами (например, терморегулирующими красками, фторопластом), они могут накапливать заряд, образуя электрическую емкость с металлическим корпусом КА. Электроны и ионы из околоземной плазмы могут попадать на поверхность КА и накапливаться на ней, особенно на непроводящих материалах (рис. 3).



Рис. 3. Хлопчатобумажный сверток ткани, закреплённый на окрашенной внешней поверхности служебного модуля РС МКС

2. Источники питания, солнечные батареи, приборы и двигатели создают электрические поля.

3. Изменения в околоземной плазме, например, при прохождении через области с разной плотностью частиц, могут вызывать заметные колебания электрического потенциала поверхности и, как следствие, изменение электрических полей [4].

4. Механизмы создания электрических полей и токов на поверхности космического аппарата при столкновении с микрочастицами:

4.1. Микрочастица под воздействием УФ-излучения Солнца заряжается положительно вследствие фотоэффекта, т. е. эмиссии электронов в результате поглощения УФ квантов. Заряд частицы может достигать порядка тысячи зарядов электрона. По металлической поверхности протекают токи, индуцированные отрицательным электрическим зарядом. При контакте частицы с поверхностью заряд частицы переходит в металл и далее происходит размывание этого пространственного заряда.

4.2. При столкновении микрочастицы с поверхностью космического аппарата происходит сжатие среды, что вызывает появление электрического тока и сопутствующей ЭДС. Плотность возникающего тока может достигать $10\text{--}1000\text{ мА/см}^2$. Эти токи возникают в объеме металла и диэлектрика, могут протекать и по противоположной стороне металла. Таким образом, удары частиц по поверхности КА приводят к созданию поверхностных токов и электрических полей.

В результате проведенных на МКС экспериментов по программе «Тест» и анализа осадка сформировано представление о среде функционирования орбитальных объектов, в том числе, наличие в среде околообъектового пространства элементов агрессивных элементов: атомарного кислорода, элементов высокого сродства к электрону (сера, фтор, хлор) и других элементов вулканических газов, достигающих орбиты, и космических источников поступления. Данные о составе непрерывно поступающего мелкодисперсного осадка на поверхность орбитальных объектов позволит уточнить требования к качеству поверхности КА по материалам, покрытиям и защитным элементам.

Заключение

Результаты исследования состава мелкодисперсного осадка на поверхности МКС продемонстрировали реальные пути получе-

ния новых данных об экзосфере Земли и космического пространства. Поверхность МКС является уникальным накопителем кометного вещества в естественном виде и единственным легко доступным для его регулярного сбора. Частицы кометного вещества, выброшенные в межпланетное пространство из ядра кометы (хвост кометы), сгорают на высоте $80\text{--}100\text{ км}$ над Землей. С помощью МКС ученые могут регулярно получать фактический материал для исследования кометного вещества, адсорбированного поверхностью МКС, и, как показано в КЭ «Тест», доставляемого в естественном состоянии на Землю. Анализ мелкодисперсного осадка с поверхности орбитальных станций является источником информации о состоянии молекул железа в космическом пространстве, а также магния в экзосфере Земли, и по результатам изотопного анализа установить источники осадка на поверхности орбитального объекта. Космический мусор и многотысячные орбитальные группировки являются сборщиками и носителями на своей поверхности биообъектов, агрессивных химических элементов и радиоактивных частиц, которые могут вызывать деstrukцию материалов станции, а также могут быть новыми потенциально опасными факторами, сопровождающие возвращение орбитальных объектов на Землю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шубралова Е. В., Пеклевский А. В., Прокопович С. П., Успенский Ф. А., Чикирев В. Н. / Космические исследования. 2025. Т. 63. № 2. С. 29–38.
2. Zinicovscaia I., Grozdov D., Yushin N., Safonov A., Proshin I., Volkov M., Pryadka A., Belyaev V., Shubralova E., Tsygankov O. / Acta Astronautica. 2021. Vol. 189. P. 278–282.
3. Василяк Л. М., Шубралова Е. В., Чикирев В. Н. / Прикладная физика. 2024. № 6. С. 14–19.
4. Баранов Д. Г., Гагарин Ю. Ф., Дергачев В. А., Ныммик Р. А., Якубовский Е. А. / Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2005. Т. 69. № 6. С. 832–834.
5. Баранов Д. Г., Гагарин Ю. Ф., Дергачев В. А., Ныммик Р. А., Панасюк М. И. / Космические исследования. 2011. Т. 49. № 6. С. 1–8.
6. Печерский Д. М., Кандинов М. Н., Марков Г. П., Пляшкевич А. А., Цельмович В. А., Шаронова З. В. / Геомагнетизм и аэронаука. 1975. Т. 15. № 2. С. 166–185.
7. Цыганков О. С., Гребенникова Т. В., Дешевая Е. А., Морозова М. А., Новикова Н. Д., Поликарпов Н. А., Сыроешкин А. В., Шубралова Е. В., Шувалов В. А. / Космическая техника и технологии. 2015. № 1 (8). С. 31–41.

Analysis of the composition and sources of deposition on the ISS surface

L. M. Vasilyak^{1*}, A. V. Peklevskiy², S. P. Prokopovich², V. N. Chikirev²,
and E. V. Shubralova²

¹ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

* E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

² Joint Stock Company “Central Research Institute for Machine Building”,
Moscow Region, Korolev, 141070 Russia

Received 9.12.2025; revised 23.01.2026; accepted 27.04.2026

The fine deposition delivered from the surface of the International Space Station (ISS), particles of cosmic dust, particles of meteoroid, volcanic and marine origin, enriched with organic matter. These particles are present in the Earth's exosphere and, under conditions of corpuscular, X-ray and ultraviolet irradiation, are an aggressive agent for the surface materials of orbital stations. An analysis of the elemental composition of deposition on the ISS surface made it possible to assess the effect of the detected elements on the stability of the structural materials of the orbiting objects, as well as to identify the sources of their entry onto the ISS surface.

Keywords: international space station, fine deposition, exosphere.

REFERENCES

1. Shubralova E. V., Peklevskiy A. V., Prokopovich S. P., Uspenskiy F. A., and Chikirev V. N. Cosmic Research, **63** (2), 29–38 (2025) [in Russian].
2. Zinicovskaia I., Grozdov D., Yushin N., Safonov A., Proshin I., Volkov M., Pryadka A., Belyaev V., Shubralova E., and Tsygankov O., Acta Astronautica **189**, 278–282 (2021).
3. Vasilyak L. M., Shubralova E. V., and Chikirev V. N., Applied Physics, № 6, 14–19 (2024) [in Russian].
4. Baranov D. G., Gagarin Yu. F., Dergachev V. A., Nymmik R. A., and Yakubovsky E. A., News of the Russian Academy of Sciences. Physical series **69** (6), 832–834 (2005).
5. Baranov D. G., Gagarin Yu. F., Dergachev V. A., Nymmik R. A., and Panasyuk M. I., Space research **49** (6), 1–8 (2011).
6. Pechersky D. M., Kandinov M. N., Markov G. P., Plyashkevich A. A., Tselmovich V. A., and Sharonova Z. V., Geomagnetism and aeronomy **15** (2), 166–185 (1975).
7. Tsygankov O. S., Grebennikova T. V., Deshevaya E. A., Morozova M. A., Novikova N. D., Polikarpov N. A., Syroeshkin A. V., Shubralova E. V., and Shuvalov V. A., Space equipment and technology, № 1 (8), 31–41 (2015) [in Russian].

Об авторах

Василяк Леонид Михайлович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru SPIN-код: 5623-5167, AuthorID: 19599, ORCID 0000-0001-6982-3038, Scopus 7004886755

Пеклевский Андрей Викторович, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (141070, Россия, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4). E-mail: 5737@mail.ru SPIN-код: 1870-6205

Прокопович Сергей Павлович, начальник отдела, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (141070, Россия, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4). E-mail: prokopovichsp@tsniimash.ru

Чикирев Владимир Николаевич, главный специалист, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (141070, Россия, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4). E-mail: vladch56@yandex.ru AuthorID: 609834

Шубралова Елена Владимировна, главный специалист, АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (141070, Россия, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4). E-mail: shubralova@mail.ru SPIN-код: 2734-5521, AuthorID: 1317404