УДК 621.38

# РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

**Д. С. Богданов,** инженер-конструктор, Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс», Самара, Россия;

orcid.org/0000-0002-5405-7438, e-mail: designengine@yandex.ru

**И. А. Богданова,** инженер-конструктор, Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс», Самара, Россия;

orcid.org/0000-0001-5056-0303, e-mail: ksente@mail.ru

**А. Н. Волныкин,** инженер-конструктор, Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс», Самара, Россия;

orcid.org/0000-0002-1421-3870, e-mail: volnykin@mail.ru

Рассматривается задача обеспечения выполнения требований стойкости бортового электронного прибора к воздействию ионизирующих излучений космического пространства (ИИКП). Целью работы является проведение оценки радиационной стойкости (PC) прибора и соответствия предъявляемым требованиям по радиационной стойкости в части дозовых и одиночных эффектов, выявление аспектов оценки, которые следует уточнить. В работе показано применение методов оценки соответствия прибора предъявляемым требованиям по стойкости к таким факторам ИИКП, как: электронное и протонное излучение естественных радиационных поясов Земли, солнечные космические лучи, тяжелые заряженные частицы и высокоэнергетичные протоны. Приведен пример потенциально чувствительных к воздействию космической радиации электронных компонентов. Для приведенного примера рассмотрены возможные меры по обеспечению требуемой стойкости. Сделаны выводы по необходимости и достаточности конкретных мероприятий.

**Ключевые слова:** радиационная стойкость, суммарное значение накопленной дозы ионизирующего излучения, дозовые эффекты, одиночные эффекты, естественный радиационный пояс Земли, солнечные космические лучи, высокоэнергетичные протоны, тяжелые заряженные частицы, одиночный сбой, интенсивность отказов.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2019-70-107-117

#### Введение

На заре Космической Эры длительность полета первых космических аппаратов (КА) составляла от нескольких дней до нескольких месяцев [1]. Однако активное освоение космического пространства вынудило разработчиков непрерывно увеличивать сроки активного существования (САС) вновь создаваемых изделий космической техники. В настоящее время для ряда КА стоит задача обеспечения САС не менее 10 лет, при одновременном расширении их функциональных характеристик и возможностей, снижении массы и габаритов. Причина в том, что информация, получаемая из космоса, все сильнее входит в жизнь общества – это и решение задач картографирования, и мониторинг окружающей среды, и данные о погоде, и развитие среды интернет и телевидения, и разведка полезных ископаемых, и многоемногое другое.

САС КА определяется не только запасом топлива на борту, необходимого для коррекции или непрерывного поддержания стабильной орбиты. Функционирование КА напрямую зависит от работоспособности его бортовой аппаратуры (БА) в условиях воздействия многочисленных факторов космического пространства, к наиболее важным из которых с точки зрения обеспечения длительного САС можно отнести ионизирующие излучения космического пространства. В настоящей статье показано применение методов оценки соответствия разрабатываемого электронного прибора предъявляемым требованиям по РС к воздействию ионизирующих излучений космического пространства (электронного и протонного излучения естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), протонного излучения солнечных космических лучей, тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов).

#### Теоретическая часть

При прохождении частиц ионизирующих излучений через какое-либо вещество происходит их взаимодействие с атомами этого вещества, результатом которого становится передача энергии от частиц к атомам. Дальнейшее рассеяние и распределение полученной энергии по объему вещества происходят в форме различных радиационных эффектов, под которыми понимают явление, состоящее в изменении параметров, характеристик и свойств объекта в результате воздействия ионизирующих излучений.

Из-за физических особенностей воздействия ИИКП на электронные приборы стойкость последних должна оцениваться по двум направлениям: стойкость к накопленной дозе (дозовые эффекты) и стойкость к воздействию отдельных заряженных частиц (одиночные эффекты). Дозовые эффекты и одиночные эффекты различаются как природой и характером влияния, так и необходимыми мерами защиты от их воздействия [2, 3].

### Стойкость к дозовым эффектам

В настоящее время среди дозовых радиационных эффектов принято выделять ионизационные эффекты и эффекты смещения. Ионизационные эффекты связаны с ионизацией вещества излучением, то есть образованием под действием излучений свободных носителей зарядов. Эффекты смещения обусловлены перемещением атомов из своего нормального положения в кристаллической решетке. Эти перемещения приводят к появлению структурных дефектов, поэтому эффекты смещения еще называют структурными эффектами.

Согласно [4] оценка уровня стойкости по дозовым эффектам проводится поэлементным методом и заключается в сравнении показателей стойкости каждого комплектующего аппаратуры (электронных компонентов, материалов и покрытий) с уровнем радиационного воздействия на него. Результатом данной оценки является коэффициент запаса комплектующего по радиационной стойкости  $K_3$ . Коэффициент запаса по радиационной стойкости электронного прибора в целом ( $K_3$  <sub>ЭП</sub>) определяется как минимальное значение из совокупности  $K_3$  комплектующих. На основании сравнения, полученного в ходе оценки стойкости  $K_3$  <sub>ЭП</sub> с коэффициентом запаса, установленным в техническом задании (T3) на разработку прибора  $K_3$  <sub>ЭП</sub><sup>T3</sup> (если в T3 последний не установлен, его значение принимается не менее трех), делается вывод о соответствии/несоответствии аппаратуры предъявляемым требованиям по радиационной стойкости и определяется необходимость доработки или дополнительных испытаний прибора с учетом следующих критериев:

 – при К<sub>3 ЭП</sub> < 1 прибор является не стойким к воздействию ИИКП: в этом случае следует менять конструкцию прибора или обеспечить дополнительную защиту с последующей повторной оценкой стойкости;

– при 1 < К<sub>3 ЭП</sub> < К<sub>3 ЭП</sub> <sup>T3</sup> или 1 < К<sub>3 ЭП</sub> < 3 прибор является стойким, однако необходимо проведение дополнительных испытаний для подтверждения радиационной стойкости прибора, полученной расчетным путем, на моделирующих установках;

– при  $K_{3 \ \exists \Pi} \ge K_{3 \ \exists \Pi}^{T3}$  или  $K_{3 \ \exists \Pi} \ge 3$  прибор является стойким, подтверждение радиационной стойкости прибора испытаниями не требуется.

Показатели стойкости комплектующих выбираются из технических условий (ТУ) на них, документов поставщика, справочных данных.

В качестве мероприятий, направленных на обеспечение и подтверждение стойкости прибора предъявляемым требованиям по PC, можно выделить следующие:

1. Применение дополнительной защиты: либо за счет непосредственной установки локальных экранов, либо за счет перекомпоновки КА или комплектующих внутри прибора, при этом снижение воздействующих уровней ИИКП обеспечивается экранированием другими рядом стоящими приборами, блоками, агрегатам, узлами и т.д. Применение локальных экранов, устанавливаемых внутри прибора и защищающих непосредственно критичные элементы, особенно актуально в условиях жестких ограничений по массе аппаратуры.

2. Замена нестойких комплектующих прибора на более стойкие аналоги.

3. Проведение испытаний прибора, подтверждающих стойкость, на моделирующих установках. При этом допускается проводить испытания не всего прибора, а только ограничивающих его стойкость комплектующих. Определение реальной стойкости комплектующих путем проведения их испытаний целесообразно и по причине частого несоответствия значений, указанных в документах, и фактических показателей стойкости. Вместе с тем проведение испытаний как прибора в целом, так и его комплектующих связано с относительно большими временными и материальными затратами.

#### Стойкость к одиночным эффектам

Одиночные радиационные эффекты в материалах обусловлены столкновением материала с частицами с высокой энергией, к которым относятся тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ) и высокоэнергетичные протоны космического пространства (ВЭП КП). Характер эффектов, возникающих под воздействием ТЗЧ и ВЭП КП в различных материалах, сильно зависит от свойств материала и наиболее ярко выражен для полупроводников [5, 6]. Конструкционные материалы, чувствительные к ТЗЧ и ВЭП КП, практически не встречаются, а среди электронных компонентов влиянию одиночных эффектов подвержены только активные электронные компоненты, выполненные на основе полупроводниковых кристаллов и пленок.

В подавляющем большинстве случаев массовая защита (оболочка КА, стенка прибора) не в состоянии полностью поглотить большую энергию ТЗЧ или ВЭП КП, и частица проходит активный электронный компонент насквозь, теряя часть своей энергии в полупроводниковой структуре и генерируя избыточный электрический заряд в локальном объеме кристалла. Этот избыточный электрический заряд при воздействии ТЗЧ возникает вследствие генерации электронно-дырочных пар вдоль пути прохождения ТЗЧ (первичная ионизация), а при воздействии ВЭП – за счет генерации электронно-дырочных пар остаточными ядрами, образующимися в результате рассеяния протонов на ядрах материалов полупроводниковой структуры (рассеяние через ядерные реакции и упругое взаимодействие) [6]. Избыточный заряд является источником одиночных радиационных эффектов в электронных компонентах – сбоев и отказов, к основным из которых можно отнести одиночные сбои, многократные сбои из-за образования одиночных сбоев в нескольких соседних ячейках памяти, кратковременные импульсные сигналы «иголки», тиристорные эффекты, долговременные проводящие каналы («проколы») в диэлектрике, вторичные пробои p-n переходов, отказы отдельных пикселей ПЗС-матрицы.

Наращивание массовой защиты снижает одиночные эффекты незначительно, приводя к ухудшению массогабаритные характеристики прибора. В связи с этим устойчивость прибора к сбоям и отказам под воздействием одиночных эффектов обеспечивается выбором стойких электронных компонентов (и других покупных комплектующих изделий) [7] и применением схемотехнических и программно-алгоритмических методов парирования сбоев и предотвращения отказов; например, формированием структуры прибора с резервированием, включением в алгоритм работы прибора проверок корректности данных [8], применением схем защиты от тиристорного эффекта или защелкивания и другими методами, в зависимости от требований, предъявляемых к прибору.

Примененная методика оценки по одиночным эффектам соответствует [5]. Результатом воздействия тяжелой заряженной частицы на электронный компонент может быть как временная утрата работоспособности компонента с последующим восстановлением (одиночный сбой), так и полная необратимая утрата работоспособности (катастрофический отказ). Опре-

делить верхнюю оценку частоты таких явлений для одного электронного компонента можно следующим образом:

$$v_{T34} = \sigma_{T34\mu ac} \cdot F_{T34} \left( L \ge L_0 \right),$$

где  $\sigma_{T3^{4}hac}$  – значение насыщения сечения возникновения эффекта под воздействием T3Ч, см<sup>2</sup> (величина, определяющая плотность потока T3Ч, необходимую для возникновения эффекта); L – линейные потери энергии частицы, проходящей сквозь компонент, МэВ·см<sup>2</sup>·г<sup>-1</sup> (вся энергия, потерянная частицей в объеме компонента, выделяется в компоненте в виде паразитных эффектов);  $L_0$  – пороговое значение L, при превышении которого возникает сбой или катастрофический отказ компонента, МэВ·см<sup>2</sup>·г<sup>-1</sup>;  $F_{T3^{4}}(L \ge L_0)$  – интегральный спектр по линейным потерям энергии средней плотности потока T3Ч, част.·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Аналогичная характеристика для одного электронного компонента под воздействием ВЭП КП определяется формулой:

$$\mathbf{v}_P = \mathbf{\sigma}_{Phac} \cdot F_P(E \ge E_0),$$

где  $\sigma_{P_{Hac}}$  – значение насыщения сечения возникновения эффекта под воздействием ВЭП КП, см<sup>2</sup>; E – энергия протона, сталкивающегося с компонентом, МэВ;  $E_0$  – пороговое значение энергии протона, при превышении которого возникает сбой или катастрофический отказ компонента, МэВ;  $F_p(E \ge E_0)$  – интегральный энергетический спектр средней плотности потока протонов, част. см<sup>-2</sup> · c<sup>-1</sup>.

### Обеспечение бессбойной и безотказной работы прибора

Основной характеристикой, определяющей способность прибора к нормальному функционированию в заданных условиях, является вероятность безотказной работы прибора, определяемая формулой:

$$P_{\text{BE3}} = 1 - P_{\text{KO}},$$

где *P<sub>KO</sub>* – вероятность возникновения эффекта катастрофического отказа в приборе.

Вероятность возникновения эффекта в приборе связана с вероятностью возникновения эффекта в каждом отдельном компоненте следующим образом:

$$P_{KO} = P_{KO1} \cdot P_{KO2} \cdot \ldots \cdot P_{KON},$$

где *P<sub>коі</sub>* – вероятность возникновения эффекта отказа в *i*-м компоненте, дублирующем функцию.

Для отказов в электронных компонентах под воздействием ТЗЧ и ВЭП КП характерен экспоненциальный закон распределения:

$$P_{KO} = 1 - \exp(-v_{\Im KE} \cdot t),$$

где  $v_{3KF}$  – частота возникновения возможных отказов электронной компонентной базы (с учетом принятых мер защиты), 1/с; *t* – время штатной работы прибора, с.

Следует отметить, что время штатной работы прибора оценивается без учета времени хранения (время нахождения прибора в режиме «Выключено»), так как катастрофические отказы не проявляются в электронных компонентах, на которые не подается питание.

Частоты катастрофических отказов и частоты сбоев определяются раздельно, поскольку для отказоустойчивости и для сбоеустойчивости меры обеспечения могут различаться. Общая частота сбоев в одном электронном компоненте определяется как сумма частот сбоев в этом компоненте, вызванных частицами различной природы происхождения: ЗЧ галактических космических лучей (ГКЛ) и ЗЧ естественного радиационного пояса земли. В нормальных условиях частота сбоев электронного компонента определяется по формуле:

$$v_{\mathcal{H}\mathcal{K}\mathcal{B}} = v_{\mathcal{T}\mathcal{S}\mathcal{Y}}^{\mathcal{I}\mathcal{K}\mathcal{I}} + v_{\mathcal{P}}^{\mathcal{E}\mathcal{P}\mathcal{I}\mathcal{S}} + v_{\mathcal{P}}^{\mathcal{I}\mathcal{K}\mathcal{I}}$$

Похожим образом, но с учетом 3Ч солнечных космических лучей (СКЛ), определяются общая частота отказов одного электронного компонента и общая частота сбоев одного электронного компонента в экстремальных условиях:

$$v_{_{T3Y}} = v_{_{T3Y}}^{_{CK\!\Pi}} + v_{_{T3Y}}^{_{\Gamma K\!\Pi}} + v_{_P}^{^{EP\!\Pi 3}} + v_{_P}^{^{CK\!\Pi}} + v_{_P}^{^{\Gamma K\!\Pi}} \,. \label{eq:v_t3y}$$

При оценке сбоеустойчивости используется такая величина, как допустимая частота возникновения. В случае использования одного резервного канала одиночный сбой в основном канале не приводит к сбою в работе прибора. Однако к такому результату может привести одновременный одиночный сбой в основном и в резервном каналах. Для исключения подобной ситуации после сбоя в основном канале резервный канал должен бессбойно функционировать по крайней мере до тех пор, пока не восстановит работоспособность основной канал. И наоборот – после сбоя в резервном канале в основном канале не должно быть сбоев до восстановления работоспособности резервного канала. Из этого критерия выводится условие допустимой частоты возникновения сбоев:

$$\mathbf{v}_{\partial on} = 1/t_{\text{BOCCM}},\tag{1}$$

где  $t_{soccm}$  – время восстановления работоспособности после одиночного эффекта, с.

Исходя из допустимой частоты возникновения сбоев и рассчитанной частоты возникновения сбоев под воздействием ЗЧ, можно определить коэффициент запаса по устойчивости к сбоям, вызванным ЗЧ:

$$K_{3}^{3q} = \mathbf{v}_{\partial on} / \mathbf{v}_{\mathcal{S}K\mathcal{F}} \,. \tag{2}$$

Если прибор обладает десятикратным запасом устойчивости  $K_3^{T34} \ge 10$ , то данный прибор следует считать стойким [5].

## Практическая оценка стойкости прибора

При проведении оценки прибора по дозовым эффектам учитывалось, что прибор установлен в отсеке КА, оболочка которого, изготовленная из алюминиевого сплава толщиной 1,5 мм, обеспечивает массовую защиту 0,4 г/см<sup>2</sup> и снижает воздействующие на внешнюю поверхность прибора уровни ИИКП (электронного и протонного излучений ЕРПЗ, протонного излучения СКЛ) до суммарного значения поглощенной дозы в 2,4·10<sup>4</sup> рад.

Корпус прибора толщиной 2,5 мм (конфигурация деталей корпуса в собранном состоянии изображена на рисунке 1) изготовлен из алюминиевого сплава и является стойким ко всем видам ионизирующих излучений.



Рисунок 1 – Эскиз конструкции корпуса прибора в собранном состоянии Figure 1 – General view of assembled case design

Конструкционные материалы, покрытия (эмали и клей) и электронные компоненты, расположенные на внешней поверхности корпуса, имеют показатели стойкости, значительно превышающие воздействующие уровни ИИКП.

При оценке PC материалов, покрытий и электронных компонентов, расположенных внутри прибора, учитывалось дополнительное снижение воздействующих уровней ИИКП, обеспечиваемое корпусом прибора с массовой защитой 0,7 г/см<sup>2</sup>. Необходимо отметить, что компоненты, расположенные внутри прибора, сгруппированы по ячейкам, защищаемым внешними стенками корпуса. Эскизный вид ячеек показан на рисунке 2 в составе конструкции прибора в разобранном (разнесенном в пространстве) состоянии (эскиз на рисунке 2 развернут относительно направления взгляда на рисунке 1).



Рисунок 2 – Эскиз конструкции корпуса прибора в разнесенном состоянии Figure 2 – General view of disassembled case design

С учетом общей массовой защиты 1,1 г/см<sup>2</sup> (оболочка отсека + корпус прибора), суммарный уровень ИИКП, воздействующий внутри прибора, не превышает 3,41·10<sup>3</sup> рад.

К электронным компонентам в составе прибора, не обладающим достаточным коэффициентом запаса по стойкости к дозовым эффектам, относится микросхема 1661PP1У (при показателях стойкости микросхемы по AEЯP.431210.899TУ  $4\cdot10^3$  рад коэффициент запаса составляет  $K_3 = 1,17$ ). Анализ доступных функциональных аналогов данной микросхемы, имеющих более высокие показатели стойкости к воздействию ИИ КП, выявил, что они обладают рядом других худших эксплуатационных параметров, важных для функционирования прибора. В таких условиях замена микросхемы на более стойкую затруднительна, и в качестве мер обеспечения требуемой стойкости прибора возможны применение локальной массовой защиты критичной микросхемы или проведение дополнительных испытаний микросхемы с целью подтверждения более высоких по сравнению с имеющимися в ТУ данных по стойкости. Вместе с тем, проведение испытаний связано с относительно большими временными и материальными затратами и не гарантирует, что более высокая стойкость микросхемы мы подтвердится.

С учетом изложенных условий наиболее рациональной мерой повышения стойкости прибора было признано применение локальной массовой защиты – локального экрана для критичной микросхемы. Локальный экран, как правило, представляет собой одну или две чаши (в зависимости от применяемой модели воздействия), закрепляемые на поверхности

печатной платы над микросхемой (рисунок 3). В соответствии с [9] материал экрана должен обладать высокой плотностью, однако применение материалов с высоким атомным номером (таких, как вольфрам или свинец) может увеличить интенсивность воздействия на микросхему отельных заряженных частиц за счет вторичного излучения. В данном случае оптимальным материалом по совокупности поглощающей способности, низкого уровня создаваемых одиночных эффектов, доступности и технологичности обработки стал сплав алюминия с магнием АМг6.



Рисунок 3 – Локальный экран микросхемы, примененный в приборе Figure 3 – Local absorbing shield applied for an integrated circuit in device design

Размещение алюминиевого корпуса локального экрана в ячейке (на поверхности печатной платы) показано на рисунке 4. Роль второй (нижней на рисунке) половины корпуса выполняет теплоотводящая поверхность рамки-корпуса ячейки.



### Рисунок 4 – Локальный экран, примененный в приборе (положение экрана в ячейке) Figure 4 – Local absorbing shield applied in device design (shield position in a module)

В части оценки стойкости прибора к одиночным эффектам особый интерес представляют:

– анализ влияния возникновения эффекта в электронном компоненте на работоспособность прибора;

- анализ частоты отказов, вызванных воздействием ЗЧ;

- анализ частоты одиночных сбоев;

– анализ общей сбоеустойчивости прибора.

Для данного прибора все перечисленные виды анализа приведены для электронных компонентов, потенциально чувствительных к данному типу воздействий.

Соотношение количества электронных компонентов по типам в приборе приведено на рисунке 5.



Анализ проводился с учетом уже принятых мер по предотвращению отказов и парированию сбоев, вызванных одиночными эффектами

Рисунок 5 – Соотношение количества активных и пассивных электронных компонентов в приборе

## Figure 5 - Relation between active and passive components within the device

Для обеспечения устойчивости потенциально чувствительных компонентов к сбоям и отказам под воздействием ТЗЧ и ВЭП КП в соответствии с [9] приняты следующие меры:

 прибор оснащен перезаписываемым постоянным запоминающим устройством (ПЗУ), обеспечивающим возможность перезаписи содержимого непосредственно в эксплуатации на орбите;

- прибор оснащен системой самоконтроля работоспособности;

– резервный канал в приборе работает в режиме ожидания (в постоянной готовности к началу работы в момент обнаружения сбоя в основном канале);

– сторожевой таймер, предотвращающий «зависание» вычислителя, реализован на отдельной от вычислителя компонентной базе;

– напряжение питания управляющих логических микросхем и компонентов, работающих с аналоговыми сигналами, поддерживается на минимально допустимом уровне;

– вторичные источники питания оснащены для различных узлов либо системой контроля потребляемого тока, либо ограничителем тока.

По результатам анализа влияния одиночных эффектов в электронных компонентах были выявлены компоненты, критичные к воздействию заряженных частиц. Данные анализа по критичным компонентам приведены в таблице 1 с учетом перечисленных выше мер по обеспечению стойкости.

Таблица 1 – Анализ влияния одиночных радиационных эффектов (ОРЭ) в элементах, «критичных» к воздействию ТЗЧ и ВЭП КП, на работоспособность прибора и его СЧ

 Table 1 – Analysis of Single-Event Effects influence in the components «critically» sensitive to

 HZE particles and high energy protons (HEP) on working condition of the device and its parts

Элемент	Тип ОРЭ	Состояние составной части при данном ОРЭ	Мероприятия по восстановлению работоспособности ЭРИ, составной части	Состояние прибора после реализации
				мероприятий по восстановлению работоспособности ЭРИ
249КП14АР	ИГ <sup>1)</sup>	Проявляется выдачей кратко- временного импульса от 20 до 25 нс логического уровня на выходе оптрона и не повлияет на работу ЭРИ в схеме. При- бор работоспособен	Не требуется	Прибор работоспособен

5584ЛАЗТ	ТЭ <sup>2)</sup>	Увеличение тока потребления в цепи питания «+3,3V». Ре- зервные каналы работоспо- собны. Прибор работоспосо- бен	Восстановление работы в следую- щем цикле работы	Прибор работоспособен
2П7210А9	ЭО <sup>3)</sup>	Отказ канала, в котором про- изошел эффект. Резервные каналы работоспособны. Прибор работоспособен.	Резервирование	Прибор работоспособен
<sup>1)</sup> ИГ – всплес <sup>2)</sup> ТЭ – тирист <sup>3)</sup> ЭО – эффек	ки анал сорный з т отказа	оговых сигналов («иголки»); эффект;		

Результаты анализа частоты отказов по [3] приведены в таблице 2 в обобщенном виде для эффекта отказа (ЭО) и тиристорного эффекта (ТЭ). Спектры средней плотности потока заряженных частиц были выбраны для массовой защиты 1 г/см<sup>2</sup>.

Таблица 2 – Частота возникновения ЭО/ТЭ в электронных компонентах при воздействии заряженных частиц

Table 2 – Failures/Single Event Latch-ups frequency of separate components under exposure to HEP and HZE particles

Элемент	Группа ЭРИ	<i>v</i> , 1/c
5584ЛАЗТ	Стандартные логические ИС <sup>1)</sup>	1,91.10-8
1564TB3T	Стандартные логические ИС <sup>1)</sup>	3,83.10-8
2П7210А9	Мощные МДП- транзисторы	Оценка невозможна, так как от- сутствуют данные по сечению от ТЗЧ и протонам
<sup>1)</sup> ИС – интегральные схемы		

В соответствии с приведенными результатами полная оценка частоты отказов невозможна. Для транзисторов требуются дополнительные экспериментальные данные. В противном случае невозможно гарантировать работу прибора на орбите.

Результаты анализа частоты одиночных сбоев по [3] приведены в таблице. Спектры средней плотности потока заряженных частиц были выбраны для массовой защиты 1 г/см<sup>2</sup>.

Таблица 3 – Частота возникновения эффекта ОС в электронных компонентах при воздействии заряженных частиц

Table 3 – Single Event Upsets (SEU) frequency for separate components under exposure to HEP and HZE particles

	FJ ····	v, 1/0
1645PT2Y <sup>1)</sup>	ППЗУ <sup>2)</sup>	9,94·10 <sup>-6</sup>
5584ЛАЗТ	Стандартные логические ИС <sup>3)</sup>	Оценка невозможна, так как от- сутствуют данные по сечению от протонов

<sup>1)</sup> Количество задействованных бит  $-6,55 \cdot 10^4$ .

<sup>2)</sup> ППЗУ – программируемое постоянное запоминающее устройство

<sup>3)</sup> ИС – интегральные микросхемы

Время восстановления работоспособности прибора при переходе на резервный канал составляет не более 10 секунд. Оценка сбоеустойчивости по формулам (1), (2) приведена в таблице 4.

ЭРИ	$v_{H\Im T}$ , 1/c			Допустимая	Коэффициент
0111	Сбои	Отказы	Σ	частота, 1/с	запаса
1645РТ2У	9,94·10 <sup>-6</sup>	$1,47 \cdot 10^{-16}$	9,94·10 <sup>-6</sup>	0,1	$1 \cdot 10^{4}$
5584ЛАЗТ	Оценка не- возможна <sup>1)</sup>	-	?	2	Оценка невозможна
	-	1,91·10 <sup>-8</sup>	1,91·10 <sup>-8</sup>	0,1	$5,3.10^{6}$
<sup>1)</sup> Оценка невозможна, так как отсутствуют данные по сечению от ТЗЧ					

Таблица 4 – Оценка сбоеустойчивости прибора Table 4 – Estimated device SEU tolerance

Для микросхемы 5584ЛАЗТ отсутствие ряда данных делает невозможным выдачу заключения о бессбойной работе в заданных условиях. Поскольку оценка носит ориентировочный характер, необходимо провести экспериментальную отработку сбоеустойчивости микросхемы [3], по результатам которой можно сделать вывод о необходимости дополнительных мер по обеспечению сбоеустойчивости прибора.

### Заключение

Проведенная оценка стойкости электронного прибора позволяет сделать следующие выводы:

 – электронный прибор в целом соответствует предъявляемым требованиям к радиационной стойкости;

 в составе электронного прибора имеются электронные компоненты, оценить стойкость которых не представляется возможным из-за нехватки экспериментальных данных;

– без полной оценки стойкости невозможна выдача заключения о бессбойной работе электронного прибора.

Результаты проведения оценки по рассмотренному прибору отчетливо свидетельствуют о необходимости дальнейшей работы по расширению экспериментальных данных и совершенствованию методологической базы уже на текущем этапе развития космической техники. И в ближайшем будущем, с развитием техники, задача не утратит своей актуальности.

#### Библиографический список

1. Беляков Б. В. Звездный путь «Прогресса». Самара: типография АО «РКЦ «Прогресс», 2014. 388 с.

2. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. Космическая электроника (в 2-х книгах). Кн. 2. М.: Техносфера, 2015. 488 с.

3. Безродных И. П., Тютнев А. П., Семенов В. Т. Радиационные эффекты в космосе. Часть 2. Воздействие радиации на электротехнические материалы. М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. 122 с.

4. ОСТ 134-1034-2012 Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам.

5. РД 134-0139-2005 Методы оценки стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам.

6. Методические указания по обеспечению сбоеустойчивости и отказоустойчивости бортовой аппаратуры изделий разработки ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» к воздействию тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов космического пространства. Часть 2.

7. Bruzzi M., Sadrozinski H. F.-W., Seiden A. Comparing radiation tolerant materials and devices for ultra rad-hard tracking detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2007. № A 579. C.754-761.

8. Han. Y., Jiang Y., Luan W., Zhang X. Safety Protection of Motor Driver in Nuclear Rescue Robot // Journal of mechanical engineering. 2017. T. 53 № 21. C. 9-15.

9. РД 134-0199-2012. Порядок предварительного выбора электронной компонентной базы для обеспечения стойкости радиоэлектронной аппаратуры к воздействию ионизирующих излучений космического пространства.

UDC 621.38

# RADIATION TOLERANCE OF AN ELECTRONIC DEVICE UNDER EXPOSURE TO SPACE RADIATION

D. S. Bogdanov, design engineer, JSC «SRC «Progress», Samara, Russia; orcid.org/0000-0002-5405-7438, e-mail: designengine@yandex.ru
I. A. Bogdanova, design engineer, JSC «SRC «Progress», Samara, Russia; orcid.org/0000-0001-5056-0303, e-mail: ksente@mail.ru
A. N. Volnykin, design engineer, JSC «SRC «Progress», Samara, Russia; orcid.org/0000-0002-1421-3870, e-mail: volnykin@mail.ru

The article gives an examination of estimation routine for fulfilling requirements to radiation tolerance of an onboard electronic device under exposure to space radiation. **The article aims** to conduct an example of estimation procedure of radiation tolerance and its correspondence to given requirements (for TID and SEE). **The article also aims** to reveal certain estimation aspects which are to be corrected. The article shows an example of practical application of estimation methods for correspondence of calculated values and given requirements for such types of ionizing radiation as: electron and proton flows of Van Allen radiation belts, solar energetic particles, HZE particles and high energy protons. The article gives several examples of components which are potentially sensitive to space radiation. For such cases the article shows possible hardening measures. The conclusion shows the necessity and sufficiency of exact actions.

**Key words:** radiation tolerance, total irradiation dose (TID), TID effects, single event effects (SEE), Van Allen radiation belt, solar energetic particles, high energy protons, HZE particles, single event upset (SEU), failure rate.

DOI: 10.21667/1995-4565-2019-70-107-117

#### References

1. Beliakov B. V. Zveznyi put' «Progressa» (The interstellar path of «Progress»). Samara: JSC «SRC «Progress». 2014. 388 p. (in Russian).

2. Belous A. I., Soloduha V. A., Shvedov S. V. *Kosmicheskaya elektronika* (Space electronics). Vol. 2. Moscow: Tehnosfera. 2015, 488 p. (in Russian).

3. Bezrodnyh I. P., Tyutnev A. P., Semionov V. T. Radiatsionnyie effekty v kosmose. Chast' 2. Vozdeistviye radiatsii na elektrotehnicheskie materialy (Radiation effects in space. Vol.2. Radiation influence on materials for electrical equipment). Moscow: JC «VNIIEM Corporation». 2016, 122 p. (in Russian).

4. OST 134-1034-2012 Metody ispytanii i otsenki stoikosti bortovoi radioelektronnoi apparatury kosmicheskih apparatov k vozdeistviyu elektronnogo i protonnogo izluchenii kosmicheskogo prostranstva po dozovym effektam (Testing and estimation methods for durability of onboard radioelectronic equipment of satellites under influence of electron and proton space rays by TID effects). (in Russian).

5. RD 134-0139-2005 Metody otsenki stoikosti k vozdeistviyu zariazhennyh chastits kosmicheskogo prostranstva po odinichnym sboiam i otkazam (Methods for estimating the durability under influence of space charged particles for single upsets and failures). (in Russian).

6. Metodicheskiye ukazaniya po obespecheniyu sboyeustoichivosti i otkazoustoichivosti bortovoi apparatury izdelii razrabotki FGUP GNPRKTs «TsSKB-Progress» k vozdeistviyu tiazhiolyh zariazhennyh chastits i vysokoenergetichnyh protonov kosmicheskogo prostranstva. (Instructions on methods for providing anti-upset and failsafe abilities of onboard electronics in products of FSUO «SSPSRC «CSKB-Progress» under influence of heavy charged particles and high-energy protons in space). Part 2. (in Russian).

7. Bruzzi M., Sadrozinski H. F.-W., Seiden A. Comparing radiation tolerant materials and devices for ultra rad-hard tracking detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. A 579 (2007). pp.754-761.

8. Han. Y., Jiang Y., Luan W., Zhang X. Safety Protection of Motor Driver in Nuclear Rescue Robot. *Journal of mechanical engineering*. 2017, vol. 53, no. 21, pp. 9-15. (in Chinese).

9. RD 134-0199-2012 Poriadok predvaritelnogo vybora elektronnoi komponentnoi bazy dlia obespecheniya stoikosti radioelektronnoi apparatury k vozdeistviyu ioniziruyuschih izluchenii kosmicheskogo prostranstva (Instructions for primary selection of electronic components ensuring the durability of radioelectronic equipment under exposure to space radiation). (in Russian).