

УДК 537.9; 629.7.023.2; 535.362
EDN: KXSADV

PACS: 78.67.Sc

**Деградация оптических свойств микропорошка ZnO,
модифицированного наночастицами SiO₂ при последовательном
облучении электронами, протонами и квантами солнечного спектра**

© М. М. Михайлов, В. В. Каранский*

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
г. Томск, 634050 Россия*** E-mail: karanskiy2015@mail.ru**Статья поступила в редакцию 17.06.2026; после доработки 30.06.2026; принята к публикации 06.08.2026
Шифр научной специальности: 1.3.5.*

Исследована деградация интегрального коэффициента солнечного излучения Δa_s микропорошка $m\text{ZnO}$, модифицированного наночастицами $n\text{SiO}_2$ ($m\text{ZnO}/n\text{SiO}_2$), при последовательном облучении электронами (e^-) с энергией 30 кэВ, протонами (p^+) с энергией 5 кэВ и квантами солнечного спектра (КСС). Проведены расчеты коэффициента аддитивности (K_{add}) для количественной оценки взаимного влияния различных видов излучений. Установлено, что в зависимости от видов излучений и последовательно-сти облучения K_{add} может быть меньше, равен и больше единицы.

Ключевые слова: оксид цинка, диоксид кремния, модифицирование, облучение, электроны, протоны, кванты солнечного спектра, коэффициент аддитивности.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-4-88-92

Введение

Терморегулирующие покрытия (ТРП) на основе пигментов оксида цинка являются одним из распространенных классов материалов систем терморегулирования КА. Их широкое применение обусловлено сочетанием малого значения интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения ($a_s = 0,15\text{--}0,25$) и высокой степени черноты $\varepsilon > 0,85$, обеспечивающим эффективный радиационный теплообмен с окружающей средой [1, 2]. Стабильность этих характеристик на протяжении всего срока активного существования КА является ключевым требованием при проектировании систем терморегулирования [3].

В условиях реального космического полета ТРП подвергаются комплексному воздействию факторов космического пространства. На геостационарной орбите основными дестабилизирующими агентами являются по-

токи электронов и протонов внешнего радиационного пояса Земли с энергией от единиц до сотен кэВ, а также ультрафиолетовое излучение Солнца [4, 5]. На низкой околоземной орбите к перечисленным факторам добавляется воздействие атомарного кислорода. Все эти факторы приводят к росту a_s , что вызывает нагрев поверхности КА и нарушение теплового баланса. Прогнозирование такой деградации – обязательный этап проектирования КА [3].

Модифицирование микропорошка $m\text{ZnO}$ наночастицами $n\text{SiO}_2$ является эффективным способом повышения радиационной стойкости ТРП [6, 7]. Установлено, что осаждение $n\text{SiO}_2$ на поверхность частиц $m\text{ZnO}$ снижает плотность собственных дефектов оксида цинка, являющихся центрами радиационно-индуцированного поглощения, и формируется защитный слой, частично экранирующий корпускулярное излучение [8]. В результате ТРП на основе $m\text{ZnO}/n\text{SiO}_2$ имеет значительно

меньший прирост a_s при электронном и протонном облучении по сравнению с немодифицированным порошком оксида цинка [9, 10].

Однако, при наземном моделировании условий полета традиционно применяется раздельное воздействие факторов, а результирующая деградация оценивается как сумма раздельных вкладов. Такой подход не учитывает возможного взаимного влияния факторов друг на друга. Для количественной оценки отклонения суммарного эффекта от простой аддитивности используется коэффициент аддитивности ($K_{\text{адд}}$).

Целью настоящей работы является исследование $K_{\text{адд}}$ для модифицированных порошков $m\text{ZnO}/n\text{SiO}_2$ при последовательном воздействии электронов, протонов и КСС и установление физических механизмов наблюдаемых эффектов.

Объект исследования и методика эксперимента

Объектом исследования был микропорошок оксида цинка. В качестве модифицирующей добавки использован нанопорошок диоксида кремния. Микропорошок $m\text{ZnO}$ смешивали в соотношении 100:3 с наночастицами $n\text{SiO}_2$.

Для модифицирования $n\text{SiO}_2$ растворяли в дистиллированной воде при наложении ультразвуковых волн, затем добавляли $m\text{ZnO}$ и перемешивали в магнитной мешалке. Смесь сушили, перетирали и прогревали в атмосфере при оптимальной температуре [11].

Интегральный коэффициент поглощения (a_s) рассчитывали по спектрам диффузного отражения согласно уравнению (1) [12–14]:

$$a_s = 1 - R_s = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{\lambda} \cdot I_{\lambda} \cdot d_{\lambda}}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda} \cdot d_{\lambda}}, \quad (1)$$

где R_s – интегральный коэффициент отражения солнечного излучения, I_{λ} – спектр излучения Солнца, $(\lambda_1 - \lambda_2)$ – диапазон длин волн солнечного спектра, используемый для интегрирования, равный 0,2–2,5 мкм.

Изменение коэффициента поглощения a_s рассчитывали по его значениям до и после облучения. Для каждого режима облучения рассчитывали $K_{\text{адд}}$ по уравнению (2) [15, 16]:

$$K_{\text{адд}} = \frac{\sum(\Delta a_{s1} + \Delta a_{s2})}{\Delta a_{s(\text{совм})}}, \quad (2)$$

где $\sum(\Delta a_{s1} + \Delta a_{s2})$ – сумма изменений при раздельном облучении; $\Delta a_{s(\text{совм})}$ – изменение значения при одновременном облучении.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Представленные в таблице 1 экспериментальные значения $K_{\text{адд}}$ для порошка $m\text{ZnO}/n\text{SiO}_2$ при последовательном облучении протонами и КСС: $p^+ \rightarrow \text{КСС}$.

Таблица 1

Значения $K_{\text{адд}}$ порошка $m\text{ZnO}/n\text{SiO}_2$ после облучения протонами и КСС

Последовательное облучение $p^+ \rightarrow \text{КСС}$ (Φp^+ , см^{-2} ; $t_{\text{КСС}}$, ч)					
$\Phi p^+ \rightarrow t_{\text{КСС}}$	$0,63 \times 10^{16}$	$1,08 \times 10^{16}$	$2,09 \times 10^{16}$	3×10^{16}	$4,07 \times 10^{16}$
Δa_s	0,039	0,060	0,084	0,107	0,124
$\Sigma \Delta a_{s(\text{разд})}$	0,028	0,043	0,068	0,093	0,113
$K_{\text{адд}}$	0,71	0,72	0,82	0,87	0,91
$\Phi p^+ \rightarrow t_{\text{КСС}}$	$4,07 \times 10^{16} \rightarrow 2$	$4,07 \times 10^{16} \rightarrow 4$	$4,07 \times 10^{16} \rightarrow 6$	$4,07 \times 10^{16} \rightarrow 8$	-
Δa_s	0,138	0,145	0,152	0,158	-
$\Sigma \Delta a_{s(\text{разд})}$	0,129	0,133	0,138	0,145	
$K_{\text{адд}}$	1,05	1,06	1,07	1,10	

1. Последовательное облучение $p^+ \rightarrow KCC$ проводили в следующем режиме:

– сначала облучали отдельно протонами флюенсом от $0,63 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ до $4,07 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и регистрировали значения Δa_s ;

– затем последовательно после протонов облучали КСС и регистрировали значения Δa_s после каждого периода облучения;

– затем облучали отдельно КСС в течение 2, 4, 6 и 8 ч;

– затем рассчитывали сумму изменений коэффициента поглощения при отдельном облучении протонами и КСС – $\Sigma \Delta a_{s(\text{разд})}$;

– рассчитывали $K_{\text{адд}}$ по значениям $\Sigma \Delta a_{s(\text{разд})}$ и значениям Δa_s при последовательном облучении $\Delta a_{(\text{посл})}$ который имел близкие к единице значения.

2. Последовательное облучение КСС $\rightarrow p^+$ проводили в следующем режиме:

– сначала облучали отдельно КСС в течение 6 ч, получили значение $\Delta a_s = 0,069$;

– затем последовательно облучали протонами флюенсом от $0,52 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ до $3,93 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и получили значения Δa_s от 0,094 до 0,164;

– сумма изменений Δa_s после раздельного облучения в таких же режимах КСС и протонами существенно ниже значений, полученных при последовательном облучении: с увеличением флюенса протонов до $3,93 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ $\Sigma \Delta a_{s(\text{разд})}$ увеличивается с 0,049 до 0,135, однако остается значительно меньше $\Sigma \Delta a_{s(\text{посл})}$.

Вследствие этого $K_{\text{адд}}$ имеет значения 0,8 во всем исследованном диапазоне от $\Phi_1 = 0,52 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ до $\Phi_2 = 3,93 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, его значения меньше единицы, что указывает на наличие синергетических эффектов.

3. Последовательное облучение $e^- \rightarrow KCC$ проводили в следующем режиме:

– сначала облучали электронами флюенсом $7 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, получили значение $\Delta a_s = 0,04$;

– затем облучали КСС последовательно после электронов в течение 2 и 4 ч, получили значения Δa_s равное 0,086 и 0,103, соответственно;

– затем облучали КСС отдельно в течение 2 и 4 ч, получили значения Δa_s равное 0,044 и 0,57, соответственно.

Сумма изменений Δa_s при раздельном облучении электронами и КСС составила

0,084 и 0,097, а при последовательном облучении $e^- \rightarrow KCC$ – 0,086 и 0,103, соответственно, и $K_{\text{адд}}$ равен 0,977 и 0,941. Его значения близки к единице, синергетические эффекты отсутствуют и при наземных испытаниях этого пигмента последовательное облучение можно заменять раздельным облучением электронами и КСС.

4. Последовательное облучение КСС $\rightarrow e^-$ проводили в следующем режиме:

– сначала облучали КСС в течение 6 ч, получили значение $\Delta a_s = 0,067$;

– затем последовательно облучали флюенсом электронов 1×10^{16} и $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, получили значения $\Delta a_s = 0,059$ и 0,064, соответственно;

– затем облучали отдельно электронами при таких же значениях флюенса 1×10^{16} и $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, получили значение $\Delta a_s = 0,017$ и 0,024, соответственно.

Сумма изменений Δa_s при раздельном облучении КСС и электронами составила 0,084 и 0,091, и $K_{\text{адд}}$ равен 1,43 и 1,42. Его значения значительно превышают единицу, что указывает на наличие синергетических эффектов при таком последовательном облучении. КСС $\rightarrow e^-$ и при наземных испытаниях этого пигмента последовательное облучение невозможно заменять его раздельным облучением.

Заключение

Исследована деградация интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения Δa_s модифицированного наночастицами $n\text{SiO}_2$ микропорошка $m\text{ZnO}$ ($m\text{ZnO}/n\text{SiO}_2$) при последовательном облучении электронами (e^-) с энергией 30 кэВ, протонами (p^+) с энергией 5 кэВ и квантами солнечного спектра (КСС). Проведены расчеты коэффициента аддитивности ($K_{\text{адд}}$) для количественной оценки взаимного влияния этих видов излучений на образование и накопление дефектов и центров поглощения.

Установлено, что при последовательном и раздельном облучении микропорошка $m\text{ZnO}$, модифицированного наночастицами $n\text{SiO}_2$ – коэффициент аддитивности в двух из четырех режимах последовательного облучения ($p^+ \rightarrow KCC$ и $e^- \rightarrow KCC$) близок к единице, в режиме КСС $\rightarrow p^+$ он равен 0,8, а в режиме КСС $\rightarrow e^-$ составляет 1,42–1,43.

Для выяснения механизмов протекающих при облучении процессов в порошках необходимы дальнейшие исследования, которые намечено проводить с разложением спектров наведенного поглощения при этих видах и режимах облучения и анализа параметров элементарных полос поглощения. Такие исследования возможно осуществить в единственной в РФ установке «Спектр», позволяющей регистрировать спектры диффузного отражения и спектры наведенного поглощения после каждого периода облучения непосредственно на месте облучения образцов (in situ).

Практическая значимость выполненного исследования заключается в том, что дальнейшее развитие космических исследований связано с разработкой технологий получения материалов для КА, обеспечивающих высокую надежность работы на длительные сроки орбитальных полетов (15–20 лет).

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования РФ,
Госзадание № FEWM-2026-0010*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов В. Ф. Деграция оптических свойств пигментов оксида и ортотитаната цинка и изготовление на их основе терморегулирующих покрытий космических аппаратов при облучении протонами: Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. – М., 1984.
2. Михайлов М. М. Фотостойкость терморегулирующих покрытий космических аппаратов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. ISBN 978-5-7511-1792-4
3. Хасанишин Р. Х., Новиков Л. С. / Физика и химия обработки материалов. 2015. № 5. С. 14–21.
4. Нецименко В. В. Исследование оптических свойств и радиационной стойкости оксидных порошков, модифицированных наночастицами: диссертация д-ра физ.-мат. наук. – Томск: ИФПМ, СО РАН, 2017.
5. Новиков Л. С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов. – М.: Университетская книга, 2010.
6. Chundong Li, Zhiqiang Liang, Haiying Xiao, Yiyong Wu, Yong Liu / Materials Letters. 2010. Vol. 64. P. 1972–1974.
7. Xian-Qing Zhou, Dong-Dong Zhang, Zakir Hayat / Processes. 2023. Vol. 11 (4). P. 1193.
<https://doi.org/10.3390/pr11041193>.
8. Михайлов М. М., Юрьев С. А., Лапин А. Н., Горончко В. А. / Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. № 9. С. 52–57.
<http://doi.org/10.31857/S1028096023090078>.
9. Михайлов М. М., Горончко В. А., Юрьев С. А., Лапин А. Н., Федосов Д. С. / Космические исследования. 2025. Т. 63. № 5. С. 541–550.
<https://doi.org/10.31857/S0023420625050073>.
10. Дудин А. Н., Юрина В. Ю., Нецименко В. В. / Материалы Международной научно-практической конференции «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению», Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. С. 305–308.
11. Дубин А. Н., Нецименко В. В., Лу С. / Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022. № 4. С. 70–76.
12. Johnson J. A., Cerbus C. A., Haines A. I., Kenny M. T. / AIAA Paper. 2005. P. 1378.
13. ASTM E490 – 00a Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables, 2005.
14. Mikhailov M. M., Sokolovskiy A. N., Yuryev S. A., Karanskiy V. V. / Advances in Space Research. 2020. Vol. 66. Is. 11. P. 2703–2710.
15. Михайлов М. М., Каранский В. В., Лапин А. Н., Юрьев С. А., Горончко В. А. / Прикладная физика. 2024. № 3. С. 63–70.
<https://doi.org/10.51368/1996-0948-2024-3-63-70>.
16. Семкин Н. Д. Испытания материалов и элементов конструкций радиоэлектронных средств космических аппаратов: учеб. пособие. – Самара: Издательство СГАУ, 2010. ISBN 978-5-7883-0758-9.

PACS: 78.67.Sc

Degradation of the optical properties of ZnO micropowder modified with SiO₂ nanoparticles under sequential irradiation with electrons, protons, and solar spectrum quanta

M. M. Mikhailov and V. V. Karanskiy *

Tomsk State University of Control System and Radioelectronics, Tomsk, 634050 Russia

** E-mail: karanskiy2015@mail.ru*

Received 17.06.2026; revised 30.06.2026; accepted 06.08.2026

The degradation of the integrated emissivity coefficient $\Delta\alpha$ of $m\text{ZnO}$ micropowder modified with $n\text{SiO}_2$ nanoparticles ($m\text{ZnO}/n\text{SiO}_2$) was studied under sequential irradiation with 30 keV

electrons (e^-), 5 keV protons (p^+), and solar spectrum quanta (SSP). The additivity coefficient (Cadd) was calculated to quantify the mutual influence of different types of radiation. It was found that, depending on the type of radiation and the irradiation sequence, Cadd can be less than, equal to, or greater than unity.

Keywords: zinc oxide, silicon dioxide, modification, irradiation, electrons, protons, solar spectrum quanta, additivity coefficient.

REFERENCES

1. Agafontsev V. F. Degradation of the optical properties of zinc oxide and zinc orthotitanate pigments and the fabrication of spacecraft heat-regulating coatings on their basis under proton irradiation: Abstract of a Cand. Sci. (Phys. and Mathematics) diss. Moscow, 1984.
2. Mikhailov M. M. Photostability of spacecraft heat-regulating coatings. Tomsk: Tomsk University Press, 2007. ISBN 978-5-7511-1792-4.
3. Khasanshin R. Kh. and Novikov L. S., Physics and Chemistry of Materials Processing, № 5, 14–21 (2015).
4. Neshchimenko V. V. Study of Optical Properties and Radiation Resistance of Oxide Powders Modified with Nanoparticles: Dissertation of Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Tomsk: Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2017.
5. Novikov L. S. Radiation Effects on Spacecraft Materials. Moscow: University Book, 2010.
6. Chundong Li, Zhiqiang Liang, Haiying Xiao, Yiyong Wu, and Yong Liu, Materials Letters **64**, 1972–1974 (2010).
7. Xian-Qing Zhou, Dong-Dong Zhang, and Zakir Hayat, Processes. **11** (4), 1193 (2023). <https://doi.org/10.3390/pr11041193>.
8. Mikhailov M. M., Yuryev S. A., Lapin A. N., and Goronchko V. A., Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies, № 9, 52–57 (2023). <https://doi.org/10.31857/S1028096023090078>.
9. Mikhailov M. M., Goronchko V. A., Yuryev S. A., Lapin A. N., and Fedosov D. S., Space Research **63** (5), 541–550 (2025). <https://doi.org/10.31857/S0023420625050073>.
10. Dudin A. N., Yurina V. Yu., and Neshchimenko V. V. From Ideas to Implementation: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Science, Innovation, and Technology”, Komsomolsk-on-Amur, February 7–11, 2022. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State University, 2022, pp. 305–308.
11. Dubin A. N., Neshchimenko V. V., and Li S., Surface. X-ray, Synchrotron, and Neutron Studies, № 4, 70–76 (2022).
12. Johnson J. A., Cerbus C. A., Haines A. I., and Kenny M. T., AIAA Paper, 1378 (2005).
13. ASTM E490 – 00a Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables. 2005.
14. Mikhailov M. M., Sokolovskiy A. N., Yuryev S. A., and Karanskiy V. V., Advances in Space Research **66** (11), 2703–2710 (2020).
15. Mikhailov M. M., Karansky V. V., Lapin A. N., Yuryev S. A., and Goronchko V. A., Applied Physics, № 3, 63–70 (2024) [in Russian]. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2024-3-63-70>.
16. Semkin N. D. Testing of materials and structural elements of spacecraft electronic equipment: [textbook]. Samara: SSAU Publishing House, 2010. ISBN 978-5-7883-0758-9.

Об авторах

Михайлов Михаил Михайлович, д.ф.-м.н.зав. лаб., Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, г. Томск, Россия, пр-т Ленина, 40). E-mail: membrana2010@mail.ru SPIN-код: 8671-5440, AuthorID: 31145

Каранский Вадим Владиславович, аспирант, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, г. Томск, Россия, пр-т Ленина, 40). E-mail: karanskiy2015@mail.ru SPIN-код: 7711-0310, AuthorID: 1066331