

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СЛОЖНОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Кузнецов Виталий Андреевич (otd4@expd.vniief.ru), Величко Клавдия Степановна, Гусаков Алексей Владимирович, Данченко Николай Григорьевич, Демьянов Сергей Александрович, Плужан Карлен Гагикович, Силаев Алексей Васильевич, Солдатенков Илья Сергеевич, Червяков Никита Олегович

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Одним из важнейших свойств, определяющих срок активного существования космических аппаратов, является радиационная стойкость аппаратуры и приборов из состава космического аппарата. Мероприятия по оценке радиационной стойкости позволяют на этапах разработки определить уязвимые к радиационному воздействию элементы прибора, не обеспечивающие заданный срок активного существования.

В работе рассмотрена задача оценки радиационной стойкости сложнофункциональных приборов космических аппаратов на примере разрабатываемой аппаратуры космической оптической линии связи для космического эксперимента «ЭКОЛИНС». Описан подход и алгоритм проведения расчетно-аналитической оценки радиационной стойкости.

В ходе работы создана расчетная модель, учитывающую трехмерную геометрию и внутреннюю структуру. При помощи данной модели проведен расчет локальных радиационных условий на составные части аппаратуры в зависимости от их расположения.

Оценка радиационной стойкости проведена с использованием материалов ОСТ 134-1034-2012 и РД 134-0139-2005 с учетом коэффициента запаса по дозовой стойкости ($K_3 = 3$) и вероятности безотказной работы ($R_{БР} = 0,92$). Представлены результаты оценки радиационной стойкости аппаратуры космической оптической линии связи.

Ключевые слова: радиационная стойкость, космические аппараты, локальные радиационные условия, метод Монте-Карло, трехмерная модель.

ESTIMATION OF RADIATION RESISTANCE OF COMPLEXLY FUNCTIONING SPACE VEHICLE DEVICES

Kuznetsov Vitaliy Andreevich (otd4@expd.vniief.ru), Velichko Klavdiya Stepanovna, Gusakov AlekseyVladimirovich, Danchenko Nikolay Grigorievich, Dem'yanov Sergey Aleksandrovich, Pluzyan Karlen Gagikovich, Silaev Aleksey Vasilievich, Soldatenkov Ilya Sergeevich, Chervyakov Nikita Olegovich

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

One of most important properties, specifying active life of space vehicles, is radiation resistance of equipment and devices entering a space vehicle structure. At the development stages activities on estimation of radiation resistance allow determination of susceptible to radiation effect device elements, not providing a specified active life.

The paper describes an estimation problem of radiation resistance for complexly functioning space vehicle devices demonstrated with developed space optical communication link equipment for space experiment «ECOLINS». Approach and algorithm of evaluating radiation resistance was described.

As a part of the work a calculation model was developed, which took into account three-dimensional geometry and an internal structure. Using this model we calculated local radiation conditions per equipment component parts depending on its location.

Radiation resistance estimation was performed with the use of materials OST 134-1034-2012 and RD/ПД 134-0139-2005 with regard to the dose resistance safety factor ($K_3 = 3$) and probability of survival ($P_s = 0.92$). Results of radiation resistance estimation of space optical communication link equipment are presented.

Key words: radiation resistance, space vehicles, local radiation conditions, Monte-Carlo method, three-dimensional model.

Введение

Современные приборы космических аппаратов (КА) могут сочетать в себе узлы различного функционального назначения, построенных на различных физических принципах. Функциональные узлы таких приборов предполагают использование принципиально разной элементной базы и широкого набора материалов. Задачи по оценки радиационной стойкости (РС) сложнофункциональных приборов КА требуют комплексного подхода, сочетающего в себе, как определение локальных радиационных условий (ЛРУ), так и анализ РС различных групп материалов и элементной базы.

Рассмотрена задача оценки РС сложнофункциональных приборов КА на примере аппаратуры космической оптической линии связи (КОЛС) для космического эксперимента «ЭКОЛИНС» со сроком активного существования (САС) 3 года начиная с 2024 г. Аппаратура КОЛС предназначена для опытной отработки в натуральных условиях технических и эксплуатационных характеристик связи между бортом российского сегмента международной космической станции (МКС) и бортом транспортного грузового корабля «Прогресс». Аппаратура осуществляет функции, как дуплексной передачи информации, так и высокоточной автономной навигации и ориентации, обеспечивающей выполнение задач космического эксперимента «ЭКОЛИНС» [1–3] на средствах российского сегмента МКС.

Разрабатываемая аппаратура КОЛС состоит из двух идентичных по конструкции терминалов – терминала станции и терминала грузового корабля. Терминал станции устанавливается на российском сегменте МКС. Терминал грузового корабля устанавливается на транспортный грузовой корабль «Прогресс». Так как аппаратура состоит из двух идентичных терминалов связи, достаточно оценить РС одного из них для наихудших радиационных условий.

Терминал связи представляет собой сложнофункциональную систему, состоящую из различных частей и узлов, связанных между собой и объ-

единенных общим корпусом. В составные части терминала связи входят: радиоэлектронная аппаратура, выполненная в собственном корпусе, отдельные платы с электрорадиоизделиями (ЭРИ), оптическая система и электротехнические материалы.

Алгоритм оценки радиационной стойкости терминала связи

Радиационное воздействие в околоземном пространстве является многокомпонентным и состоит из потоков космических лучей, образованных галактическими космическими лучами и солнечными космическими лучами, возникающими при интенсивных хромосферных вспышках, а так же ионизирующего излучения (ИИ) радиационных поясов Земли. Основными радиационными эффектами, влияющими на работоспособность аппаратуры, являются дозовые эффекты (ДЭ) и одиночные радиационные эффекты (ОРЭ).

ДЭ связаны с поглощением энергии в веществе, как за счет ионизации, так и за счет структурных повреждений и будут проявляться во всех элементах аппаратуры. Методика расчетной оценки РС по ДЭ для ЭРИ изложена в [4]. Для оценок РС по ДЭ для оптических и электротехнических материалов применялись аналогичные подходы, основанные на расчете коэффициента запаса по дозовой РС.

ОРЭ вызываются одиночными высокоэнергетическими ионизирующими частицами космического пространства (КП), и их воздействие носит вероятностный характер, связанный со случайным попаданием отдельных частиц в чувствительные микрообъемы элементов ЭРИ. ОРЭ в ЭРИ можно разделить на обратимые и необратимые, которые в свою очередь приводят к одиночным сбоям и катастрофическим отказам аппаратуры. Методика расчетной оценки по ОРЭ для ЭРИ изложена в [5].

Алгоритм расчетно-аналитической оценки РС терминала связи в соответствии с [4, 5] показан на рис. 1.

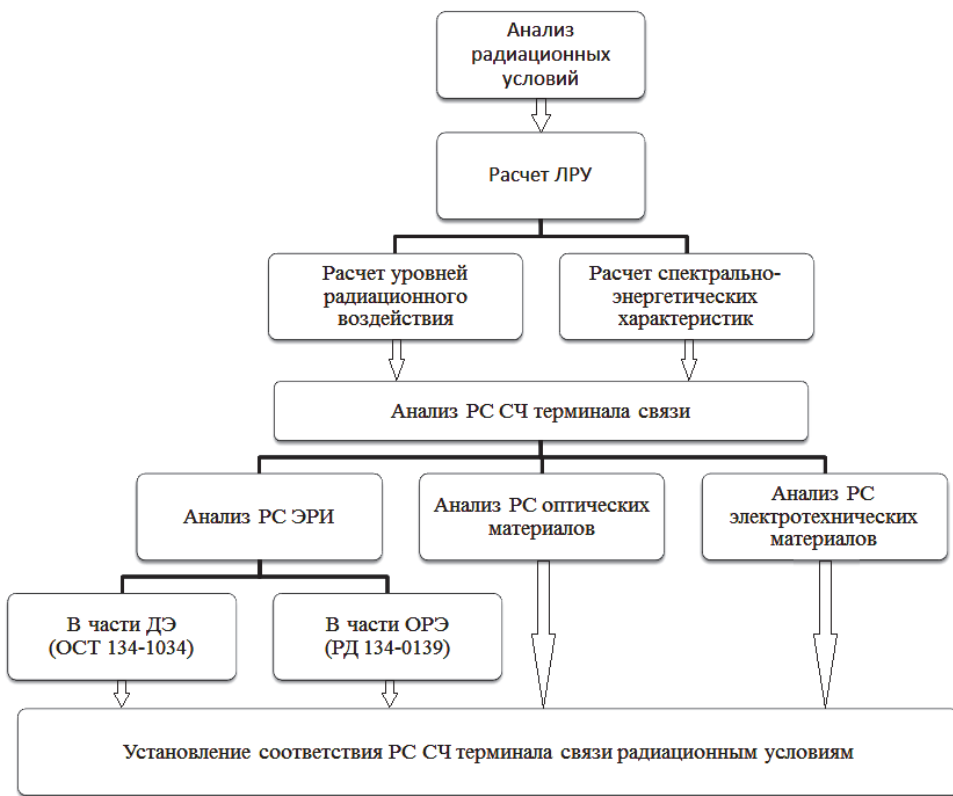


Рис. 1. Алгоритм расчетно-аналитической оценки РС терминала связи

Радиационные условия включают в себя: источники радиационного воздействия КП, их интенсивность и спектрально-энергетические характеристики. Подробный отчет по радиационным условиям для российского сегмента МКС изложен в [6].

Расчет ЛРУ заключается в установлении уровней поглощенных доз и спектрально-энергетических характеристик электронов, протонов и вторичного гамма-излучения для составных частей (СЧ) терминала связи. Уровни поглощенных доз на СЧ терминала связи рассчитаны лучевым методом [7]. Для определения спектрально-энергетических характеристик радиационного воздействия для СЧ терминала связи, а так же для оценки влияния вторичного гамма-излучения проведены расчеты методом Монте-Карло [8].

Результатом оценки РС является установление соответствия или несоответствия РС терминала связи и его СЧ уровням радиационного воздействия с учетом коэффициента запаса по дозовой радиационной стойкости и вероятности безотказной работы.

Расчетная модель терминала связи

Терминал связи представляет собой конструкцию со сложной геометрией и с неоднородной радиационной защитой. Для учета влияния взаимной экранировки, построена расчетная модель терминала связи на основе 3D-модели по следующим принципам:

- модель учитывает: внешний и внутренний каркас, состоящий из металлических пластин различной толщины, корпуса РЭА и защитные экраны;
- элементы сложной формы преобразованы в элементы простой формы со схожими экранирующими функциями, учитывающие масса-габаритные характеристики элемента;
- за основу материала всех конструкций терминала взят алюминиевый сплав АМгб (плотность сплава $\rho_0 = 2,65 \text{ г/см}^3$);
- консервативная модель расчета по наихудшему случаю не учитывает внутренние элементы, не относящиеся к элементам защиты.

При преобразовании элементов конструкций терминала сложной формы в элементы простой формы изменяется их объем. Для сохранения аналогичных экранирующих свойств необходимо сохранение массы элемента защитной конструкции. Сохранение массы при изменяемом объеме элемента защитной конструкции в расчетной модели обеспечивается изменением плотностью материала. Плотности элементов конструкций терминала связи рассчитывались по формуле (1):

$$\rho_{\text{элемент}} = 2,65 \cdot \frac{V_0}{V_{\text{элемент}}}, \quad (1)$$

где V_0 – объем элемента в соответствии с 3D-моделью; $V_{\text{элемент}}$ – объем элемента расчетной модели.

Расчет уровней радиационного воздействия лучевым методом

В лучевом методе используется зависимость поглощенной дозы от массовой толщины сферического защитного экрана и для его реализации необходим набор данных о массовой толщине окружающих интересующую область слоев вещества, находящихся между рассматриваемой точкой и внешней поверхностью конструкции. Выбран вариант реализации лучевого метода с использованием расчетов Монте-Карло [9].

Зависимость поглощенной дозы от массовой толщины сферической защиты экрана для российского сегмента МКС [6] аппроксимируется функцией (2):

$$D(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\alpha_i t}, \quad (2)$$

где A_i и α_i – параметры аппроксимирующей функции, определяемые методом наименьших квадратов по известному набору значений $D(t)$; t – массовая толщина сферической защиты.

По значениям параметров аппроксимации (α_i) выбирается энергия источника фотонного излучения исходя из условия (3):

$$\alpha_i = \mu_{Al}(E_i), \quad (3)$$

где μ_{Al} – массовый коэффициент поглощения фотонного излучения с энергией E_i для алюминия.

Аппроксимация зависимости поглощенной дозы от массовой толщины сферической защиты экрана показана на рис. 2.

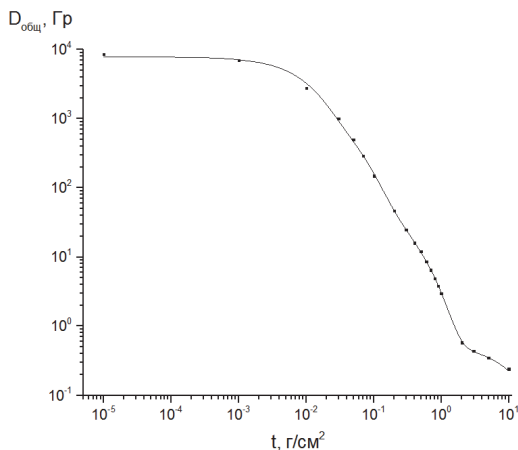


Рис. 2. Зависимость полной поглощенной дозы от массовой толщины сферической защиты экрана [6]

Значения доз в СЧ терминала связи за 1 год активного существования рассчитаны по формуле (4):

$$D(r) = \sum_{i=1}^n A_i n_i, \quad (4)$$

где $D(r)$ – расчетное значение дозы в точке \vec{r} от электронов и протонов за 1 год активного существования; n_i – доля фотонов, вышедших из модели конструкции без взаимодействия с веществом, для каждого источника.

Расчетные значения суммарных поглощенных доз ($D(r)$) для СЧ терминала связи отличаются друг от друга не более 11 %. В качестве общей поглощенной дозы для внутренних частей терминала связи выбрано максимальное значение ($D_{e,p}$) – 0,5 Гр за 1 год активного существования. Эффективная массовая толщина защиты в соответствии с аппроксимирующей функцией при уровне поглощенной дозы 0,5 Гр соответствует значению – 2,38 г/см².

Для приведенного значения эффективной массовой толщины защиты, в соответствии с данными по радиационным условиям для российского сегмента МКС [6], отобраны уровни воздействия характеристик КП, влияющих на ОРЭ (по зависимостям плотностей потоков тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетических протонов (ВЭП) от массовой толщины защиты).

Средняя плотность потока ВЭП (в районе Южно-атлантической аномалии) – $1,6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Максимальная плотность потока ВЭП (при солнечной вспышке) – $7,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Средняя плотность потока ТЗЧ – $1,5 \cdot 10^{-1} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Максимальная плотность потока ТЗЧ (при солнечной вспышке) – $1,9 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Расчет спектрально-энергетических характеристик радиационного воздействия методом Монте-Карло

Взаимодействие заряженных частиц (ЗЧ) с защитными экранами и конструкциями терминала связи порождает вторичные гамма-кванты, приводящее к дополнительному радиационному воздействию и увеличению поглощенной дозы в чувствительных элементах. Проведен расчет величины поглощенной дозы для внутренних частей терминала связи с учетом вторичного гамма-излучения и погрешности расчета. Рассчитаны энергетические спектры электронов, протонов и гамма-квантов для внутренних частей терминала связи.

Расчеты на воздействие электронов проведены с помощью программного комплекса СМК методом Монте-Карло. Расчеты на воздействие протонов проведены с помощью программного комплекса RHITS методом Монте-Карло. Распределение воздействия ИИ – изотропное. Энергетические спектры ЗЧ для СЧ терминала связи показаны на рис. 3. Энергетические спектры вторичных гамма-квантов для СЧ терминала связи показаны на рис. 4. Результаты слабо отличаются для различных областей терминала связи, поэтому приведены их средние значения (отклонение от среднего значения не более 15 %).

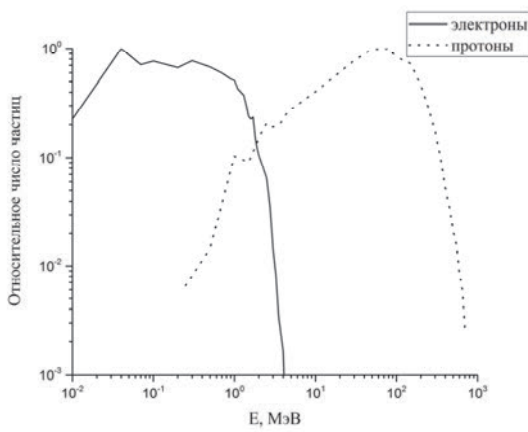


Рис. 3. Дифференциальные энергетические спектры ЗЧ для внутренних частей терминала связи

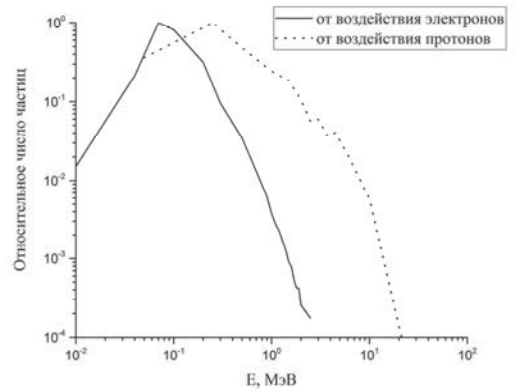


Рис. 4. Дифференциальные энергетические спектры вторичных гамма-квантов для внутренних частей терминала связи

Поглощенная доза в кремнии от вторичного гамма-излучения рассчитана по формуле (5):

$$D_{\gamma} = d_{\gamma_e} \cdot K_{e \rightarrow \gamma} \cdot \Phi_e^{\text{КП}} + d_{\gamma_p} \cdot K_{p \rightarrow \gamma} \cdot \Phi_p^{\text{КП}}, \quad (5)$$

где d_{γ_e} , d_{γ_p} – равновесная поглощенная доза в кремнии, приходящаяся на единичный флюенс источника вторичного гамма-излучения от электронов и протонов; $K_{e \rightarrow \gamma}$, $K_{p \rightarrow \gamma}$ – коэффициенты вторичного гамма-излучения от электронов и протонов показывают, какой флюенс вторичных гамма-квантов в терминале связи приходится на единичный флюенс ЗЧ источника; $\Phi_e^{\text{КП}}$, $\Phi_p^{\text{КП}}$ – полный флюенс электронов и протонов в точке КП для российского сегмента МКС.

Расчетное значение поглощенной дозы вторичного гамма-излучения от воздействия электронов и протонов за 1 год активного существования составляет $\sim 0,025$ гр.

Итоговое значение поглощенной дозы для внутренних частей терминала связи за САС (3 года) с учетом погрешности и вторичного гамма-излучения рассчитано по формуле (6):

$$D_{\text{внутр}}^{\text{САС}} = 3 \cdot \frac{D_{e,p} + D_{\gamma}}{1 - \delta}, \quad (6)$$

где δ – погрешность расчета поглощенной дозы ($\delta = 0,1$ при доверительной вероятности $P = 0,95$); $D_{e,p}$ – расчетное значение поглощенной дозы от электронов и протонов за 1 год активного существования для внутренних частей терминала связи; D_{γ} – расчетное значение поглощенной дозы от вторичного гамма-излучения за 1 год активного существования для внутренних частей терминала связи.

Значение поглощенной дозы для внутренних частей терминала связи за САС ($D_{\text{внутр}}^{\text{САС}}$) составляет – 1,75 гр.

Результаты оценки радиационной стойкости терминала связи

Оценка радиационной стойкости проведена с использованием материалов ОСТ 134-1034-2012 и РД 134-0139-2005 с учетом коэффициента запаса по дозовой стойкости ($K_3 = 3$) и вероятности безотказной работы ($P_{БР} = 0,92$). Для оценок РС ЭРИ из состава терминала связи использовались данные, предоставленные АО «ОРКК» «НИИ КП» из [10]. Для оценок РС оптических и электротехнических материалов использовались данные из [11]–[14]. Анализ показал необходимость проведения испытаний для подтверждения радиационной стойкости терминала связи по дозовым и одиночным эффектам.

Заключение

В настоящем докладе показан алгоритм проведения расчетно-аналитической оценки РС терминала связи, а также представлены результаты расчетов ЛРУ.

Рассчитаны уровни радиационного воздействия на СЧ терминала связи. Для внутренних частей терминала расчетный уровень дозового воздействия составил 1,75 Гр за САС. Уровень радиационного воздействия по одиночным эффектам соответствует средней плотности потока протонов $1,6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, максимальной плотности потока протонов (при солнечной вспышке) $7,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, средней плотности потока ТЗЧ $1,5 \cdot 10^{-1} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, максимальной плотности потока ТЗЧ (при солнечной вспышке) $1,9 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Рассчитаны энергетические спектры электронов, протонов и вторичных гамма-квантов для внутренних частей терминала связи. Приведенные спектры важно учитывать при подготовке к испытаниям РС терминала связи или его СЧ.

Список литературы

1. Королев Б. В., Лопота В. А. Информационное обеспечение пилотируемых космических полетов / X Международная научно-практическая конференция «Пилотируемые полеты в космос» // Сборник тезисов. Звездный городок: ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина», 2013.

2. Быстров М. И., Королев Б. В., Николаев В. В. Экспериментальное подтверждение в натуральных условиях тактико-технических и эксплуатационных характеристик космической оптической линии связи между космическими аппаратами / X Международная научно-практическая конференция «Пилотируемые полеты в космос» // Сборник тезисов. Звездный городок: ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина», 2013.

3. Королев Б. В. Технология работы космической оптической линии связи для повышения оперативности управления и получения информации потребителем в процессе функционирования космических средств // Космическая техника и технологии. 2014. Вып. 1. С. 39–47.

4. ОСТ 134-1034-2012 Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам. С. 37.

5. РД 134-0139-2005 Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы оценки стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам С. 79.

6. Объединенный документ НАСА/РКА по спецификации и стандартам для Российского сегмента МКС SSP 500094.

7. Хатулев В. А., Завора Ю., Загорков А. Н. и др. Методика расчета поглощенных доз ионизирующих излучений космического пространства с использованием 3D-моделей космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на электронную аппаратуру. 2011. Вып. 1. С. 12–18.

8. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П., Горбунов А. В., Залялов А. Н., Иванов Н. В., Малькин А. Г., Рослов В. И., Семенова Т. В., Субботин А. Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ СМК № 2011610500. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» // Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 11 января 2011 г.

9. Галихина О. А., Лазарев С. А., Залялов А. Н. Использование программ метода Монте-Карло для расчетов поглощенных доз лучевым методом // ВАНТ. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2018. Вып. 3. С. 11–14.

10. Отраслевая информационно-справочная система по стойкости ЭКБ к ионизирующим излучениям космического пространства (www.kosrad.ru).

11. Ромашова В. Б., Жукова М. О. Обзор радиационно-стойких волокон от зарубежных и отечественных производителей. // Санкт-Петербургский Государственный Университет Аэрокосмического Приборостроения, АО «АО «ЛЛС»», ООО «ОЭС Спецпоставка».

12. Акишин А. И., Новиков Л. С., Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. М.: Знание, 1983. С. 64.

13. Новиков Л. С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов. М.: Университетская книга, 2010. С. 192.

14. Кулаков В. М., Ладыгин Е. А., Шаховцов В. И., Вологдин Э. Н., Андреев Ю. Н. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. М.: Советское радио, 1980. С. 224.