

УДК 537.591

ОЦЕНКА ПОГЛОЩАЕМОЙ ДОЗЫ В ЗАЩИТНОМ СТЕКЛЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОТОКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2022 г. С. В. Цаплин^а, *, С. А. Большев^а

^а Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе, д. 34, Самара, 443086 Россия

*E-mail: tsaplin@samsu.ru

Поступила в редакцию 11.05.2021 г.

После доработки 29.07.2021 г.

Принята к публикации 30.07.2021 г.

Впервые в широком интервале энергий протонов (от 0.1 до 400 МэВ) и электронов (от 0.04 до 7 МэВ) с помощью базы данных и программного обеспечения Spenvis Европейского космического агентства рассчитывались потоки протонов и электронов в соответствии с условиями эксплуатации наноспутника SamSat–ION на ССО. В соответствии с спектральными энергетическими характеристиками этих потоков вычислялись ионизационные и радиационные потери для защитного стекла К-208 и SiO₂, также вычислялась годовая поглощаемая доза по эмпирическим формулам. Получены результаты расчёта интегральных потоков в защитном стекле К-208 и SiO₂ при воздействии протонов и электронов круговой ССО для различных толщин и показана доля прошедших частиц в приближении однослойной стопы.

Ключевые слова: ионизационные, радиационные потери, поглощаемая, эквивалентная доза, защитное стекло К-208

DOI: 10.31857/S0023119322010132

ВВЕДЕНИЕ

Малые космические аппараты (МКА) функционируют в условиях воздействия потоков электронов и ионов в широком диапазоне энергий (0.001–10⁵ МэВ) солнечной, космической радиации входящих в состав радиационных поясов Земли (РПЗ), солнечных космических лучей (СКЛ) и галактических космических лучей (ГКЛ), которые относят к основным составляющим ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства (КП), или космической радиации, которая является одной из главных причин возникновения отказов в работе блоков радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) КА и уменьшения сроков активного существования аппаратов [1, 2].

Надежность БРЭА связана с обеспечением радиационной устойчивости электронно-компонентной базы (ЭКБ) при ограниченной потребляемой мощности и массогабаритных характеристиках. Известно [3, 4], что гарантийный срок пребывания КА на околоземной орбите или при межпланетном полете зависит от выбора условий эксплуатации, применения радиационно-стойких электронных компонент в составе БРЭА и методики испытания, прогнозирования. На материалы и элементы оборудования, находящиеся на поверхности МКА, значительное радиационное

воздействие оказывают также электроны и ионы горячей магнитосферной плазмы с энергиями ~1–100 кэВ. В зависимости от условий эксплуатации КА на орбите интенсивность космической радиации различна.

Известно [2, 5], что в околоземном пространстве МКА подвергается воздействию ионизирующего излучения, которое представляет собой поток первичных заряженных частиц (электроны, протоны и тяжелые заряженные частицы), и вторичных частиц – результата ядерных превращений, связанных с первичными частицами. В результате воздействия ИИ на БРЭА вследствие ионизационных и ядерных потерь энергии первичных и вторичных частиц в чувствительных элементах наблюдаются различные сбои и отказы [5, 6].

Наибольшее предпочтение для выбора условия эксплуатации МКА отдают низким околоземными круговым и эллиптическим солнечно-синхронным орбитам (ССО) [5, 7]. Целесообразность и привлекательность солнечно-синхронных орбит для движения МКА обусловлены линией светораздела, которая отделяет освещенную часть Земли от неосвещенной части – за счет постоянного движения МКА в дневной области, что приводит к эффективному использованию солнечных батарей. ССО,

имеющая постоянную ориентацию относительно Солнца, используется для съемок поверхности Земли.

В рамках данной работы специальное рассмотрение одиночных сбоев не проводится, однако используемые расчетные методы позволяют вычислять спектры линейными потерями энергии (ЛПЭ) и исследовать в дальнейшем эффекты воздействия одиночных частиц.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе будут исследованы воздействия потоков электронов и протонов [8] на защитное стекло К-208 состав которого: SiO_2 – 69.49%; B_2O_3 – 11.93%; Na_2O – 10.33%; K_2O – 6.25%; CeO_2 – 2.0% соответствует отраслевому стандарту ОСТ 3-3677-82 и стекло SiO_2 – 100% (толщиной 100 мкм) находящейся на внешней поверхности трехпереходной структуры солнечной батареи и на поверхности датчиков (толщиной 100–500 мкм) освещенности TCS3472 с ИК-фильтром, датчика угла ADPD2140 в видимой спектральной и инфракрасной области спектра, соответственно, наноспутника в соответствии с его условиями эксплуатации на круговой солнечно-синхронной орбите (ССО) с наклоном 97.447° , периодом обращения – 94.74 мин и апоцентром – 516.2 км. Выбор круговой ССО обусловлен тем, что наноспутник при движении по орбите в основном будет находиться под ЕРПЗ и хорошо защищен от СКЛ геомагнитным полем [9].

Известно, с одной стороны, что при облучении заряженными частицами диэлектриков с низкой проводимостью в них формируются области с высокой плотностью заряда [10], поле которого может привести к развитию электростатического разряда между областью локализации заряда и поверхностью диэлектрика. Рост разрядных каналов происходит в результате разрушения диэлектрика и образования проводящей фазы. Появление каналов представляет собой сложный стохастический процесс, который сопровождается ионизацией, газовой выделением, разогревом и т.д., приводящими к образованию в стекле проводящей фазы. Поэтому до настоящего времени не разработана количественная теория формирования проводящих каналов.

С другой стороны, воздействие потоков протонов, электронов ССО приводит к образованию радиационных дефектов, которые становятся источниками поглощения в видимой области электромагнитного солнечного спектра, что может привести к изменению пропускания светового излучения [10].

Выбор круговой ССО в качестве эксплуатационной позволяет обеспечить более безопасные условия эксплуатации с точки зрения воз-

действия космической радиации на бортовую аппаратуру наноспутника.

Для обеспечения выполнения задач ориентации наноспутника SamSat–ION на ССО проводятся исследования для обеспечения работоспособности датчика освещенности при воздействии потоков протонов и электронов на стекло К-208, которое планируется использовать в качестве защитного стекла от ионизирующего излучения. Характеристикой радиационной стойкости является оценка поглощаемой дозы в защитном стекле.

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ

Удельные ионизационные потери энергии в веществе с многокомпонентным химическим составом можно вычислить по формуле [11]:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{1}{M} \sum_i N_i A_i \left(\frac{dE}{dx} \right)_i, \quad (1)$$

где M – молекулярный вес соединения, N_i – количество атомов сорта i с атомным весом A_i в молекуле, $(dE/dx)_i$ – удельные ионизационные, радиационные потери для данного простого вещества, ($\text{МэВ/мг} \cdot \text{см}^2$) можно определить в соответствии с [11, 12].

Для однокомпонентного материала ионизационные потери запишем в виде:

$$\begin{aligned} - \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{ион}} &= \frac{2\pi r_e^2 m_e c^2}{\beta^2} N_A \frac{Z}{A} \times \\ &\times \left[\ln \left(\frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \frac{\epsilon}{2(I/m_e c^2)} \right) + f^m(\epsilon) - \delta \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где E – удельная энергия ионизационных потерь; x – путь пройденный заряженной частицей; r_e^2 – радиус электрона; m_e – масса электрона; c – скорость света; N_A – число Авогадро; Z – атомный номер атомов вещества; A – массовое число атомов вещества; $I = (13.5Z) \times 1.6 \times 10^{-12}$ – средний ионизационный потенциал атомов поглощающего вещества среды (эрг); δ , f^m – поправки, учитывающие эффект плотности и связанности К- L -электронов; $\beta = v/c$, $\epsilon = T/m_e c^2$.

В частности, для электронов поправка

$$f^-(\epsilon) = (1 - \beta^2) \left[1 + \frac{\epsilon^2}{8} - (2\epsilon + 1) \ln 2 \right],$$

а для позитронов

$$f^+(\epsilon) = 2 \ln 2 - \frac{\beta^2}{12} \times \left[23 + \frac{14}{\epsilon + 2} + \frac{10}{(\epsilon + 2)^2} + \frac{4}{(\epsilon + 2)^3} \right].$$

Расчеты эффекта плотности достаточно сложны, поэтому на практике для вычисления величины δ используют выражения Штернхеймера, ко-

торые справедливы как для электронов, так и для тяжелых частиц:

$$\delta = \begin{cases} 4.606X + C + a(X_1 - X)^3, & \text{если } X_0 < X < X_1; \\ 4.606X + C, & \text{если } X > X_1; \\ 0, & \text{если } X < X_0. \end{cases}$$

Здесь

$$X = \lg\left(\frac{p}{mc}\right), \quad C = -2 \ln\left(\frac{I}{22.8} \sqrt{\frac{A}{\rho Z}}\right) - 1, \\ a = \frac{|C| - 4.606X_0}{(X_1 - X_0)^3},$$

где p — импульс частицы, m — ее масса, ρ — плотность вещества (г/см^3).

Значения X_1 и X_0 для твердых веществ в соответствии с [11, 12] запишем

$$X_1 = \begin{cases} 2, & \text{если } I < 100 \text{ эВ;} \\ 3, & \text{если } I \geq 100 \text{ эВ;} \end{cases} \\ X_0 = \begin{cases} 0.2, & \text{если } I < 100 \text{ эВ, } |C| < 3.681; \\ 0.326 \cdot |C| - 1, & \text{если } I < 100 \text{ эВ, } |C| \geq 3.681; \\ 0.2, & \text{если } I \geq 100 \text{ эВ, } |C| < 5.215; \\ 0.326 \cdot |C| - 1.5, & \text{если } I \geq 100 \text{ эВ, } |C| \geq 5.215. \end{cases}$$

Формула Бете–Блоха для тяжелых частиц имеет вид [11, 12]

$$-\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{ион}} = \frac{2\pi r_e^2 m_e c^2}{\beta^2} N_A z^2 \frac{Z}{A} \times \left[\ln\left(\frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \frac{2m_e c^2}{I^2} Q_{\max}\right) - 2\beta^2 - U - \delta \right], \quad (3)$$

где z — величина заряда частицы, Q_{\max} — максимальная энергия, передаваемая атомным электронам от налетающей частицы с массой M и Лоренц-фактором γ .

$$Q_{\max} = \frac{2m_e c^2 (\gamma - 1)}{1 + 2\gamma(m_e/M) + (m_e/M)^2}.$$

Поправки δ на эффект плотности среды рассчитываются также, как и для электронов. Поправка U — учитывает эффект связанности электронов на K - и L -оболочках, для ее вычисления используются эмпирические формулы [11]:

$$U = \frac{2C_e(I, \eta)}{Z},$$

где $\eta = \beta(T + mc^2)/mc$,

$$C_e(I, \eta) = \begin{cases} (0.42237\eta^{-2} + 0.0304\eta^{-4} - 3.8 \times 10^{-4}\eta^{-6}) \times 10^{-6} I^2 + \\ + (3.858\eta^{-2} - 0.1668\eta^{-4} + 1.5 \times 10^{-3}\eta^{-6}) \times 10^{-9} I^3, & \eta > 0.13; \\ C_e(I, \eta = 0.13) \cdot [\ln(T/2)] / \ln(7.9/2), & \eta \leq 0.13. \end{cases}$$

Радиационные потери для электронов определим следующим образом [11]:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад}}^{(e)} = \frac{Z^2 K \alpha \varepsilon}{A 4\pi m} G(E_k),$$

$$G(E_k) = \left[\frac{12\varepsilon^2 + 4m_e^2 c^4}{3\varepsilon p c} \ln\left(\frac{\varepsilon + pc}{m_e c^2}\right) - \frac{(8\varepsilon + 6pc)m^2 c^4}{3\varepsilon (pc)^2} \left(\ln\left(\frac{\varepsilon + pc}{m_e c^2}\right)\right)^2 - \frac{4}{3} + \frac{2m^2 c^4}{\varepsilon p} F\left(\frac{2p(\varepsilon + pc)}{m^2 c^4}\right) \right], \quad (4)$$

где $F(x) = \int_0^x \ln(1+y) \frac{1}{y} dy$, $\varepsilon = E_k + m_e c^2$, – полная энергия электрона, p – импульс электрона; $K = 4\pi r_e^2 m_e c^2 N_A = 0.307 \text{ МэВ/г см}^2$.

При определении потерь для веществ сложного состава, к которым относится большинство материалов, применяемых в космической технике, используется композиционный закон Брэгга. Если вещество состоит из двух типов атомов – 1 и 2, тогда потери частиц в сложном веществе определяются по формуле [13]:

$$-\frac{dE}{dx} = f_1 \left(\frac{dE}{dx}\right)_1 + f_2 \left(\frac{dE}{dx}\right)_2, \quad (5)$$

где $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{1,2}$ – потери в чистом веществе, состоящим из атомов типа 1 или 2,

$$f_1 = \frac{Z_1 n_1}{Z_w n_w}, \quad f_2 = \frac{Z_2 n_2}{Z_w n_w}.$$

Здесь Z_1, Z_2, Z_w – зарядовые числа в атоме 1, атоме 2, сложном веществе, n_1, n_2, n_w – число атомов типа 1, типа 2, сложного вещества в единице объема.

Пробег заряженной частицы с начальной кинетической энергией E_0 движущейся в некоторой среде, определяется как длина пути, который она проходит до полной остановки и рассчитывается по формуле [11]

$$R(E_0) = \int_0^{E_0} \left(-\frac{dE}{dx}\right)_i^{-1} dT, \quad (6)$$

где $\left(\frac{dE}{dx}\right)_i = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад}}$ – суммарные потери энергии.

ПОГЛОЩАЕМАЯ ДОЗА В ЗАЩИТНОМ СТЕКЛЕ

Определим годовую поглощенную дозу для защитного стекла К-208 и SiO₂ толщиной 100–

500 мкм при воздействии потока электронов, протонов в соответствии с условиями эксплуатации наноспутника на ССО в соответствии с [14] по формуле:

$$D(E_i, \delta) = B \int_{E_{\text{min}}}^{E_i} \frac{dN}{dE} \frac{dE'}{dx} dE', \text{ Гр}, \quad (7)$$

где δ – толщина материала; D – величина поглощенной дозы, Гр; dN/dE_p и dN/dE_e – дифференциальные энергетические спектры, протонов и электронов соответственно; dE'/dx – ионизационные потери протонов в веществе защиты, МэВ · г⁻¹ · см²; B – коэффициент перехода от поглощенной энергии к дозе, равный $B = 1.6 \times 10^{-10} \text{ Гр МэВ}^{-1}$ г; E' – энергия протонов на глубине материала δ , связанная с энергией протонов, падающих на поверхность материала с энергией E , соотношением “пробег-энергия”

$$R(E') = R(E) + \delta,$$

где $R(E')$ и $R(E)$ – пробеги протонов с энергиями E' и E , соответственно, в веществе защиты.

Поглощенная доза от спектра электронов, распределенных по закону dN/dE_e , рассчитывается по формуле

$$D(E_i, \delta) = D_n(\delta) \int_{E_{\text{min}}}^{E_i} \frac{dN}{dE_e} dE_e, \text{ Гр},$$

где $D_n(\delta)$ – среднее значение поглощенной дозы, рассчитывается методом, основанном на рассмотрении многократного рассеяния в веществе с учетом ионизационных потерь [14].

Результаты ионизационных и радиационных потери, длина пробега протонов, электронов для стекла К-208 и SiO₂ рассчитаны по формулам (2)–(4), (6) приведены на рис. 1, а результаты поглощенной дозы приведены на рис. 2 соответственно.

Определим интегральные потоки протонов и электронов, прошедших в стекле К-208 в приближении однослойной стопы по формуле

$$\Phi_{K208}(z, E_i) = \Phi_0(z, E_i) \exp\left[-\frac{z}{R_{K208}(E_i)}\right], \quad (8)$$

$$z \in (0, h_{K208}) \text{ для } \forall E_i,$$

где E_i – энергия, $\Phi_0(0, E_i)$ – поток протонов и электронов на ССО соответственно, $R_{K208}(E_i)$ – длина пробега протонов и электронов; h_{K208} – толщина защитного стекла.

Результаты расчета представлены на рис. 3, 4 и в табл. 1.

Анализ полученных результатов показывает, что потери энергии (рис. 1а, 1б), длины пробега (рис. 1в, 1г) электронов, протонов в защитном

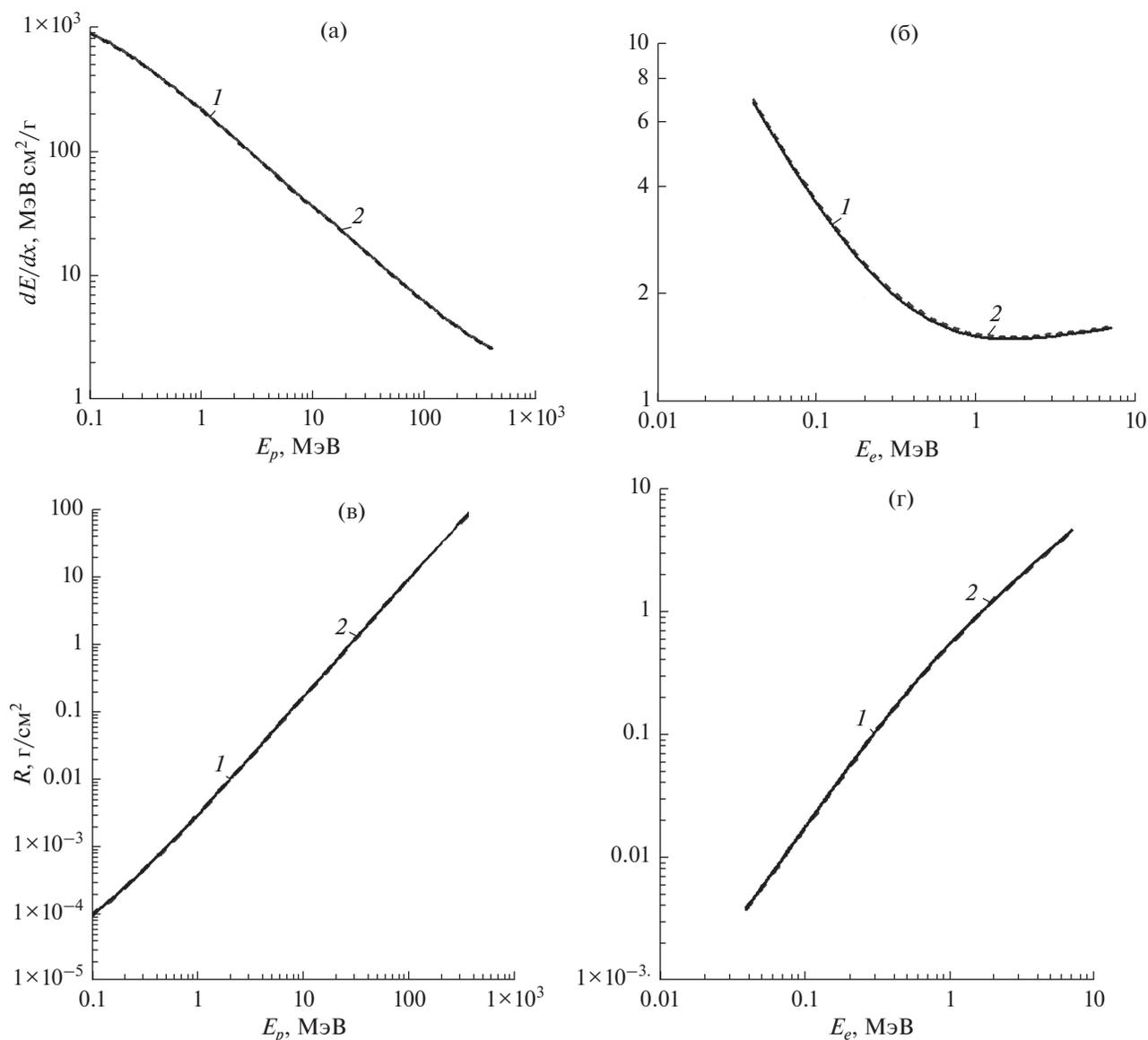


Рис. 1. Свойства защитного стекла К-208: (а) потери протонов, (б) потери электронов, (в) пробег протонов, (г) пробег электронов; 1 – стекло К-208, 2 – SiO₂.

стекле К-208 и SiO₂ сравнимы (различие менее 1%). Это совпадение обусловлено высокой радиационной стойкостью стекла SiO₂. Характер изменения зависимостей длины пробега определяется потерями энергий электронов и протонов. Эти частицы в области больших энергий будут проникать на глубину (толщину) стекла с малыми потерями.

Проведем анализ числовых значений поглощенной годовой дозы в стекле К-208 и SiO₂ приведенных на рис. 2а–2в. Из рис. 2а, 2б следует, что годовая поглощаемая доза для стекла К-208 толщиной 100–500 мкм изменяется от 325.2 до 154.4 рад при воздействии потока протонов с энергиями от 0.1 до 400 МэВ, а при воздействии

потока электронов от 1.4×10^5 рад до 1.7×10^4 рад в диапазоне энергий 0.04–7 МэВ. Эти изменения в зависимости от толщины стекла наблюдаются на рис. 2в.

Из графических зависимостей следует, что в узком интервале энергий протоны (~10 МэВ) и электроны (~0.1 МэВ) поглощаются в тонком поглощающемся слое стекла из-за малой длины пробега, которая связана с изменениями ионизационных и радиационных потерь при взаимодействии протонов и электронов со стеклом, причем их характер различный. В дальнейшем характер зависимости поглощаемой дозы от энергии протонов и электронов переходит в состояние насыщения несмотря на изменение по-

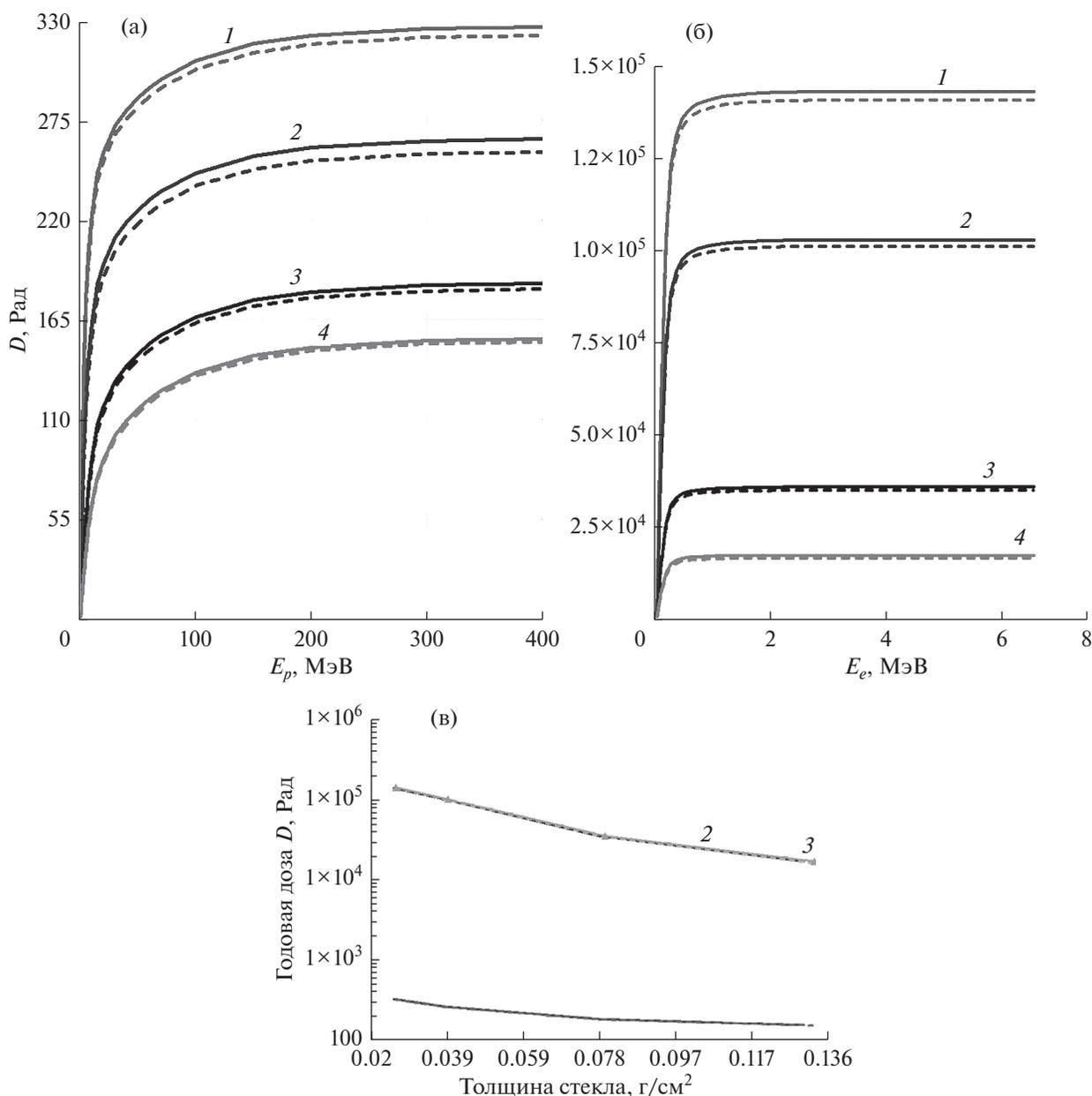


Рис. 2. Годовая поглощенная доза в защитном стекле К-208 при воздействии потока: (а) протонов и (б) электронов на ССО: для толщины К-208 1 – 100 мкм; 2 – 150 мкм, 3 – 300 мкм, 4 – 500 мкм; (в) суммарная поглощенная доза; сплошная линия К-208, пунктирная линия SiO_2 .

тока частиц, участвующих в прохождении внутри стекла. Поглощаемая доза создается малым количеством частиц с большой энергией протонов и электронов. Эти процессы можно объяснить различием механизмами взаимодействия электронов и протонов, участвующих в передачи энергии атомам стекла. Эффективность передачи энергии электронов атомам стекла значительно выше, чем у протонов. Вклад в поглощаемую дозу электронов значительно превосходит в численном значении по сравнению с протонами участвующих во

взаимодействии. Радиационная стойкость защитного стекла К-208 в соответствии многочисленными публикациями [15, 16] обусловлена наличием CeO_2 – 2.0%. В [15] показано, что введение в боросиликатное стекло ионов церия (Ce) и присутствие в матрице двух его зарядовых состояний (Ce^{3+} , Ce^{4+}) в определенном соотношении обеспечивают не только радиационно-оптическую устойчивость, но и отсекают вредное ультрафиолетовое излучение. Однако сравнительные расчетные результаты, приведенные на

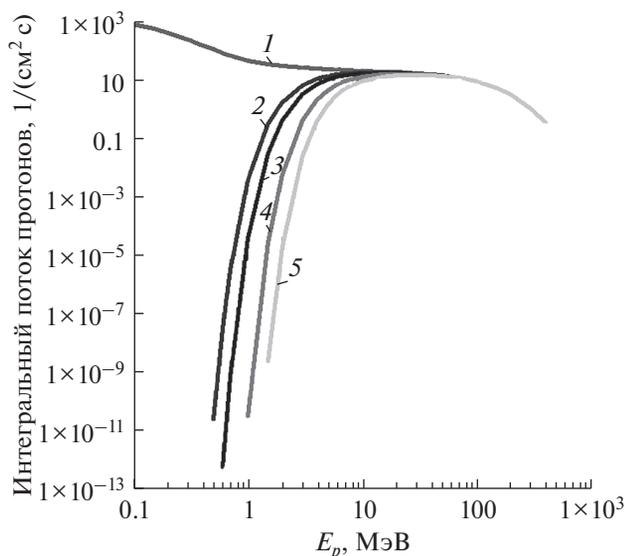


Рис. 3. Интегральный поток протонов ССО на передней поверхности – 1 и на противоположной поверхности защитного стекла К-208 для толщины: 2 – 100 мкм; 3 – 150 мкм, 4 – 300 мкм, 5 – 500 мкм.

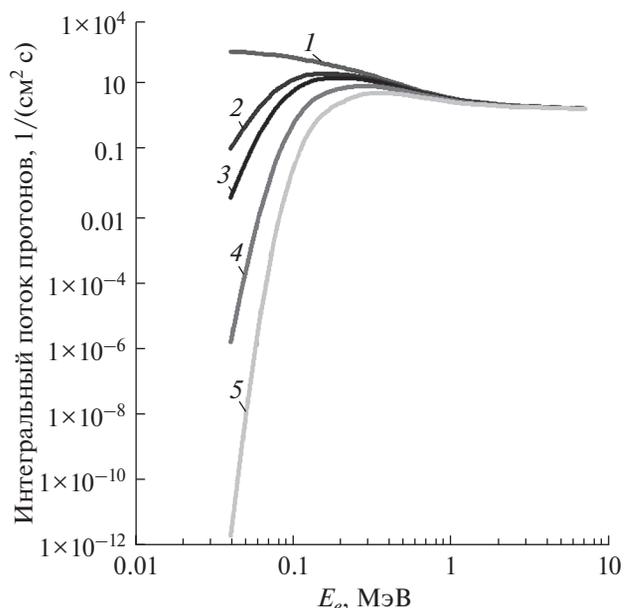


Рис. 4. Интегральный поток электронов ССО на передней поверхности – 1 и на противоположной поверхности защитного стекла К-208 для толщины: 2 – 100 мкм; 3 – 150 мкм, 4 – 300 мкм, 5 – 500 мкм.

рис. 1а–2в величины годовой поглощаемой дозы для защитного стекла К-208 (с CeO_2) и SiO_2 практически не отличаются, это различие составляет менее 1.0%. Следовательно, радиационная стойкость защитного стекла К-208 в основном определяется наличием в нем SiO_2 , как основной компоненты.

Результаты расчета представлены на рис. 3, 4 и в табл. 1 показывает, что протоны проходят в стекле толщиной: 100, 150, 300, 500 мкм с энергией более 2, 3, 4 и 5 МэВ; а электроны проходят в стекле толщиной: 100, 150, 300, 500 мкм с энергией более 0.04, 0.054, 0.082 и 0.11 МэВ соответственно.

Поглощенная доза создается протонами и электронами малых энергий ССО. Число протонов, электронов больших энергий невелико, но их воздействие на фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), датчики освещенности, угла, БРЭА в процессе эксплуатации может привести к появлению в запрещенной зоне полупроводника локальных уровней, дефектов, что приводит к снижению значений таких физических параметров, как проводимость, время жизни носителей и др. Самым чувствительным к воздействию радиации параметром ФЭП является время жизни неосновных носителей заряда.

Таблица 1. Интегральный поток и поглощенная доза в защитном стекле К-208

толщина, мкм	Интегральный поток, $1/\text{см}^2\cdot\text{с}$; в диапазоне энергий от min до max, МэВ		Годовая поглощенная доза, рад; в диапазоне энергий от min до max, МэВ	
	протоны (рис. 3)	электроны (рис. 4)	протоны для max (рис. 3) и 400 МэВ	электроны для max (рис. 4) и 7 МэВ
100	1.70–17.4 (2–15)	1.28–252.4 (0.04–0.158)	245.7–326.3 (15–400)	$(1.03–1.43) \times 10^5$ (0.158–7)
150	3.21–16.7 (3–15)	1.23–185.7 (0.054–0.186)	184.3–264.3 (15–400)	$(7.4–1.03) \times 10^4$ (0.186–7)
300	1.97–15.4 (4–20)	1.0–107.3 (0.082–0.284)	117.3–184.98 (20–400)	$(3.07–3.56) \times 10^4$ (0.284–7)
500	1.4–14.5 (5–30)	1.14–65.3 (0.11–0.339)	101.06–154.4 (30–400)	$(1.58–1.7) \times 10^4$ (0.339–7)

Под действием облучения существенно изменяется режим работы ФЭП и его выходные характеристики. Это обусловлено влиянием радиации на основные физические параметры, от которых зависит эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований влияния ионизирующего, радиационного, тормозного излучений на функционирование наноспутника было установлено:

Изменение интегрального потока протонов, электронов от их энергии в защитном стекле свидетельствуют не только об участии и вкладе в величину поглощаемой энергии, но и о потоке высокоэнергетических прошедших частиц в стекле. Получены результаты расчета интегральных потоков в защитном стекле К-208 и SiO₂ при воздействии протонов и электронов круговой ССО для различных толщин и показана доля прошедших частиц (в приближении однослойной стопы), которые воздействуют на фотоэлектрические преобразователи, радиоэлектронные элементы бортовой радиоэлектронной аппаратуры, датчик освещенности, датчика угла.

Длина пробега, поглощаемая доза протонов, электронов в стекле К-208 при наличии химического состава в соответствии с ОСТ 3-3677-82 и SiO₂ совпадают, различие менее 1%.

Защитные стекла К-208 и SiO₂ толщиной 150 мкм могут быть использованы для обеспечения защиты датчиков освещенности и датчика угла от воздействия орбитальных потоков протонов и электронов в области малых энергий с учетом коэффициента пропускания в оптическом диапазоне. Годовая поглощаемая доза для стекла К-208 и SiO₂ изменяется в допустимых пределах при воздействии потока протонов и электронов, что приемлемо для функционирования радиоэлектронных элементов выполненных на основе кремния для ограниченного времени эксплуатации наноспутника SamSat-ION.

Для защиты радиоэлектронных элементов БРЭА от высокоэнергетического ионизирующего излучения необходимо использовать стандартные методы, основанные на локальном способе защиты для обеспечения гарантированных режимов эксплуатации наноспутника на круговой ССО в течение года.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего

образования, подведомственных Министерству науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Н.В., Панасюк М.И. Космическая радиация и прогнозирование сбое- и отказоустойчивости интегральных микросхем в бортовой аппаратуре космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). 2001. Вып. 1–2. С. 3.
2. Гулько О.Е. Механизмы отказов КМОП ИС при воздействии ионизирующих частиц космического излучения // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2005. В. 1–2. С. 80.
3. Зебрев Г.И. Моделирование дозовых и одиночных радиационных эффектов в кремниевых микро- и нанoeлектронных структурах для цепей проектирования и прогнозирования. Дис. док. техн. наук. М.: МИФИ, 155 с.
4. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с длительными сроками активного существования к воздействию ионизирующих излучений космического пространства / В.И. Лукьяшенко и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2001. В. 3–4. С. 81.
5. Цаплин С.В., Тюлевин С.В., Пиганов М.Н., Болычев С.А. Исследование свойств радиоэлектронных элементов при воздействии ионизационного потока: учеб. Пособие. Изд-во Самарского университета, 2018. 180 с.
6. Анашин В.С. и др. Ионизирующее излучение космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов. Физматлит, 2013. 358 с.
7. Акимов А.А., Гриценко А.А., Юрьев Р.Н. Солнечно-синхронные орбиты – основные возможности и перспективы // Ионосфера. 2015. № 68. С. 29.
8. Цаплин С.В., Болычев С.А. Исследование влияния ионизирующего, тормозного излучений на функционирование бортовой радиоэлектронной аппаратуры наноспутника SamSat-ION при его эксплуатации на круговой солнечно-синхронной орбите. Работа принята в печать для издания в Вестнике Самарского университета.
9. Безродных Е.И., Казанцев С.Г., Семенов В.Т. Радиационные условия на солнечно-синхронных орбитах в период максимума солнечной активности // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М.: ФГУП “НПП ВНИИЭМ”, 2010. Т. 116. С. 23.
10. Хасанишин Р.Х., Новиков Л.С. Изменение спектра пропускания стекла марки К-208 под действием ионизирующих излучений и молекулярных потоков. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 7. С. 83.
11. Беспалов В.И. Лекции по радиационной защите: учебное пособие. Изд-во Томского политехнического университета, 2017, 695 с.
12. Павленко В.И., Едаменко О.Д., Черкашина Н.И., Носков А.В. Суммарные потери энергии реляти-

- вистского электрона при прохождении через полимерный композиционный материал // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 4. С. 101.
13. *Бяков В.М., Степанов С.В., Магомедбеков Э.П.* Начала радиационной химии: учебное пособие. М.: Изд-во РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2013. 192 с.
14. РД 50-25645.216-90. Методические указания. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Метод расчета распределения поглощенной и эквивалентной доз космических излучений по толщине материалов на внешней поверхности космического аппарата на орбитах, проходящих через ЕРПЗ. М.: Изд-во Стандартов, 1990. 10 с.
15. *Мальчукова Е.В., Абрамов А.С., Непомнящих А.И., Теруков Е.И.* Алюмоборосиликатные стекла, содопированные редкоземельными элементами, как радиационно-защитные покрытия солнечных батарей // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. Вып. 6. С. 753.
16. *Арбузов В.И.* Основы радиационного оптического материаловедения: учебное пособие. Изд-во: СПб ГУ ИТМО. 2008. 284 с.