

УДК 537.9; 629.7.023.2; 535.362  
EDN: NROBRZ

PACS: 78.67.Sc

**Об аддитивности изменений оптических свойств  
модифицированного наночастицами SiO<sub>2</sub> порошка ZnO при  
одновременном и раздельном облучении электронами и протонами***М. М. Михайлов, В. В. Каранский, А. Н. Лапин, С. А. Юрьев, В. А. Горончко*

*Исследовано изменение спектров диффузного отражения модифицированного наночастицами  $n\text{SiO}_2$  микропорошка  $m\text{ZnO}$  ( $m\text{ZnO}/n\text{SiO}_2$ ) при раздельном и одновременном облучении электронами с энергией 30 кэВ и протонами с энергией 5 кэВ. Проведены расчеты коэффициента аддитивности ( $K_{\text{add}}$ ), определяемого отношением значений суммы  $\Delta a_s$  при раздельном облучении к его значениям при одновременном облучении. Установлено, что  $K_{\text{add}}$  в зависимости от времени облучения изменяется от 0,95 до 0,92. Расчеты для времени пребывания на геостационарной орбите в течение 7 лет дают значение  $K_{\text{add}} = 0,87$ . Поэтому при наземных испытаниях такого пигмента для терморегулирующих покрытий космических аппаратов, предназначенных для длительных сроков полетов необходимо осуществлять совместное действие этих видов излучений или учитывать значения  $K_{\text{add}}$ .*

*Ключевые слова:* оксид цинка, диоксид кремния, модифицирование, облучение, электроны, протоны, спектры отражения.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-3-63-70

**Введение**

Поддержание температуры космических аппаратов (КА) на заданном уровне является актуальной задачей. Эту функцию выполняют активные и пассивные системы терморегулирования. Основную нагрузку выполняют пассивные системы, представляющие собой терморегулирующие покрытия (ТРП), нанесен-

ные на радиаторы терморегулирования, корпуса КА, приборы и устройства. Среди различных типов ТРП (кварцевые стекла и полимерные пленки с напыленными слоями алюминия или серебра, эмали и керамики, плазменнонанесенные керамические покрытия и др.) эмалевые и керамические покрытия занимают ведущее место благодаря простоте технологии их получения и нанесения и не большой стоимости. Они состоят из пигментов (75–80 %) и связующих (20–25 %) [1, 2].

Основной рабочей характеристикой таких ТРП является интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения ( $a_s$ ), который определяется спектрами диффузного отражения ( $\rho_\lambda$ ) в солнечном диапазоне (0,2–2,5 мкм). Для ТРП класса «Оптические солнечные отражатели» (ОСО) значение коэффициента поглощения ( $a_s$ ) ТРП составляет не более 0,2. Но в процессе орбитальных полетов КА под действием излучений КП в ТРП образуются дефекты и центра поглощения, что приводит к появлению полос поглощения,

---

**Михайлов Михаил Михайлович**, зав. лаб., д.ф.-м.н.

E-mail: membrana2010@mail.ru

**Каранский Вадим Владиславович**, аспирант.

E-mail: karanskiy2015@mail.ru

**Лапин Алексей Николаевич**, с.н.с., к.т.н.**Юрьев Семен Александрович**, с.н.с., к.т.н.**Горончко Владимир Александрович**, м.н.с.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 40.

Статья поступила в редакцию 22.02.2024

Принята к публикации 15.04.2024

Шифр научной специальности: 1.3.5

---

© Михайлов М. М., Каранский В. В., Лапин А. Н., Юрьев С. А., Горончко В. А., 2024

уменьшению коэффициента отражения ( $\rho_\lambda$ ) увеличению коэффициент поглощения ( $a_s$ ) и повышению температуры КА. Поэтому необходимы ТРП с высокой стойкостью оптических свойств к действию излучений и других факторов КП.

Среди излучений КП на высоких орбитах главными являются электроны ( $e^-$ ), протоны ( $p^+$ ) и кванты солнечного спектра (КСС). Они действуют одновременно все три вида ( $e^- + p^+ + \text{КСС}$ ) в радиационных поясах Земли (РПЗ) и в межпланетном космическом пространстве (МКП) или только заряженные частицы ( $e^- + p^+$ ) при заходе КА в тень Земли, Луны или других планет.

За время развития космических исследований оценку деградации коэффициента поглощения ( $a_s$ ) ТРП осуществляли как при раздельном [3, 4], так и при одновременном их облучении [4, 5]. При этом не учитывали синергетические эффекты (СЭ), возникающие при облучении, которые могли привести к значительным ошибкам в определении изменений коэффициента поглощения ( $\Delta a_s$ ) [6–8]. Поэтому актуальной была и является в настоящее время проблема изучения СЭ, возникающих при совместном действии излучений КП на ТРП и их компоненты.

Порошки оксида цинка используются в качестве пигментов ТРП на протяжении всего более 60-летнего периода освоения КП, поскольку обладают высокой отражательной способностью и высокой относительно других пигментов фото- и радиационной стойкостью [9, 10]. В последние годы в связи с возрастающими требованиями к срокам активного существования КА осуществляют обработку пигментов различными способами [11]. Одним из наиболее эффективных среди которых является модифицирование наночастицами [12, 13]. Одним из наиболее эффективным типом модификаторов являются нанопорошки диоксида кремния, обладающие аморфной структурой [14]. Поэтому исследования радиационной стойкости модифицированных наночастицами порошков оксида цинка является актуальными.

Целью настоящей работы является исследование изменений спектров диффузного отражения ( $\rho_\lambda$ ) и коэффициента поглощения ( $a_s$ ) при одновременном и раздельном облуче-

нии электронами и протонами модифицированного наночастицами  $n\text{SiO}_2$  порошка микронных размеров оксида цинка ( $m\text{ZnO}$ ).

### Методика эксперимента

Объектом исследования служил микропорошок оксида цинка (квалификация «ос.ч.» по ТУ 6-09-2175-77, производитель ЗАО «Вектон», Россия). В качестве модифицирующей добавки был использован нанопорошок диоксида кремния (чистота 99,8 %, средний размер 10–12 нм, производитель ООО «Плазмотерм», Россия). Микропорошок  $m\text{ZnO}$  смешивали в соотношении 100:3 с наночастицами  $n\text{SiO}_2$ .

Для модифицирования нанопорошок  $n\text{SiO}_2$  растворяли в дистиллированной воде при наложении ультразвуковых волн, затем в полученный раствор добавляли исследуемый микропорошок  $m\text{ZnO}$  и перемешивали в течение 3 ч в магнитной мешалке. Смесь сушили при температуре 150 °С, перетирали в агатовой ступке и прогревали в атмосфере 2 ч при оптимальной температуре 650 °С [15]. После охлаждения порошок прессовали в подложки диаметром 24 мм, высотой 2 мм под давлением 1 МПа со временем выдержки 2 мин.

Регистрацию спектров диффузного отражения ( $\rho_\lambda$ ) после каждого периода облучения осуществляли в вакууме на месте облучения образцов (in situ) в имитаторе условий КП «Спектр» [16].

В ходе эксперимента осуществляли одновременное облучение электронами ( $E = 30$  кэВ,  $\varphi = 9 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) и протонами ( $E = 5$  кэВ,  $\varphi = 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ). По спектрам диффузного отражения ( $\rho_\lambda$ ) рассчитали интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения ( $a_s$ ) уравнение (1) [17–19]:

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

где  $R_s$  – интегральный коэффициент отражения солнечного излучения,  $I_\lambda$  – спектр излучения Солнца,  $(\lambda_1 - \lambda_2)$  – диапазон длин волн солнечного спектра, используемый для интегрирования, равный 0,32–2,1 мкм.

Изменения коэффициентов ( $\Delta\rho_\lambda$  и  $\Delta a_s$ ) рассчитывали по значениям до и после облучения.

### Экспериментальные результаты и обсуждение

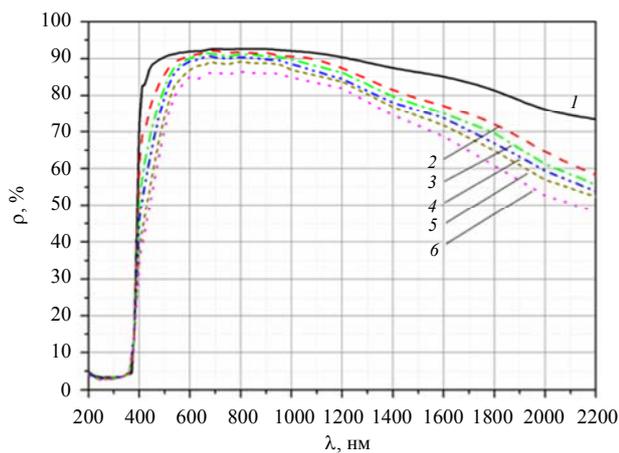
В спектрах диффузного отражения при одновременном облучении (рис. 1а) с увеличением времени воздействия наблюдается снижение коэффициентов отражения во всей области от 375 до 2200 нм. Спектры диффузного отражения при раздельном облучении электронами (рис. 1б) и протонами (рис. 1в) коэффициент отражения с увеличением длины волны плавно снижается.

Наиболее интенсивной полосой поглощения в спектрах  $\Delta\rho_\lambda$  при одновременном об-

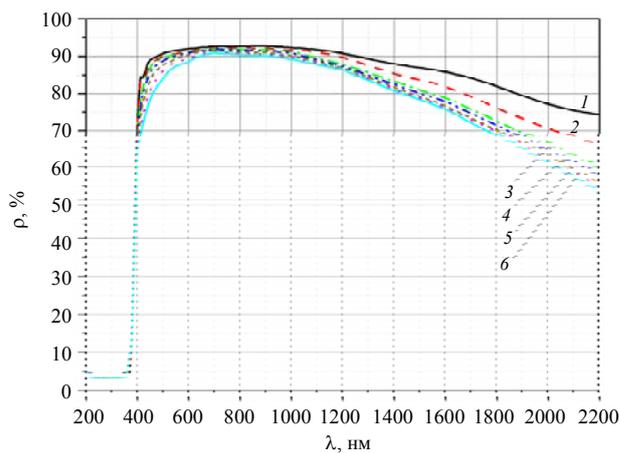
лучении ( $e^- + p^+$ ) является полоса с максимумом при 420 нм и интенсивностью 41 (рис. 2а) для максимального времени облучения электронами и протонами. С увеличением флюенса электронов (рис. 2б) и протонов (рис. 2в) коэффициенты отражения уменьшаются во всей области от 375 нм.

Наибольшее уменьшение при облучении электронами происходит в ИК-области и достигает 22-23. При облучении протонами наибольшие его изменения (до 50) происходят в полосе при 420 нм.

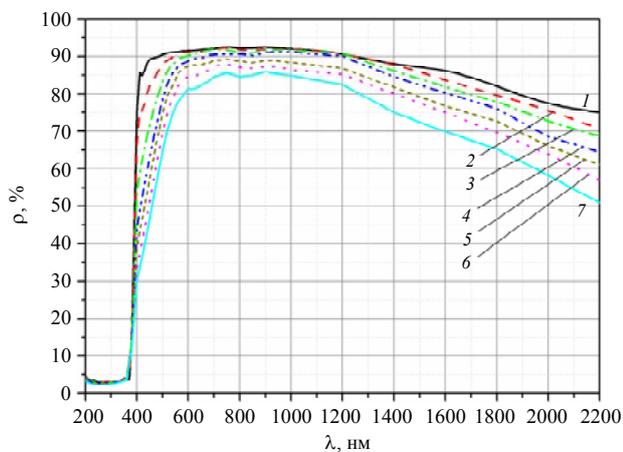
В разностных спектрах (рис. 2а, б, в) после одновременного и раздельного облучения электронами и протонами проявляются 2 характерные области: полоса поглощения с максимумом при 420 нм и увеличивающееся с ростом длины волны поглощение в области от 800 до 2200 нм.



а)

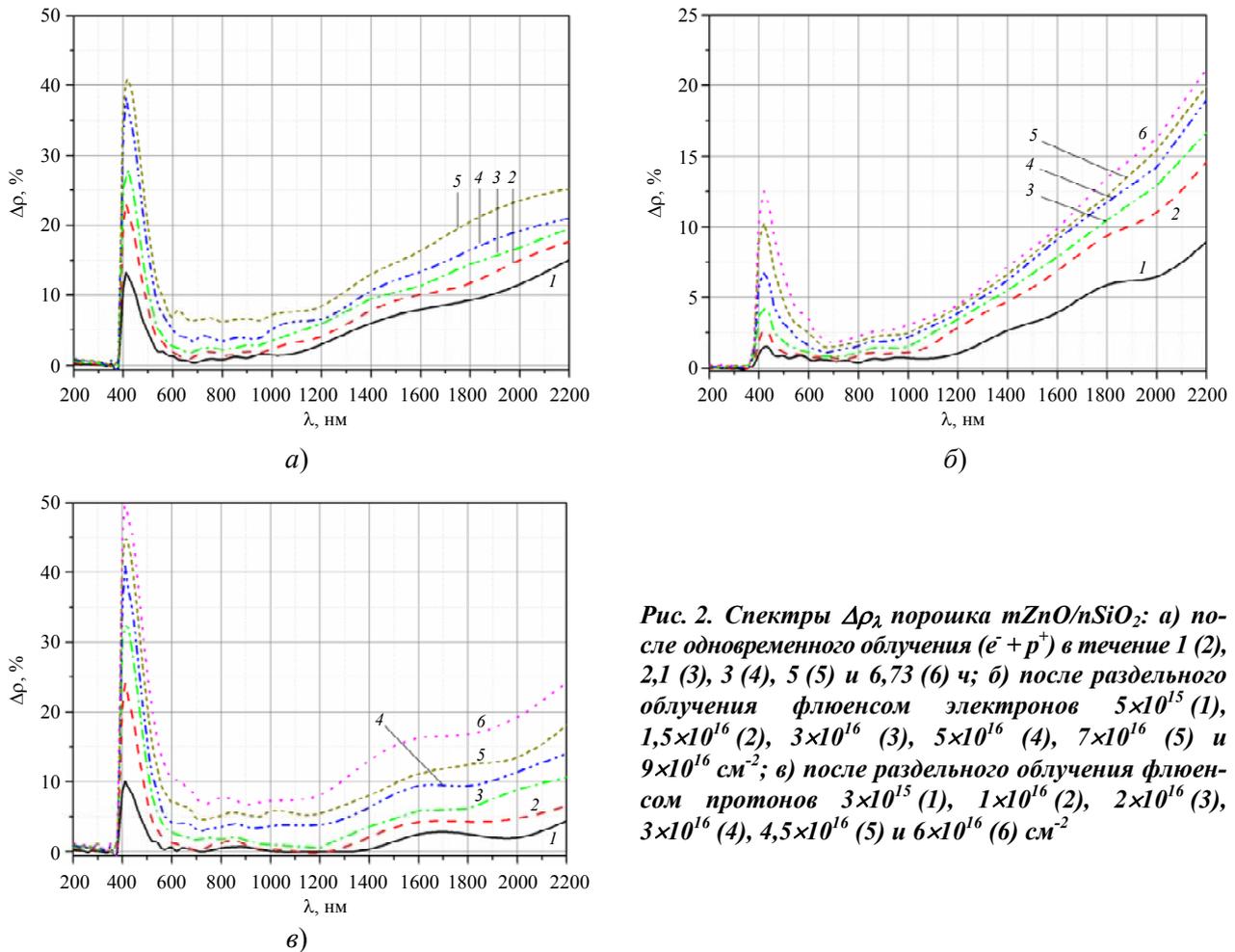


б)



в)

Рис. 1. Спектры  $\rho_\lambda$  порошка  $mZnO/nSiO_2$  до облучения (1) и после облучения: а) после одновременного облучения электронами с энергией 30 кэВ и протонами с энергией 5 кэВ в течение 1 (2); 2,1 (3); 3 (4); 5 (5) и 6,73 (6) ч; б) после раздельного облучения электронами с энергией 30 кэВ флюенсом  $5 \times 10^{15}$  (2);  $1,5 \times 10^{16}$  (3);  $3 \times 10^{16}$  (4);  $5 \times 10^{16}$  (5);  $7 \times 10^{16}$  (6) и  $9 \times 10^{16}$  (7)  $cm^{-2}$ ; в) после раздельного облучения протонами с энергией 5 кэВ флюенсом  $3 \times 10^{15}$  (2);  $1 \times 10^{16}$  (3);  $2 \times 10^{16}$  (4);  $3 \times 10^{16}$  (5);  $4,5 \times 10^{16}$  (6) и  $6 \times 10^{16}$  (7)  $cm^{-2}$



**Рис. 2.** Спектры  $\Delta\rho_\lambda$  порошка  $m\text{ZnO}/n\text{SiO}_2$ : а) после одновременного облучения ( $e^- + p^+$ ) в течение 1 (2), 2,1 (3), 3 (4), 5 (5) и 6,73 (6) ч; б) после раздельного облучения флюенсом электронов  $5 \times 10^{15}$  (1),  $1,5 \times 10^{16}$  (2),  $3 \times 10^{16}$  (3),  $5 \times 10^{16}$  (4),  $7 \times 10^{16}$  (5) и  $9 \times 10^{16}$   $\text{см}^{-2}$ ; в) после раздельного облучения флюенсом протонов  $3 \times 10^{15}$  (1),  $1 \times 10^{16}$  (2),  $2 \times 10^{16}$  (3),  $3 \times 10^{16}$  (4),  $4,5 \times 10^{16}$  (5) и  $6 \times 10^{16}$  (6)  $\text{см}^{-2}$

Полоса поглощения после одновременного облучения электронами и протонами определяется распадом сложных центров, состоящих в основном из дефектов анионной подрешетки, сопровождающимся увеличением концентрации F-центров, атомарного кислорода на поверхности и свободных электронов. Полоса поглощения после раздельного облучения электронами и протонами в видимой области определяется собственными точечными дефектами оксида цинка (вакансии и

междоузельные ионы цинка и кислорода в различном зарядовом состоянии), в ближней ИК-области – свободными электронами, ОН-радикалами и хемосорбированными газами [20–22].

Изменение интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения  $\Delta a_s$   $m\text{ZnO}/n\text{SiO}_2$  в зависимости от времени воздействия при одновременном облучении ( $e^- + p^+$ ) приведены в таблице.

**Таблица**

**Зависимость  $\Delta a_s$  от времени и флюенса электронов и протонов при их одновременном и раздельном облучении порошка  $m\text{ZnO}/n\text{SiO}_2$**

$(e^- + p^+), t, \text{ч}$	$\Delta a_s$	$\Phi e^-, \text{см}^{-2}$	$\Delta a_s$	$\Phi p^+, \text{см}^{-2}$	$\Delta a_s$
1	0,038	$0,5 \times 10^{16}$	0,013	$0,3 \times 10^{16}$	0,016
2,1	0,059	$1,5 \times 10^{16}$	0,022	$1 \times 10^{16}$	0,041
3	0,077	$3 \times 10^{16}$	0,028	$2 \times 10^{16}$	0,066
5	0,105	$5 \times 10^{16}$	0,036	$3 \times 10^{16}$	0,093
6,73	0,133	$7,08 \times 10^{16}$	0,045	$4,5 \times 10^{16}$	0,121

Увеличение интенсивности полосы поглощения и концентрации дефектов происходит в результате воздействия электронов и протонов, как при одновременном облучении, так и при раздельном.

На рисунке 3 представлена зависимость  $\Delta\alpha_s$  порошка  $mZnO/nSiO_2$  при одновременном облучении ( $e^- + p^+$ ) для всего измеряемого диапазона длин волн от 200 до 2200 нм и для областей спектра  $\lambda < 800$  нм и  $\lambda > 800$  нм.

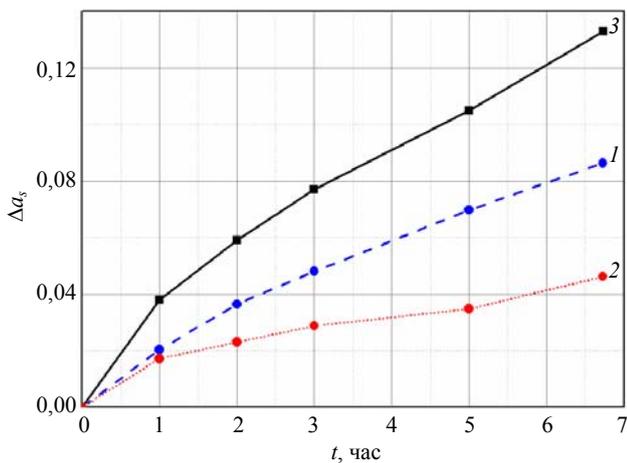


Рис. 3. Зависимость  $\Delta\alpha_s$  порошка  $mZnO/nSiO_2$  от времени облучения ( $e^- + p^+$ ) в области спектра  $\lambda < 800$  нм (1),  $\lambda > 800$  нм (2) и во всём измеряемом диапазоне  $200 < \lambda < 2200$  (3)

Из рисунка 3 можно сделать вывод, что при одновременном облучении ( $e^- + p^+$ ), наибольший вклад в значения  $\Delta\alpha_s$  вносят собственные точечные дефекты ZnO, полосы поглощения которых расположены в УФ и видимой областях спектра. Свободные электроны, образованные при облучении и поглощающие в ближней ИК-области дают примерно в два раза меньший вклад в измене-

ние интегрального коэффициента поглощения [9, 11, 19].

Изменение  $\Delta\alpha_s$  при одновременном облучении в области свыше 800 нм вызвано свободными электронами, ОН-радикалами и хемосорбированными газами примерно в 2 раза меньше, чем в области спектра до 800 нм [20–22].

Параметром, определяющим отличие площадей полос поглощения различных центров окраски и интегрального коэффициента поглощения, является коэффициент аддитивности ( $K_{адд}$ ) – коэффициент, определяемый отношением изменений свойств или рабочего параметра отдельных центров окраски или суммы этих параметров при раздельном действии излучений к изменениям при совместном действии излучений (одновременном или последовательном) уравнение (2):

$$K_{адд} = \frac{\Sigma(\Delta\rho_1 + \Delta\rho_2)}{\Delta\rho_{совм}}, \quad (2)$$

где  $\Sigma(\Delta\rho_1 + \Delta\rho_2)$  – сумма изменений рабочего параметра при раздельном действии излучений;  $\Delta\rho_{совм}$  – изменение рабочего параметра при совместном действии излучений.

Зависимости  $\Delta\alpha_s$  и коэффициента аддитивности  $K_{адд}$  от времени раздельного и одновременного облучения порошка  $mZnO/nSiO_2$  электронами и протонами показывают (рис. 4), что сумма значений  $\Delta\alpha_s$  при раздельном облучении меньше по сравнению со значениями при одновременном облучении. Значения времени раздельного облучения рассчитывали из экспериментальных значений флюенса электронов и протонов при облучении (таблица) и потоков этих заряженных частиц.

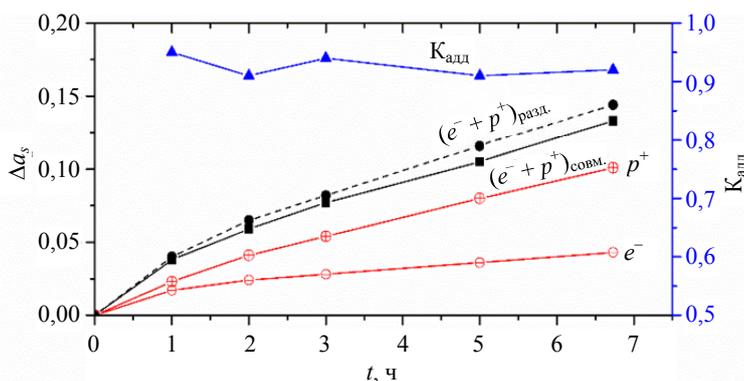


Рис. 4. Зависимости  $\Delta\alpha_s$  и  $K_{адд}$  от времени раздельного и одновременного облучения электронами и протонами ( $e^- + p^+$ ) порошка  $mZnO/nSiO_2$

Поэтому  $K_{\text{адд}}$  близок к единице, но с увеличением времени облучения он уменьшается от 0,95 до 0,91–0,92. Значения флюенса заряженных частиц в экспериментальных исследованиях не большие. Например, для электронов максимальная величина составляет  $7,08 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  [23]. Пересчет этой величины для Геостационарной орбиты по методике замены спектров заряженных частиц на орбитах моноэнергетическими пучками при наземных испытаниях ТРП и пигментов [24], например для покрытия на основе ортатитаната цинка с полиметилсилоксаном в качестве связующего дает величину потока электронов  $3,17 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Если принять такой же поток и для исследуемого пигмента, то получим время действия на него электронов на ГСО 0,7 года. Для большего времени пребывания на орбите, например для 7 лет флюенс электронов увеличится в 10 раз и составит  $7,08 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Коэффициент аддитивности для такого флюенса уменьшится. При экстраполяции его значений по линейному закону он составит 0,87. Принимая значения  $K_{\text{адд}}$  в начале облучения равным единице, получаем его уменьшение при флюенсе электронов  $7,08 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  и соответствующем флюенсе протонов для 7 годам их совместного действия на ГСО на данный пигмент в 1,15 раз.

### Заключение

Исследовано изменение спектров диффузного отражения модифицированного наночастицами  $n\text{SiO}_2$  микропорошка  $m\text{ZnO}$  ( $m\text{ZnO}/n\text{SiO}_2$ ) при раздельном и одновременном облучении электронами с энергией 30 кэВ и протонами с энергией 5 кэВ. Установлено, что облучение во всех трех режимах приводит к появлению полосы поглощения в видимой области с максимумом при 420 нм и увеличивающемуся с ростом длины волны поглощению в ближней ИК-области. По спектрам диффузного отражения определены значения интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения ( $a_s$ ) и его изменений ( $\Delta a_s$ ) после одновременного и раздельного облучения модифицированного порошка ( $m\text{ZnO}/n\text{SiO}_2$ ). Проведены расчеты коэффициента аддитивности ( $K_{\text{адд}}$ ), как отношение значений суммы  $\Delta a_s$  при раздельном облучении к

его значениям при одновременном облучении. Установлено, что  $K_{\text{адд}}$  в зависимости от времени облучения электронами и протонами в указанных режимах изменяется от 0,95 до 0,92. Для времени пребывания на Геостационарной орбите в течение 7 лет расчеты дают значение  $K_{\text{адд}} = 0,87$ . Поэтому при наземных испытаниях такого пигмента для ТРП космических аппаратов, предназначенных для длительных сроков полетов необходимо осуществлять совместное действие этих видов излучений или учитывать значения  $K_{\text{адд}}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке  
Министерства науки и высшего образования РФ,  
Госзадание № FEWM-2023-0012.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лукас Дж. Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов. / Под ред. Анфимова Н. А. – М.: Мир, 1974.
2. Петров Г. М. Моделирование тепловых режимов космических летательных аппаратов и окружающей среды. – М.: Машиностроение, 1972. С. 382.
3. Агафонов В. Ф. Деградация 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.
4. Brown R. R., Fogdall L. B., Cannaday S. S. Progress in Astronautics: Thermal Design Principles of Spacecraft and Entru. Vol. 21. – New York: Academic Press, 1969. P. 697–724.
5. Cargo M. Mc., Greenberg S. A., Douglas N. I. Radiation-Induced Absorption Bands in Spacecraft Thermal Control Coating Pigments. Thermophys. Appl. to Thermal Design of Spacecraft. Vol. 23. – New York: Academic Press, 1970. P. 189–200.
6. Барбашев Е. А., Богатов В. А., Козин В. И. и др. Космическое материаловедение и технология. – М.: Наука, 1977.
7. Браун Р. Р. Влияние электронного пучка и ультрафиолетового излучения на терморегулирующие покрытия / ВЦП, перевод № Ц-36376. – М., 1975.
8. Millard I. P. Optical Stabilities of Coatings Exposed to Four Years Space Environment on OSO-III / AIAA. 1973. № 734.
9. Нецименко В. В. Исследование оптических свойств и радиационной стойкости оксидных порошков, модифицированных наночастицами: диссертация д-ра физ.-мат. наук. – Томск: ИФПМ, СО РАН, 2017.
10. Kumari Latha, Li W. Z., Vannoy Charles H., Leblanc Roger M., Wang D. Z. / Materials Research Bulletin. 2010. Vol. 45. Is. 2. P. 190–196.

11. Михайлов М. М. Патенты на изобретения (материалы для космических аппаратов). – Томск, ТУСУР, 2022.
12. Chundong Li, Zhiqiang Liang, Haiying Xiao, Yiyong Wu, Yong Liu. / Materials Letters. 2010. Vol. 64. P. 1972–1974.
13. Xian-Qing Zhou, Dong-Dong Zhang, Zakir Hayat. / Processes. 2023. Vol. 11 (4). P. 1193. <https://doi.org/10.3390/pr11041193>.
14. Qianhui Yu, Pengyun Tan, Jiahao Zhou, Xiaojing Ma, Yingqing Shao, Shuangying Wei, Zhenhua Gao. / Polymers (Basel). 2023. Vol. 15 (23). P. 4588.
15. Дудин А. Н., Нецименко В. В., Лу С. / Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022. № 4. С. 70–76.
16. Kositsyn L. G., Mikhailov M. M., Kuznetsov N. Y., Dvoretzkiy M. I. / Instruments and experimental techniques. 1985. Vol. 28. P. 929–932.
17. Johnson J. A., Cerbus C. A., Haines A. I., Kennedy M. T. / AIAA Paper. 2005. P. 1378.
18. ASTM E490 – 00a Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables. 2005.
19. Mikhailov M. M., Sokolovskiy A. N., Yuryev S. A., Karanskiy V. V. / Advances in Space Research 2020. Vol. 66. Is. 11. P. 2703–2710.
20. Blanco M., Coello J., Ityriaga H., Maspoeh S. / Analyst. 1998. Vol. 124. P. 135–150.
21. Blanco M., Vilarroya I. / Tractrends in Analytical Chemistry. 2002. Vol. 21. P. 240–250.
22. Михайлов М. М., Нецименко В. В. / Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 8. С. 233–246.
23. Васильев В. Н., Дворецкий М. И., Игнатьев В. Н., Косицын Л. Г., Михайлов М. М., Соловьев Г. Г., Тендитный В. А. Имитация комплексного воздействия космических излучений на терморегулирующие покрытия. Модель космоса. – М.: МГУ, 1983. Т. 2. Гл. 13. С. 375–393.
24. Михайлов М. М., Дворецкий М. И. / Неорганические материалы. 1991. Т. 27. № 11. С. 2365–2369.

PACS: 78.67.Sc

## On additivity of changes in optical properties under simultaneous and separate irradiation with electrons and protons of ZnO powder modified by SiO<sub>2</sub> nanoparticles

*M. M. Mikhailov, V. V. Karanskiy, A. N. Lapin, S. A. Yuryev and V. A. Goronchko*

Tomsk State University of Control System and Radioelectronics  
40 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: karanskiy2015@mail.ru

*Received 22.02.2024; revised 15.04.2024*

***The change of diffuse reflectance spectra of mZnO (mZnO/nSiO<sub>2</sub>) micropowder modified by nSiO<sub>2</sub> nanoparticles under separate and simultaneous irradiation with 30 keV electrons and 5 keV protons has been studied. Calculations of the additivity coefficient ( $C_{add}$ ), which is determined by the ratio of the values of the sum  $\Delta a_s$  a separate irradiation to its values at simultaneous irradiation, have been carried out. It was found that  $C_{add}$  varies from 0.96 to 0.92 depending on the time of irradiation. Calculations for the time of stay in geostationary orbit for 7 years give the value of  $C_{add} = 0.87$ . Therefore, during ground tests of such pigment for thermoregulating coatings of spacecraft designed for long flight times it is necessary to carry out joint action of these types of radiation or take into account the values of  $C_{add}$ .***

**Keywords:** zinc oxide, silicon dioxide, modification, irradiation, electrons, protons, reflection spectra.

### REFERENCES

1. Lucas J., Heat transfer and thermal regime of spacecraft. Ed. Anfimova N. A., Moscow, Mir, 1974.
2. Petrov G. M., Modeling of thermal regimes of spacecraft and the environment, Moscow, Mashinostroenie, 1972, pp. 382.

3. Agafontsev V. F. Degradation of the optical properties of zinc oxide and orthotitanate pigments and the production of thermoregulating coatings for spacecraft based on them under proton irradiation: Abstract. Diss. Candidate physics and mathematics sciences. Moscow, 1984.
4. Brown R. R., Fogdall L. B. and Cannaday S. S., Progress in Astronautics: Thermal Design Principles of Spacecraft and Entru. **21**, 697–724 (1969).
5. Cargo M. Mc., Greenberg S. A. and Douglas N. I. Radiation-Induced Absorption Bands in Spacecraft Thermal Control Coating Pigments. Thermophys. Appl. to Thermal Design of Spacecraft. **23**, 189–200 (1970).
6. Barbashev E. A., Bogatov V. A., Kozin V. I. et al., Space materials science and technology, Moscow, Nauka, 1977.
7. Brown R. R. The influence of electron beam and ultraviolet radiation on thermostatic coatings. VCP, translation № Ts-36376, Moscow, 1975.
8. Millard I. P., Optical Stabilities of Coatings Exposed to Four Years Space Environment on OSO-III. AIAA, № 734, 1–12 (1973).
9. Neshchimenko V. V. Study of the optical properties and radiation resistance of oxide powders modified with nanoparticles: dissertation of Dr. Phys.-Math. Sciences, Tomsk, IPPM, SB RAS, 2017.
10. Latha Kumari, Li W. Z., Charles H. Vannoy, Roger M. Leblanc and Wang D. Z., Materials Research Bulletin **45** (2), 190–196 (2010).
11. Mikhailov M. M. Patents for inventions (materials for spacecraft). Tomsk, TUSUR, 2022.
12. Chundong Li, Zhiqiang Liang, Haiying Xiao, Yiyong Wu and Yong Liu, Materials Letters **64**, 1972–1974 (2010).
13. Xian-Qing Zhou, Dong-Dong Zhang and Zakir Hayat, Processes **11** (4), 1193 (2023).  
<https://doi.org/10.3390/pr11041193>.
14. Qianhui Yu, Pengyun Tan, Jiahao Zhou, Xiaojing Ma, Yingqing Shao Shuangying Wei, and Zhenhua Gao, Polymers (Basel). **15** (23), 4588 (2023).
15. Dudin A. N., Neshchimenko V. V. and Li S., Surface. X-Ray, Synchrotron and Neutron Studies, № 4, 70–76 (2022).
16. Kositsyn L. G., Mikhailov M. M., Kuznetsov N. Y. and Dvoretzkiy M. I., Instruments and experimental techniques **28**, 929–932 (1985).
17. Johnson J. A., Cerbus C. A., Haines A. I. and Kenny M. T., AIAA Paper, 1378 (2005).
18. ASTM E490 – 00a Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables, 2005.
19. Mikhailov M. M., Sokolovskiy A. N., Yuryev S. A. and Karanskiy V. V., Advances in Space Research **66**, 2703–2710 (2020).
20. Blanco M., Coello J., Ityriaga H. and Maspocho S., Analyst **124**, 135–150 (1998).
21. Blanco M. and Vilarroya I., Tractrends in Analytical Chemistry **21**. 240–250 (2002).
22. Mikhailov M. M. and Neshchimenko V. V., Surface. X-ray synchrotron and neutron research, № 8, 233–246 (2009).
23. Vasiliev V. N., Dvoretzkiy M. I., Ignatiev V. N., Kositsyn L. G., Mikhailov M. M., Solovyov G. G. and Tenditny V. A., Simulation of the complex effects of cosmic radiation on thermostatic coatings. Model of space, Moscow, MSU **2**, ch. 13, pp. 375–393 (1983).
24. Mikhailov M. M. and Dvoretzkiy M. I., Inorganic materials **27**, 2365–2369 (1991).