

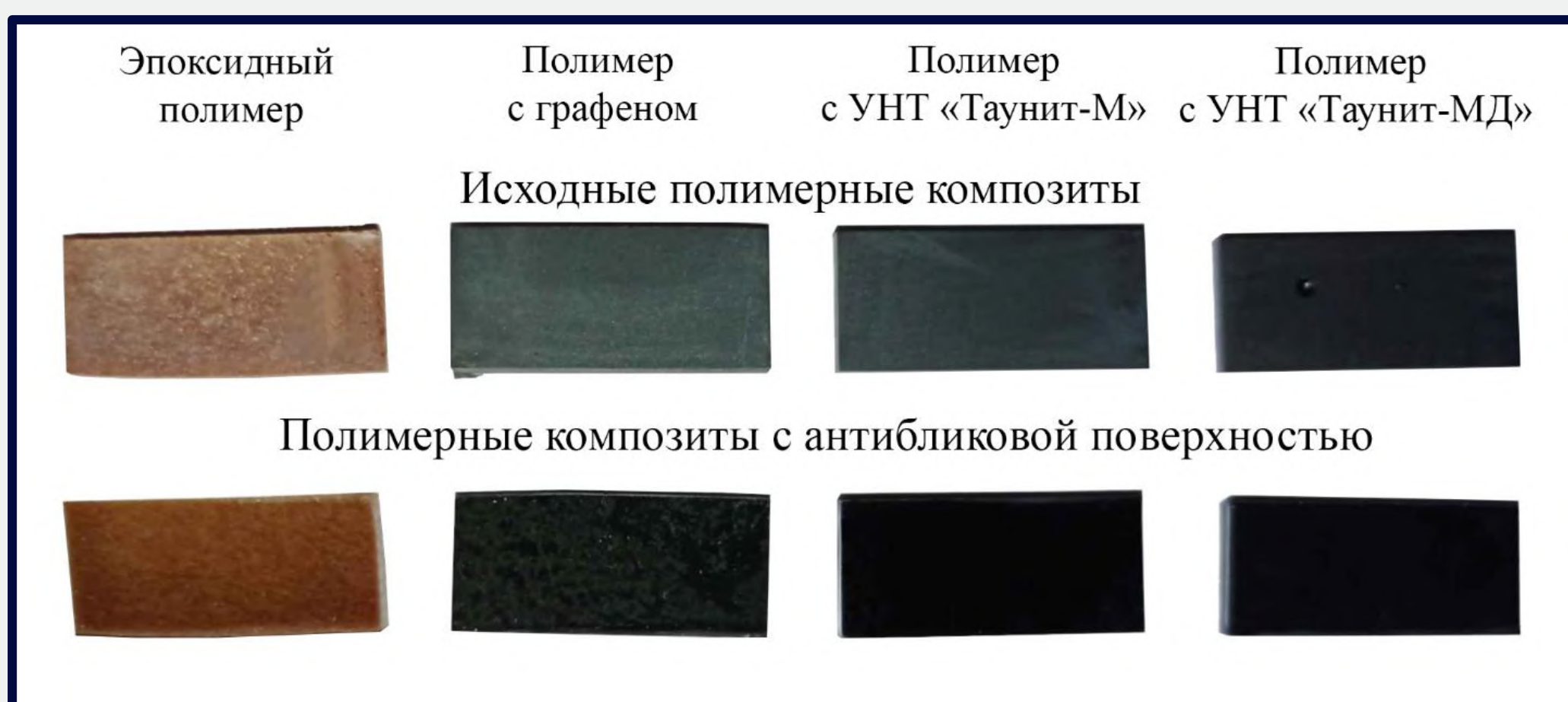
## ВВЕДЕНИЕ

Композитные материалы произвели революцию в космической отрасли благодаря своим многофункциональным, разнонаправленным и адаптируемым свойствам, которые могут выдерживать экстремальные условия космического пространства. Одним из новых типов функциональных материалов являются композиты, модифицированные углеродными наноструктурами. Добавление углеродного наполнителя в полимерную матрицу приводит к улучшению ее электропроводности, увеличению поглощательной способности в широком спектральном диапазоне. Поэтому не удивительно, что данные материалы нашли свое применение и в космосе. Полимерные композиты широко используются в конструкциях космических кораблей, элементах полезной нагрузки, силовых и тепловых подсистемах управления, элементах оптических систем.

Предыдущие исследования продемонстрировали перспективность применения композитных материалов, облученных атомарным кислородом (АК), в качестве антиотражающих в ближнем ИК-диапазоне покрытий [1]. Настоящий доклад является продолжением работы по созданию функциональных материалов для космических приложений и расширяет диапазон изучения оптических свойств композитов в среднем ИК диапазоне.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Исследуемые образцы:** композитные материалы на основе эпоксидной полимерной матрицы, модифицированные графеновыми нанопластинками и многостенными УНТ серии «Таунит» (ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов, Россия). Концентрация наполнителя - 1 мас. %.



Внешний вид образцов эпоксидной смолы с углеродными наполнителями до и после облучения в кислородной плазме ( $F = 30 \times 10^{20}$  ат/см<sup>2</sup>)

**Облучение АК** проведено с помощью магнитоплазменодинамического ускорителя с внешним магнитным полем в НИИЯФ МГУ [2]. Параметры потока на расстоянии 0,2 м от среза анода ускорителя в плоскости размещения образца материала: средняя энергия ионов 20–40 эВ; состав потока: нейтралы О и О<sub>2</sub>, ионы О и О<sub>2</sub>, плазменные электроны. Эквивалентный флуенс (F) атомарного кислорода в кислородной плазме изменялся в диапазоне  $(1,7-30) \times 10^{20}$  ат/см<sup>2</sup>.

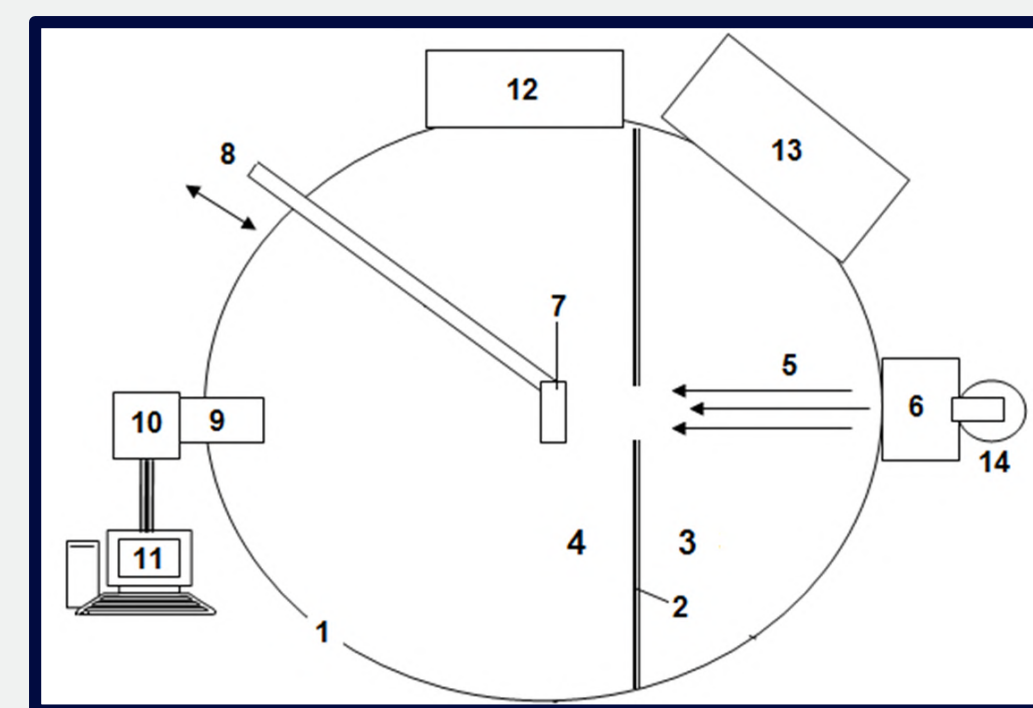
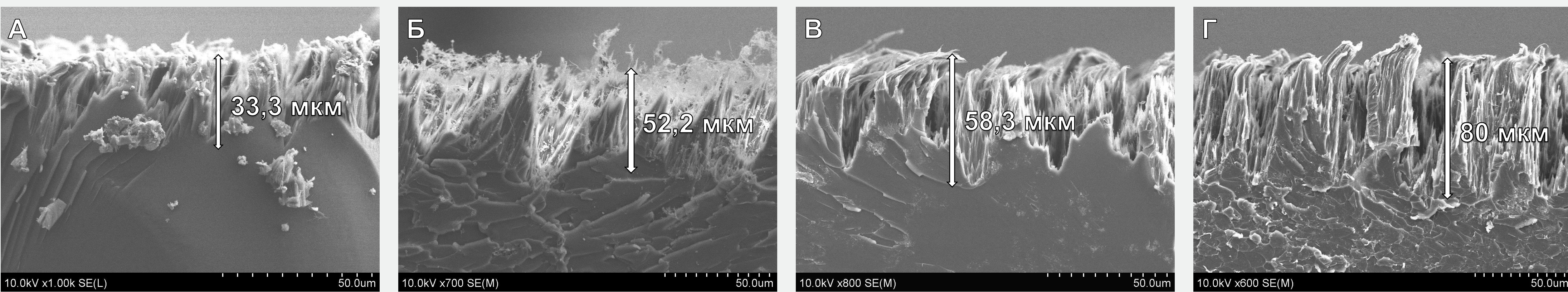


Схема плазменно-пучкового стенда НИИЯФ МГУ: 1-камера, 2-разделительная стенка, 3-ускорительная секция, 4- секция образцов, 5-поток плазмы атомарного кислорода, 6 -плазменный ускоритель, 7-держатель образцов, 8-манипулятор образцов, 9-масс-спектрометр, 10- цифровой электронный блок измерения, 11-ПК, 12,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

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

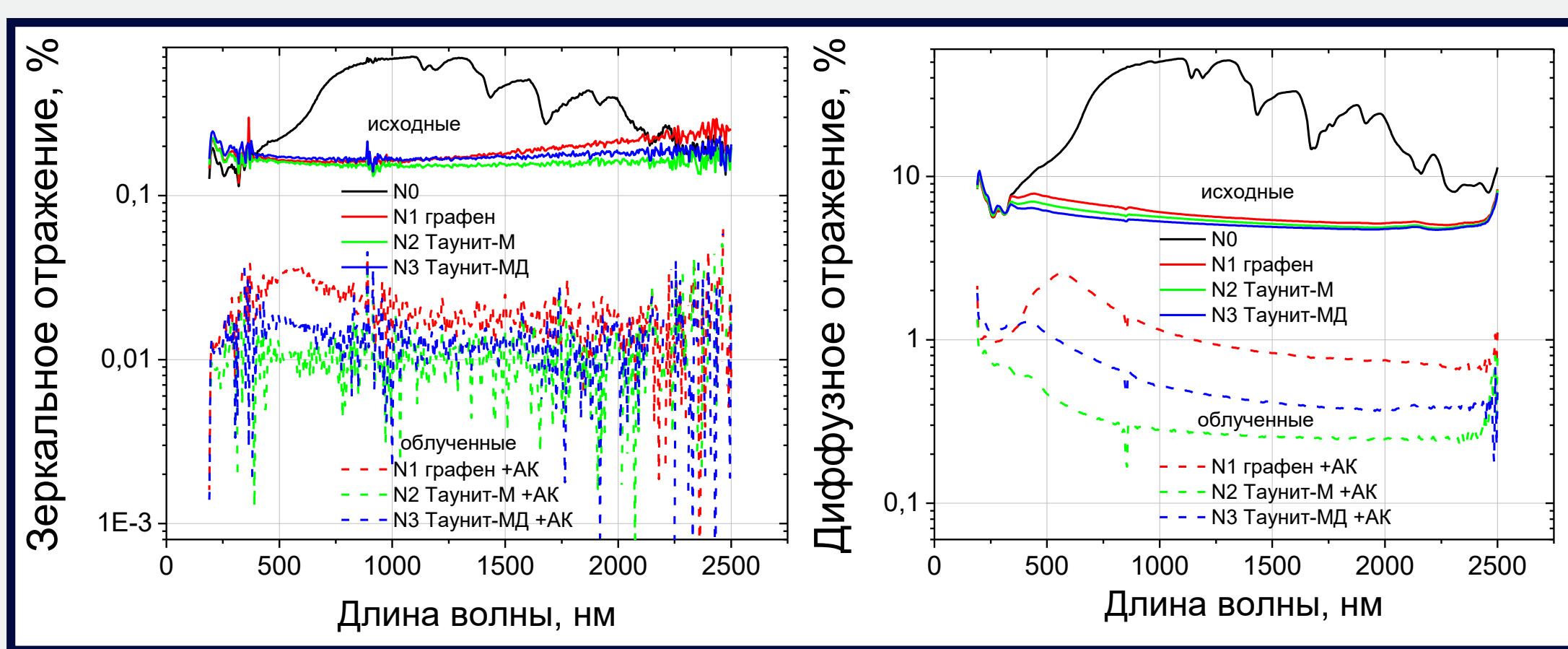
Плазменная обработка приводит к растравливанию верхнего слоя композитов и формированию развитого эрозионного микрорельефа, ориентированного навстречу потоку кислородной плазмы. Максимальная глубина эрозии составляет 80 мкм.



РЭМ изображения поперечного сечения образцов композитных материалов после обработки в кислородной плазме : эпоксидная смола (А), с наполнителем «Графеновые нанопластинки» (Б), с УНТ «Таунит-М» (В), с УНТ «Таунит-МД» (Г)

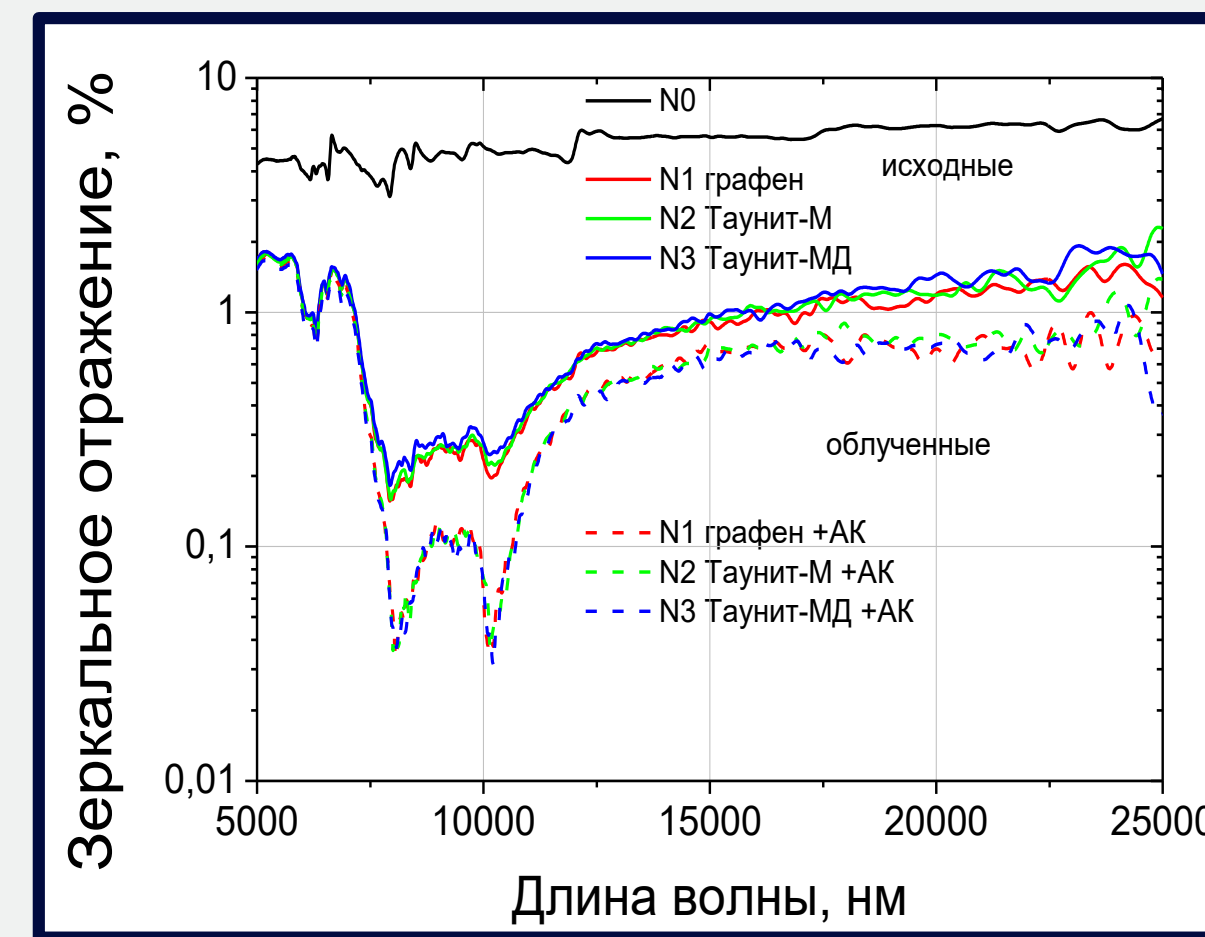
### УФ-, ВИДИМЫЙ, БЛИЖНИЙ ИК-ДИАПАЗОН

После облучения в кислородной плазме с флуенсом  $30 \times 10^{20}$  ат/см<sup>2</sup> в эпоксидных композитах с углеродными наполнителями наблюдается уменьшение коэффициентов отражения в УФ, видимом и ближнем ИК-диапазоне больше, чем на порядок. Максимальный эффект - для образца с наполнителем «Таунит-М»: коэффициент зеркального отражения уменьшается в 40 раз, а коэффициент диффузного отражения – в 77 раз по сравнению с необлученной эпоксидной смолой без наполнителя.



### СРЕДНИЙ ИК-ДИАПАЗОН

При переходе в средний ИК-диапазон коэффициент отражения возрастает и для исходных, и для облученных в кислородной плазме образцов, а эффект введения углеродных наполнителей на отражательную способность после воздействия атомарного кислорода менее выражен. Модификация полимерной матрицы углеродными наноматериалами и последующее облучение в кислородной плазме с флуенсом  $30 \times 10^{20}$  ат/см<sup>2</sup> приводит к снижению коэффициента зеркального отражения в среднем ИК-диапазоне примерно на порядок величины по сравнению с исходным полимером.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При воздействии на полимерные образцы, модифицированные наноразмерными углеродными добавками, плазменными потоками атомарного кислорода с низкой энергией и флуенсом  $30 \times 10^{20}$  ат/см<sup>2</sup> на поверхности композитов сформирован развитый пространственно-ориентированный микрорельеф с глубиной эрозии 30 – 80 мкм. Продemonстрировано, что формирование эрозионного рельефа приводит к заметному снижению отражательной способности композитов с углеродными наполнителями в спектральной области 0,2 – 2,5 мкм. Минимальные коэффициенты диффузного (<1%) и зеркального (<0,02%) отражения характерны для облученного полимера с наполнителем «Таунит-М». Последние показатели говорят о перспективности применения данных нанокompозитов в качестве антиотражающих поглощающих покрытий в оптических и оптоэлектронных системах как космических аппаратов, так и наземных устройств. В среднем ИК-диапазоне эффект введения углеродных добавок на снижение отражательной способности эпоксидных композиций после воздействия атомарного кислорода менее выражен. Наименьшие значения коэффициента зеркального отражения в среднем ИК-диапазоне составляют около 1%.

[1] Parkhomenko, I.N. Atomic oxygen exposure effect on carbon nanotubes/epoxy composites for space systems / I.N. Parkhomenko, L.A. Vlasukova, I.D. Parfimovich, F.F. Komarov, L.S. Novikov, V.N. Chernik, D.V. Zhigulin // Acta Astronautica. – 2023. – Vol. 204. – P. 124 – 131.  
[2] Газоразрядный источник плазмы дугоплазмотронного типа: пат. 1797448 (СССР) / В.Н. Черник. – Опубл. 09.07.1995.