

Исследование деградации оптических свойств защитных покрытий солнечных батарей высокоорбитальных КА под действием электронов и протонов

А. М. Шамаев*

Акционерное общество «Композит»

Россия, 141070, г. Королев Московской области, ул. Пионерская д. 4

(Поступила в редакцию 26.12.2023; подписана в печать 25.02.2024)

Представлены результаты экспериментальных исследований снижения коэффициента пропускания образцов стекла К-208 под действием электронов и протонов с энергиями от 10 до 50 кэВ. Облучение проводилось в вакууме 10^{-4} Па при плотностях потока частиц в диапазоне от 10^{10} до 2.5×10^{11} см $^{-2}$ с $^{-1}$. Деградация оптических свойств, исследованных образцов при малых и средних дозах облучения обусловлена накоплением центров окраски и изменением структуры их облучаемой поверхности при электростатических разрядах за счет образования микровыступов, разрядных каналов. При больших дозах облучения деградация связана также с изменением стехиометрии стекла и с загрязнением его поверхности плазмоидами, выбрасываемыми в окружающее пространство при разрядах. Установлено, что влияние накопления центров окраски в стеклах при электронном и протонном облучении дозами, соответствующими дозовым нагрузкам за период их эксплуатации на геостационарных орбитах, не приводит к существенным изменениям их оптических свойств.

PACS: 42.70.-a, 42.70.Jk, 78.15.+e

УДК: 535.345.61, 538.958, 621.355

Ключевые слова: космический аппарат, солнечные батареи, факторы космического пространства, спектральный коэффициент пропускания, центры окраски, электростатические разряды.

ВВЕДЕНИЕ

Материалы внешних покрытий геостационарных космических аппаратов (КА) подвергаются большим дозовым нагрузкам [1], что может повлечь за собой изменения их функциональных свойств до недопустимого уровня. Наиболее подвержены неэкранированному воздействию ионизирующих излучений и загрязнению продуктами собственной внешней атмосферы КА, используемые в бортовой аппаратуре, оптические материалы [2–7] — стекла, терморегулирующие покрытия и т.д.

В частности с ростом энерговооружённости КА и увеличением их срока активного существования до 15 лет и более ужесточились требования к ресурсной оценке деградации солнечных батарей (СБ). Ухудшение функциональных характеристик СБ, в частности, снижение вырабатываемой мощности может быть обусловлена деградацией оптических свойств защитных покрытий (ЗП) элементов СБ, а именно снижением их коэффициентов пропускания. Назначение ЗП толщиной от 120 до 300 мкм — экранирование фотоэлементов от протонов с энергиями от 3.0 до 7.5 МэВ. Деградация свойств ЗП происходит под действием частиц горячей магнитосферной плазмы и естественных радиационных поясов Земли. В них, помимо накопления радиационных центров окраски [8, 9], аккумулируется объемный заряд, поле которого стимулирует развитие различных процессов, в том числе электростатических разрядов (ЭСР). На развитие ЭСР влияют как параметры воздействующего излучения, так и давле-

ние окружающей атмосферы, а так же наличие технологических дефектов [10]. В России в качестве основы для ЗП солнечных батарей и терморадияторов используют радиационно-стойкое оптическое стекло марки К-208, стойкость которого обусловлена введением в его состав церия Се $_2$ О.

Таким образом, кроме загрязнения продуктами собственной внешней атмосферы, главную опасность для солнечных батарей представляют корпускулярные излучения космического пространства, вызывающие радиационно-стимулированную деградацию полупроводниковых элементов и ограничивающие срок службы батарей.

Сведения о систематических исследованиях совместного воздействия на стекла обоих компонентов плазмы — электронов и протонов — практически отсутствуют. Исследованиям ЭСР при электронном облучении диэлектриков посвящено большое количество работ ученых разных стран [11–13], однако до настоящего времени не сформулированы общепринятые механизмы развития разрядов и не разработаны корректные математические модели их количественного описания. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния на оптические характеристики образцов ЗП облучения электронами и протонами с энергиями частиц характерными для горячей магнитосферной плазмы.

1. ОБЪЕКТЫ

Для проведения экспериментов использовались квадратные пластины стекла К-208 размером 30×30×0.17 мм. Состав стекла К-208 представлен в табл. 1.

* info@kompozit-mv.ru

Таблица 1. Состав стекла К-208

Компонент	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CeO ₂
Мол. %	69.49	4.25	10.33	11.93	4.00	2.00

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пластины стекла прикрепляли к полированной металлической поверхности предметного столика испытательного стенда УВ-1/2, подробно описанного в работе [1], и облучали при следующих условиях:

- вакуум — 10^{-4} Па;
- энергия электронов и протонов — (10–50) кэВ;
- плотность потока электронов φ_e и протонов φ_p — от 10^{10} до 2.5×10^{11} см⁻²с⁻¹;
- флюенсы электронов Φ_e и протонов Φ_p — от 1.0×10^{14} до 1.0×10^{16} см⁻²;
- температура столика — $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Коэффициент пропускания измерялся на двухлучевом спектрофотометре с использованием интегрирующей сферы с размещёнными на ней фотоприёмниками. Оптическая схема измерений представлена на рис. 1.

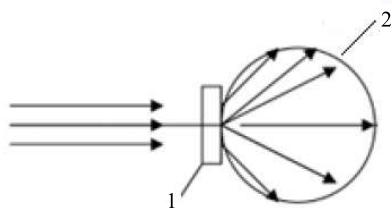


Рис. 1. Схема измерения коэффициентов пропускания: 1 — образец; 2 — интегрирующая сфера

Поверхности образцов до и после облучения исследовались с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47–Multi–Technique SPM производства NT–MDT с использованием полуконтактной атомно-силовой моды, которая при высокой точности измерений не разрушает поверхность образца [12].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2, а показан спектр пропускания исходного образца стекла К-208, из которого видно, что исследуемое стекло пропускает электромагнитное излучение, в основном начиная с длины волны $\lambda = 260$ нм. На рис. 2, б представлено АСМ-изображение фрагмента поверхности необлученного стекла.

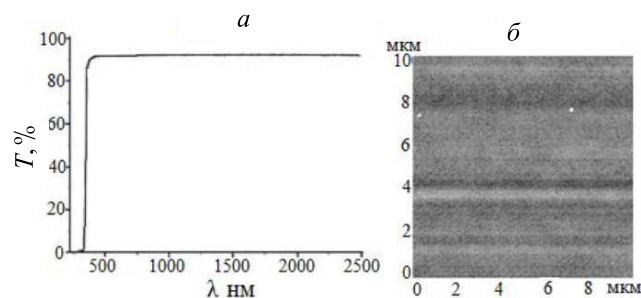


Рис. 2. а — спектр пропускания исходного образца стекла; б — АСМ-изображение фрагмента 10×10 мкм поверхности стекла

Из расчёта с использованием вычислительных алгоритмов метода Монте–Карло следует, что для значений энергии электронов $E_0 = (10 - 50)$ кэВ энергия электронного компонента плазмы выделяется в приповерхностном слое до 25 мкм. Максимальные длины пробегов электронов в стекле для соответствующих значений энергий электронов E_0 не превышают 1.5 мкм ($E_0 = 10$ кэВ); 4.8 мкм ($E_0 = 20$ кэВ); 9.8 мкм ($E_0 = 30$ кэВ); 16.0 мкм ($E_0 = 40$ кэВ) и 24.0 мкм ($E_0 = 50$ кэВ).

Первая серия экспериментов заключалась в проверке влияния энергии и плотности потока электронов воздействующих на образцы на величину изменения их спектров пропускания. Облучение проводилось до одинаковых значений поглощённой в стекле дозы. В качестве примера на рис. 3 представлены разности спектров пропускания образцов стекла К-208 исходного и облучённых электронами с энергиями 10, 30 и 50 кэВ при одинаковых плотностях потоков частиц $\varphi_e = 7.0 \times 10^{10}$ см⁻²с⁻¹.

При указанной плотности потока электронов модификация поверхности стекла может быть обусловлена радиационно–стимулированными процессами в облучаемом слое стекла и разрядами типа «микровыступ–ионизованная остаточная атмосфера» вакуумной камеры. Далее мы будем их называть разрядами первого типа. Такие разряды происходят с микровыступов, существовавших на поверхности стекла и образовавшихся на ней, и сопровождаются быстрыми фазовыми переходами материала из твердого состояния в жидкое, газообразное и плазменное. Заканчиваются разряды выбросом в окружающее пространство плазмы с избыточным электронным зарядом, что в экспериментах приводило к импульсному повышению давления в вакуумной камере.

В промежутках времени между разрядами вместе с ростом поля термализованных в стекле электронов, в прилегающей к облучаемой поверхности области, увеличивается концентрация положительных ионов. Бомбардировка вершечек микровыступов, в окрестностях которых напряженность поля имеет локальные максимумы, ускоренными ионами приводит к их разо-

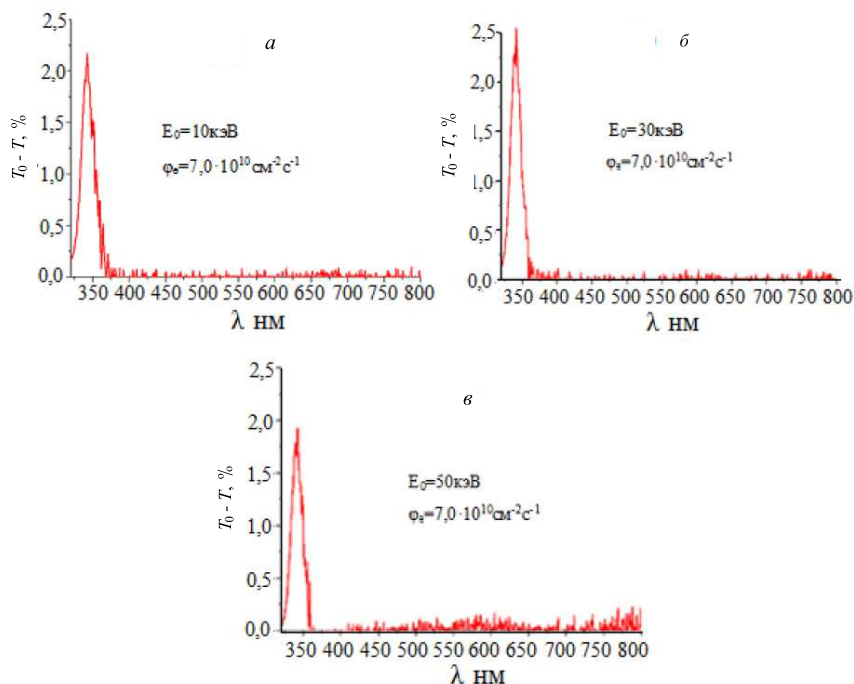


Рис. 3. Изменения спектров пропускания образцов при воздействии электронов разных значений энергий E_0 : а — 10 кэВ, б — 30 кэВ, в — 50 кэВ

греву, стимулирующему зарождение разряда.

Образование новых микровыступов на поверхности образцов, по всей видимости, обусловлено тем, что для приповерхностного слоя стекла характерно высокое содержание структурных дефектов. Их отжиг при облучении сопровождается появлением радиационно-стимулированных напряжений и радиационно-стимулированной диффузией, способствующим ускорению транспортных процессов, обеспечивающих перенос материала к центрам роста микровыступов на поверхности, стекла.

Наблюдаемое в экспериментах многократное повторение разрядов через микровыступы, представляющие собой в местах выхода плазмы капли застывшего стекла связано с тем, что они обладают большей проводимостью по сравнению с окружением и возвышаются над ним. Их повышенная проводимость обусловлена структурными изменениями и нарушением стехиометрии материала при облучении и разрядах. Разряды приводят к росту размеров микровыступов за счет накопления на них остывшего стекла и сопровождаются скачкообразным ростом давления в вакуумной камере, за счет выброса плазмы.

По мере увеличения φ_e до значений больших $7.6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, наряду с разрядами первого типа, начинают происходить разряды второго типа, которые развиваются вдоль облучаемой поверхности стекла и оставляют на ней разрядные каналы глубиной в несколько нм. С дальнейшим увеличением плотности потока электронов растет как концентрация ионизованного газа у поверхности образца, так и радиаци-

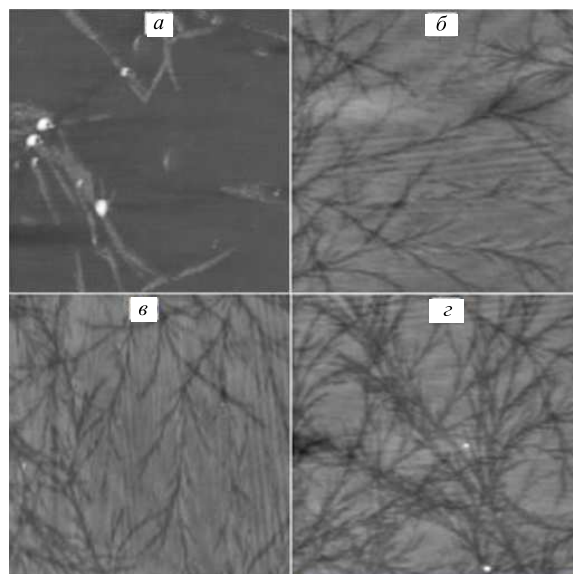


Рис. 4. АСМ-изображения фрагментов поверхности образцов облученных электронами с энергией $E_0 = 30 \text{ кэВ}$ при значениях φ_e : а — $8.6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$; б — $1.1 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$; в — $1.3 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$; г — $\varphi_e = 1.5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

онная проводимость облучаемого слоя стекла. Эти процессы в основном и стимулирует разряды второго типа, интенсивность которых при наличии достаточной тангенциальной составляющей напряжённости электрического поля увеличиваются вместе со значением φ_e .

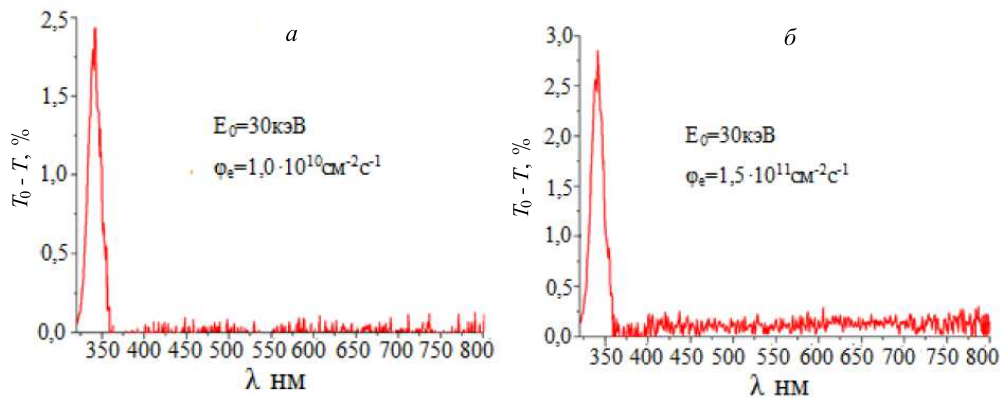


Рис. 5. Разности спектров пропускания исходного и образцов стекла К-208, облучённых электронами с энергиями $E_0 = 30$ кэВ и плотности и потока φ_e а — $1.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, б — $1.5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

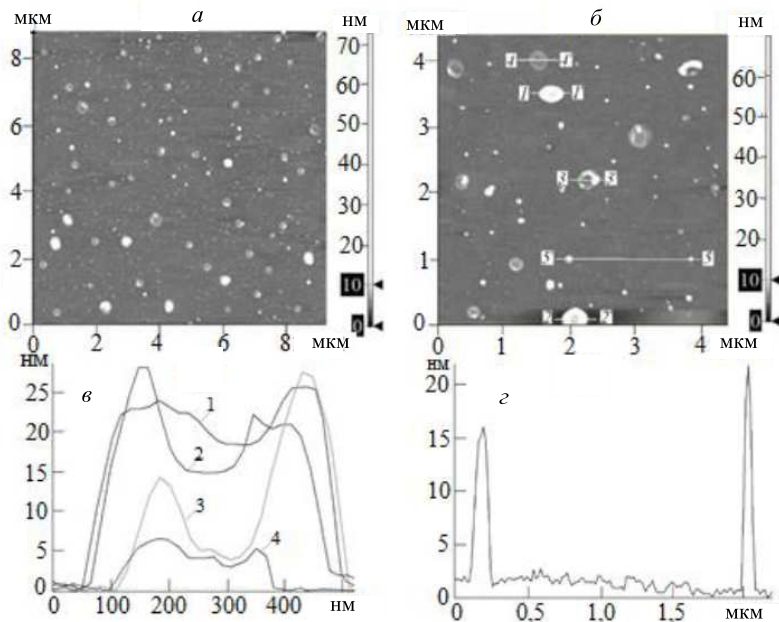


Рис. 6. а и б — АСМ-изображения фрагментов 10×10 мкм и 4.5×4.5 мкм образца, облучённого протонами, в и г — сечения кадра (б) вдоль линий 1-1'(1), 2-2'(2), 3-3'(3), 4-4'(4) и 5-5' соответственно $\Phi_p = 3.0 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$

На рис. 4 представлены АСМ изображения фрагментов 5×5 мкм образцов К-208 облученных электронами, при разных значениях φ_e .

Из рис. 4 видно, что в случае облучения образца электронами с энергией $E_0 = 30$ кэВ при $\varphi_e = 8.6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (рис. 4 а) на поверхности стекла появляются как отдельные микровыступы — следы разрядов первого типа стекло-ионизованная остаточная атмосфера, так и одиночные разрядные каналы — следы разрядов второго типа. Однако с повышением значения параметра φ_e (рис. 4, б-г) разряды второго типа начинают преобладать, и поверхность стекла покрывается сеткой разрядных каналов. В качестве примера на рис. 5 показано изменение спек-

тра пропускания образцов при воздействии электронов с энергиями $E_0 = 30$ кэВ и плотностями потока $\varphi_e = 1.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и $1.5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Таким образом, на основании представленных данных на рис. 5 можно утверждать, что совокупность радиационно-стимулированных дефектов — центры окраски, наноразмерные микровыступы и разрядные каналы, появляющиеся на поверхности стекла при его электронном облучении в результате разрядов привели к изменениям спектра пропускания стекла, в диапазоне от 280 до 370 нм не более чем на 3% процента.

Во второй серии экспериментов исследовалось влияние протонного облучения на коэффициент пропускания образцов стекла К-208.

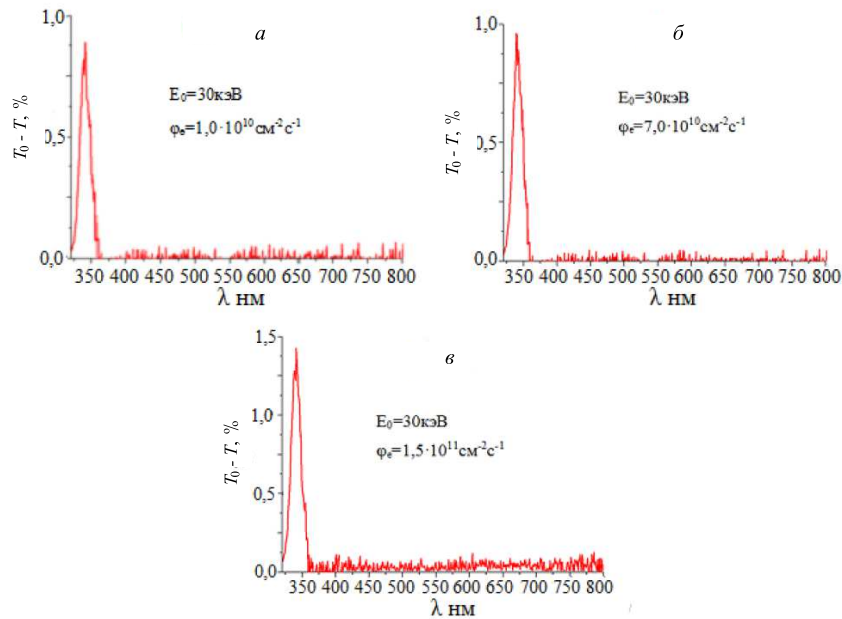


Рис. 7. Разности спектров пропускания исходного и образцов стекла К-208, облучённых электронами с энергиями $E_0 = 30$ кэВ и плотности и потока φ_e : а — 1.0×10^{10} $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$, б — 7.0×10^{10} $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$, в — 1.5×10^{11} $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$

На рис. 6 представлены АСМ-изображения фрагментов поверхности 10×10 мкм (а) 4.5×4.5 мкм (б) образца, облучённого протонами с энергией 30 кэВ флюенсом до значения $\Phi_p = 3.0 \times 10^{15}$ см^{-2} .

Протоны почти в две тысячи раз тяжелее электронов. Взаимодействуя в основном с электронной системой материала, протоны в результате столкновений почти не меняют направления движения. В случае воздействия энергия протонного компонента плазмы выделяется в тонком приповерхностном слое до 1 мкм, что обуславливает отжиг дефектов, появление градиентов механических напряжений и других процессов в облучаемом слое стекла.

При протонном облучении в изменении структуры поверхности стекла определяющую роль играет формирование газонаполненных пузырьков. Их появление не может значительно изменить спектр пропускания образцов. На рис. 7 представлены разности спектров пропускания исходного и образцов стекла К-208, облучённых протонами с энергией 30 кэВ до флюенса $\Phi_p = 3.0 \times 10^{15}$ см^{-2} при разных плотностях потока.

Из рис. 7 следует, что спектры пропускания образцов при протонном облучении изменяются меньше, чем при электронном облучении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа полученных результатов можно сделать выводы:

- Накопленные радиационные центры окраски

в образцах К-208 при электронном и протонном облучении флюенсами соответствующими дозовым нагрузкам за период их эксплуатации на ГСО, приводят к изменениям спектра пропускания стекла, в диапазоне от 280 до 370 нм не более чем на 3% процента. Это обусловлено присутствием в составе стекла церия, который обеспечивает оптическую радиационную стойкость стекла.

- При электронном облучении, в отличие от протонного облучения, наблюдались электростатические разряды с образованием на поверхности стекла микровыступов и разрядных каналов, которые, по-видимому, наряду с радиационными центрами окраски вносят определённый вклад в деградацию оптических свойств стекла.
- При протонном облучении изменение структуры поверхности стекла происходит в основном за счёт формирования газонаполненных пузырьков, не вносящих значительного вклада в изменения спектра пропускания образцов. Помимо образования радиационных дефектов при протонном облучении происходит локальный нагрев приповерхностного слоя стекла и, как следствие, отжиг дефектов. Совокупность указанных эффектов приводит к тому, что при облучении протонами спектр пропускания покровного стекла изменяется меньше по сравнению со случаем электронного облучения.

- [1] Модель космоса. Научно-информационное издание. Под ред. Л. С. Новикова. М.: КДУ, 2007.
- [2] Хасаншин Р.Х., Надирадзе А.Б. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. № 3. 73 (2013).
- [3] Бреховских С. М., Викторова Ю. Н., Ланда Л. М. Радиационные эффекты в стеклах. М.: Энергоиздат, 1982.
- [4] Khassanchine R.H., Timofeev A.N., Galygin A.N., Kostiuk V.I. // Journal of Spacecraft and Rockets. **43**, N 3. 509 (2006).
- [5] Khassanchine R.H., Timofeev A.N., Grigorevskiy A.V., Galygin A.N. // Journal of Spacecraft and Rockets. **43**, N 2. 410 (2006); Roussel J.-F., Alet I., Faye D., and Pereira A. // Journal of Spacecraft and Rockets. **41**, N 5. 812 (2004).
- [6] Zhao Xiaohu, Shen Zhigang, Xing Yushan, Ma Shulin // J. Acta Aeronautical and Astronautic Since. **30**(1). 159 (2009).
- [7] Сергеев П.М. и др. // Оптический журнал. **71**, № 6. 93 (2004).
- [8] Арбузов В.И., Сучков Ф.В. // Оптический журнал. **68**, № 6. 85 (2001).
- [9] Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. № 10. 14 (2016).
- [10] Ferguson D. C., Wimberly S.C. // Proceed. 50th AIAA Aerospace Sci. Mtg. January, 2013. Nashville, Tennessee. AIAA 2013-0810. doi: 10.2514/6.2013-810.
- [11] Hirokazu Masui, Kazuhiro Toyoda, Mengyu Cho // IEEE Trans. on Plasma Sci. **36**. 2387 (2008).
- [12] Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Гаценко Л.С., Волкова Я.Б. // Перспективные материалы. № 1. 22 (2015).
- [13] Барышева М.М., Грибков Б.А., Зорина М.В., Салащенко Н.Н. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. № 8. 100 (2013).

Study of degradation of optical properties of solar protective coatings batteries of high-orbital spacecraft under the influence of electrons and protons

A. M. Shamaev

Joint Stock Company «Composite»
Korolev, 141070, Moscow region, Russia
E-mail: info@kompozit-mv.ru

The results of experimental studies of the decrease in the transmittance of K-208 glass samples under the influence of electrons and protons with energies from 10 to 50 keV are presented. Irradiation was carried out in a vacuum of 10–4 Pa at particle flux densities in the range from 10×10^{10} to 2.5×10^{11} $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. The degradation of the optical properties of the studied samples at low and medium irradiation doses is due to the accumulation of color centers and changes in the structure of their irradiated surface during electrostatic discharges due to the formation of microprotrusions and discharge channels. At high radiation doses, degradation is also associated with a change in the stoichiometry of the glass. and from contamination of its surfaces with plasmoids released into the surrounding space during discharges. It has been established that the influence of the accumulation of color centers in glasses during electron and proton irradiation with doses corresponding to dose loads during the period of their operation in geostationary orbits does not lead to significant changes in their optical properties

PACS: 42.70.-a, 42.70.Jk, 78.15.+e.

Keywords: spacecraft, solar panels, space factors, spectral transmittance, color centers, electrostatic discharges.

Received 26 January 2023.

Сведения об авторах

Шамаев А. М. — инженер; e-mail: info@kompozit-mv.ru.