

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

Научно-исследовательский институт ядерной физики

имени Д.В. Скобельцына

Отдел космических наук

Лаборатория космического материаловедения

В.Н. Черник

**ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ
АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ
ЗЕМЛИ НА МАТЕРИАЛЫ КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ.**

Международная космическая станция, высота 400 км

На низких околоземных орбитах наибольшее повреждающее действие на материалы наружных поверхностей КА оказывает атомарный кислород набегающего потока. Из-за эрозии годовые потери толщины полимеров могут достигать долей мм.



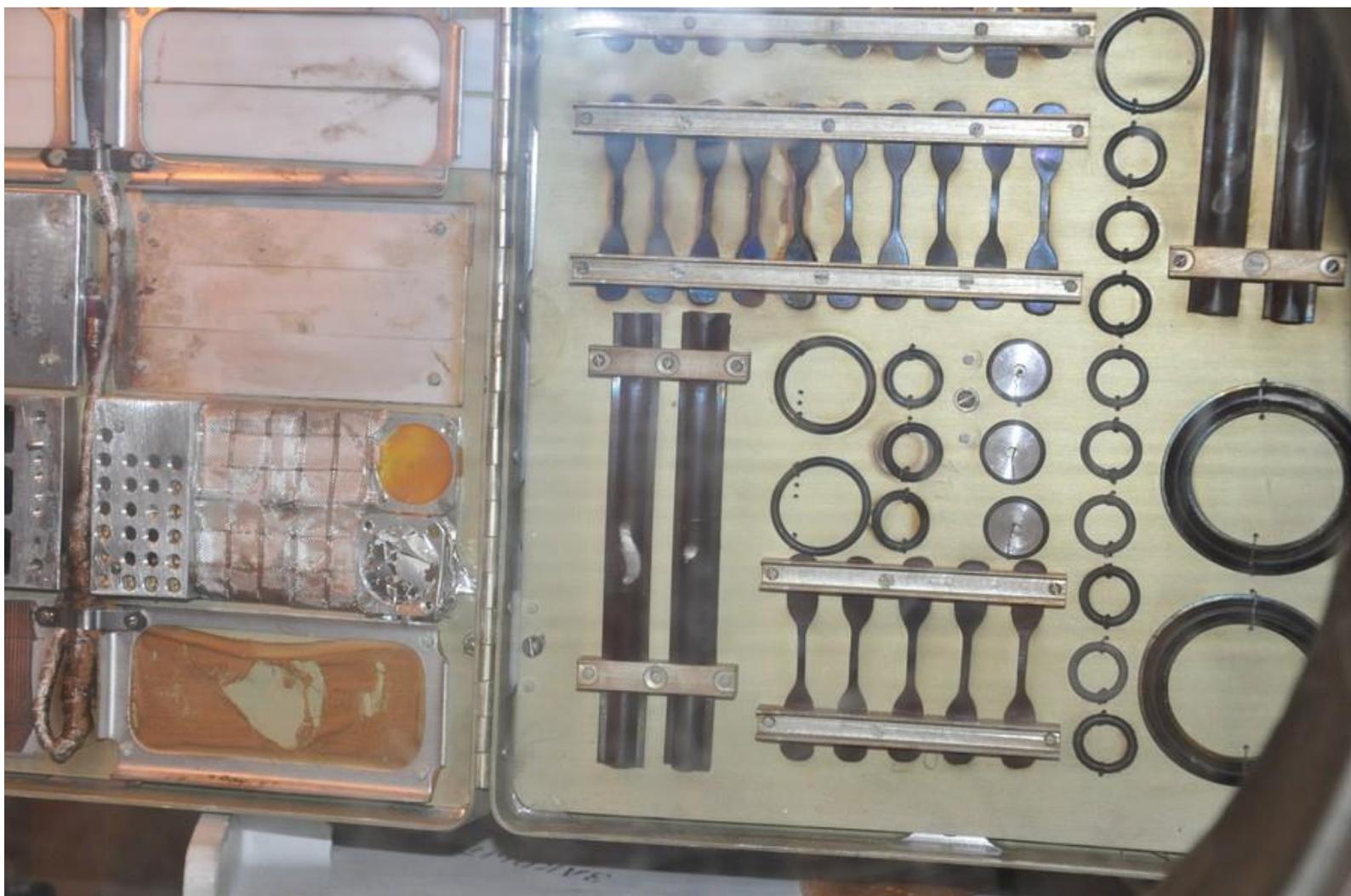
При создании новых материалов проводятся исследования их стойкости, как в натуральных экспериментах на борту КА, так и в лабораторных моделирующих установках.

НИИЯФ МГУ участвует в обоих направлениях. В космическом материаловедческом эксперименте «КОМПЛАСТ» на борту МКС. И на созданном в НИИЯФ МГУ стенде для имитации потока АК пучком ускоренной до энергии 20-30 эВ кислородной плазмы.

Образец арамидной ткани, разрушенный атомарным кислородом за 13 лет экспозиции на наружной поверхности МКС



Натурный эксперимент КОМПЛАСТ на МКС 1998 г-н/вр.
Кассета с образцами открыта внутри камеры в среде аргона



Кассета «КОМПЛАСТ»

- В полетном эксперименте «КОМПЛАСТ» на МКС в числе других материалов образец был доставлен на Шаттле в НИИЯФ МГУ в специальном гермоконтейнере
- На предыдущем слайде виден этот образец в кассете с другими образцами. Кассета извлечена из гермоконтейнера и раскрыта внутри камеры с аргоном

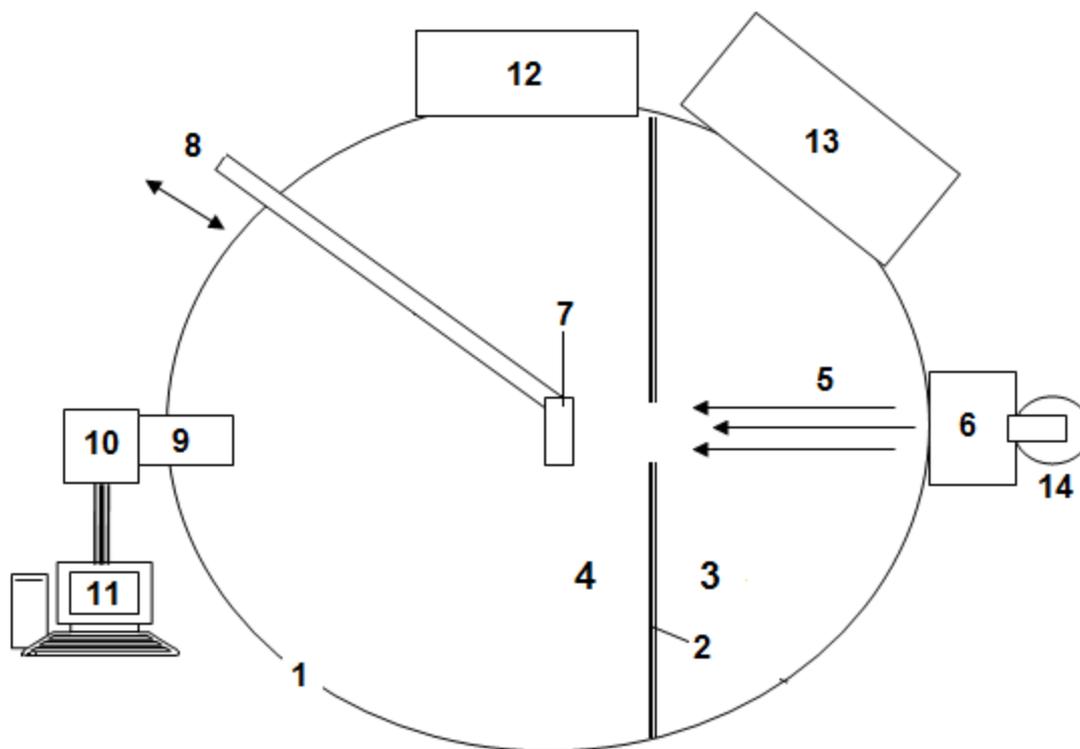
Вскрытие гермоконтейнера внутри камеры с аргоном в НИИЯФ МГУ корп.19 пом.1-26



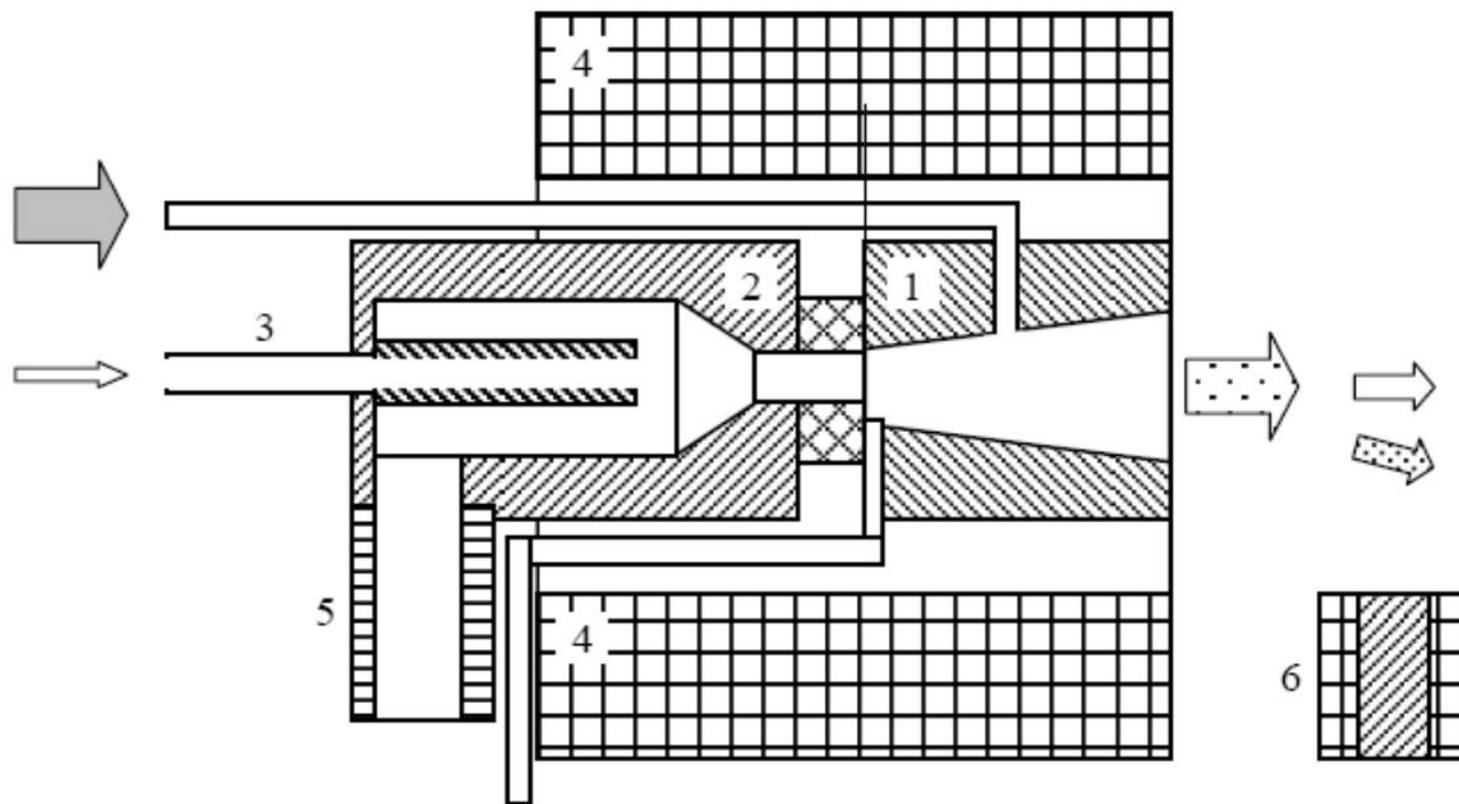
Показана процедура вскрытия гермоконтейнера внутри камеры, заполненной аргоном, извлечения и раскрытия кассет для извлечения образцов. Затем там же внутри камеры образцы помещались в гермопеналы для передачи заинтересованным организациям для исследования.

Схема плазменно-пучкового стенда НИИЯФ МГУ

1-камера, 2-стенка, 3-ускорительная секция, 4- секция образцов, 5-поток плазмы атомарного кислорода, 6-плазменный ускоритель. 7-держатель образцов, 8-манипулятор образцов, 9-масс-спектрометр, 10- цифровой электронный блок измерения, 11-ПК, 12, 13, 14-крионасосы.



Ускоритель кислородной плазмы с двойным контрагированием А.с. 1797448. СССР 1991



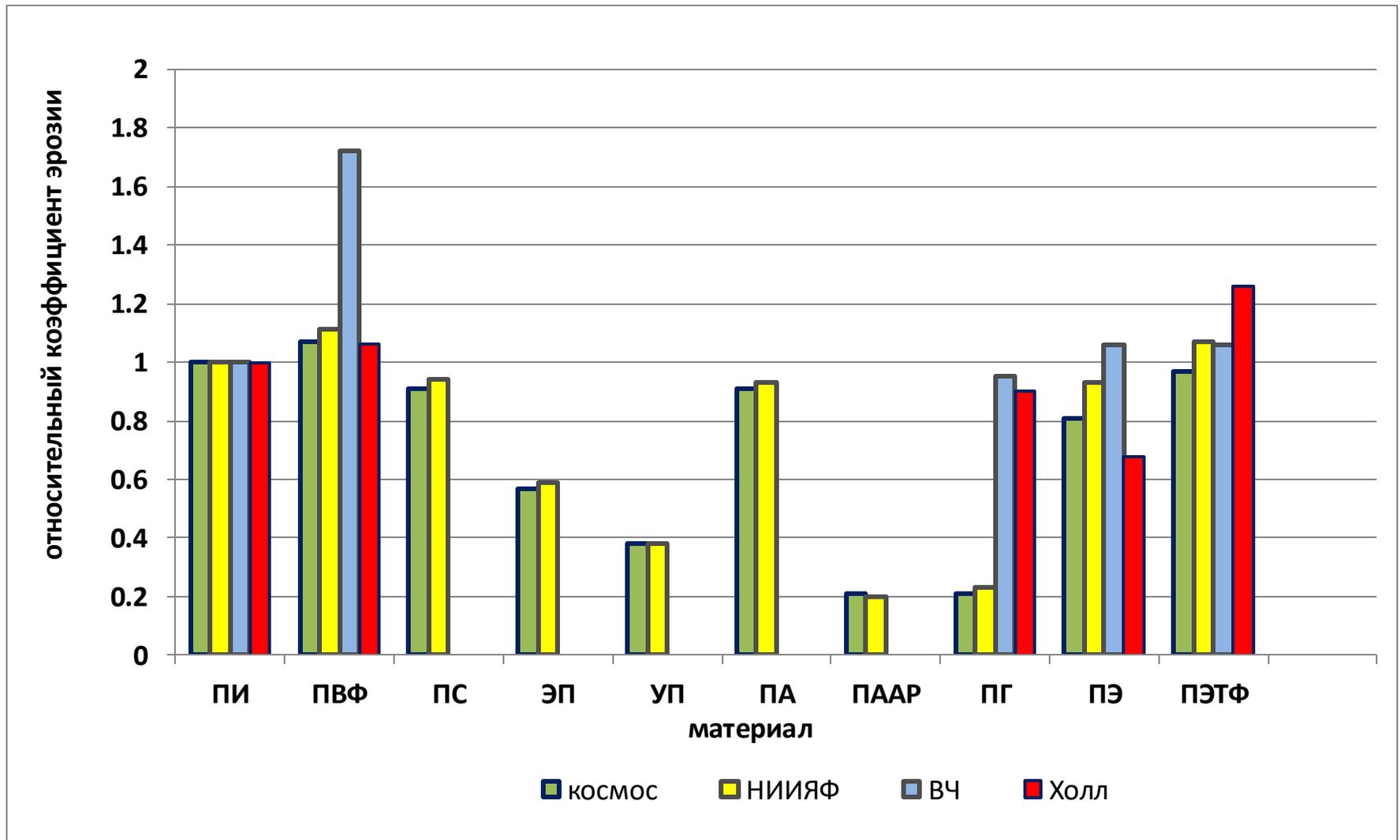
Лабораторное моделирование потоков АК проводилось на плазменно-пучковом стенде [1]. Источником кислородной плазмы служит магнитоплазмадинамический ускоритель.

- В ускорителе реализован режим двойного контрагирования разряда с полым катодом, что снижает содержание примесей в потоке до $10E-6$.
- Используется режим ускорения плазмы до энергии частиц кислорода 20-30 эВ. Благодаря такому умеренному повышению энергией по сравнению с 5 эВ в набегающем потоке это позволяет, с одной стороны многократно повысить интенсивность эрозии материала, а с другой стороны еще не приводит к заметному изменению механизма окислительного разрушения. Это позволяет повысить достоверность прогнозирования эрозии материалов КА при длительных полетах на основе результатов лабораторных ускоренных испытаний.

Ускоренный поток кислородной плазмы с энергией 20-30 эВ
на стенде НИИЯФ МГУ и спектр масс ионов



Коэффициенты эрозии материалов относительно полиимида



На предыдущем слайде:

Полиимид (ПИ), полиэтилентерефталат (майлар) (ПЭТФ), полиэтилен низкого давления (ПЭНД), пирографит (ПГ), поливинилфторид (тедлар) (ПВФ), полистирол (ПС), полиметилметакрилат (ПММА), эпоксид (ЭП), углерод (УП), полиамид 6 (нейлон 6/капрон) (ПА), параамид (кевлар/русар) (ПААР)

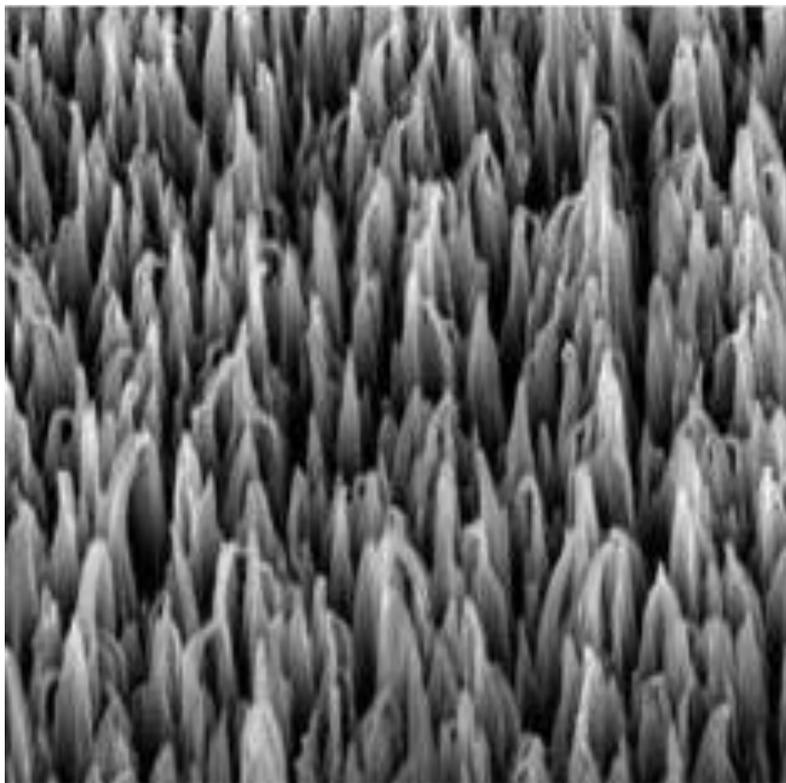
Коэффициенты эрозии базовых материалов КА относительно полиимида.

Результаты, полученные на плазменно-пучковой установке НИИЯФ МГУ (желтый цвет) с энергией частиц кислорода 20-30 эВ показали, что относительные коэффициенты эрозии, нормированные по полиимиду, близки к данным полетных экспериментов на МКС (зеленый цвет) для всех 10 испытанных материалов.

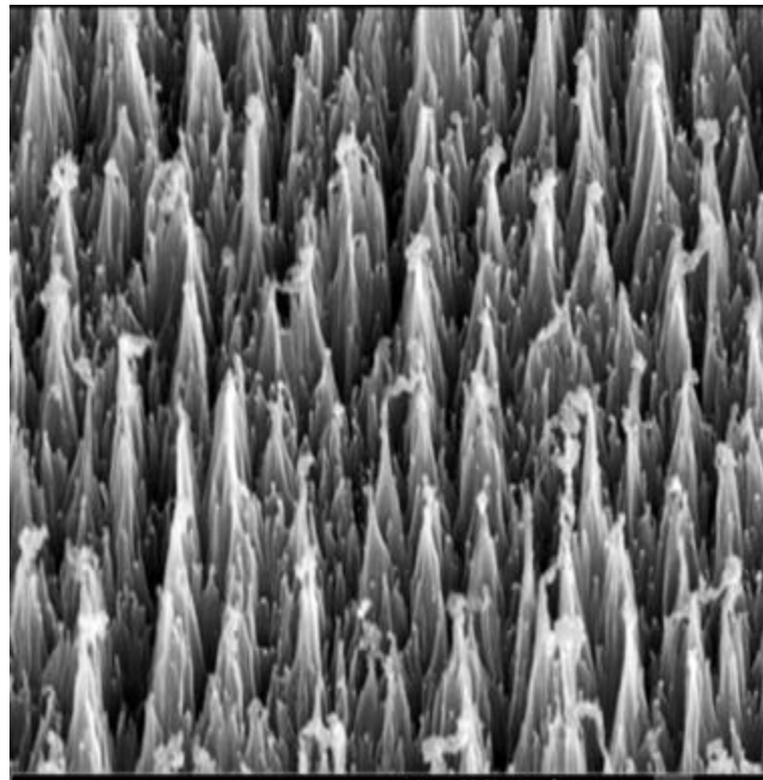
Сравнение с литературными данными исследований на других установках в ВЧ разряде (синий цвет) и в холловском ускорителе ионов (красный цвет) показали для некоторых полимеров и углерода заметные отличия от данных, полученных в космических экспериментах

Рельеф поверхности полиимидной пленки Картон после экспозиции в космосе на КА LDEF и на стенде НИИЯФ МГУ

На борту КА LDEF при Ф АК $2,3 \cdot 10^{20}$ ат./см²; поле 2 мкм



На стенде НИИЯФ МГУ при ЭФ АК $2,4 \cdot 10^{20}$ ат./см². Поле 2 мкм



Российская орбитальная служебная станция



Второй этап развёртывания.

📍 Космодром Восточный



Экипаж	2–4 чел.
Количество внешних рабочих мест	48 шт.
Кораблей посещения (пилотируемых / грузовых)	1–2 / 1–3 шт.
Объёмы гермоотсеков	667 м ³
Объёмы для научного оборудования	до 49 м ³

Имитационные исследования проводились на протяжении многих лет в интересах отечественных предприятий космической техники.

Начиная с 2023 г на стенде исследуются перспективные материалы для РОСС, в том числе по заказу производителей космической техники. Особый интерес привлекает исследование материалов при высоких флюенсах АК для имитации полетов длительностью 20 и более лет.

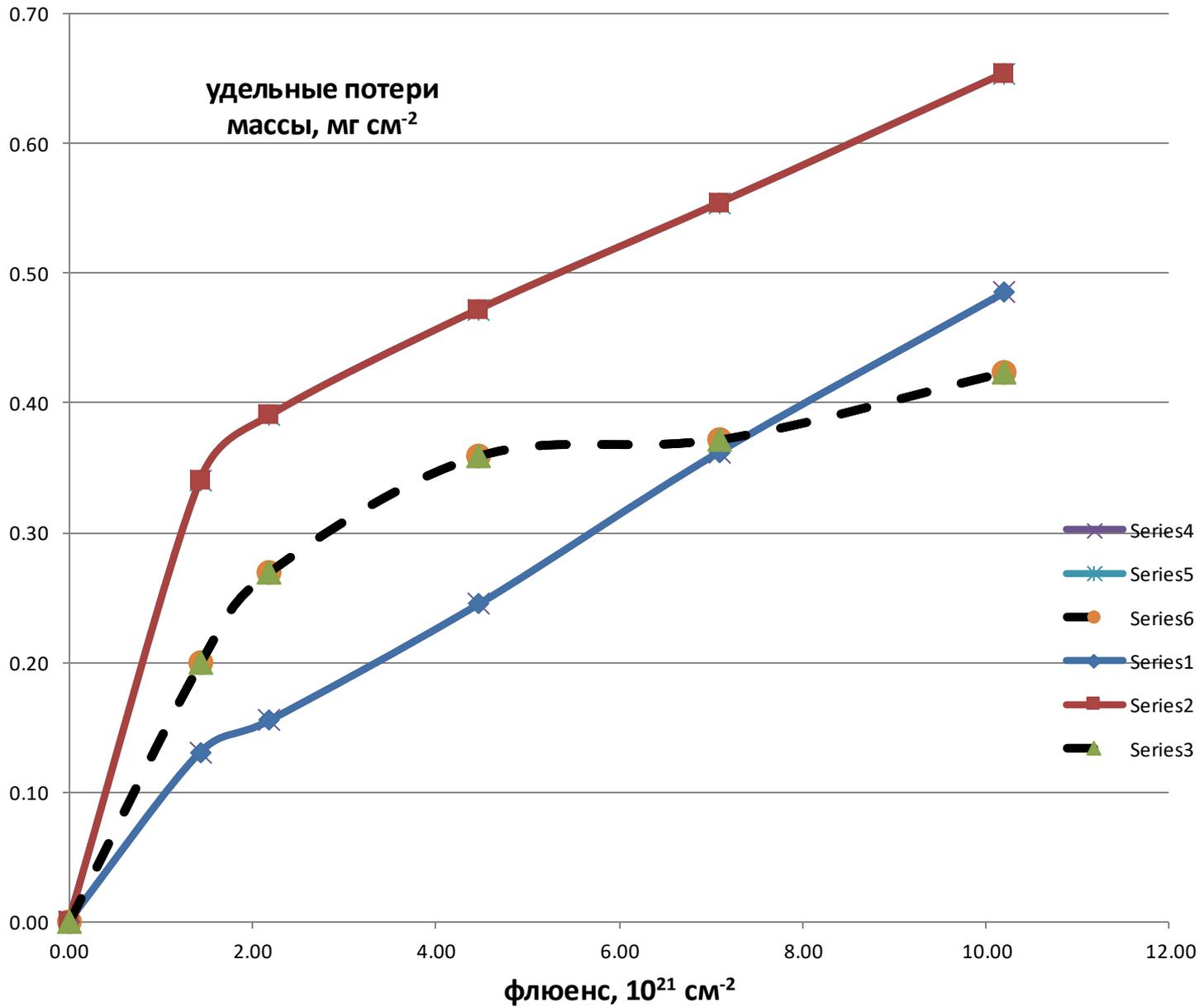
Проведены ускоренные испытания на стойкость к воздействию атомарного кислорода при эффективных флюенсах $1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$. 3 типов покрытий на основе кремнийорганических полимеров: покрытие №1 ЭКТ-ПЦ, №2 лак ЭКТ, №3 герметик УФ-7-21, нанесенные на подложки из алюминиевой фольги толщиной 190 мкм размером 20x20 мм [2].

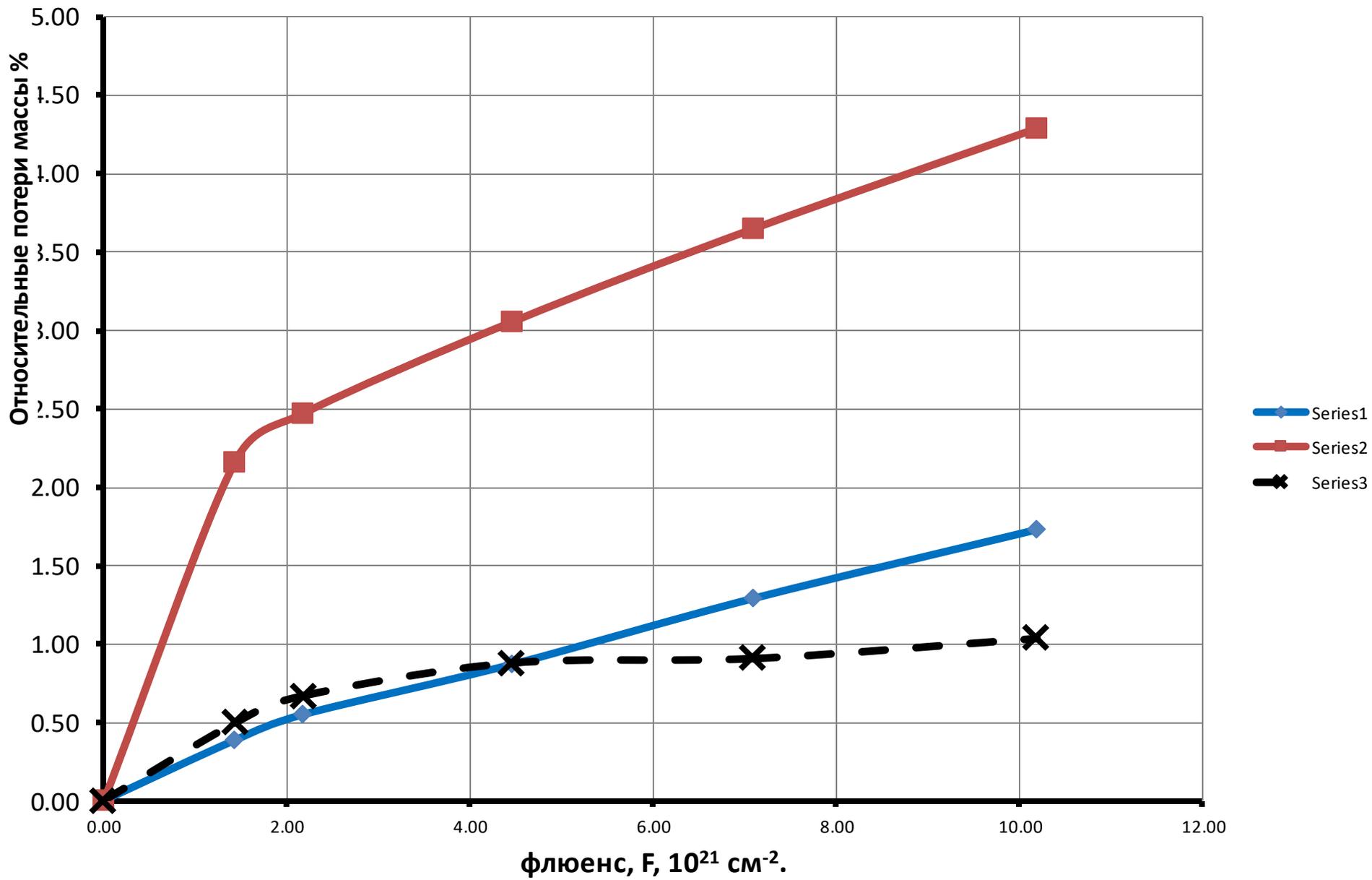
Измерены зависимости от флюенса АК потерь массы и коэффициентов эрозии материалов. Покрытия показали на два порядка более высокую стойкость к воздействию атомарного кислорода, чем у эталонного полиимида. Измеренные коэффициенты эрозии на два порядка ниже, чем у полиимида и составляют: для ЭКТ-ПЩ - $4,2 \cdot 10^{-26}$ г/атом О, для ЭКТ - $3,2 \cdot 10^{-26}$ г/атом О, для УФ-7-21 - $1,7 \cdot 10^{-26}$ г/атом О.

Для оценки предельного флюенса работоспособности покрытий определены относительные потери массы при флюенсе 10^{22} см⁻², определенные по трендам: №1 - 1,48 %, №2 - 2,26% ,№3 - 0,42%.

Исходя из этих данных, 100% уноса материала покрытия ожидается при флюенсах: №1 - $7 \cdot 10^{23}$ см⁻², №2 -- $4 \cdot 10^{23}$ см⁻², №3 - $25 \cdot 10^{23}$ см⁻². Это соответствует флюенсам при длительности полета в несколько десятков лет в зависимости от орбиты.

Удельные потери массы





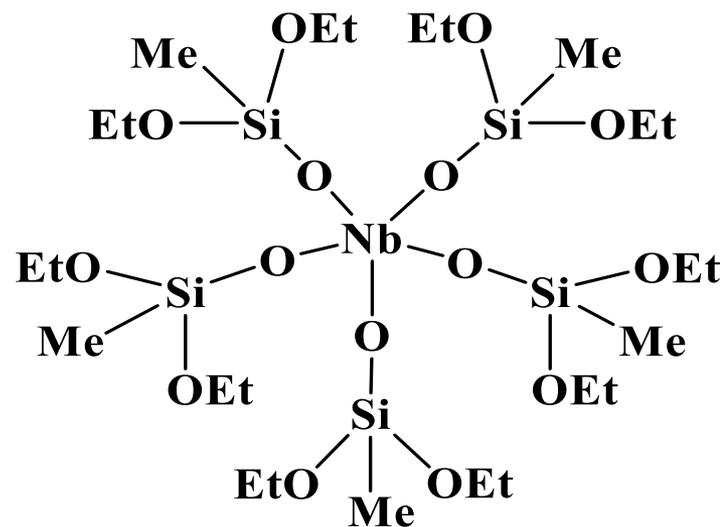
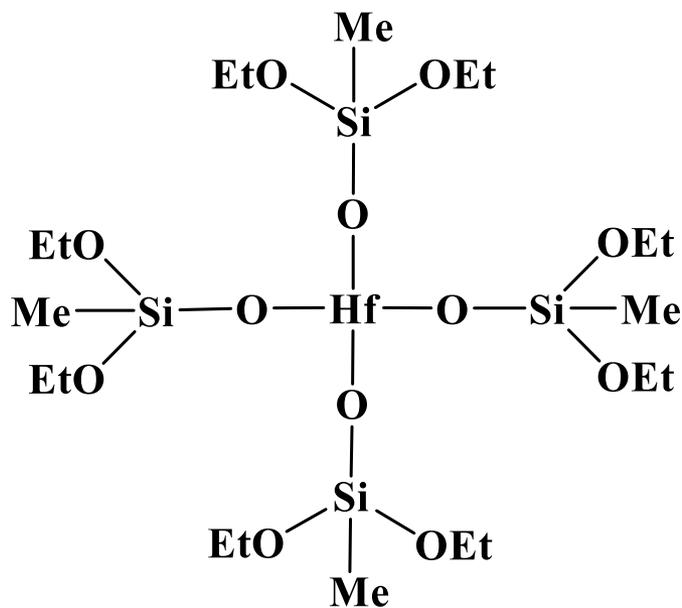
Кроме рассмотренных выше испытаний перспективных фабричных материалов другим направлением работ являются исследования стойкости к АК новых материалов-нанокомпозитов. Это полиимидные нанокомпозиты, содержащие атомы Si. Матричным полимером служат термостойкие полиимиды; а прекурсорами наночастиц размером менее 10 нм, т.е. веществами, из которых они формируются, являются металлоксилосиланы, различающиеся центральным атомом (Al, Fe, Cr, Zr, Hf, Nb). Они показаны на рис. Повышение стойкости к АК достигается образованием в полимерных молекулах кремний содержащих наночастиц в результате окисления введенных силосановых прекурсоров. Концентрация прекурсоров изменялась от 4 до 25 мас. %.

Разработка таких материалов проводится в Институте элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, Институте синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколова РАН. НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова участвует в этих работах и проводит эксперименты по воздействию АК. Работы ведутся в рамках гранта «Силосановые полимеры лестничного типа-перспективные защитные материалы для космической техники» с участием ИНЭОС РАН, ИСПМ РАН и НИИЯФ МГУ.

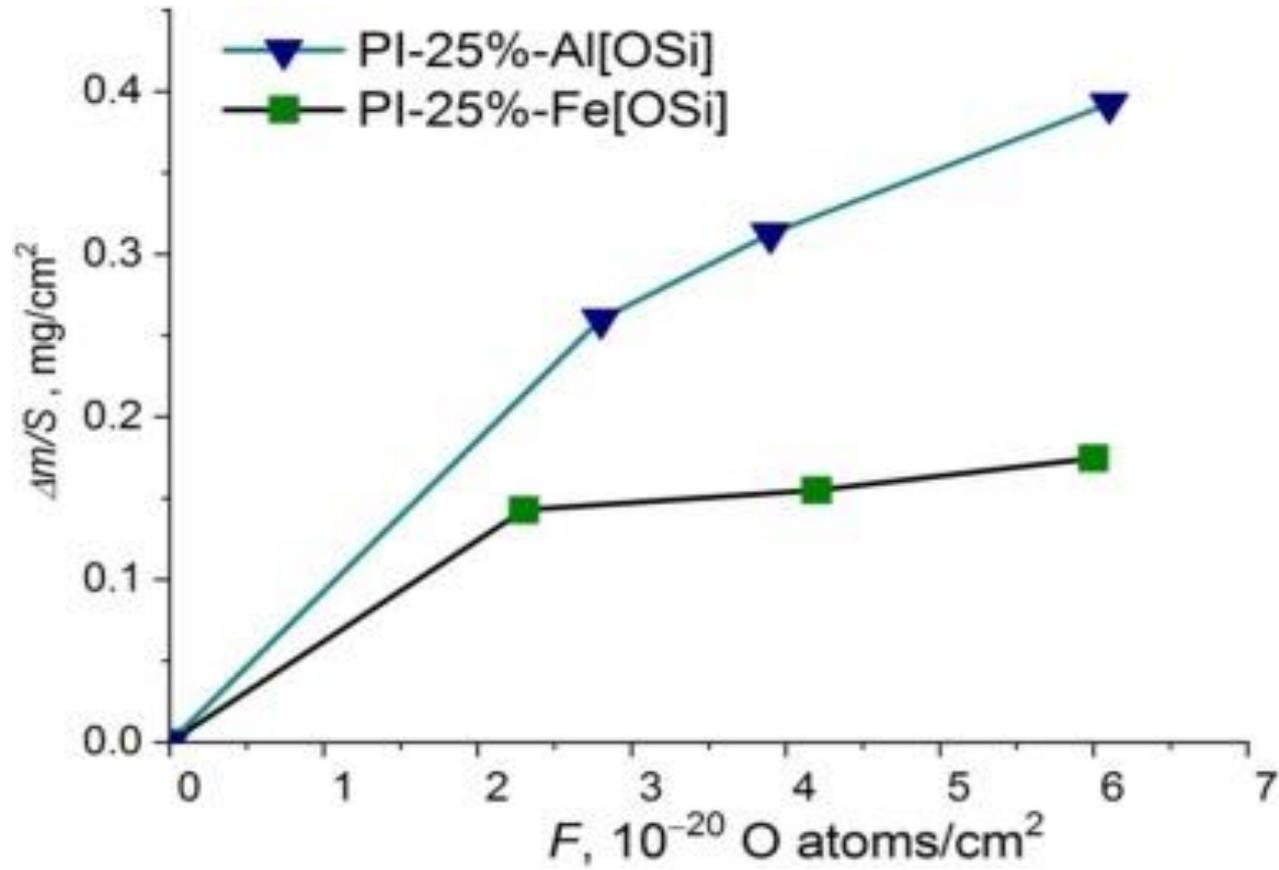
Целью настоящей работы было определить защитные механизмы гибридных наночастиц от разрушительного воздействия АК. Были использованы одни и те же полиимиды и силосаны с атомами металлов одинаковой валентности (Al и Fe) и одинаковой кремнийорганической средой. Особое внимание было уделено определению основных этапов получения металл-силосановых прекурсоров.

Структурные формулы прекурсоров Hf-силоксана, Nb-силоксана .

Композиты разработаны и изготовлены в
ИНЭОС РАН , Москва, Россия
О.А. Серенко , У.С. Андропова [3,4]



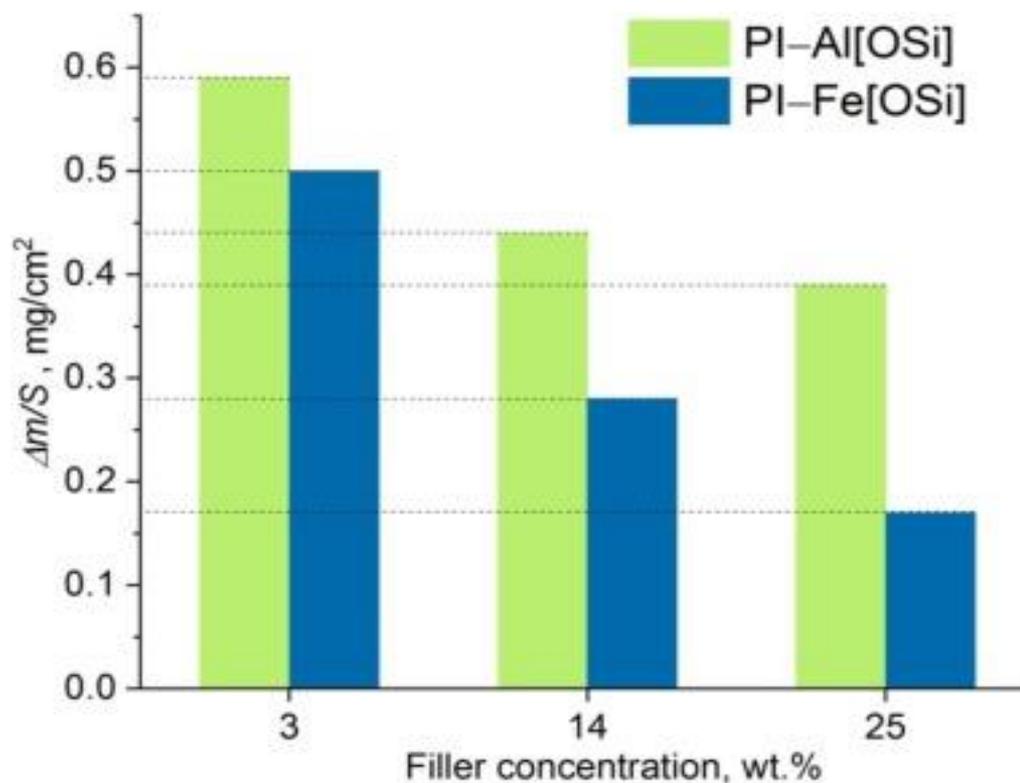
Зависимости удельных потерь массы $\Delta m/S$ от флюенса АО F для нанокомпозитов с концентрацией 25 мас.% прекурсора [4]



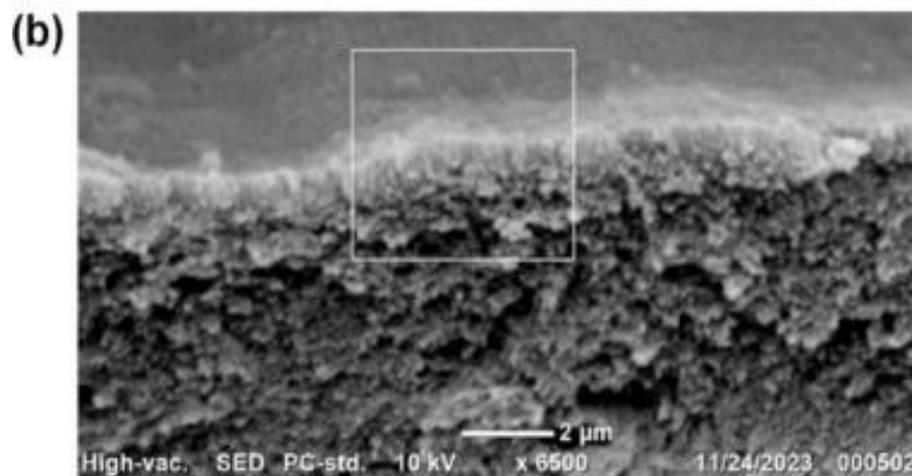
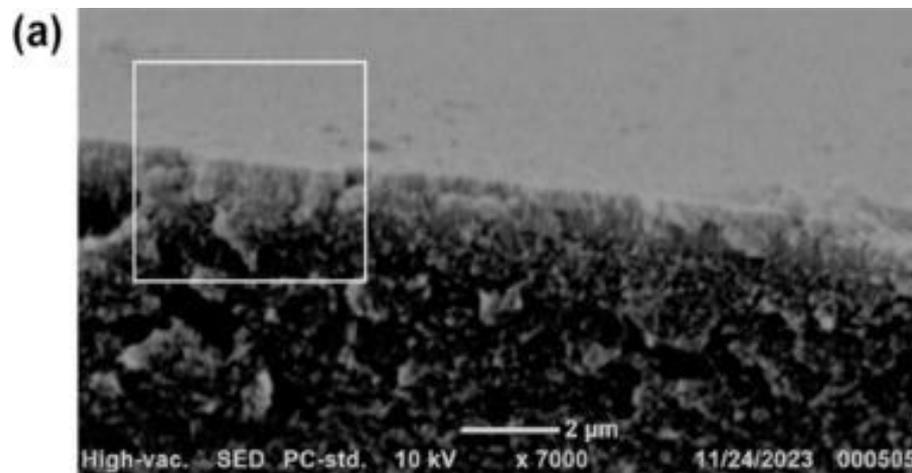
На рисунке показаны зависимости $\Delta m/S$ от флюенса АО F для нанокомпозитов с одинаковой концентрацией 25 мас.% прекурсора [4]. Значения $\Delta m/S$ для композита с наночастицами силоксана с железом меньше, чем с наночастицами силоксана с алюминием. С учётом одинакового содержания силоксанового компонента в наночастицах полученный результат указывает на влияние природы центрального атома металла в используемых прекурсорах на защитную функцию наночастиц в полиимиде от воздействия АО в целом.

На рисунке показана гистограмма изменения удельной потери массы ($\Delta m/S$) нанокомпозитов, при различных концентрациях прекурсоров при флюенсе АО $F = 6 \times 10^{20}$ атомов О/см²) [4]. По мере увеличения концентрации наполнителя, независимо от типа центрального атома металла, значения $\Delta m/S$ уменьшаются. При одинаковой концентрации наночастиц эти значения меньше для композитов с железом по сравнению с композитами с алюминием. Более того, по мере увеличения содержания наночастиц разница между $\Delta m/S$ для образцов увеличивается.

Гистограмма изменения удельной потери массы ($\Delta m/S$) нанокompозитов [4], полученных при использовании различных концентраций прекурсоров при постоянном значении флюенса АО $F = 6 \times 10^{20}$ атомов O/cm²



СЭМ-изображения поперечных сечений ПИ пленок, с 25% Al-силоксана (a) или Fe-силоксана (b) после облучения АК [4]



- СЭМ-изображения поперечных сечений пленок, полученных с использованием 25% Al-силоксана (а) или Fe-силоксана (b) после облучения АО (флюенс F составляет 6×10^{20} атомов O/cm²) [4].
- На поверхности виден светлый слой обогащенный кремнием, причем для силоксана с алюминием слой более рыхлый.
- Исследования показали, что механизм защиты полиимида с наночастицами металлосилоксанов от разрушительного воздействия АО основан на окислении силоксановых фрагментов с образованием внешнего защитного слоя, препятствующего проникновению АК в объем покрытия и дальнейшей деструкции полимера, причем морфология/сплошность внешнего защитного слоя определяется природой атома металла. Защитный слой на поверхности силоксана с железом менее подвержен микротрещинам по сравнению с внешним слоем, образующимся на плёнке с алюминием.
- Защитный эффект наночастиц силоксана тем сильнее, чем выше их содержание в полимере..

ПУБЛИКАЦИИ по результатам 2024 г.

1. Л.С. Новиков, В.Н. Черник, Е.Н. Воронина, Н.Н. Чирская
Моделирование воздействия атомарного кислорода на материалы искусственных спутников Земли // Космические исследования, 2024, т.62, № 4, с. 372-384
2. В.Н. Черник, Л.С. Новиков, С.П. Соколова, А. О. Куриленок, Ю.В. Поручикова. Распыление полимерных покрытий при высокофлюентном облучении потоком кислородной плазмы// Поверхность, 2025, №4.
3. Andropova U.S., Chernik V.N., Novikov L.S., Sapozhnikov d.a., Tebeneva N.A., Ausin R.R., Serenko O.A. Effect of Nanoparticles and Syloxan Groups on the Atomic Oxygen Erosion Resistance of Copolyimide// Polymer Degradation and Stability, Elsevier BV (Netherlands), 2024
4. Serenko O.A., Andropova U.S., Ausin R.R., Shevchenko V.G., Tebeneva N.A., Chernik V.N., Novikov L.S., Muzafarov F.V. Stabilisation Mechanisms of Polyimide-Metallosiloxane Nanocomposites Against Atomic Oxygen Impact // Applied surface science, Elsevier BV (Netherlands), 15 марта 2025г.