

ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НАНОСПУТНИКА

© 2021

С. В. Цаплин кандидат физико-математических наук, заведующий межкафедральной учебно-научной лабораторией «Взаимодействие излучения с веществом и радиационной стойкости материалов»; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; tsaplin56@yandex.ru

С. А. Болычев ведущий инженер-программист межкафедральной учебно-научной лаборатории «Взаимодействие излучения с веществом и радиационной стойкости материалов»; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; bolychevsa@mail.ru

Приводятся результаты расчёта по исследованию влияния ионизирующего, тормозного излучений на функционирование наноспутника, полученные при выполнении проекта 0777-2020-0018 в 2020 г. Приводится сравнительный анализ результатов расчёта удельных ионизационных, радиационных потерь энергии протонов (от 0,1 до 400 МэВ) и электронов (от 0,04 до 7 МэВ), а также их длины пробега в алюминии, полученные по формулам различных авторов, а также из базы данных материалов Национального института стандартов и технологий. По результатам анализа вычисляется годовая доза в алюминиевой конструкции наноспутника SamSat – ION, находящейся на круговой солнечно-синхронной орбите (ССО). В основе всех расчётов используются данные энергетических спектров протонов и электронов ССО, приведённые в информационной системе Spenvis (Европейское космическое агентство). Получены результаты расчёта интегральных потоков в алюминии при воздействии протонов и электронов круговой ССО для различных толщин, показана доля прошедших частиц в приближении однослойной стопы. Проведена оценка радиационной стойкости радиоэлектронных элементов ISL70321SEH, ISL73321SEH и Virtex-4QV, Virtex-5QV, входящих в состав блоков радиоэлектронной аппаратуры SamSat – ION и её возможности функционирования в течение года.

Ионизационные, радиационные потери; тормозное излучение; поглощённая доза; эквивалентная доза; радиационные пояса Земли; радиационная защита; радиоэлектронные элементы; бортовая аппаратура; малые космические аппараты

Цитирование: Цаплин С.В., Болычев С.А. Оценка и анализ влияния ионизирующего излучения на функционирование бортовой радиоэлектронной аппаратуры наноспутника // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 3. С. 77-96. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-77-96

Введение

Малые космические аппараты (МКА) функционируют в условиях воздействия потоков электронов и ионов в широком диапазоне энергий ($0,001 - 10^5$ 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, что является одной из главных причин возникновения отказов в работе блоков радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) КА и уменьшения сроков активного существования аппаратов [1; 2].

Безотказность элементной базы, состоящей из тысяч компонентов, и электронной компонентной базы, в составе которой несколько миллионов транзисторных структур

радиоэлектронной бортовой аппаратуры, определяет гарантийный срок службы КА [4 – 9]. При этом требуется обеспечение радиационной устойчивости электронно-компонентной базы (ЭКБ) при ограниченной потребляемой мощности и массогабаритных характеристиках. Известно [10; 11], что гарантийный срок пребывания КА на околоземной орбите или при межпланетном полёте зависит от выбора условий эксплуатации, применения радиационно-стойких электронных компонентов в составе бортовой радиоэлектронной аппаратуры и методики испытания, прогнозирования. На материалы и элементы оборудования, находящиеся на поверхности КА, значительное радиационное воздействие оказывают также электроны и ионы горячей магнитосферной плазмы с энергиями $\sim 1 - 100$ кэВ. В зависимости от условий эксплуатации КА на орбите интенсивность космической радиации различна.

Известно [2 – 4], что в околоземном пространстве МКА подвергается воздействию ионизирующего излучения (ИИ), которое представляет собой поток первичных заряженных частиц (электроны, протоны и тяжёлые заряженные частицы), и вторичных частиц – результата ядерных превращений, связанных с первичными частицами. В результате воздействия ИИ на бортовую радиоэлектронную аппаратуру вследствие ионизационных и ядерных потерь энергии первичных и вторичных частиц в чувствительных элементах наблюдаются различные сбои и отказы [3; 4].

Наибольшее предпочтение для выбора условия эксплуатации МКА отдают низким околоземными круговым и эллиптическим солнечно-синхронным орбитам (ССО) [4; 12]. Целесообразность и привлекательность солнечно-синхронных орбит для движения МКА обусловлены линией светораздела, которая отделяет освещённую часть от неосвещённой части Земли – за счёт постоянного движения МКА в дневной области, что приводит к эффективному использованию солнечных батарей. ССО – орбита искусственного спутника Земли (ИСЗ), имеющая постоянную ориентацию относительно Солнца, используется для съёмки объектов на поверхности Земли при решении задач дистанционного зондирования Земли и проведения экспериментов по обнаружению космического мусора, исследованию процессов, происходящих на Солнце.

Основные эффекты, влияющие на работоспособность бортовой радиоэлектронной аппаратуры

Основные эффекты, образующиеся в результате воздействия ионизирующего излучения на радиоэлектронную аппаратуру (РЭА), связаны с ионизационными и ядерными потерями энергии первичных и вторичных частиц в активных и пассивных областях полупроводниковых приборов (ПП) и интегральных схем (ИС), входящих в состав РЭА [2; 3; 13]. Эти эффекты могут вызвать параметрический отказ ПП и ИС вследствие накопления дозы ИИ, а также возникновение одиночных сбоев и отказов от воздействия отдельных высокоэнергетических ядерных частиц. Кроме того, могут наблюдаться: изменение прозрачности оптических сред (радиационное окрашивание и растрескивание оптических стекол); световые помехи в оптико-электронной аппаратуре вследствие радиолюминесценции и воздействия ядер космических излучений в оптических деталях; пробой и растрескивание изолирующих материалов вследствие электризации диэлектриков и протекания радиационно-стимулированных химических реакций; уменьшение мощности источников питания из-за деградации солнечных батарей [1].

Влияние космической плазмы проявляется через электризацию диэлектрических защитных и термоизолирующих покрытий. При достижении критического заряда происходит внутренний локальный электростатический пробой, который может привести к непосредственному отказу или сбою прибора. Кроме того, возможен косвенный эффект, вызванный действием электромагнитного поля, возникающего при пробое [14].

Таким образом, на функционирование РЭА КА воздействует много различных факторов, каждый из которых может вызвать сбой или отказ всей системы, и в общем случае необходимо принимать во внимание все действующие факторы, однако влияние двух первых из перечисленных факторов (ионизирующее излучение и космическая плазма) является преобладающим.

Воздействие корпускулярных частиц на поверхность КА приводит к образованию вторичных частиц излучения, которые могут привести к сбою, отказу бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) [4; 11; 15]. Например, защита солнечных батарей обеспечивается радиационно-стойким стеклом. Однако поглощённая доза в стекле, вызванная воздействием корпускулярных частиц, накапливается и может привести к изменению работоспособности БРЭА. Для разработки аппаратуры, способной устойчиво и длительно работать в условиях высокого уровня радиации, необходимо знание состава ионизирующего излучения, его энергетического, пространственного распределения и механизмов воздействия на электронные компоненты, а также конструкционные и электроизоляционные материалы. При проектировании БРЭА на этапе эскизного проекта проводятся лабораторные испытания на воздействие ионизирующих частиц в соответствии с методикой проведения испытаний на радиационную стойкость радиоэлектронных компонент и условиями эксплуатации КА [4]. По результатам испытаний проводится анализ и с помощью математических моделей прогнозируется работоспособность БРЭА. Исследование влияния поглощённой дозы на БРЭА является актуальной задачей, поскольку такой прогноз особенно очевиден при полётах не только в пределах магнитосферы Земли, но и за её пределами, когда космический аппарат пересекает радиационные пояса, в которых интенсивность ионизирующих излучений со временем изменяется в десятки и сотни раз [14].

Результаты исследований [2; 3; 13; 14] показывают, что воздействие ИИ на электронные блоки бортовой аппаратуры КА приводит к изменению состояния электронного компонента, вызванному одной частицей ионизирующего излучения (ион, фотон, протон, нейтрон и т.д.), которая сталкивается с чувствительным узлом системы, таким как микропроцессор, полупроводниковая память или мощный транзистор. Изменение состояния происходит из-за возникновения свободного заряда, который появляется в результате ионизации внутри или рядом с чувствительным узлом системы или логическим элементом, таким как бит памяти. В итоге устройство выдаёт ошибку. Эту единичную ошибку и называют «нарушением в результате единичного события», SEU или просто случайным сбоем (soft error). Какой должна быть радиационная защита (применяя радиационно-стойкие материалы)? Исследование радиационной стойкости радиоэлектронных компонентов БРЭА является актуальной задачей не только сегодняшнего дня, но и на будущее, поскольку элементная база постоянно совершенствуется и создаётся на новой технологической основе.

Эффекты, оказывающие негативное влияние на материалы БРЭА МКА при воздействии космической радиации, можно разделить на два класса: эффекты, обусловленные суммарной поглощённой дозой радиации, и эффекты, обусловленные мощностью поглощённой дозы [10; 16 – 19]. Дозовые эффекты проявляются в постепенной деградации полупроводниковых и диэлектрических материалов в первую очередь. К эффектам, обусловленным мощностью дозы, также можно отнести эффекты от воздействия на радиоэлектронные элементы бортового оборудования одиночных заряженных частиц. Наличие одиночного сбоя определяется линейными потерями энергии (ЛПЭ) частицы в объёме чувствительного элемента.

В рамках данной работы специальное рассмотрение одиночных сбоев не проводится, однако используемые расчётные методы позволяют вычислять спектры ЛПЭ и исследовать эффекты воздействия одиночных частиц.

Помимо дозовых эффектов существует и другой механизм воздействия космической радиации, связанный с накоплением объёмного заряда в диэлектрических элементах конструкции КА, что может стать причиной сбоя электроники КА, нарушения передачи сигналов и т.д.

Постановка задачи

Конструкция наноспутника с массогабаритными размерами, соответствующего стандарту CubeSat 3U, выполнена из алюминиевого материала различной толщины. На внешней поверхности наноспутника расположены фотоэлектрические преобразователи, датчики освещённости для определения положения по отношению к Солнцу.

В рамках данной работы специальное рассмотрение одиночных сбоев не проводится, однако используемые расчётные методы позволяют вычислять спектры линейных потерь энергии и исследовать эффекты воздействия одиночных частиц.

Для изучения влияния на работоспособность БРЭА оценим потоки протонов и электронов круговой ССО.

Спектральные энергетические спектры протонов, электронов, радиационных поясов Земли для круговой ССО вычислялись с помощью программного обеспечения Sprenvis Европейского космического агентства (ЕКА) [20], результаты расчётов приведены на рис. 1 – 4.

В соответствии с данными о радиационных поясах Земли, представленными на рис. 2 – 4, наноспутник SamSat – ION, находясь в околоземном пространстве на ССО, испытывает влияние ионизирующего излучения, которое представляет собой потоки первичных заряженных частиц: протоны с энергиями от 0,1 до 400 МэВ; электроны с энергиями от 0,04 до 7 МэВ. При этом годовой флюенс протонов находится в интервале от 10^7 до $2,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, а электронов – от $6 \cdot 10^5$ до $5,3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

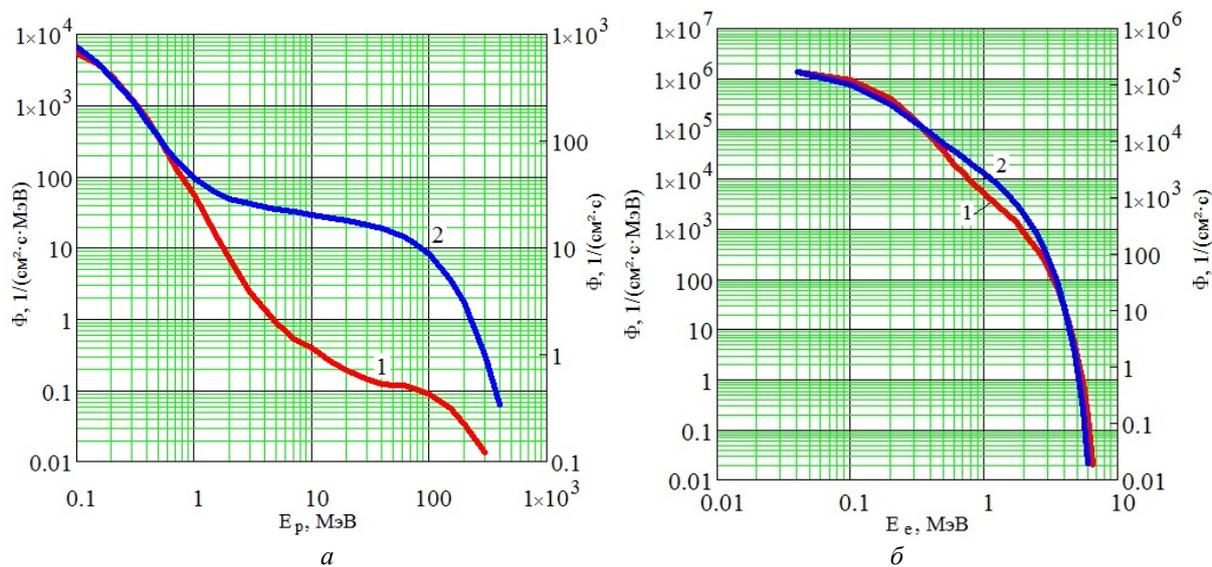


Рис. 1. Потоки протонов и электронов ССО: 1 – дифференциальный; 2 – интегральный; Φ – поток (протонов, электронов); E_p – энергия протона; E_e – энергия электрона

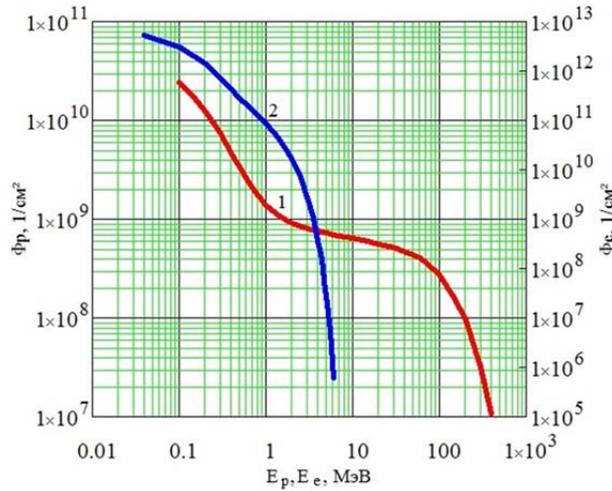


Рис. 2. Годовые флюенсы ССО: 1 – протоны; 2 – электроны

В данной работе исследуются воздействия потоков протонов с энергиями от 0,1 до 400 МэВ, электронов с энергиями от 0,04 до 7 МэВ и соответствующие годовые флюенсы протонов в интервале от 10^7 до $2,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и электронов – от $6 \cdot 10^5$ до $5,3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ на алюминиевую конструкцию, расположенную на внешней поверхности наноспутника в соответствии с его условиями эксплуатации на круговой солнечно-синхронной орбите высотой 510 км, с наклоном $97,447^\circ$, 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 в естественном радиационном поясе Земли (ЕРПЗ) и хорошо защищён от солнечных космических лучей (СКЛ) геомагнитным полем [21]. По данным этих потоков проводилась оценка радиационной стойкости материалов конструкции SamSat – ION. Поскольку в основе конструкционного материала используется в основном алюминий, то этот материал будет предметом дальнейших исследований по обеспечению защиты при воздействии потоков протонов и электронов в широком диапазоне энергий ССО.

Оценка радиационной стойкости

Удельные ионизационные и радиационные потери энергии электронов и протонов круговой ССО в соответствии с данными программы потоков (рис. 1, 2) Spenvis ЕКА в алюминиевой конструкции наноспутника SamSat – ION толщиной 0,5; 1; 1,5 мм определялись по формулам, приведённым в работах [22; 23]. Пробеги электронов и протонов с начальной кинетической энергией E_0 , движущихся в алюминии, определялись как длина пути, который они проходят до полной остановки, и рассчитывались по формуле:

$$R_i(E_0) = \int_0^{E_0} \left(-\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE, \tag{1}$$

где $i = e, p$ – электроны, протоны соответственно;

$$\left(\frac{dE}{dx} \right) = \sum_i \left[\left(\frac{dE_i}{dx} \right)_{\text{ион}} + \left(\frac{dE_i}{dx} \right)_{\text{рад}} \right] - \text{суммарные потери энергии.}$$

Определены ионизационные, радиационные и суммарные потери энергии (рис. 3, 4), а также длина пробега протонов и электронов в алюминии для диапазона энергий круговой ССО. Проведено сравнение полученных результатов с результатами расчётов, представленных в работах [25; 26], и данными базы данных по материалам NIST [27], результаты расчётов представлены на рис. 5 – 7.

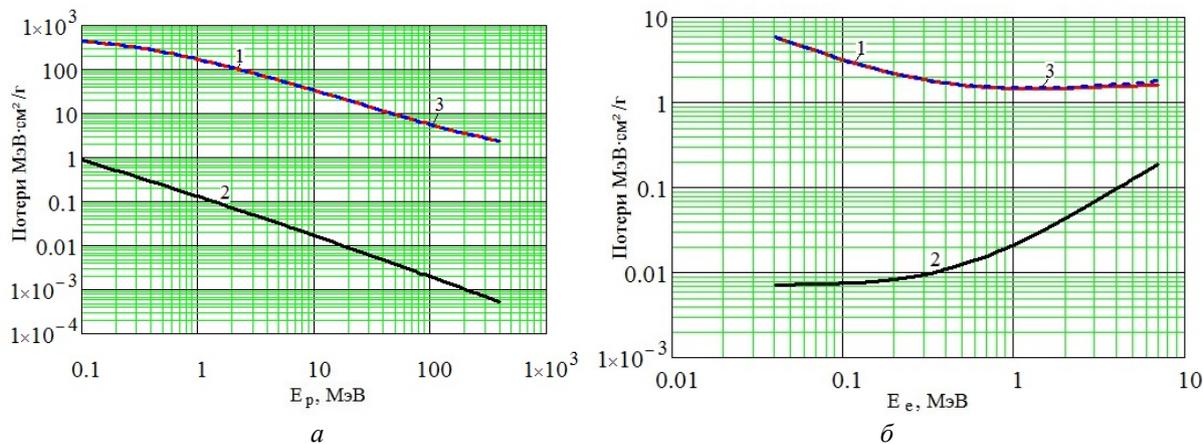


Рис. 3. Потери энергии протонов и электронов в алюминии: 1 – ионизационные; 2 – радиационные; 3 – суммарные

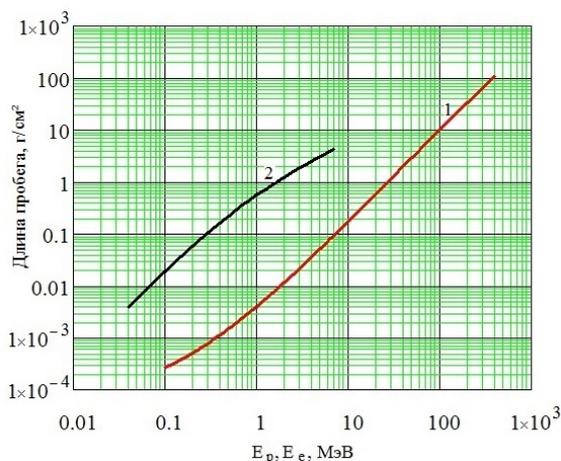


Рис. 4. Длина пробега частиц в алюминии: 1 – протоны; 2 – электроны

Результаты расчётов показывают, что для заданного диапазона энергий ионизационные потери протонов в алюминии лежат в диапазоне от 2,4 до 447 МэВ·см²/г, а радиационные – от 5·10⁻⁴ до 0,88 МэВ·см²/г и, таким образом, почти весь вклад в суммарные потери дают ионизационные потери. У электронов ионизационные потери в алюминии для заданного диапазона энергий составляют от 1,4 до 5,9 МэВ·см²/г, радиационные – от 7·10⁻³ до 0,19 МэВ·см²/г, при этом, начиная с энергии 4 МэВ, радиационные потери электронов становятся сравнимыми с ионизационными потерями (рис. 3, а). Рассчитанные суммарные потери обеспечивают для заданного диапазона энергий длину пробега в алюминии для протонов от 2,6·10⁻⁴ до 1,05·10² г/см², для электронов – от 3,9·10⁻³ до 4,3 г/см² (рис. 4).

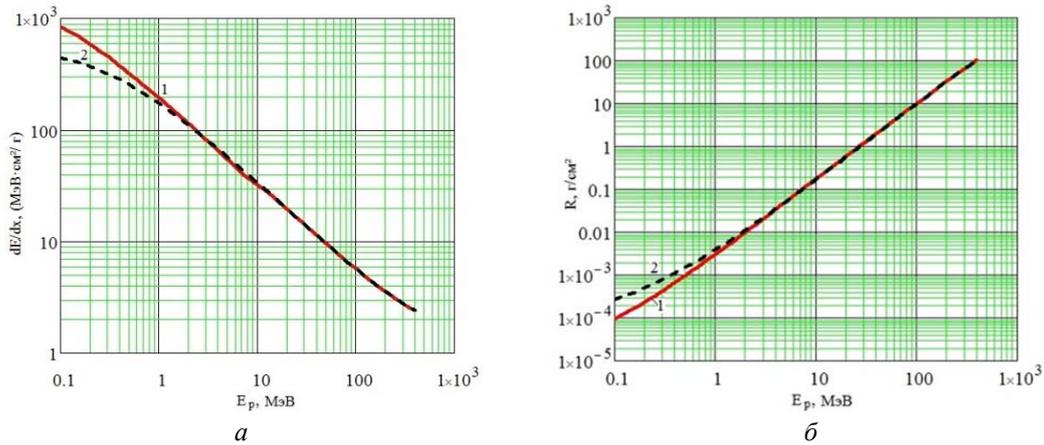


Рис. 5. Ионизационные потери и длина пробега протонов в алюминии: 1 – [22]; 2 – [27]

Из приведённых результатов следует, что для ионизационных потерь протонов в алюминии наблюдается отклонение расчётных результатов от экспериментальных данных в области энергий меньше 1 МэВ (рис. 5, а), что связано с ограниченностью применения формулы Бете-Блоха для тяжёлых частиц в области малых энергий, в этой области энергий применяются эмпирические выражения. Среднеквадратичное отклонение (СКО) по всему диапазону энергий в этом случае составляет 90,6. Аналогичные отклонения наблюдаются также и для длины пробега протонов (рис. 5, б), что объясняется теми же причинами. СКО по всему диапазону энергий для длины пробега протонов в алюминии составляет 0,017.

Сравнение результатов расчёта ионизационных потерь электронов в алюминии с расчётами других авторов и экспериментальными данными приведено на рис. 6, а. Наилучшее совпадение с экспериментальными данными показывает расчёт по данным в [25], СКО в данном случае составляет 0,01. Для [22] СКО составляет 0,174, для [26] – 0,05.

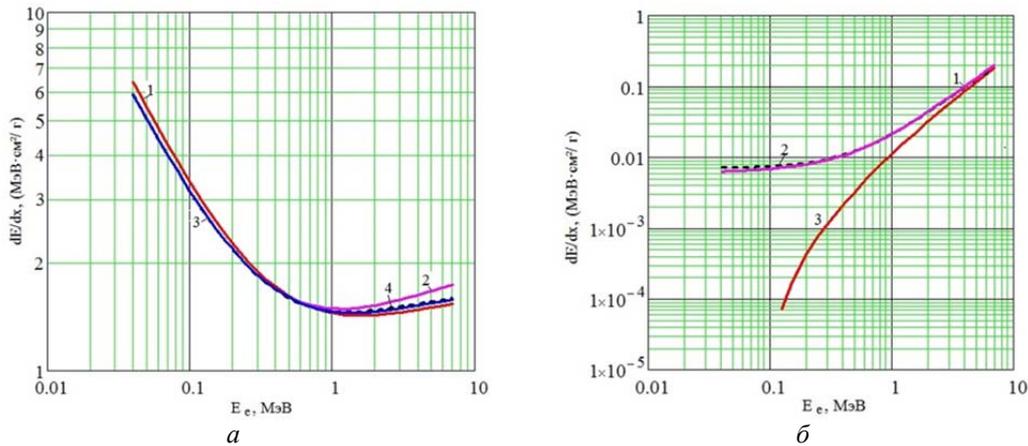


Рис. 6. Ионизационные (а) и радиационные (б) потери электронов в алюминии: 1 – [22]; 2 – [27]; 3 – [25]; 4 – [26]

Сравнение результатов расчёта радиационных потерь электронов в алюминии с расчётами по формулам других авторов и экспериментальными данными приведено на рис. 6, б. Наилучшее совпадение с экспериментальными данными показывает расчёт по формуле [23], СКО здесь составляет 0,003, для [26] СКО – 0,008. На рис. 7 показано сравнение результатов расчёта длины пробега электронов в алюминии с экспериментальными данными, СКО в этом случае составило 0,1.

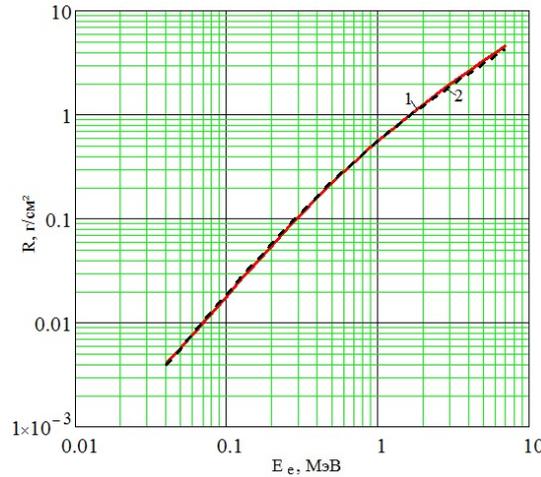


Рис. 7. Длина пробега электронов в алюминии: 1 – [22]; 2 – [27]

Из сравнительного анализа результатов расчётов по формулам (1) – (3) и базы данных NIST для ионизационных, радиационных потерь, длины пробега частиц следует хорошее совпадение в области энергий для протонов $E_p > 1$ МэВ, для электронов $E_e > 0,04$ МэВ. В области малых энергий есть отклонение с базой данных NIST, это отличие связано с тем, что механизм взаимодействия в области больших и малых энергий различен. По-видимому, используя статистические методы описания процесса взаимодействия протонов, электронов с атомами алюминия [19] с использованием генератора случайных величин, математическая модель многократно обчисляется, на основе полученных данных вычисляются вероятностные характеристики, которые будут соответствовать результатам базы данных NIST [27].

В дальнейшем будет показано, что влияние доли малых энергий протонов, электронов в расчёте поглощённой дозы при воздействии ионизирующего излучения с алюминием незначительно.

Расчёт поглощённой дозы в конструкционных материалах наноспутника

В большинстве случаев БРЭА выполнена на основе кремния. Определим влияния ионизирующего излучения на функционирование БРЭА в соответствии с условиями эксплуатации наноспутника на круговой ССО. Для этого определим величину поглощённой дозы в Si за защитой алюминия.

Известно [29], что величина поглощённой дозы D от протонов в материале определяется по формуле:

$$D(E_i, \delta) = B \int_{E_{\min}}^{E_i} \frac{dN}{dE} S(E') dE', \quad (2)$$

где δ – толщина материала; D – величина поглощённой дозы, Гр; dN/dE_p и dN/dE_e – дифференциальные энергетические спектры протонов и электронов соответственно; $S(E')$ – ионизационные потери протонов в веществе защиты, МэВ·г⁻¹·см²; B – коэффициент перехода от поглощённой энергии к дозе, равный $B = 1,6 \cdot 10^{-10}$ Гр·МэВ⁻¹·г; E' – энергия протонов на глубине материала δ , связанная с энергией протонов, падающих на поверхность материала с энергией E .

Найдём годовую поглощённую дозу в элементе алюминиевой конструкции толщиной 0,5; 1,0 и 1,5 мм наноспутника SamSat – ION. Ионизационные, радиационные потери и длина пробега протонов и электронов определялись по формулам работ [22;23], поглощённая доза вычислялась в соответствии с [20] по формуле (2). Результаты расчётов приведены на рис. 8.

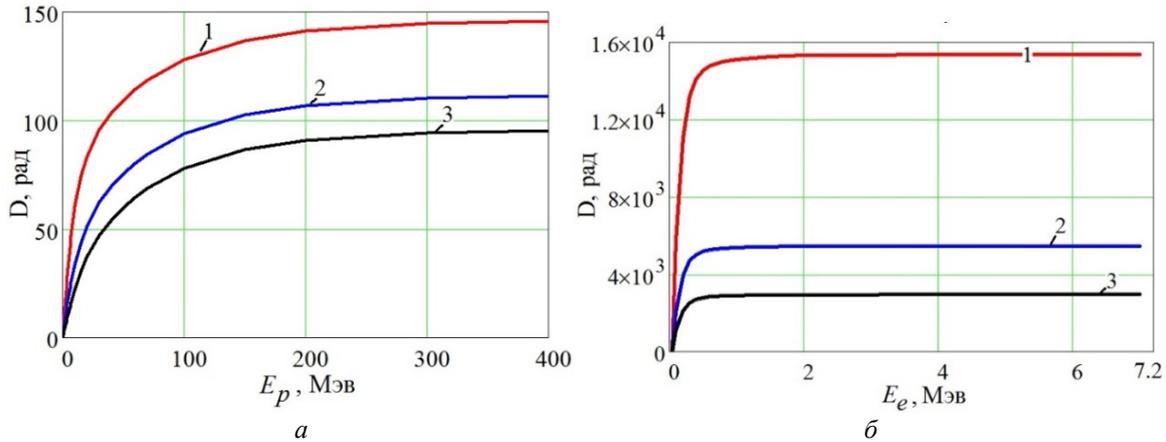


Рис. 8. Годовая поглощённая доза в алюминии при воздействии потоков:

а – протонов; б – электронов на ССО: 1 – толщина 0,5 мм; 2 – толщина 1 мм; 3 – толщина 1,5 мм

Годовая поглощённая доза для алюминиевой защиты 1 мм от воздействия протонных потоков составила 111,36 рад, от электронов – 5469 рад, а для алюминиевой защиты 1,5 мм от воздействия протонов составила 95,34 рад, а от электронов – 2953 рад. Также поглощённая доза в алюминии определялась с помощью программы Shieldose [21], результаты расчёта приведены на рис. 9.

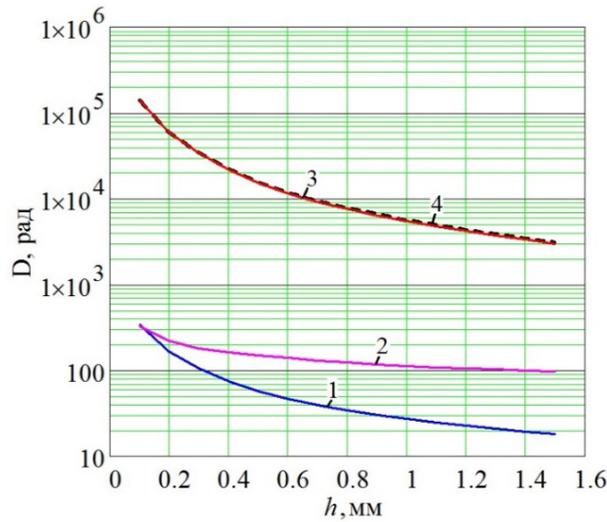


Рис. 9. Зависимость годовой поглощённой дозы от толщины в алюминиевой конструкции наноспутника SamSat ION, находящейся на круговой ССО:

1 – тормозное излучение; 2 – протоны; 3 – электроны; 4 – суммарная доза

По результатам расчётов с помощью программы Shieldose годовая поглощённая доза (рис. 9) за защитой 1 мм составляет $5,641 \cdot 10^3$ рад, в том числе $5,501 \cdot 10^3$ рад от электронов, 112,9 рад от протонов и 27,15 рад от тормозного излучения, а за защитой 1,5 мм составляет $3,082 \cdot 10^3$ рад, в том числе $2,966 \cdot 10^3$ рад от электронов, 97,6 рад от

протонов и 18 рад от тормозного излучения. Сравнивая результаты расчётов, приведённые на рис. 8, а; 8, б и рис. 9, видно, что отличия в результатах расчёта по формулам работ [29] и [21] не превышают 2,2% для протонов и менее 1% для электронов. Поскольку тормозное излучение не даёт существенного вклада в суммарную поглощённую дозу, то влиянием тормозного излучения на работоспособность БРЭА можно пренебречь.

Определим интегральные потоки протонов и электронов, прошедших в алюминии в приближении однослойной стопы по формуле

$$\Phi_{Al}(z, E_i) = \Phi_0(z, E_i) \exp\left[-\frac{z}{R_{Al}(E_i)}\right], \quad z \in (0, h_{Al}), \quad \text{для } \forall E_i, \quad (3)$$

где E_i – энергия; $\Phi(E_i)$ – поток протонов, электронов на ССО; $R_{Al}(E_i)$ – длина пробега протонов и электронов; h_{Al} – толщина алюминия.

Стопа представляет собой многослойную систему, в которой известны толщина, плотность, ионизационный потенциал, физико-химические свойства для каждого слоя. Слой по химическому составу может быть однокомпонентный или многокомпонентный. В каждом слое взаимодействие потоков протонов, ионов, электронов с материалом слоя описывается классическими фундаментальными законами физики.

Результаты расчёта в соответствии с (3), представленные на рис. 10, показывают, что протонам для преодоления алюминиевой защиты толщиной 0,5 мм (1 мм; 1,5 мм) необходимо иметь энергию 4,6 МэВ (6,7 МэВ; 8,8 МэВ), а электронам 0,11 МэВ (0,17 МэВ; 0,24 МэВ) соответственно.

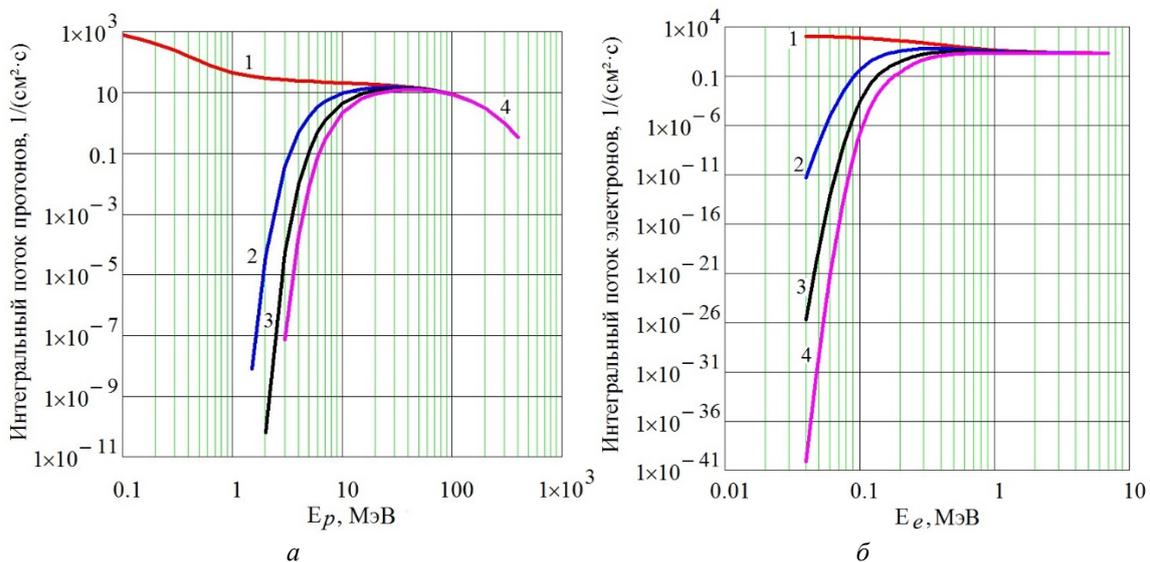


Рис. 10. Интегральные потоки: а – протонов; б – электронов ССО на передней поверхности – 1 и на противоположной поверхности алюминия для толщины: 2 – 0,5 мм; 3 – 1 мм, 4 – 1,5 мм

Сравнивая результаты расчёта поглощённых доз с расчётом с помощью программы Sprenvis, можно сделать следующие выводы:

– погрешность расчёта дозы по модели стопы составляет 1,5 и 1% для протонов и электронов соответственно (рис. 11, а).

– погрешность расчёта дозы по формулам [1 – 3] составляет 1,8 и менее 1% для протонов и электронов соответственно (рис. 11, б).

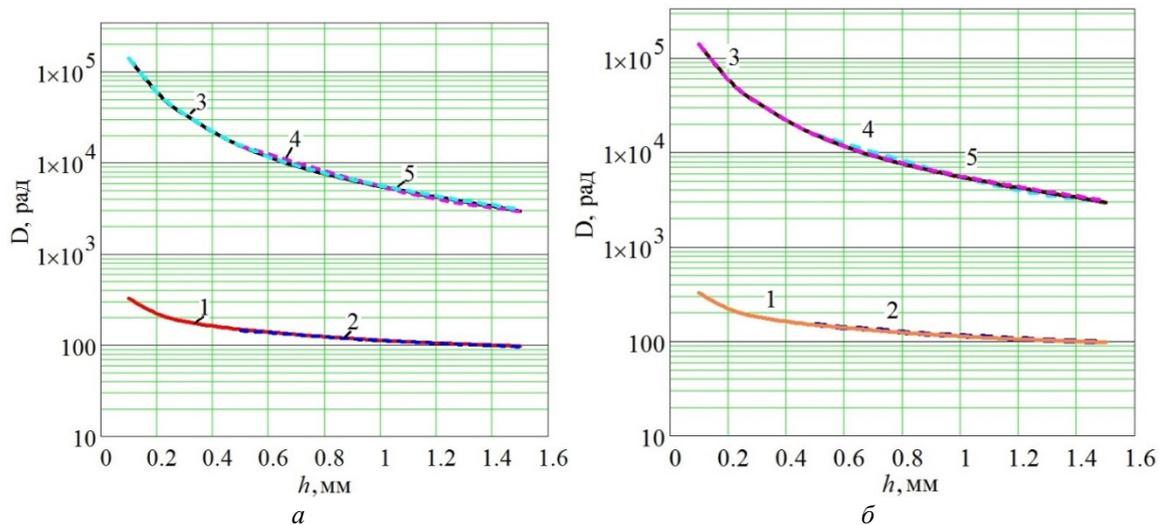


Рис. 11. Сравнение расчёта годовой поглощённой дозы по модели стопы (а) и по формулам [1 – 3] (б): 1 – протоны (Spensvis); 2 – протоны; 3 – электроны (Spensvis); 4 – электроны; 5 – суммарная доза

В соответствии с расчётными данными (рис. 11) максимальные значения годовой поглощённой дозы при воздействии потоков протонов и электронов при эксплуатации наноспутника SamSat – ION на круговой ССО за защитой из алюминиевой конструкции толщиной 1 мм составляет $5,581 \cdot 10^3$ рад, а при толщине 1,5 мм – $3,048 \cdot 10^3$ рад. Отличие результатов годовой дозы, вычисленных с помощью программы Shieldose (рис. 9), от результатов, приведённых на рис. 11, не превышает 1,8%.

Из результатов расчёта (рис. 9 – 11) следует, что поглощённая доза создаётся протонами и электронами малых энергий ССО. Число протонов, электронов больших энергий невелико, но их воздействие на БРЭА в процессе эксплуатации может привести к появлению в запрещённой 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 радиоэлектронных элементов бортовой аппаратуры является время жизни неосновных носителей заряда.

С уменьшением геометрических размеров транзисторов снижается площадь кристалла, уменьшаются паразитные ёмкости, улучшается быстродействие и снижается энергопотребление сверхбольших интегральных схем (СБИС). За последние 30 лет длина затвора МОП-транзистора (металл – оксид – полупроводник) уменьшилась в 200 раз (с 10 мкм в начале 70-х годов до 60 нм в 2000 г.) [31].

В соответствии с прогнозами Ассоциации предприятий полупроводниковой индустрии NTRS минимальные размеры элементов будут продолжать быстро уменьшаться и к 2030 году достигнут 30 нм.

В настоящее время с развитием нанотехнологии созданы радиоэлектронные элементы субмикронных размеров (толщиной от 100 до 1000 нм).

Ограничимся рассмотрением радиоэлектронных радиационно-стойких элементов БРЭА, в состав которых входит Si: секвенсоры питания ISL70321SEH (Si), ISL73321SEH (Si) [32], ПЛИС Virtex-4QV (Si), Virtex-5QV (Si) [33; 34].

Оценим годовую поглощённую дозу в Si различной толщины за алюминиевой защитой 1,5 мм в приближении двухслойной стопы. Результаты расчёта приведены в табл. 1.

Таблица 1. Годовая поглощённая доза в Si различной толщины за алюминиевой стенкой корпуса SamSat – ION толщиной 1,5 мм

Материал	Толщина	Годовая доза, Рад		
		Протоны	Электроны	Суммарная
Al	1,5 мм	95,619	2953	3048,619
Si	5 нм	70,5422	475,81	546,352
	50 нм	70,5425	475,813	546,356
	100 нм	70,5429	475,816	546,359
	500 нм	70,5457	475,847	546,393
	1000 нм	70,5492	475,89	546,439
	2 мкм	70,556	475,967	546,523
	4 мкм	70,571	476,121	546,692
	10 мкм	70,614	476,584	547,198
	20 мкм	70,686	477,354	548,04
	40 мкм	70,833	479,204	550,037
	80 мкм	71,138	483,211	554,349
	100 мкм	71,302	485,523	556,825
200 мкм	72,214	497,854	570,068	

Различие поглощённой дозы в Si (табл. 1) в нано- и микрообласти обусловлено различным соотношением толщины и длины свободного пробега протонов и электронов ССО. Высокоэнергетические протоны и электроны проникают на всю глубину Si.

Анализ результатов суммарной поглощённой дозы Si в зависимости от её толщины (табл. 1) показывает, что изменения незначительны. Алюминиевые стенки корпуса SamSat – ION защищают нано- и микрорадиоэлектронные элементы БРЭА, изготовленные на основе Si, от воздействия ионизирующего излучения в области малых энергий протонов и электронов ССО. Незначительная часть потока ионизирующего излучения больших энергий поглощается в Si и проходит сквозь него.

Из табл. 2 следует, что в соответствии с [35] радиоэлектронные элементы, имеющие поглощённую дозу в интервале от 100 до 1000 крад, можно считать радиационно-стойкими. Для сравнительного анализа результатов расчёта определим отношение поглощённых доз с результатами табл. 1.

Таблица 2. Сравнение годовых поглощённых доз с данными фирм: Intersil, Xilinx, Honeywell

Микросхемы	Допустимая поглощённая доза, крад	Толщина Si, мкм	Отношение доз по данным фирм-производителей к данным из табл. 1
ISL70321SEN (*) [32]	$946,8 \cdot 10^4$	1	$1,733 \cdot 10^7$
ISL73321SEN (*) [32]	$946,8 \cdot 10^4$	1	$1,733 \cdot 10^7$
ПЛИС Viriex-4QV [33;37]	$157,8 \cdot 10^4$	200	$2,768 \cdot 10^6$
ПЛИС Viriex-5QV [33;37]	$946,8 \cdot 10^4$	200	$1,661 \cdot 10^7$
КМОП БИС [37]	1000	0,15	1830,29

(*) – Секвенсор ISL70321SEN проверен на радиационную безопасность до 100 крад при высокой мощности дозы и 75 крад при низкой мощности дозы, в то время как ISL73321SEN проверен на радиационную безопасность до 75 крад при низкой мощности дозы и низком коэффициенте потерь ($0,01 \text{ рад/с} = 3,156 \cdot 10^2 \text{ рад}$ – годовой поглощаемой дозе). Результаты получены при проведении приёмочных тестирований с низкой мощностью дозы, в качестве источника излучения использовался изотоп кобальта ^{60}Co

По данным [34; 36] семейство Virtex-5QV компании Xilinx обладает стойкостью к ионизирующей дозе более 1 Мрад (Si), что делает его привлекательным для использования в широком спектре изделий оборонной и аэрокосмической отрасли [38].

При сравнении результатов, приведённых в табл. 1 с данными производителей фирм Intersil, Xilinx, Honeywell, видно, что различие в поглощённой дозе очевидно, следовательно можно сделать вывод, что радиоэлектронные элементы, расположенные за алюминиевой стенкой толщиной 1,5 мм, надёжно будут функционировать в течение года с учётом компоновки БРЭА SamSat – ION.

Анализ результатов

Проведены исследования воздействия орбитальных потоков протонов и электронов во всём диапазоне энергий на алюминиевые конструктивные элементы наноспутника SamSat – ION с целью обеспечения работоспособности БРЭА на круговой ССО. Орбитальные потоки протонов и электронов определены с помощью программного обеспечения Spenvis Европейского космического агентства.

Для конструкционного материала алюминия наноспутника была проведена оценка радиационной стойкости по определению ионизационных потерь, радиационных потерь, длины пробега для широкого энергетического спектра орбитальных частиц электронов и протонов. Проведён сравнительный анализ результатов расчёта с результатами различных авторов для узкого диапазона энергий, а также был сделан сравнительный анализ с базой данных NIST для спектрального энергетического спектра ССО. Было установлено, что ионизационные потери в области малых энергий, рассчитанные по формуле Бете-Блоха [22] с учётом различных поправок, неудовлетворительно согласуются с результатами базы данных по материалам NIST. Это различие связано с механизмами взаимодействия частиц малых энергий протонов и электронов с материалами.

В области больших энергий результаты расчёта совпадают с результатами базы данных по материалам NIST. По результатам расчётов была определена годовая поглощённая доза в алюминии при взаимодействии орбитального потока протонов и электронов с алюминием толщиной 0,5 мм; 1 мм; 1,5 мм. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами расчёта с помощью программы Shieldose, различие не превышает 1,8% для протонов и менее 1% для электронов.

Использование алюминия толщиной 1,5 мм в качестве конструкционного материала обеспечивает защиту БРЭА от воздействия ионизирующего излучения в области малых энергий. В области больших энергий высокоэнергетических частиц необходимо использовать локальные способы защиты от ионизирующего излучения радиоэлектронных элементов БРЭА.

Получены результаты расчёта интегральных потоков протонов, электронов на круговой ССО в алюминии для толщин 0,5; 1; 1,5 мм в приближении однослойной стопы.

Проведённый сравнительный анализ радиационной стойкости кремниевых радиоэлектронных компонентов по результатам расчёта в приближении двухслойной стопы и по данным производителя радиоэлектронных элементов (секвенсоры питания ISL70321SEH, ISL73321SEH и ПЛИС Virtex-4QV, Virtex-5QV), входящих в БРЭА SamSat – ION, показал, что работоспособность радиоэлектронной аппаратуры в течение года будет обеспечена.

Заключение

В результате проведённых исследований воздействия орбитальных потоков протонов, электронов на алюминиевую конструкцию наноспутника, БРЭА с учётом тормозного излучения, ионизационных, радиационных потерь их энергии было установлено:

1. В области больших энергий результаты расчёта годовой дозы, длины пробега совпадают с результатами расчёта программы Shieldose и не превышают 1,8% для протонов и менее 1% для электронов.

2. Алюминий толщиной 1÷1,5 мм может быть использован в качестве конструкционного материала для защиты БРЭА от воздействия ионизирующего излучения в области малых энергий.

3. Тормозное излучение не даёт существенного вклада в суммарную поглощённую дозу и его влиянием на работоспособность БРЭА можно пренебречь.

4. Получены результаты расчёта интегральных потоков в алюминии при воздействии протонов и электронов круговой ССО для различных толщин и показана доля прошедших частиц в приближении однослойной стопы. С помощью приближения двухслойной стопы оценена радиационная стойкость радиоэлектронных элементов БРЭА SamSat – ION и её возможность функционирования в течение года.

5. Для защиты радиоэлектронных элементов БРЭА от высокоэнергетического ионизирующего излучения необходимо использовать стандартные методы, основанные на локальном способе защиты с учётом различных эффектов в полупроводниковых структурах, аккумуляторах источников питания. При этом способе нужно учитывать массогабаритные размеры наноспутника с учётом оптимального времени пребывания на круговой ССО.

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.

Библиографический список

1. Кузнецов Н.В., Панасюк М.И. Космическая радиация и прогнозирование сбоя и отказоустойчивости интегральных микросхем в бортовой аппаратуре космического аппарата // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2001. Вып. 1-2. С. 3-8.

2. Гулько О.Е. Механизмы отказов КМОП ИС при воздействии ионизирующих частиц космического излучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2005. Вып. 1-2. С. 80-83.

3. Анашин В.С., Алексеев И.И., Бодин В.В., Герасимов В.Ф., Головкин А.В., Давыдов В.А., Дикая Н.Ю., Зинченко В.Ф., Ишутин И.О., Кузнецов Н.В., Макаров Ю.Н., Михайлов М.А., Нагаев К.Д., Николаева Н.И., Ныммик Р.А., Осипенко П.Н., Панасюк М.И., Першенков В.С., Протопопов Г.А., Райкунов Г.Г., Соболев С.А., Таперо К.И., Ужегов В.М., Улимов В.Н., Хаустов В.В., Чубунов П.А., Шиванов А.В., Юшков Б.Ю., Яковлев М.В. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов. М.: Физматлит, 2013. 256 с.

4. Цаплин С.В., Тюлевин С.В., Пиганов М.Н., Большев С.А. Исследование свойств радиоэлектронных элементов при воздействии ионизационного потока: учебное пособие. Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. 180 с.
5. ОСТ 134-1034-2003. 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. М.: ЦНИИ машиностроения, 2003. 43 с.
6. 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. М.: ЦНИИ машиностроения, 2005. 74 с.
7. РД В 319.03.39-2000. Изделия электронной техники. Контроль и прогнозирование безопасности в условиях длительного совместного воздействия низкоинтенсивных ионизирующих излучений и термотокковых нагрузок по результатам ускоренных испытаний. М.: ТК по военной стандартизации № 319 МО РФ, 2000. 39 с.
8. РД 11 1003-2000. Изделия полупроводниковой электроники. Метод прогнозирования надёжности в условиях низкоинтенсивного ионизирующего облучения. СПб.: РНИИ «Электронстандарт», 2000. 27 с.
9. Лишневицкий А.Э., Бенгин В.В. Методика краткосрочного прогноза динамики накопления поглощённой дозы на международной космической станции по данным системы радиационного контроля // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 5 (21). С. 54-59.
10. Зебров Г.И. Моделирование дозовых и одиночных радиационных эффектов в кремниевых микро- и нанoeлектронных структурах для цепей проектирования и прогнозирования. Дис. ... доктора техн. наук. Москва, 2009. 156 с.
11. Лукьященко В.И., Ужегов В.М., Яковлев М.В., Борисов Ю.А., Улимов В.Н., Зинченко В.Ф., Жуков Ю.Н., Герасимов В.Ф., Хаустов В.В. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с длительными сроками активного существования к воздействию ионизирующих излучений космического пространства // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2001. Вып. 3-4. С. 81-87.
12. Акимов А.А., Гриценко А.А., Юрьев Р.Н. Солнечно-синхронные орбиты – основные возможности и перспективы // Инфосфера. 2015. № 68. С. 31-33.
13. Таперо К.И., Диденко С.И. Основы радиационной стойкости изделий электронной техники: радиационные эффекты в изделиях электронной техники: учебное пособие. М.: Изд. Дом МИСиС, 2013. 349 с.
14. Таперо К.И., Улимов В.Н., Членов А.М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 304 с.
15. Лукьященко В.И., Ужегов В.М., Яковлев М.В., Кувшинников В.М., Михайлов М.А., Шиванов А.В., Гецелев И.В., Кузнецов Н.В., Ныммик Р.А., Зинченко В.Ф., Улимов В.Н. Радиационные условия на борту космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2004. Вып. 1-2. С. 3-16.
16. Демидов А.А. Исследования радиационной стойкости субмикронных КМОП СБИС на КНИ-структурах // Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2004». Вып. 7. М.: МИФИ, 2004. С. 77-78.

17. Агаханян Т.М., Аствацатурьян Е.Р., Скоробогатов П.К. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных микросхемах. М.: Энергоатомиздат, 1989. 252 с.

18. Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборов: учебное пособие. М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2001. 70 с.

19. Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах и методы испытаний изделий полупроводниковой электроники на радиационную стойкость: учебное пособие. М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2002. 46 с.

20. Информационная система Spenvis Европейского космического агентства. <https://www.spenvis.oma.be>

21. 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. 2010. Т. 116, № 3. С. 23-26.

22. Беспалов В.И. Лекции по радиационной защите: учебное пособие. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2017. 695 с.

23. Павленко В.И., Едаменко О.Д., Черкашина Н.И., Носков А.В. Суммарные потери энергии релятивистского электрона при прохождении через полимерный композиционный материал // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 4. С. 101-106. DOI: 10.7868/S0207352814040180

24. Бяков В.М., Степанов С.В., Магомедбеков Э.П. Начала радиационной химии: учебное пособие. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2012. 166 с.

25. Бекман И.Н. Атомная и ядерная физика: радиоактивность и ионизирующее излучение: учебник для бакалавриата и магистратуры. М.: Юрайт, 2017. 398 с.

26. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. Книга 1. Физика атомного ядра. М.: Энергоатомиздат, 1993. 376 с.

27. National Institute of Standards and Technology. The PSTAR program. <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html>

28. Жуковский М.Е., Скачков М.В. О статистических методах переноса электронов в веществе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки». 2009. № 1 (32). С. 31-46.

29. РД 50-25645.216-90. Методические указания. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Метод расчёта распределения поглощённой и эквивалентной доз космических излучений по толщине материалов на внешней поверхности космического аппарата на орбитах, проходящих через ЕРПЗ. М.: Издательство стандартов, 1990. 10 с.

30. Хасаншин 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. 83-87. DOI: 10.7868/S0207352814070099

31. Thompson S., Alavi M., Hussein M., Jacob P., Kenyon C., Moon P., Prince M., Sivakumar S., Tyagi S., Bohr M. 130nm logic technology featuring 60nm transistors, low-k dielectrics, and Cu interconnect // Intel Technology Journal. 2002. V. 6, Iss. 2. P. 5-13.

32. Radiation hardened quad power supply sequencers. ISL70321SEH, ISL73321SEH. <https://www.renesas.com/us/en/document/dst/isl70321seh-isl73321seh-datasheet>

33. Space-grade Virtex-5QV FPGA. <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/virtex-5qv.html>

34. Radiation-hardened FPGA for defense and aerospace application. <https://www.xilinx.com/>

35. Зебрев Г.И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. 148 с.
36. Новое семейство радиационно-стойких микросхем от XILINX. <https://www.macrogroup.ru/news/2014/140>
37. Schmidt F.H.Jr. Fault tolerant design implementation on radiation hardened by design SRAM-based FPGAs. S.M. Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2013. 204 p.
38. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. Книга 2. М.: Техносфера, 2015. 488 с.

ESTIMATION AND ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF IONIZING RADIATION ON THE OPERATION OF NANOSATELLITE ONBOARD RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

© 2021

- S. V. Tsaplin** Candidate of Science (Phys. & Math.), Head of the Laboratory «Radiation-Matter Interaction and Radiation Resistance of Materials», Department of Radio Physics, Semiconductor Micro- and Nanoelectronics; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; tsaplin56@yandex.ru
- S. A. Bolychev** Lead Software Engineer of the Laboratory «Radiation-Matter Interaction and Radiation Resistance of Materials»; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; bolychevsa@mail.ru

The paper presents the results of a calculation aimed to study the influence of ionizing, bremsstrahlung radiation on the operation of a nanosatellite obtained during the implementation of the project 0777-2020-0018 in 2020. A comparative analysis of the results of calculating the specific ionization and radiation energy losses of protons (from 0.1 to 400 MeV) and electrons (from 0.04 to 7 MeV), as well as their path lengths in aluminum according to the formulas of various authors and the database of materials of the National Institute of Standards and Technologies is presented. Based on the analysis results, the annual dose in the aluminum structure of the SamSat – ION nanosatellite in a circular sun-synchronous orbit (SSO) is calculated. All calculations are based on the data of the energy spectra of protons and electrons of the SSO given in the “Information system Spenvis of the European Space Agency”. The results of calculating the integral fluxes in aluminum under the action of protons and electrons of a circular SSO for different thicknesses are obtained, and the fraction of passed particles is shown in the approximation of a single-layer stack. The radiation resistance of the electronic elements ISL70321SEH, ISL73321SEH and Virtex-4QV, Virtex-5QV included in the SamSat – ION avionics and its ability to operate during a year was assessed.

Ionization; radiation losses; bremsstrahlung; absorbed; equivalent dose; radiation belts of the Earth; radiation protection; radio electronic elements; onboard equipment; small spacecraft

Citation: Tsaplin S.V., Bolychev S.A. Estimation and analysis of the influence of ionizing radiation on the operation of nanosatellite onboard radio electronic equipment. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 3. P. 77-96. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-77-96

References

1. Kuznetsov N.V., Panasyuk M.I. Space radiation and prediction of failure and fault tolerance of integrated circuits in spacecraft onboard equipment. *Questions of Atomic Science and Technics. Series: Physics of Radiation Effects on Radio-Electronic Equipment*. 2001. Iss. 1-2. P. 3-8. (In Russ.)

2. Gul'ko O.E. Failure mechanisms of CMOS ICs when exposed to ionizing particles of cosmic radiation. *Questions of Atomic Science and Technics. Series: Physics of Radiation Effects on Radio-Electronic Equipment*. 2005. Iss. 1-2. P. 80-83. (In Russ.)

3. Anashin V.S., Alekseev I.I., Bodin V.V., Gerasimov V.F., Golovko A.V., Davydov V.A., Dikaya N.Yu., Zinchenko V.F., Ishutin I.O., Kuznetsov N.V., Makarov Yu.N., Mikhaylov M.A., Nagaev K.D., Nikolaeva N.I., Nymmik R.A., Osipenko P.N., Panasyuk M.I., Pershenkov V.S., Protopopov G.A., Raykunov G.G., Sobolev S.A., Tapero K.I., Uzhegov V.M., Ulimov V.N., Khaustov V.V., Chubunov P.A., Shivanov A.V., Yushkov B.Yu., Yakovlev M.V. *Ioniziruyushchee izluchenie kosmicheskogo prostranstva i ikh vozdeystvie na bortovuyu apparaturu kosmicheskikh apparatov* [Ionizing radiation from outer space and its impact on the spacecraft onboard equipment]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2013. 256 p.

4. Tsaplin S.V., Tyulevin S.V., Piganov M.N., Bolychev S.A. *Issledovanie svoystv radioelektronnykh elementov pri vozdeystvii ionizatsionnogo potoka: uchebnoe posobie* [Investigation of the properties of radioelectronic elements under the influence of an ionization flow]. Samara: Samara University Publ., 2018. 180 p.

5. OST 134-1034-2003 Industry standard. Spacecraft apparatus, devices, devices and equipment. Methods for testing and assessing the resistance of onboard radio-electronic equipment of spacecraft to the effects of electronic and proton radiation from outer space by dose effects. Moscow: Central Research Institute for Machine Building Publ., 2003. 43 p.

6. RD 134-0139-2005. Spacecraft apparatus, devices, devices and equipment. Methods for assessing the resistance to the impact of charged particles of outer space by single failures and failures. Moscow: Central Research Institute for Machine Building Publ., 2005. 74 p.

7. RD V 319.03.39-2000. Electronic products. Control and prediction of safety in conditions of long-term combined exposure to low-intensity ionizing radiation and thermal current loads based on the results of accelerated tests. Moscow: TK po Voennoy Standartizatsii no. 319 MO RF Publ., 2000. 39 p.

8. RD 11 1003-2000. Semiconductor electronics products. Method of predicting reliability under conditions of low-intensity ionizing radiation. SPb.: RRI «Electronstandart» Publ., 2000. 27 p.

9. Lishnevskii A.E., Benghin V.V. Method for short-term forecast of absorbed dose accumulation dynamics at international space station based on radiation monitoring system data. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*. 2013. No. 5 (21). P. 54-59. (In Russ.)

10. Zebrov G.I. *Modelirovanie dozovykh i odinichnykh radiatsionnykh effektov v kremnievykh mikro- i nanoelektronnykh strukturakh dlya tsepey proektirovaniya i prognozirovaniya. Dis. ... doktora tekhn. nauk* [Modeling dose and single radiation effects in silicon micro- and nanoelectronic structures for design and prediction circuits]. Moscow, 2009. 156 p.

11. Luk'yashchenko V.I., Uzhegov V.M., Yakovlev M.V., Borisov Yu.A., Ulimov V.N., Zinchenko V.F., Zhukov Yu.N., Gerasimov V.F., Khaustov V.V. Methods for testing and assessing the resistance of onboard radio-electronic equipment of spacecraft with long periods of active life to the effects of ionizing radiation from outer space. *Questions of Atomic Science and Technics. Series: Physics of Radiation Effects on Radio-Electronic Equipment*. 2001. Iss. 3-4. P. 81-87. (In Russ.)

12. Akimov A.A., Gritsenko A.A., Yur'ev R.N. Sun-synchronous orbits – main opportunities and prospects. *Infosfera*. 2015. No. 68. P. 31-33. (In Russ.)

13. Tapero K.I., Didenko S.I. *Osnovy radiatsionnoy stoykosti izdeliy elektronnoy tekhniki: radiatsionnye efekty v izdeliyakh elektronnoy tekhniki: uchebnoe posobie* [Fundamentals of radiation resistance of electronic products: radiation effects in electronic products]. Moscow: Izdatel'skiy Dom MISiS Publ., 2013. 349 p.

14. Tapero K.I., Ulimov V.N., Chlenov A.M. *Radiatsionnye efekty v kremnievykh integral'nykh skhemakh kosmicheskogo primeneniya* [Radiation effects in silicon integrated circuits for space applications]. Moscow: BINOM. Laboratoriya Znaniy Publ., 2012. 304 p.
15. Luk'yashchenko V.I., Uzhegov V.M., Yakovlev M.V., Kuvshinnikov V.M., Mikhaylov M.A., Shivanov A.V., Getselev I.V., Kuznetsov N.V., Nymmik R.A., Zinchenko V.F., Ulimov V.N. Radiation conditions on board spacecraft. *Questions of Atomic Science and Technics. Series: Physics of Radiation Effects on Radio-Electronic Equipment*. 2004. Iss. 1-2. P. 3-16. (In Russ.)
16. Demidov A.A. Issledovaniya radiatsionnoy stoykosti submikronnykh KMOP SBIS na KNI-strukturakh. *Nauchno-tehnicheskii sbornik «Radiatsionnaya Stoykost' Elektronnykh Sistem – Stoykost'-2004»*. Iss. 7. Moscow: MEPhI Publ., 2004. P. 77-78. (In Russ.)
17. Agakhanyan T.M., Astvatsatur'yan E. R., Skorobogatov P.K. *Radiatsionnye efekty v kremnievykh integral'nykh mikroskhemakh* [Radiation effects in silicon integrated microcircuits]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989. 252 p.
18. Vologdin E.N., Lysenko A.P. *Radiatsionnye efekty v nekotorykh klassakh poluprovodnikovyykh priborov: uchebnoe posobie* [Radiation effects in some classes of semiconductor devices: manual]. Moscow: Moscow Institute of Electronics and Mathematics Publ., 2001. 70 p.
19. Vologdin E.N., Lysenko A.P. *Radiatsionnye efekty v integral'nykh mikroskhemakh i metody ispytaniy izdeliy poluprovodnikovoy elektroniki na radiatsionnyuyu stoykost': uchebnoe posobie* [Radiation effects in integrated microcircuits and methods for testing semiconductor electronic products for radiation resistance]. Moscow: Moscow Institute of Electronics and Mathematics Publ., 2002. 46 p.
20. SPENVIS. The Space Environment Information System. Available at: <https://www.spennis.oma.be>
21. Bezrodnikh I.P., Kazantsev S.G., Semenov V.T. Radiation environment of sun-synchronous orbit in the sunspot maximum period. *Electromechanical Matters. VNIIEM Studies*. 2010. V. 116, no. 3. P. 23-26. (In Russ.)
22. Bupalov V.I. *Lektsii po radiatsionnoy zashchite: uchebnoe posobie* [Lectures on radiation protection]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2017. 695 p.
23. Pavlenko V.I., Edamenko O.D., Cherkashina N.I., Noskov A.V. Total energy losses of relativistic electrons passing through a polymer composite. *Journal of Surface Investigation*. 2014. V. 8, Iss. 2. P. 398-403. DOI: 10.1134/S1027451014020402
24. Byakov V.M., Stepanov S.V., Magomedbekov E.P. *Nachala radiatsionnoy khimii: uchebnoe posobie* [Basics of radiation chemistry]. Moscow: D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia Publ., 2012. 166 p.
25. Bekman I.N. *Atomnaya i yadernaya fizika: radioaktivnost' i ioniziruyushchee izluchenie: uchebnyk dlya bakalavriata i magistratury* [Atomic and nuclear physics: radioactivity and ionizing radiation]. Moscow: Yurayt Publ., 2017. 398 p.
26. Mukhin K.N. *Eksperimental'naya yadernaya fizika. Kniga 1. Fizika atomnogo yadra* [Experimental nuclear physics. Book 1. Physics of the atomic nucleus]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1993. 376 p.
27. National Institute of Standards and Technology. The PSTAR program. Available at: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html>
28. Zhukovskii M.Ye., Skachkov M.V. On statistic methods of modeling electrons transport in substance. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2009. No. 1 (32). P. 31-46. (In Russ.)
29. RD 50-25645.216-90. Manual. Radiation safety of a spacecraft crew in space flight. Method for calculating the distribution of absorbed and equivalent doses of cosmic radiation over the thickness of materials on the outer surface of a spacecraft in orbits passing through

the Earth's Van Allen Radiation Belts. Moscow: Izdatel'stvo Standartov Publ., 1990. 10 p. (In Russ.)

30. Khasanshin R.K., Novikov L.S. Changes in K-208 glass transmittance spectra under ionizing radiation and molecular fluxes. *Journal of Surface Investigation*. 2014 V. 8, Iss. 4. P. 698-702. DOI: 10.1134/S1027451014040090

31. Thompson S., Alavi M., Hussein M., Jacob P., Kenyon C., Moon P., Prince M., Sivakumar S., Tyagi S., Bohr M. 130nm logic technology featuring 60nm transistors, low-k dielectrics, and Cu interconnect. *Intel Technology Journal*. 2002. V. 6, Iss. 2. P. 5-13.

32. Radiation hardened quad power supply sequencers. ISL70321SEH, ISL73321SEH. Available at: <https://www.renesas.com/us/en/document/dst/isl70321seh-isl73321seh-datasheet>

33. Space-grade Virtex-5QV FPGA. Available at: <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/virtex-5qv.html>

34. Radiation-hardened FPGA for defense and aerospace application. Available at: <https://www.xilinx.com/>

35. Zebrev G.I. *Radiatsionnye efekty v kremnievykh integral'nykh skhemakh vysokoy stepeni integratsii* [Radiation effects in high-integration silicon integrated circuits]. Moscow: MEPhI Publ., 2010. 148 p.

36. *Novoe semeystvo radiatsionno-stoykikh mikroskhem ot XILINX* [XILINX's new family of radiation-hardened microcircuits]. Available at: <https://www.macrogroup.ru/news/2014/140>

37. Schmidt F.H.Jr. Fault tolerant design implementation on radiation hardened by design SRAM-based FPGAs. S.M. Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2013. 204 p.

38. Belous A.I., Solodukha V.A., Shvedov S.V. *Kosmicheskaya elektronika. Kniga 2* [Space electronics. Book 2]. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2015. 488 p.