

УДК 621.384.62; 629.7
EDN: AVVVWF

PACS: 87.65.+y, 96.50.Pw

Влияние экзосферы Земли на микродеструкцию материалов орбитальных станций© 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.ru

² АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,
Московская обл., г. Королёв, 141070 РоссияСтатья поступила в редакцию 5.12.2025; после доработки 14.01.2026; принята к публикации 20.02.2026
Шифр научной специальности: 1.3.1

Исследования по программе космического эксперимента «Тест» физико-химических свойств образующегося мелкодисперсного осадка на поверхности Международной космической станции (МКС) подтвердили возможность его активного участия в агрессивном влиянии собственной внешней атмосферы на развитие микродеструкции материалов МКС. Приведен пример влияния на герметичность уплотнений в иллюминаторах химических элементов высокого сродства к электрону из состава вулканических газов, достигающих поверхности МКС. Наличие графита на стеклах иллюминаторов, пробоотборниках и очистителях указывает на процессы деградации материалов уплотнителя, что может привести к утечкам газовой среды. Эксперимент «Тест» показал, что естественное загрязнение поверхности МКС космозолями требует рассмотрения старения материалов станции и их коррозионной устойчивости с учетом внешней среды.

Ключевые слова: международная космическая станция, мелкодисперсный осадок, деградация материалов.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-7-13

Введение

Одной из задач космического эксперимента (КЭ) «Тест» в период 2010–2024 годов являлся сбор мелкодисперсного осадка с поверхности Российского сегмента МКС с помощью специального пробоотборника для его физико-химического анализа в целях изучения перемещения вещества в космосе [1–5]. Отбор проб производится космонавтом в процессе «внекорабельной деятельности» в контейнерном блоке (пробоотборник), который поддерживается стерилизованным и гермоизолированным в течение всего эксперимента, включая доставку на Землю. Задача наземной фазы – проведение физико-химического, токсиколо-

гического, микробиологического и молекулярного анализа проб.

Исследования состава мелкодисперсного осадка позволяют оценить возможность развития микродеструкции гермокорпуса, ухудшения прозрачности иллюминаторов, эксплуатационных характеристик солнечных батарей и радиаторов под влиянием факторов космического пространства, и сформировать требования к перспективным конструктивным материалам. Анализ физико-химических свойств осадка позволяет установить его участие в агрессивном влиянии на конструктивные элементы и по элементам состава определить источник его поступления в собственную внешнюю атмосферу (СВА) МКС, а также

уточнить данные о геохимическом составе космической пыли на высоте 400 км над поверхностью Земли и о его источниках.

Анализ возможного влияния мелкодисперсного осадка на материалы космических объектов

Установлено, что дисперсный состав космической пыли на поверхности МКС состоит из трех фракций: микронной (1 мкм и 5 мкм), субмикронной (доминирующая фракция) и наночастиц. Из 46 исследованных проб в 27 пробах выявлены не менее одного элемента высокого сродства к электрону, в том числе хлора (17), фтора (6), серы (17), которые, как известно, постоянно присутствуют в вулканических газах. Кроме того, присутствие следов вулканических газов подтверждалось при выявлении одновременно редкоземельного элемента рения и радиоактивных элементов (урана, тория, радия, цезия). В космических телах рений ранее не определялся, поэтому можно полагать, что этот элемент земного происхождения. Самым вероятным источником попадания рения на поверхность МКС являются фумарольные парогазовые выбросы вулкана Кудрявый на острове Итуруп. Вулкан Кудрявый представляет собой один из редких случаев долговременной стационарной высокотемпературной магматической дегазации, в фумарольных парогазопылевых выбросах которого количество рения может достигать 20–36 т/год. Это единственное открытое месторождение рения, третье в мире по запасам этого металла, кроме того, радиоактивные элементы (уран, торий, радий, цезий) также постоянно присутствуют в фумарольных газах вулкана Кудрявый [3, 5].

Частицы серы, хлора и фтора, часто выявляемые в составе проб мелкодисперсного осадка с поверхности МКС, не являются постоянными элементами космической пыли, но в газовых выбросах вулканов они всегда присутствуют и являются главными агрессивными компонентами фумарольных газов. Эти элементы активно участвовали в формировании первичной атмосферы Земли и до сих пор оказывают влияние на климат. В верхнюю часть ионосферы на высоту орбиты МКС ионизированные частицы газопылевых выбросов по-

дают с восходящей ветвью глобальной электрической цепи, связывающей стратосферу и ионосферу. На их «гребне» возможна быстрая инжекция аэродисперсных частиц в ионосферу со сменой фазового состояния «аэрозоль-космозоль» [6].

Таким образом, обнаружение рения, серы, хлора и фтора на поверхности МКС по результатам геолого-минералогического анализа является доказательством того, что при извержениях вулканов газопылевые выбросы могут подниматься не только до высоты стратосферы, но и гораздо выше в космическое пространство на высоту 400 км над Землей. Этот факт ставит важную материаловедческую задачу исследования влияния осаждения постоянно поступающих элементов высокого сродства к электрону на состояние материалов орбитальных объектов, уплотнений и стекол иллюминаторов, на оптические приборы и др.

Следует отметить, что в составе 46 проб мелкодисперсного осадка на поверхности МКС обнаружено 65 химических элементов, и только в 5 пробах мелкодисперсного осадка на поверхности РС МКС не обнаружены следы железа [3]. В частицах вулканических газов, поднимающихся за пределы атмосферы до высоты орбиты, может присутствовать хлорид железа, выделяющийся при высоких температурах из магматического расплава. Присутствие частиц хлоридов железа в вулканических газах связано с реакцией магмы с хлорсодержащими соединениями, которые также могут выделяться при извержении. Летучим хлорид железа становится безводный хлорид железа FeCl_3 , который при сильном нагревании переходит в газообразное состояние, образуя мономеры FeCl_3 и димеры Fe_2Cl_6 [7, 8].

При взаимодействии хлорида железа с компактным алюминием происходит накопление ионов железа, завершающееся выделением железа в свободном состоянии и появлением ферритмагнитных частиц, найденных на поверхности фторопластовых корпусов приборов «Тест». Ионы хлорида мигрируют через оксидную пленку к металлу в первую очередь по дефектным местам, увеличивая скорость коррозии [7, 8].

Анализ химического состава загрязнений остекления иллюминатора выявил преобладания оксида цинка, что позволяет выска-

зять предположение о диспергировании покрытий радиаторов и других конструктивных элементов, окрашенных эмалями, содержащими цинк. В качестве примеси присутствуют кремний, алюминий, калий, хлор, фтор и сера. Установлено присутствие углерода, с

преобладающей таблитчатой формой частиц. При отборе проб с иллюминаторов на стекле и границе с обоймой и при последующей очистке стекла специальными устройствами всегда обнаруживались черные следы графита таблитчатого вида (рис. 1).

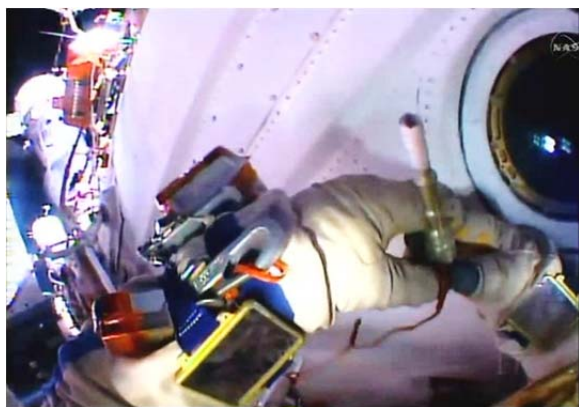


Рис. 1. Отбор проб со стекла иллюминатора служебного модуля МКС (слева) и вид черного осадка на тампоне пробника, доставленного в лабораторию (справа)

Наличие заметных следов таблитчатого графита на стеклах иллюминаторов, пробоотборниках и очистителях указывает на наличие процессов деградации материалов. В составе паронита, являющегося уплотнителем обойм иллюминаторов, содержится более 10 % графита, в том числе таблитчатого вида. Известно, что под воздействием хлора, взаимодействующего с остальными химическими составляющими паронита, графит освобождается. Это обстоятельство может повлиять на герметичность уплотнений в конструкциях иллюминаторов орбитальных объектов при их длительной эксплуатации. Следует отметить, что приборными средствами определить место утечки воздуха в результате повреждения уплотнений затруднительно.

В экспедиции МКС-71 (2024 г.) космонавты О. Кононенко и Н. Чуб обнаружили наличие конденсата на внутреннем стекле иллюминатора № 1 малого лабораторного модуля МЛМ-У, что свидетельствует о негерметичности уплотнителя обоймы. Ранее 12 июня 2022 г. на внутренней стороне внешнего стекла этого иллюминатора космонавтом С. Корсаковым было сделано фото полумесяца инея (рис. 2). Это указывает на то, что в конструкции иллюминатора № 1 МЛМ-У имеет место процесс малой утечки воздуха в течение 2 лет. Образование льда можно объяснить тем, что в

2022 году в результате натекания воздуха в пространстве между стёкол иллюминатора установились термодинамические условия тройной точки воды: давление 4,6 Торр (0,006 атм) и температура 0,01 °С на внутренней стороне внешнего стекла. За счет продолжающейся утечки воздуха в межстекольное пространство давление стало больше 4,6 Торр, и появились капельки конденсата.



Рис. 2. Фото инея на внутренней стороне внешнего стекла иллюминатора

Так как температура внешнего стекла от оправы с температурой внешних конструктивных элементов МКС снижается до центра

стекла с температурой, близкой к отрицательной, зона максимума слоя выпавшего инея и в дальнейшем расположения капелек может указать расположение места негерметичности оправы стекла. Одной из причин может являться деградация герметичности паронитовых уплотнений.

В 2021 году для исследования продолжительности сохранения жизнеспособности микроорганизмов в открытом космическом пространстве на поручнях модуля «Поиск» были установлены два устройства «Тест-экспонат» на 3,5 года. Поверхностные участки фторопластовых гермоблоков представляли интерес для исследования, поскольку на их поверхности образовывался налет мелкодисперсного вещества из состава космозоля. После доставки на Землю устройства «Тест-экспонат» в 2024 году с фторопластового блока был сделан соскоб, и был вырезан условно чистый участок изнутри блока для выполнения физико-химического анализа мелкодисперсионного вещества. Анализ показал, что корпус покрыт осадком рыжего цвета, который удерживается на поверхности фторопласта достаточно прочно, не остаётся на перчатках и практически не счищается ватным тампоном (рис. 3).



Рис. 3. Осадок на поверхности корпуса «Тест»

Элементный анализ образцов проводился методом оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Получены результаты, в целом, повторяющие результаты предыдущих работ. Соотношение элементов может напоминать как состав каменных метеоритов, так и состав обычной минеральной пыли на Земле, поскольку речь идёт о самых распространённых на Земле элементах. Данные для железа и никеля позволяют проанализировать происхождение железа. Соотношение железо/никель в исследо-

ванном образце равно 335, следовательно, эти частицы железа не метеоритного происхождения, т. к. для них это соотношение не превосходит 14.

В 2019 году в ВНИИФТРИ проводился анализ объектов, экспонировавшихся на внешней поверхности МКС и содержащих мелкодисперсные частицы: свёрток ткани из хлопчатобумажного материала, экспонировавшийся в течение 10 лет на кронштейне модуля «Звезда» и фторопластовый прибор «Тест-экспонат» на кронштейне модуля «Пирс» после 1 года экспонирования. Для анализа образцов применяли нейтронно-активационный анализ (НАА) – высокочувствительный, точный метод, используемый для количественного анализа основных, второстепенных элементов и микроэлементов. Методика НАА основана на измерении параметров излучения, испускаемого при распаде радиоактивных ядер, образовавшихся в результате облучения материала нейтронами. Соотношение железо/никель в исследованных образцах: для фторопластового корпуса прибора в 2019 г. составляет 220 (в 2024 г. – 335), для хлопковой ткани загрязнённого участка 280, а чистого 236.

Важно обратить внимание на концентрацию урана и тория [3] в образцах. Их количества малы, но данный метод имеет отличную разрешающую способность по таким тяжёлым ядрам. Их количество возросло в 3–4 раза на загрязнённом участке. Появление данных элементов можно объяснить наземными испытаниями, либо работой спутников с ядерным источником энергии, либо наличием следов вулканических газов.

Во время работы с участками загрязнённой ткани была отмечена её низкая механическая прочность и повышенная хрупкость. При разрезании поверхностные волокна крошились и разлетались. С незагрязнёнными участками такого не происходило. Поэтому был проведён сравнительный анализ загрязнённого и незагрязнённого участка ткани при помощи электронно-растрового сканирующего микроскопа JEOS jsm-35CF. Были обнаружены несколько видов дефектов загрязнённой ткани, отсутствующие на чистой ткани и не характерные для хлопка. На загрязнённом участке были выявлены «изъеденные» и «крошащиеся» волокна (рис. 4).

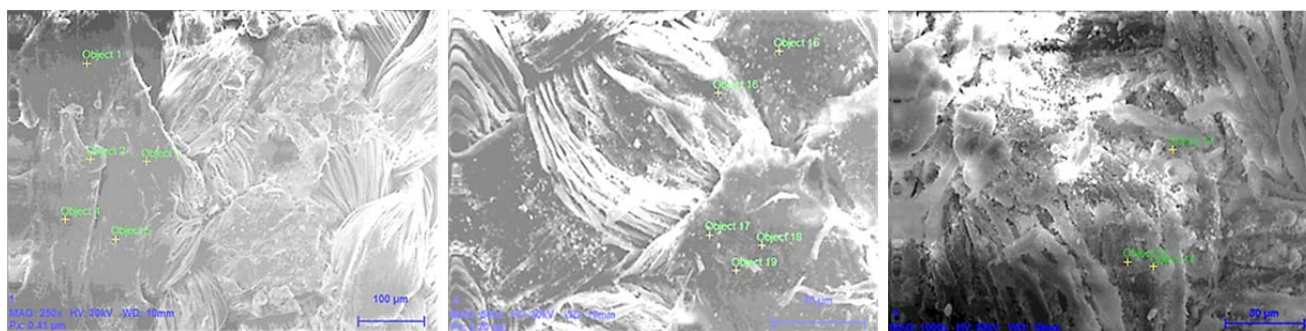


Рис. 4. Увеличенные фрагменты ткани

Петли волокон ткани сохранились только на малом участке. Поскольку волокна ткани были разрушены, то были исследованы механические свойства целых петель с обеих сторон ткани. На внешней стороне (подвергавшейся воздействию) петли рвутся, почти не вытягиваясь, при усилии раз в пять меньшем. На закрытой стороне минимальное усилие разрыва составляло 1,5 кг силы, максимальное – 2 кг силы. На внешней стороне в коричневых областях максимальная выдерживаемая масса – 0,5 кг, минимальная – около 0,25 кг, в белых областях – 1,5 кг и 0,75 кг, соответственно.

На обеих сторонах ткани обнаружены элементы Al, Si, Ca, и Mg, которые наиболее часто находятся в космической пыли и метеоритах. На внешней стороне есть еще S, Cl и F, которые присутствуют в вулканических газах. Обнаружение Zn подтверждает диспергирование покрытий конструктивных элементов, окрашенных эмалями, содержащими цинк. Различие в составе может быть следствием разных скоростей пылевых частиц. Частицы золя крайне малы и, двигаясь на высокой скорости, внедряются в волокна ткани. При высокой скорости они проходят сквозь материю.

Таким образом, исследования физико-химических свойств образующегося мелкодисперсного осадка на поверхности МКС подтвердили возможность его активного участия в агрессивном влиянии СВА на развитие микродеструкции элементов конструкции из разных материалов на МКС. Это обстоятельство формирует новые требования к материалам поверхности космических аппаратов, покрытиям и защитным элементам, с учетом адсорбции и накопления частиц различного происхождения.

Заключение

Результаты космического эксперимента «Тест» показали, что орбитальные группировки и космический мусор являются сборщиками и носителями на своей поверхности агрессивных химических элементов, не рассеиваемых в космическое пространство, как ранее предполагалось. Обнаружено, что химически активные элементы и частицы железа могут быть результатом вулканической деятельности. Постоянное поступление на поверхность МКС биогенного материала, частиц метеороидных потоков, химически активных элементов вулканических газов и, что важно, радиоактивных частиц, требует дальнейшего изучения коррозионной стойкости поверхности в условиях многолетнего комбинированного воздействия агрессивного околоземного пространства. Это определяет новые опасные факторы влияния экзосферы Земли не только на техническое состояние орбитальных средств снаружи, но и внутри после частых внекорабельных работ экипажа. Элементы мелкодисперсного осадка, накопленного на внешней поверхности любого объекта, при возвращении космического аппарата попадут на Землю, и это может представлять опасность. Исследования перемещения вещества в космосе является важной задачей, что также необходимо для планетарной безопасности.

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. Василяк Л. М., Шубралова Е. В., Чикирев В. Н. / Прикладная физика. 2024. № 6. С. 14–19.
3. Zinicovscaia I., Grozdov D., Yushin N., Safonov A., Proshin I., Volkov M., Pryadka A., Belyaev V., Shub-

ralova E., Tsygankov O. / Acta Astronautica. 2021. Vol. 189. P. 278–282.

4. Grebennikova T. V., Syroeshkin A. V., Shubralova E. V., Eliseeva O. V., Kostina L. V., Kulikova N. Y., Latyshev O. E., Morozova M. A., Yuzhakov A. G., Zlatskiy I. A., Chichaeva M. A., Tsygankov O. S. / Scientific World Journal. Vol. 2018. № 7360147, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2018/7360147>

5. Пономарев Г. П., Рашидов В. А., Чубурков Ю. Т. и др. / Материалы Всесоюзного совещания «Геодина-

мика, магматизм и минерагения континентальных окраин Севера Пацифики». 2003. Т. 2. С. 200–201.

6. Попель С. И. / Природа. 2015. № 9. С. 48–56.

7. Колпаков М. Е., Дресвянников А. Ф., Юсупов Р. А. <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-himicheskikh-ravnovesiy-sistemy-fe-ii-fe-iii-al-iii-h2o-pri-korrozii-alyuminiya-v-rastvore-hlorida-zheleza-iii-vysokoy/viewer> С. 132–139.

8. Десвянников А. Ф., Колпаков М. Е. / Журнал физ. химии. 2003. Т. 77. № 5. С. 807.

PACS: 87.65.+y, 96.50.Pw

The influence of the Earth's exosphere on the micro-destruction of materials of space stations

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 5.12.2025; revised 14.01.2026; accepted 20.02.2026

Research under the Test space experiment program on the physical and chemical properties of the resulting fine sediment on the surface of the International Space Station (ISS) has confirmed the possibility of its active participation in the aggressive influence of its own external atmosphere on the development of micro-degradation of ISS materials. An example of the effect of chemical elements with high electron affinity from volcanic gases reaching the surface of the ISS on the tightness of seals in portholes is given. The presence of graphite on the windows of portholes, samplers and cleaners indicates the degradation of the sealing materials, which can lead to leakage of the gaseous medium. The Test experiment showed that the natural contamination of the ISS surface by dispersed particles of the cosmosol requires consideration of the aging of station materials and their corrosion resistance, taking into account the external environment.

Keywords: international space station, fine deposition, exosphere.

REFERENCES

- 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].
- Vasilyak L. M., Shubralova E. V., and Chikirev V. N., Applied Physics, № 6, 14–19 (2024) [in Russian].
- Zinikovskaia 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).
- Grebennikova T. V., Syroeshkin A. V., Shubralova E. V., Eliseeva O. V., Kostina L. V., Kulikova N. Y., Latyshev O. E., Morozova M. A., Yuzhakov A. G., Zlatskiy I. A., Chichaeva M. A., and Tsygankov O. S., Scientific World Journal **2018**, 7360147, 1–7 p.
- Ponomarev G. P., Rashidov V. A., Chuburkov Yu. T. et al., Proceedings of the All-Union Conference “Geodynamics, magmatism and minerageny of the continental margins of the North Pacific” **2**, 200–201 (2003).
- Popel S. I., Priroda, № 9, 48–56 (2015) [in Russian].

7. Kolpakov M. E., Dresvyannikov A. F., and Yusupov R. A. <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-himicheskikh-ravnovesiy-sistemy-fe-ii-fe-iii-al-iii-h2o-pri-korrozii-alyuminiya-v-rastvore-hlorida-zheleza-iii-vysokoy/viewer> p. 132–139 [in Russian].
8. Dresvyannikov A. F. and Kolpakov M. E., Journal of Physical Chemistry **77** (5) 807 (2003) [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-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