

## ФИЗИКА

## PHYSICS

УДК 535.346.1

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-1-14-21>

Поступило в редакцию 10.11.2025

Received 10.11.2025

**М. Н. Жукова<sup>1</sup>, академик Ф. Ф. Комаров<sup>1</sup>, И. Д. Парфимович<sup>1</sup>, И. В. Чижов<sup>1</sup>,  
В. Н. Черник<sup>2</sup>, Л. С. Новиков<sup>2</sup>, Д. В. Жигулин<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко  
Белорусского государственного университета,  
ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобелевца  
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова,  
Ленинские горы, 1, стр. 2, 119991, Москва, Российская Федерация*

<sup>3</sup>*Открытое акционерное общество «Интеграл»,  
ул. Казинца, 121А, 220108, Минск, Республика Беларусь*

### АНТИОТРАЖАЮЩИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОМАТЕРИАЛАМИ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ КИСЛОРОДНОЙ ПЛАЗМОЙ

**Аннотация.** Для разработки материалов, устойчивых к условиям ближнего космоса, в настоящей работе исследуются эпоксидные композиты с наполнителями в виде графена и многостенных углеродных нанотрубок («Таунит-М» и «Таунит-МД»). Анализируются их структурные характеристики и оптическое поведение после воздействия атомарного кислорода. Воздействие атомарного кислорода на низких околоземных орбитах со средней энергией ~5 эВ приводит к эрозии поверхности композитов, что выражается в значительной потере массы. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что средний выход эрозии ( $R_m$ ) составляет  $1,07 \cdot 10^{-23}$  г/атом для композита с наполнителем из «Таунит-М»,  $1,21 \cdot 10^{-23}$  г/атом для «Таунит-МД» и  $8,56 \cdot 10^{-24}$  г/атом для наполнителя из графена. Этот эффект обусловлен тем, что углеродные наполнители подвергаются окислению и химическому распылению под действием кислородной плазмы, что характерно для материалов, используемых в условиях космического пространства. Воздействие атомарного кислорода с флюенсом  $(1,7-30,0) \cdot 10^{20}$  атом/см<sup>2</sup> приводит к значительному уменьшению коэффициентов отражения (как зеркального, так и диффузного) в широком диапазоне длин волн (0,2–25,0 мкм). Для чистой эпоксидной смолы зеркальное отражение снизилось в 1,4 раза, а для образцов с добавками графена, «Таунит-М» и «Таунит-МД» – в 9,9, 15,8 и 13,6 раз соответственно. Диффузное отражение уменьшилось в 1,2 раза у чистой смолы и в 5,3, 16,7 и 9,0 раз для соответствующих наполненных систем. Эти результаты свидетельствуют о формировании на поверхности модифицированных композитов слоя с высокими антиотражающими характеристиками. Такие модифицированные низкоэнергетической кислородной плазмой материалы являются эффективными для использования в составе оптических и оптоэлектронных систем космического назначения, а также в наземных приложениях, где важны материалы с высоким поглощением и пониженным отражением.

**Ключевые слова:** антиотражающие покрытия, эпоксидная смола, многостенные углеродные нанотрубки, графен, кислородная плазма

**Для цитирования.** Антиотражающие полимерные композиты с углеродными наноматериалами, модифицированные кислородной плазмой / М. Н. Жукова, Ф. Ф. Комаров, И. Д. Парфимович [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2026. – Т. 70, № 1. – С. 14–21. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-1-14-21>

**Mary N. Zhukava<sup>1</sup>, Academician Fadey F. Komarov<sup>1</sup>, Ivan D. Parphimovich<sup>1</sup>, Igor V. Chizhov<sup>1</sup>,  
Vladimir N. Chernik<sup>2</sup>, Lev S. Novikov<sup>2</sup>, Dmitry V. Zhyhulin<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of the Belarusian State University,  
7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus*

<sup>2</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of the Lomonosov Moscow State University,  
1/2, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Open Joint-Stock Company «Integral»,  
121A, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus*

## ANTIREFLECTIVE POLYMER COMPOSITES WITH CARBON NANOMATERIALS MODIFIED BY OXYGEN PLASMA

**Abstract.** This study investigates the properties of epoxy resin reinforced with carbon nanomaterials (graphene and multi-walled carbon nanotubes “Taunit M” and “Taunit MD”), focusing on their structural and optical characteristics, as well as the effects of atomic oxygen (AO) exposure, which is crucial for the application of such composites in low Earth orbit (LEO) conditions. Exposure to AO in LEO, with an average energy of  $\sim 5$  eV, leads to the surface erosion of composites, resulting in significant mass loss. Experimental results indicate that the average erosion yield ( $R_m$ ) is  $1.07 \cdot 10^{-23}$  g/atom for the composite with “Taunit M” filler,  $1.21 \cdot 10^{-23}$  g/atom for “Taunit MD”, and  $8.56 \cdot 10^{-24}$  g/atom for the graphene-filled composite. This effect occurs because carbon fillers undergo the oxidation and chemical sputtering under AO exposure, a typical behavior for materials used in space environments. After irradiation with an AO fluence of  $(1.7\text{--}30.0)10^{20}$  atom/cm<sup>2</sup>, a significant decrease in reflection coefficients (both specular and diffuse) is observed across a broad spectral range (0.2–25  $\mu\text{m}$ ). Specular reflection decreased by 1.4 times for pure epoxy resin, and by 9.9, 15.8, and 13.6 times for samples filled with graphene, “Taunit M”, and “Taunit MD”, respectively. Diffuse reflection from the pure epoxy decreased by 1.2 times, while for graphene-, “Taunit M”-, and “Taunit MD”-filled samples, it decreased by 5.3, 16.7, and 9.0 times, respectively. These findings indicate that modifying epoxy resin with carbon nanomaterials followed by AO irradiation leads to the formation of a surface layer with high anti-reflective properties. Such materials, treated with low-energy oxygen plasma, are highly effective for use in optical and optoelectronic systems of spacecraft, as well as in terrestrial applications requiring materials with high absorption and low reflection.

**Keywords:** epoxy resin, carbon nanotubes, graphene, oxygen plasma, anti-reflective coatings

**For citation.** Zhukava M. N., Komarov F. F., Parphimovich I. D., Chizhov I. V., Chernik V. N., Novikov L. S., Zhyhulin D. V. Antireflective polymer composites with carbon nanomaterials modified by oxygen plasma. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2026, vol. 70, no. 1, pp. 14–21 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-1-14-21>

**Введение.** В условиях активного развития космических полетов актуальным вопросом является подготовка летательных аппаратов к агрессивной среде околоземного космического пространства. В процессе эксплуатации космические аппараты подвергаются воздействию экстремальных факторов: высокого вакуума, микрогравитации, солнечного излучения, циклических перепадов температур, микрометеоритного потока, космического мусора и радиации [1–3]. На орбитальных высотах сохраняются остатки атмосферы, представленные в том числе атомарным кислородом (АК). Благодаря высокой химической активности и кинетической энергии ( $\sim 5$  эВ) атомарный кислород является причиной деградации полимерных и композитных материалов в условиях космоса. Учитывая тот факт, что скорость движения спутников на этих орбитах порядка 28000 км/ч, именно набегающий поток АК вызывает наиболее серьезные повреждения функциональных материалов, что приводит к изменению их характеристик [2]. Поэтому актуальным является решение задачи корректной и бесперебойной работы всех систем космического аппарата, защищенных от повреждающих внешних и внутренних факторов среды.

Ускоренные испытания, проведенные с учетом критериев, приближенных к условиям околоземного пространства, позволяют значительно сократить финансовые затраты и время при разработке экспериментальных образцов защитных покрытий. Изменения характеристик материалов в потоках кислородной плазмы оценивают на земле в имитационных лабораторных условиях. Согласно данным предыдущих исследований, углеродсодержащие полимерные материалы, в частности углепластики, обладают значительной устойчивостью к воздействию кислородной плазмы [4–6].

Одними из первых систем, где эпоксидная матрица была модифицирована углеродными нанотрубками (УНТ), стали композиты на основе эпоксидной смолы. Исследования показали, что введение углеродных наночастиц в эпоксидную матрицу приводит к повышению коррозионной стойкости, уменьшению коэффициента диффузии воды. Также при определенной концентрации наполнителей наблюдается улучшение механических характеристик покрытий (прочности и жесткости), снижение коэффициента трения и скорости изнашивания, а также повышение теплостойкости. Введение углеродных наполнителей в эпоксидную смолу способствует росту ее электропроводности и усилению поглощения излучения в широком спектральном диапазоне [7–10]. Благодаря этим свойствам модифицированные композиты находят применение в качестве покрытий для электронных схем, нагревательных элементов, проводящих слоев для рассеивания статического заряда, а также в качестве защитных покрытий от электромагнитного излучения.

Настоящее исследование посвящено разработке эпоксидных покрытий, содержащих углеродные наноматериалы двух типов, для применения в системах, эксплуатируемых в условиях

околоземного космического пространства (ОКП). В данной работе мы приводим результаты исследования нанокompозитов на основе эпоксидной смолы с коммерчески доступными наполнителями из многостенных УНТ (МУНТ) и графена.

Полученные типы композитного материала на основе эпоксидного полимера с добавлением двух типов УНТ и графена, обработанные кислородной плазмой, могут применяться как эффективные антибликовые покрытия для оптических и оптоэлектронных систем, обеспечивать защиту космической электроники от перегрева солнечной радиацией.

**Материалы и методы исследования.** В качестве матрицы использовалась эпоксидная смола ЭД-20, отверждаемая аминным отвердителем Этал-45 М в соотношении 2 : 1. В качестве наполнителей применялись графеновые нанопластины и многостенные УНТ («Таунит-М», «Таунит-МД», ООО «НаноТехЦентр», Российская Федерация) в концентрации 1 мас. %. Диаметр УНТ составлял 10–20 нм, длина – 2 мкм для «Таунит-М» и 20 мкм для «Таунит-МД».

Композиты изготавливались двухэтапным методом. Сначала проводилось ультразвуковое диспергирование наполнителя в растворе неионогенного ПАВ и ацетона (24 кГц, 80 Вт). После выпаривания растворителя при 40 °С полученная паста вводилась в эпоксидную матрицу, дополнительно диспергировалась ультразвуком и механически перемешивалась до однородного состояния. Полученные образцы размером 20 × 10 × 2 мм отверждались в сушильном шкафу в течение суток.

Воздействие кислородной плазмы осуществлялось в НИИЯФ МГУ с использованием магнитоплазмодинамического ускорителя (рис. 1). Энергия ионов составляла 20–40 эВ, эффективный флюенс –  $(1,7\text{--}30)10^{20}$  атом/см<sup>2</sup>. Перед облучением образцы дегазировались в вакууме  $10^{-4}$  Па при 20 °С в течение 24 ч.

Потери масс измерялись аналитическими микровесами HR-202i (точность ±10 мкг). Морфология поверхности исследовалась методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии (СЭМ – Hitachi S-4800, ПЭМ – Hitachi H-800). Оптические свойства оценивались по спектрам отражения в диапазоне 0,2–25,0 мкм: зеркальное и диффузное отражения измерялись на спектрофотометре Lambda-1050; зеркальное в ИК-диапазоне – на фурье-спектрометре Spectrum 3 Optica.

Для расчета коэффициентов поглощения и излучения использовались законы Кирхгофа и Планка. Равновесная температура покрытия при солнечном облучении определялась из баланса поглощенной и излученной энергии, без учета внутреннего тепловыделения [11].

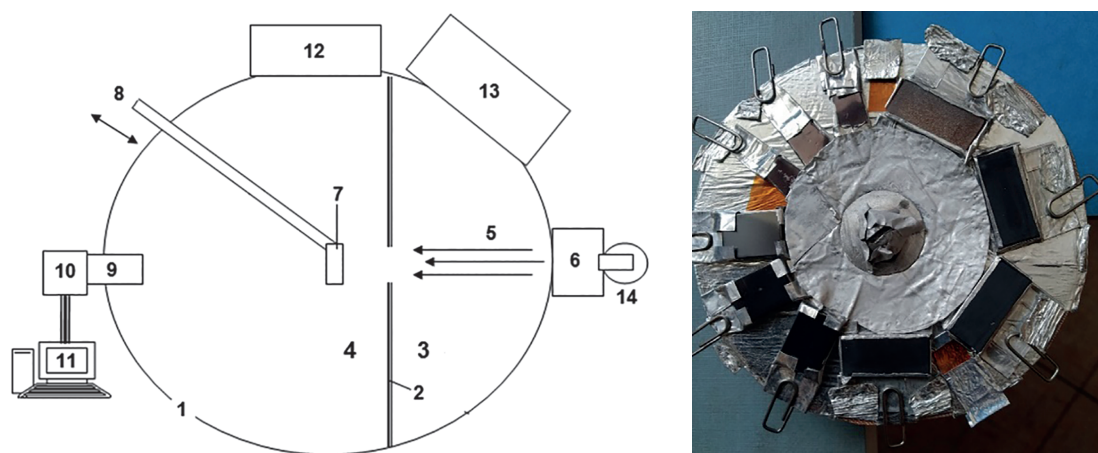


Рис. 1. Схема стенда НИИЯФ МГУ: 1 – вакуумная камера; 2 – разделительная стенка; 3 – блок плазменного источника; 4 – измерительный блок; 5 – поток атомарного кислорода; 6 – ускоритель; 7 – держатель образцов; 8 – держатель-контроллер образцов; 9 – масс-спектрометр; 10 – электронный модуль измерения; 11 – компьютер; 12, 13, 14 – крионасосы

Fig. 1. Diagram of the MSU NIIYAF test bench: 1 – vacuum chamber; 2 – partition wall; 3 – plasma source unit; 4 – measurement unit; 5 – atomic oxygen flow; 6 – accelerator; 7 – sample holder; 8 – sample holder-controller; 9 – mass spectrometer; 10 – electronic measurement module; 11 – computer; 12, 13, 14 – cryopumps

**Результаты и их обсуждение.** Введение углеродных наноматериалов существенно изменяет микроструктуру эпоксидной матрицы. Анализ СЭМ-изображений (не приводится) показал, что наполнители устраняют пористость и повышают однородность поверхности. После обработки кислородной плазмой образцы приобретают равномерный матовый вид и развитый микро-рельеф (рис. 2).

Глубина эрозии увеличивается с введением УНМ: для чистой смолы – 33 мкм, для композита с графеном – 52 мкм, с «Таунит-М» – 58 мкм, с «Таунит-МД» – 80 мкм. Разрушение УНТ сопровождается их «распушиванием», вызванным окислением и структурным расслоением трубок.

Зависимость потери массы от флюенса АК носит нелинейный характер (рис. 3).

При увеличении флюенса наблюдается рост потерь с последующим насыщением. При флюенсе  $3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$  удельная потеря массы составила:  $24,5 \text{ мг/см}^2$  – для чистой смолы,  $25,7 \text{ мг/см}^2$  – для композита с графеном,  $32,0 \text{ мг/см}^2$  – с «Таунит-М» и  $36,4 \text{ мг/см}^2$  – с «Таунит-МД» (табл. 1). Расчетный эрозионный выход  $Rm$  равен  $(8,2\text{--}12,1)10^{-24} \text{ г/атом}$ , что согласуется с данными для аналогичных эпоксидных композитов [12–14]. Наибольшие потери массы наблюдаются для образца с «Таунит-МД», что связано с большей длиной УНТ и более текстурированной поверхностью композита, что способствует более активному взаимодействию с АК.

Оптические исследования показали, что обработка кислородной плазмой приводит к значительному снижению коэффициентов отражения (рис. 4). Для необлученных образцов зафиксировано превышение диффузного отражения над зеркальным в среднем на 25 % у эпоксидной матрицы и приблизительно на 5 % у систем с УНТ. Добавление углеродных наноконцент сни-

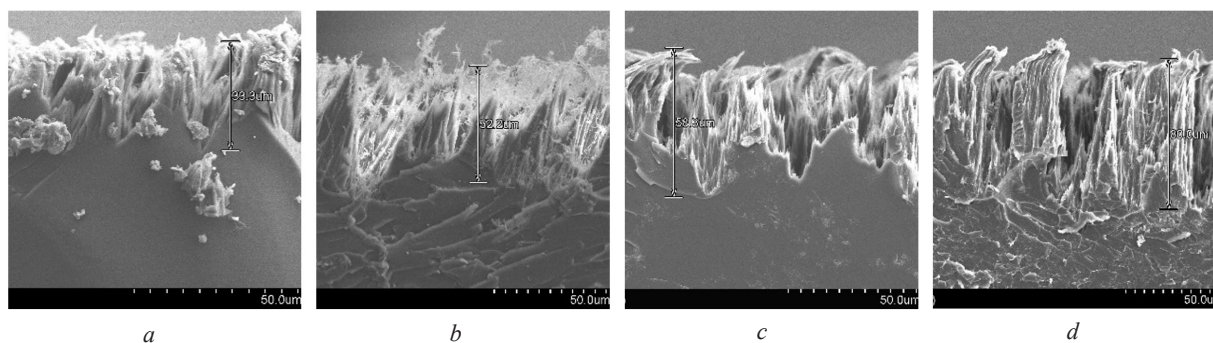
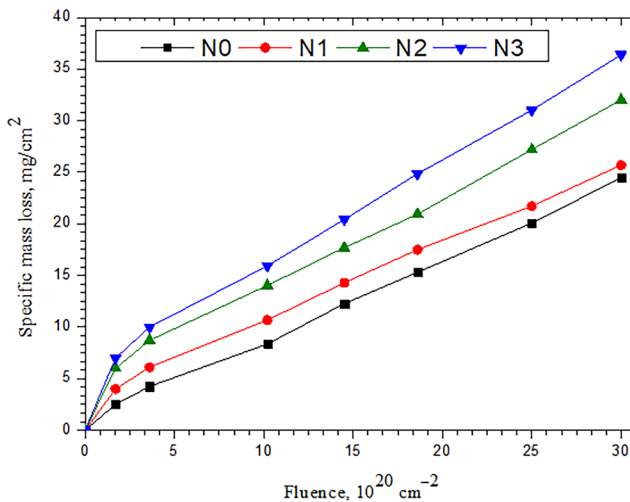


Рис. 2. СЭМ-изображения: *a* – эпоксидная смола без наполнителя; *b* – эпоксидный композит с 1 мас. % графена; *c* – эпоксидный композит с 1 мас. % УНТ серии «Таунит М»; *d* – эпоксидный композит с 1 мас. % УНТ серии «Таунит МД»

Fig. 2. SEM images: *a* – epoxy resin sample without filler; *b* – epoxy composite with 1 wt. % graphene; *c* – epoxy composite with 1 wt. % CNTs of the “Taunit M” series; *d* – epoxy composite with 1 wt. % CNTs of the “Taunit MD” series

Рис. 3. Потери масс полимерных композитов с 1 мас. % углеродными наполнителями при обработке АК: N0 – чистая эпоксидная смола, N1 – графен, N2 – «Таунит М», N3 – «Таунит МД»

Fig. 3. Mass loss of polymer composites with 1 wt. % carbon fillers under AO treatment: N0 – pure epoxy resin, N1 – graphene, N2 – “Taunit M”, N3 – “Taunit MD”



Т а б л и ц а 1. Исходные массы композитных образцов до и после облучения потоком АК

T a b l e 1. Initial masses of composite samples and masses before and after AO flux exposure

Образец Sample	M0 – первоначальная масса, мг M0 – initial mass, mg	M1 – масса спустя 11 дней хранения на воздухе, мг M1 – mass after 11 days of storage in air, mg	M2 – масса после облучения, мг M2 – mass after irradiation, mg	$\Delta m$ – удельная потеря массы для флюенса $30 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ , мг/см <sup>2</sup> $\Delta m$ – specific mass loss for a fluence of $30 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ , mg/cm <sup>2</sup>
N0 эпоксидная смола	397,38	397,38	348,73	24,47
N1 графен	524,39	524,10	472,06	25,69
N2 Таунит М	531,24	530,94	467,40	32,00
N3 Таунит МД	538,74	538,31	466,01	36,38

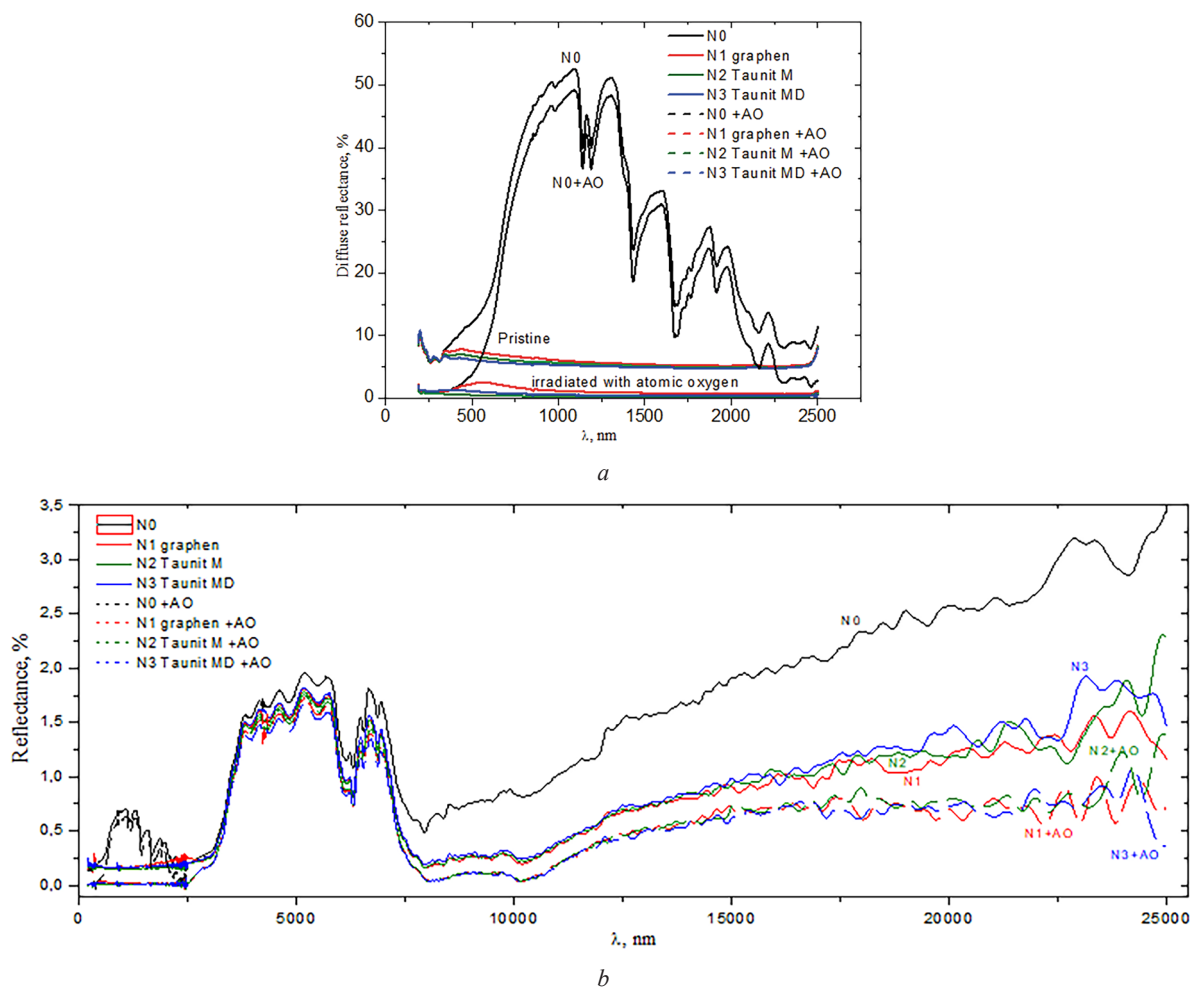


Рис. 4. Спектры диффузного отражения (а) в диапазоне 0,2–2,5 мкм и зеркального отражения (б) в диапазоне 0,2–25,0 мкм

Fig. 4. Diffuse reflection spectra (a) in the range 0.2–2.5  $\mu\text{m}$  and specular reflection spectra (b) in the range 0.2–25.0  $\mu\text{m}$ 

жает диффузное отражение эпоксидной смолы на 19,82 % (графен), 20,18 % («Таунит М») и на 20,42 % («Таунит МД»), и зеркальное отражение на 0,21 % (графен), 0,24 % («Таунит М») и на 0,22 % («Таунит МД»). Проведенный анализ данных показывает, что модификация эпоксидной матрицы углеродными наполнителями вызывает уменьшение коэффициента зеркального отражения в 2,1–2,5 раза и коэффициента диффузного отражения в 4,3–4,8 раза. Воздействие кислородной плазмы с флюенсом  $30 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$  снижает зеркальное отражение исходного образца чистой эпоксидной смолы в 1,4 раза, а для композитов с наполнителями графен, «Таунит М», «Таунит МД» – в 9,9, 15,8 и 13,6 раз соответственно. Комбинированный метод, включающий введение углеродных наполнителей в полимерную матрицу и последующее плазменное облучение с флюенсом  $30 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ , демонстрирует эффективность, снижая коэффициенты отражения

композитных материалов более чем на порядок величины. Образец с наполнителем «Таунит М» демонстрирует рекордное подавление отражательной способности относительно чистого полимерного необлученного материала. Для этого образца наблюдается снижение коэффициента зеркального отражения в 40 раз и коэффициента диффузного отражения в 77 раз.

Таким образом, во всей изученной спектральной области наблюдается снижение коэффициента зеркального отражения, при этом форма спектральных кривых сохраняется. В ИК-области исходные образцы имеют коэффициент отражения в целом выше, чем после обработки. В результате обработки кислородной плазмой коэффициент отражения всех исследуемых образцов снижается в среднем на 5–7 %.

После обработки образцов кислородной плазмой пики и провалы, характерные для O–H, C=O и C–O связей, становятся более выраженными. Это указывает на увеличение содержания кислородсодержащих функциональных групп на поверхности материала. Следует отметить, что в диапазоне 3–7 мкм коэффициент зеркального отражения для всех образцов резко возрастает, что обусловлено в основном оптическими свойствами самой полимерной матрицы эпоксидной смолы [15].

Расчет коэффициентов солнечного поглощения  $\alpha_s$  и излучения  $\epsilon_0$  (табл. 2) показал, что для всех образцов отношение  $\alpha_s / \epsilon_0 \approx 1,0$ , равновесная температура составляет 5–6 °С, а эффективность фототермического преобразования  $\eta \approx 0,9$ . Эти значения указывают на высокую термостабильность покрытий в условиях ОКП. Модифицированные композиты будут сохранять целостность и не проявлять признаков термодеструкции при температурных колебаниях в диапазоне от –75 до +200 °С, характерном околоземному космическому пространству (200–1000 км от Земли).

Т а б л и ц а 2. Коэффициент солнечного поглощения  $\alpha_s$ , коэффициент излучения  $\epsilon_0$ , отношение  $\alpha_s / \epsilon_0$ , равновесная температура  $T_p$  и эффективность фототермического преобразования  $\eta$

Table 2. Solar absorption coefficient  $\alpha_s$ , emission coefficient  $\epsilon_0$ , ratio  $\alpha_s / \epsilon_0$ , equilibrium temperature  $T_p$ , and photothermal conversion efficiency  $\eta$

Образец Sample	$\alpha_s$	$\epsilon_0$	$\alpha_s / \epsilon_0$	$T_p, ^\circ\text{C}$ $T_e, ^\circ\text{C}$	$\eta$
N0 эпоксид плазма	0,9968	0,9808	1,0163	6,3	0,904
N1 графен плазма	0,9995	0,9943	1,0053	5,5	0,907
N1 графен	0,9982	0,9915	1,0068	5,6	0,906
N2 Таунит М плазма	0,9997	0,993	1,0068	5,6	0,907
N2 Таунит М	0,9979	0,9893	1,0087	5,7	0,905
N3 Таунит МД плазма	0,9997	0,9951	1,0046	5,4	0,907
N3 Таунит МД	0,9983	0,9904	1,008	5,7	0,906

Таким образом, совместное воздействие углеродного наполнения и плазменной обработки обеспечивает значительное снижение коэффициентов отражения и повышение оптической активности материала. Композиты на основе эпоксидной смолы с УНТ и графеном формируют устойчивые антибликовые поверхности с низкими потерями отраженного излучения и высокой тепловой стабильностью.

**Заключение.** Снижение коэффициентов отражения и увеличение поглощения связано в первую очередь с изменением морфологии поверхности под действием АК, определенный вклад в него вносит и состав композита. Окисление углеродных наполнителей и образование летучих компонент приводит к образованию шероховатостей и дефектов, которые способствуют эффективному рассеиванию и поглощению света. Углеродные нанотрубки и графен, благодаря своей высокой удельной поверхности и проводящим свойствам, усиливают поглощение электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне.

Результаты работы демонстрируют, что комбинированное воздействие – введение углеродных наполнителей в эпоксидную смолу и последующая обработка кислородной плазмой – существенно улучшает оптические функциональные характеристики материала. Плазменная обработка с флюенсом  $30 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$  приводит к уменьшению коэффициентов отражения как минимум на порядок величины, что было проиллюстрировано экспериментально. Для облученных композитов, модифицированных графеном и УНТ, характерны низкие значения отражения: коэффициент диффузного не превышает 2 % и 1 %, а коэффициент зеркального составляет менее 0,04 %

и 0,02 % соответственно. Исследованные материалы проявляют себя как высокоэффективные широкодиапазонные антибликовые покрытия, что открывает перспективы их использования в оптических и оптоэлектронных системах различного назначения как в космических аппаратах ОКП, так и в наземных условиях.

Полученные материалы, по результатам исследования, показали также, что в будущем могут эксплуатироваться в качестве защиты от воздействия различных факторов космического пространства на космические аппараты. Результаты приведенных расчетов и экспериментальных данных показывают, что термодеструкция исследованных материалов не будет проявляться в условиях околоземного космического пространства. Такие покрытия перспективны и для использования в качестве колориметров и фототермальных преобразователей солнечной энергии. Таким образом, полученные результаты исследований демонстрируют значительный потенциал композитов на основе эпоксидной смолы с углеродными наноматериалами для применения в условиях сложных внешних воздействий.

Дальнейшие исследования целесообразно расширить на оптимизацию концентрации наполнителей, изучение долговременной стабильности свойств в условиях термоциклирования в ОКП и применение более сложных по составу наполнителей.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы научных исследований «Цифровые и космические технологии, безопасность общества и государства» (задание 5.1.4.3.4, № ГР 20212657).

**Acknowledgements.** This work was supported by the state research program “Digital and Space Technologies, Security of Society and State” (task 5.1.4.3.4, no. SR 20212657).

#### Список использованных источников

1. Banks, B. A. Low Earth orbital atomic oxygen interactions with spacecraft materials / B. A. Banks, K. K. de Groh, S. K. Miller // *MRS Online Proceedings Library*. – 2004. – Vol. 851. – P. 426–437. <https://doi.org/10.1557/proc-851-nn8.1>
2. Study on atomic oxygen exposure and hard particle impact of polyimide nanocomposites / L. S. Novikov, E. N. Voronina, V. N. Chernik [et al.] // *International Journal of Nanoscience*. – 2020. – Vol. 19, N 2. – Art. 1950007. <https://doi.org/10.1142/S0219581X19500078>
3. Chernik, V. N. Atomic oxygen simulation by plasmadynamic accelerator with charge exchange / V. N. Chernik // *Proceedings of 7th International Symposium Materials in Space Environment*. – Toulouse, 1997. – SP-399. – P. 237–241.
4. Standard Practices for Ground Laboratory Atomic Oxygen Interaction Evaluation of Materials for Space Applications: ASTM E2089-00. ASTM, 2006. – 5 p. <https://doi.org/10.1520/e2089-00>
5. Applications of highly non-equilibrium low-pressure oxygen plasma for treatment of polymers and polymer composites on an industrial scale / A. Vesel, G. Primc, R. Zaplotnik, M. Mozetič // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. – 2020. – Vol. 62, N 2. – Art. 024008. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab5b50>
6. Rheological, EMI and corrosion properties of epoxy coating with nanoparticle and conductive carbon black / A. A. P. O. Amorim, M. G. Oliveira, M. C. Mancini, A. S. Siqueira // *SN Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 3. – Art. 236. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04247-7>
7. Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – a comparative study / F. H. Gojny, M. H. G. Wichmann, B. Fiedler, K. Schulte // *Composites Sciences and Technology*. – 2005. – Vol. 65, N 15–16. – P. 2300–2313. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.04.021>
8. Epoxy-based shape memory composite for space applications / D. Margoy, I. Gouzman, E. Grossman [et al.] // *Acta Astronautica*. – 2021. – Vol. 178. – P. 908–919. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.08.026>
9. Spray coating process of MWCNT/epoxy nanocomposite films for aerospace applications: effects of process parameters on surface electrical properties / S. Laurenzi, M. Clausi, F. Zaccardi [et al.] // *Acta Astronautica*. – 2019. – Vol. 159. – P. 429–439. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.01.043>
10. Atomic oxygen exposure behaviors of CVD-grown carbon nanotube film and its polymer composite film / L. Jiao, Y. Gu, S. Wang [et al.] // *Composites. Part A: Applied Sciences and Manufacturing*. – 2015. – Vol. 71. – P. 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.01.008>
11. Влияние режимов нанесения наноструктурированных нитридных и карбонитридных покрытий на их структуру, оптические и электрофизические свойства / С. В. Константинов, Ф. Ф. Комаров, И. В. Чижов [и др.] // *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. – 2024. – №. 2. – С. 69–83.
12. Longitudinal unzipping of carbon nanotubes to form graphene nanoribbons / D. V. Kosynkin, A. L. Higginbotham, A. Sinitskii [et al.] // *Nature*. – 2009. – Vol. 458. – P. 872–876. <https://doi.org/10.1038/nature07872>
13. Tennyson, R. C. Protection of polymeric materials from atomic oxygen / R. C. Tennyson // *High Performance Polymers*. – 1999. – Vol. 11, N 1. – P. 157–165. <https://doi.org/10.1088/0954-0083/11/1/013>
14. An experimental study on improving the atomic oxygen resistance of epoxy resin/silica nanocomposites / X. Wang, X. Zhao, M. Wang, Z. Shen // *Polymer Engineering and Science*. – 2007. – Vol. 47, N 7. – P. 1156–1162. <https://doi.org/10.1002/pen.20659>
15. Ferrari, A. C. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon / A. C. Ferrari, J. Robertson // *Physical Review B*. – 2000. – Vol. 61, N 20. – Art. 14095. <https://doi.org/10.1103/physrevb.61.14095>

## References

1. Banks B. A., de Groh K. K., Miller S. K. Low Earth orbital atomic oxygen interactions with spacecraft materials. *MRS Online Proceedings Library*, 2004, vol. 851, pp. 426–437. <https://doi.org/10.1557/proc-851-nn8.1>
2. Novikov L. S., Voronina E. N., Chernik V. N., Chirskaya N. P., Zhang W. Study on atomic oxygen exposure and hard particle impact of polyimide nanocomposites. *International Journal of Nanoscience*, 2020, vol. 19, no. 2, art. 1950007. <https://doi.org/10.1142/S0219581X19500078>
3. Chernik V. N. Atomic oxygen simulation by plasmadynamic accelerator with charge exchange. *Proceedings of 7th International Symposium Materials in Space Environment*. Toulouse, 1997, SP-399, pp. 237–241.
4. ASTM E2089-00. *Standard Practices for Ground Laboratory Atomic Oxygen Interaction Evaluation of Materials for Space Applications*, ASTM, 2006. 5 p. <https://doi.org/10.1520/e2089-00>
5. Vesel A., Primc G., Zaplotnik R., Mozetič M. Applications of highly non-equilibrium low-pressure oxygen plasma for treatment of polymers and polymer composites on an industrial scale. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2020, vol. 62, no. 2, art. 024008. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab5b50>
6. Amorim A. A. P. O., Oliveira M. G., Mancini M. C., Sirqueira A. S. Rheological, EMI and corrosion properties of epoxy coating with nanoparticle and conductive carbon black. *SN Applied Sciences*, 2021, vol. 3, art. 236. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04247-7>
7. Gojny F., Wichmann M., Fiedler B., Schulte K. Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – a comparative study. *Composites Science and Technology*, 2005, vol. 65, no. 15–16, pp. 2300–2313. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.04.021>
8. Margoy D., Gouzman I., Grossman E., Bolker A., Eliaz N., Verker R. Epoxy-based shape memory composite for space applications. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 178, pp. 908–919. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.08.026>
9. Laurenzi S., Clausi M., Zaccardi F., Curt U., Santonicola M. G. Spray coating process of MWCNT/epoxy nanocomposite films for aerospace applications: effects of process parameters on surface electrical properties. *Acta Astronautica*, 2019, vol. 159, pp. 429–439. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.01.043>
10. Jiao L., Gu Y., Wang S., Yang Z., Wang H., Li Q., Li M., Zhang Z. Atomic oxygen exposure behaviors of CVD-grown carbon nanotube film and its polymer composite film. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, vol. 71, pp. 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.01.008>
11. Konstantinov S. V., Komarov F. F., Chizhov I. V., Zaikov V. A., Zhyhulin D. V. The effect of deposition regimes of nanostructured nitride and carbonitride coatings on their structure, optical and electrophysical properties. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika = Journal of the Belarusian State University. Physics*, 2024, no. 2, pp. 69–83 (in Russian).
12. Kosynkin D. V., Higginbotham A. L., Sinitkii A., Lomeda J. R., Dimiev A., Price B. K., Tour J. M. Longitudinal unzipping of carbon nanotubes to form graphene nanoribbons. *Nature*, 2009, vol. 458, pp. 872–876. <https://doi.org/10.1038/nature07872>
13. Tennyson R. C. Protection of polymeric materials from atomic oxygen. *High Performance Polymers*, 1999, vol. 11, no. 1, pp. 157–165. <https://doi.org/10.1088/0954-0083/11/1/013>
14. Wang X., Zhao X., Wang M., Shen Z. An experimental study on improving the atomic oxygen resistance of epoxy resin/silica nanocomposites. *Polymer Engineering and Science*, 2007, vol. 47, no. 7, pp. 1156–1162. <https://doi.org/10.1002/pen.20659>
15. Ferrari A. C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical Review B*, 2000, vol. 61, no. 20, art. 14095. <https://doi.org/10.1103/physrevb.61.14095>

## Информация об авторах

Жукова Мария Николаевна – мл. науч. сотрудник. E-mail: Maryliss.lab@gmail.com. ORCID: 0009-0002-6039-3160.

Комаров Фадей Фадеевич – академик, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией. E-mail: komarovf@bsu.by. ORCID: 0000-0001-8292-8942.

Парфимович Иван Дмитриевич – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник. E-mail: idparfimovich@gmail.com. ORCID: 0000-0002-5922-6333.

Чижов Игорь Викторович – аспирант. E-mail: igorchizhovwork@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4455-2128.

Черник Владимир Николаевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотрудник. E-mail: chernik@sinp.msu.ru.

Новиков Лев Симонович – д-р физ.-мат. наук, профессор, ст. науч. сотрудник. E-mail: novikov@nsrd.sinp.msu.ru.

Жигулин Дмитрий Владимирович – начальник сектора. E-mail: zhygulin@mail.ru.

## Information about the authors

Zhukava Mary N. – Junior Researcher. E-mail: Maryliss.lab@gmail.com. ORCID: 0009-0002-6039-3160.

Komarov Fadey F. – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Laboratory. E-mail: komarovf@bsu.by. ORCID: 0000-0001-8292-8942.

Parfimovich Ivan D. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Researcher. E-mail: idparfimovich@gmail.com. ORCID: 0000-0002-5922-6333.

Chizhov Igor V. – Postgraduate Student. E-mail: igorchizhovwork@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4455-2128.

Chernik Vladimir N. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Senior Researcher. E-mail: chernik@sinp.msu.ru.

Novikov Lev S. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Senior Researcher. E-mail: novikov@nsrd.sinp.msu.ru.

Zhygulin Dmitry V. – Head of the Sector. E-mail: zhygulin@mail.ru.