

УДК 621.396.6:539.12.04 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.9.2.91.103

## **Обеспечение радиационной стойкости бортовой аппаратуры командных радиолиний при длительных сроках активного существования космических аппаратов (Часть 2)**

**Н. Н. Булгаков**, *contact@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**В. Ф. Зинченко**, *д. ф.-м. н., contact@spacecorp.ru*

*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**Аннотация.** Обобщен опыт работ, выполненных в АО «РКС» за период с 2003 по 2021 гг., по разработке бортовой аппаратуры командных радиолиний космических аппаратов различного назначения с заданным уровнем радиационной стойкости в условиях длительного воздействия ионизирующих излучений космического пространства.

Предложена методика испытаний сложных электронных модулей гибридной технологии, содержащих силовые мощные МОП транзисторы (МОПТ). Показано влияние «кумулятивного эффекта» на стойкость мощных МОПТ к необратимым эффектам одиночных событий (ЭОС).

На примере анализа имеющейся информации о сбоях в функционировании реальной бортовой аппаратуры при длительной эксплуатации в условиях космического пространства показано, что возможными причинами нештатных ситуаций (НШС) являются обратимые одиночные сбои в применяемых электрорадиоизделиях, возникающие при воздействии как тяжелых заряженных частиц (до 70 % НШС), так и электростатических разрядов (30 % НШС).

Показано, что частота возникновения одиночных сбоев может быть существенно снижена при чередовании активного и пассивного режима работы приборов бортовой аппаратуры с использованием резервных комплектов.

Эффективность разработанного методического и программного обеспечения для подтверждения радиационной стойкости бортовой аппаратуры командных радиолиний подтверждается успешной эксплуатацией в период 2005–2021 гг. порядка 100 космических аппаратов различного назначения.

**Ключевые слова:** ионизирующие излучения, радиационная стойкость, эффекты одиночных событий, командные радиолинии

## **Ensuring the Radiation Resistance of the Onboard Command Radio Link Equipment during Long Periods of Active Existence of Spacecraft (Part 2)**

**N. N. Bulgakov**, *contact@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

**V. F. Zinchenko**, *Dr. Sci. (Phys.-Math.), contact@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The experience of Joint Stock Company “Russian Space Systems” in the development of onboard equipment for command radio links of spacecraft for various purposes with a given level of radiation resistance under conditions of long-term exposure to ionizing radiation of outer space for the period from 2003 to 2021 is summarized. The main stages of work to ensure the resistance of onboard equipment to integral dose effects and the effects of single events are considered.

A test methodology for complex hybrid technology electronic modules containing power MOSFETs has been proposed. The influence of the “cumulative effect” on the resistance of high-power MOSFETs to irreversible single event effects (SEE) is shown.

On the example of the analysis of available information on the failures in the functioning of real onboard equipment during long-term operation in space conditions, it is shown that the possible causes of abnormal situations are reversible single failures in the applied electronic components arising both from the effects of heavy charged particles (up to 70 % of abnormal situations), and electrostatic discharges (30 % of abnormal situations).

The paper shows that the frequency of occurrence of single failures can be significantly reduced by alternating the active and passive mode of operation of onboard equipment devices using redundant kits.

The effectiveness of the developed methodological and software resources for confirming the radiation resistance of the onboard equipment of command radio links is proved by successful operation of about 100 spacecraft of various purposes during 2005–2021.

**Keywords:** ionizing radiation, radiation resistance, single event effects, command radio links

## Введение

Бортовая аппаратура командных радиолиний (далее БА) космических аппаратов (КА) должна сохранять работоспособность в течение длительных сроков активного существования (САС) в условиях непрерывного воздействия различных видов ионизирующих излучений (ИИ) космического пространства (КП): электронов и протонов естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетических протонов (ВЭП) галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ). При действии отдельных ВЭП и ТЗЧ могут возникать так называемые эффекты одиночных событий (ЭОС), приводящие к необратимому отказу электрорадиоизделий (ЭРИ) либо инициированию обратимых переходных процессов в схемах БА.

Основная проблема, возникающая при проектировании перспективной БА, — отсутствие в ряде случаев требуемой номенклатуры радиационностойких ЭРИ с пороговыми линейными потерями энергии (ЛПЭ) ТЗЧ относительно ЭОС в чувствительном объеме (ЧО) ЭРИ не менее  $60 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ . Доступные ЭРИ импортного производства (ИП) уровня качества «industrial» имеют, как правило, более низкие показатели радиационной стойкости (РС). С другой стороны, разработка радиационностойких ЭРИ отечественного производства (ОП) в рамках планируемых опытно-конструкторских работ (ОКР) требует определенного времени. В этих условиях необходимо применение комплекса мер для обеспечения заданных требований по РС БА, включая резервирование критичных узлов и повышение уровня методического обеспечения испытаний ЭРИ на стойкость к ЭОС. Исследования в этих направлениях, разработка методик их проведения являются важной научно-технической задачей. В следующих разделах подробно рассматриваются перечисленные вопросы с учетом накопленного в АО «РКС» за последние почти 20 лет опыта по разработке БА для КА различного назначения, стойкой к ЭОС в условиях длительного воздействия ИИ КП. Эффективность разработанного методического и программного обеспечения для прогнозирования стойкости БА к ЭОС подтверждается успешной эксплуатацией порядка 100 КА различного назначения.

## 1. Общая характеристика ЭОС в БА при воздействии ионизирующих излучений космического пространства

Одним из основных факторов, определяющих РС БА, являются ЭОС в ЭРИ высокой степени интеграции при действии отдельных ВЭП и ТЗЧ СКЛ и ГКЛ, а также ВЭП ЕРПЗ. ЭОС, возникающие в ЭРИ при действии ТЗЧ и ВЭП КП, делят на две основные группы: обратимые и необратимые ЭОС.

Обратимые ЭОС не приводят к катастрофическому отказу аппаратуры и могут быть исправлены программными методами без отключения питания БА либо временным отключением питания. Для ЭРИ, чувствительных к необратимым ЭОС, необходимо проведение экспертных оценок вероятности возникновения ЭОС в течение САС и разработка в случае необходимости мер по повышению устойчивости БА к ЭОС, включая замену критичных ЭРИ на радиационностойкие аналоги.

Необходимо отметить, что степень защищенности ЭРИ в составе приборов БА отличается сильной анизотропией и зависит от компоновки приборов БА в КА, толщины корпуса приборов и защитных свойств окружающих конструктивных элементов КА. Поэтому при расчете частот сбоев и отказов ЭРИ при воздействии ТЗЧ и ВЭП КП в общем случае, в соответствии с рекомендациями РД 134-0139-2005, необходимо использовать дифференциальные энергетические спектры протонов  $\varphi_P(E)$  и ЛПЭ-спектры ТЗЧ  $\varphi_{\text{ТЗЧ}}(L)$ , усредненные с учетом анизотропии распределения массовой толщины защиты для рассматриваемого ЭРИ. Поскольку процедура усреднения дифференциальных ЛПЭ спектров ТЗЧ и энергетических спектров ВЭП является достаточно трудоемкой, обычно для консервативных оценок частот сбоев и отказов ЭРИ для заданной орбиты КА используются указанные спектры за однородной сферической защитой толщиной, эквивалентной  $1 \text{ г/см}^2$  алюминия. Этот выбор обусловлен следующими причинами. Во-первых, указанная величина соответствует характерной минимальной толщине корпусов приборов БА. Кроме того, в диапазоне типичных толщин защиты ЭРИ в приборах БА от  $1 \text{ г/см}^2$  до  $3 \text{ г/см}^2$  дифферен-

циальные спектры  $\varphi_P(E)$ ,  $\varphi_{ТЗЧ}(L)$  изменяются достаточно слабо, так что использование при расчетах дифференциальных спектров протонов и ТЗЧ КП за однородной защитой толщиной  $1 \text{ г/см}^2$  обеспечивает получение вполне обоснованных оценок частот сбоев и отказов ЭРИ в условиях КП.

Как показывает накопленный в АО «РКС» опыт обеспечения надежного функционирования БА различных КА, основные этапы создания аппаратуры, устойчивой к ЭОС, включают [1, 2]:

- анализ перечня ЭРИ, примененных в составе БА КА, и параметров, характеризующих их устойчивость к ЭОС при действии отдельных ВЭП и ТЗЧ, при использовании имеющихся результатов испытаний, а также опубликованных данных (Datasheets для ЭРИ ИП, ТУ, статьи, материалы конференций);

- экспертные оценки частоты обратимых сбоев и вероятности возникновения необратимых отказов ЭРИ за САС для заданной орбиты КА, составление перечня ЭРИ для испытаний в пучках ВЭП и ТЗЧ;

- проведение при необходимости испытаний ЭРИ в пучках тяжелых заряженных ионов и ВЭП с целью получения основных параметров, характеризующих устойчивость ЭРИ к ЭОС;

- анализ результатов испытаний и выдача заключения об устойчивости БА к ЭОС в течение САС.

Методические вопросы, связанные с практической реализацией перечисленных выше этапов работ по обеспечению стойкости БА к ЭОС, рассматриваются в следующих разделах.

## **2. Проведение испытаний ЭРИ, примененных в БА, на стойкость к эффектам одиночных событий**

В настоящее время испытания ЭРИ на стойкость к ЭОС могут быть проведены в полном объеме только на циклотронах У-400, У-400М Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна [1, 3].

«На испытательном стенде циклотрона У-400М можно получать пучки тяжелых ионов (Ne, Ar, Kr, Xe, Bi) с энергиями от 3 до 6 МэВ/нуклон и линейными потерями энергии (ЛПЭ) от единиц

до  $\approx 70 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$  при нормальном падении пучка на поверхность облучаемого изделия. Однако низкие начальные энергии тяжелых ионов, получаемые на циклотронах, требуют облучения ЭРИ только в вакууме при снятой крышке изделия. Это не всегда возможно для современных ИЭТ, изготовленных по технологиям BGA (Ball Grid Array), SOC (System On a Chip), SIP (System In a Package), без их механического повреждения и нарушения нормального функционирования.

В отличие от циклотронов синхротронные ускорители тяжелых ионов позволяют получать ионы C, Al, Fe, Ag с энергиями на мишени до 200 МэВ/нуклон, что дает возможность проводить испытания ЭРИ без раскорпусирования изделий в диапазоне ЛПЭ тяжелых ионов от 2 до 60 МэВ·см<sup>2</sup>/мг в ЧО ЭРИ при нормальном падении на кристалл интегральной микросхемы (ИС)» [1]. Поскольку в России планируется создание нового мощного синхротрона, представляет интерес рассмотреть методики проведения испытаний ЭРИ в пучках длиннопробежных ионов, разработанные АО «РКС» совместно с АО «НИИП» в процессе проведения работ по подтверждению стойкости ЭРИ к ЭОС, вызываемых ТЗЧ [4].

### **2.1. Методические особенности проведения испытаний ЭРИ на устойчивость к эффектам одиночных событий в пучках длиннопробежных ионов**

#### **2.1.1. Определение ЛПЭ ионов в чувствительном объеме ЭРИ**

Важное значение при планировании и интерпретации результатов испытаний ЭРИ на стойкость к ЭОС имеет корректное определение ЛПЭ ионов в ЧО рассматриваемого изделия. Известно, что ЛПЭ ТЗЧ по мере торможения в материале защиты возрастают, достигая максимального значения или так называемого пика Брэгга в конце пробега. Поэтому для корректной оценки ЛПЭ ионов в ЧО ЭРИ необходимо иметь достоверную информацию об эффективной толщине корпуса ЭРИ перед ЧО. Поскольку информация о конструкции ЭРИ не всегда доступна, была разработана эффективная методика определения суммарной толщины защиты, включая корпус ЭРИ и дополнительную

защиту, перед ЧО [5]. Данная методика основана на использовании того обстоятельства, что пучок ионов выводится из магнитного кольца синхротрона в виде одиночных импульсов с частотой до 0,5 Гц; при этом каждый импульс имеет тонкую структуру, состоящую из нескольких разделенных во времени банчей (сгустков) частиц. Средняя мощность дозы в ЧО ЭРИ при воздействии одиночного импульса ионов достигает  $10^7$  рад(Si)/с при длительности около 1 мкс.

Очевидно, что величина измеряемого ионизационного тока ЭРИ в пучке ионов пропорциональна ЛПЭ ионов в ЧО ЭРИ. Таким образом, меняя толщину замедлителя перед корпусом ЭРИ путем увеличения угла падения ионов  $\alpha$  на замедлитель, можно плавно варьировать ЛПЭ ионов в ЧО. Как показал анализ полученных экспериментальных результатов, максимумы ионизационных токов и сечения тиристорного эффекта для конкретной ИС, изготовленной по КМОП-технологии, реализуются при одном и том же значении толщины замедлителя [5].

Этот факт свидетельствует, во-первых, о том, что ЛПЭ ТЗЧ в ЧО микросхемы достигают максимальной величины,  $L_{\text{МАКС}}$ , в районе пика Брэгга. Кроме того, нормируя на величину  $L_{\text{МАКС}}$ , можно по амплитуде ионизационного тока оценивать величины ЛПЭ ТЗЧ на выходе из замедлителя при промежуточных значениях толщины, что позволяет существенно расширить диапазон ЛПЭ в ЧО ЭРИ для конкретного типа иона.

### 2.1.2. Страгглинг ЛПЭ тяжелых ионов в чувствительном объеме ЭРИ

Ввиду статистической природы взаимодействия ионов с веществом мы имеем после прохождения моноэнергетических ионов через замедлитель широкий энергетический спектр (страгглинг энергии). Данный эффект ведет, в свою очередь, к страгглингу ЛПЭ тяжелых ионов в ЧО тестируемого ЭРИ. Поэтому для корректной интерпретации результатов испытаний ЭРИ необходимо учитывать эффекты страгглинга.

Для вычисления энергетических и ЛПЭ спектров ионов высоких энергий после прохождения через материалы был предложен следующий алгоритм, подробно рассмотренный в [6].

Очевидно, что в общем случае энергетический спектр ионов на определенной глубине  $d$  замедлителя представляет собой распределение Гаусса

$$f(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_E^2}} \exp\left[-\frac{(E - E_d)^2}{2\sigma_E^2}\right], \quad (1)$$

где средняя энергия  $E_d = E_0 - \Delta E_d$ ;

$E_0$  — начальная энергия ионов;

$\Delta E_d$  — средние потери энергии ионов после прохождения замедлителя толщиной  $d$ ;

$\sigma_E$  — страгглинг энергии.

Естественно полагать, что, по аналогии с распределением полного пробега ионов с начальной энергией  $E_0$ , распределение пробегов ионов в материале замедлителя, имеющих остаточную энергию  $E_d$ , также представляет собой гауссиан

$$f(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_R^2}} \exp\left[-\frac{(R - d)^2}{2\sigma_R^2}\right], \quad (2)$$

где, вследствие статистической независимости потерь энергии ионов в диапазонах  $[0, d]$  и  $[d, R_0]$ ,

$$\sigma_R = \left[\sigma_{R_0}^2 - \sigma_d^2\right]^{1/2}, \quad (3)$$

$\sigma_{R_0}$  — страгглинг пробегов ионов с начальной энергией  $E_0$ ,

$\sigma_d$  — страгглинг пробегов ионов с остаточной энергией  $E_d$ .

Величины  $\sigma_{R_0}$  и  $\sigma_d$  могут быть получены в результате стандартных расчетов по программе SRIM [7].

Как правило, в ограниченном диапазоне энергий вблизи средней энергии  $E_d$  в распределении (1) страгглинг энергий  $\sigma_E$  имеет вид  $\sigma_E \approx \alpha\sigma_R$ .

Что касается зависимости поведения распределения  $f(E)$  от толщины замедлителя  $d$ , то можно отметить следующее. Как показывают результаты проведенных расчетов, в диапазоне  $d \leq 0,9R_0$   $f(E)$  представляет гауссиан, симметричный относительно средней энергии  $E_d$ .

При  $d > 0,9R_0$  распределение  $f(E)$  в области энергий  $E < E_d$  постепенно деградирует, так как часть ионов не достигает ЧО ЭРИ и поглощается в замедлителе. В этом случае распределение  $f(E)$  рассчитывается на основании распределения ионов



по пробегам (2), (3), используя закон сохранения частиц, т. е.

$$f(E) = f[R(E)] \frac{dR}{dE}. \quad (4)$$

Для  $d \geq R_0$  вследствие страгглинга пробегов часть ионов не достигает границы замедлителя  $d$ . В этом случае распределение ионов по пробегам представляет собой «хвост» гауссиана (2) со средней энергией  $E_d = 0$ , так что флюенс ионов быстро уменьшается с ростом  $d$ . Энергетический спектр ионов, выходящих из замедлителя, имеет вид

$$f(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{E_0}^2}} \exp \left[ -\frac{(E + E(\Delta R))^2}{2\sigma_{E_0}^2} \right], \quad (5)$$

где  $\sigma_{E_0}$  — страгглинг энергий при  $d = R_0$ ;

$E(\Delta R)$  — средняя энергия ионов, имеющих пробег  $\Delta R = d - R_0$ .

На основе полученных энергетических спектров ионов для толщины замедлителя  $d$ , используя (1), (4), (5), можно рассчитать ЛПЭ-спектры ионов  $f(L)$ .

Для достаточно малых толщин замедлителя  $d \leq 0,9R_0$  распределение  $f(L)$  представляет собой гауссиан

$$f(L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_L^2}} \exp \left[ -\frac{(L - L_d)^2}{2\sigma_L^2} \right], \quad (6)$$

где  $L_d$  — ЛПЭ ионов со средней энергией  $E_d$  в ЧО ИЭТ.

Страгглинг ЛПЭ в диапазоне пробегов  $d \leq 0,9R_0$  может быть приближенно представлен в виде

$$\sigma_L \approx [L(E_d - \sigma_E) - L(E_d + \sigma_E)]/2. \quad (7)$$

В случае  $d > 0,9R_0$ , когда распределение ионов по ЛПЭ вблизи границы замедлителя не является симметричным гауссианом (6), распределение  $f(L)$  рассчитывается по аналогии с (4) как

$$f(L) = f[E(L)] \frac{dE}{dL}. \quad (8)$$

Для примера на рис. 1 представлены типичные дифференциальные ЛПЭ спектры ионов  $Ag^{107}$

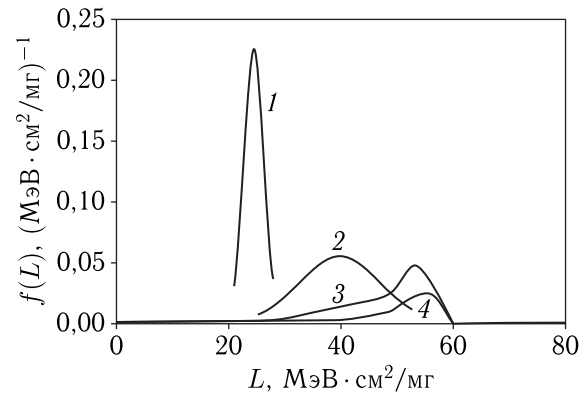


Рис. 1. Дифференциальные ЛПЭ спектры ионов  $Ag^{107}$  в кремнии после прохождения замедлителя из стали толщиной, равной: 1 —  $0,75R_0$ , 2 —  $0,9R_0$ , 3 —  $0,98R_0$ , 4 —  $1,02R_0$

( $E_0 = 9,7$  ГэВ) после прохождения определенной толщины замедлителя из стали.

Зная дифференциальные ЛПЭ спектры ионов на границе ЧО ЭРИ, можно рассчитать основные характеристики распределения ионов по ЛПЭ в ЧО, включая среднюю энергию  $L_{CP}$  и страгглинг ЛПЭ  $\sigma_L$  в ЧО.

С целью экспериментальной проверки эффективности использования длиннопробежных ионов для испытаний ЭРИ на стойкость к ЭОС были проведены исследования чувствительности микросхемы микроконтроллера, изготовленной по КМОП технологии, к ТЭ при действии ионов железа и серебра [4].

Корпус рассматриваемой ИС был сделан из ковара толщиной 400 мкм. Также учитывали слой воздуха порядка 25 см между ИС и мишенью ускорителя. Для регулировки энергии ионов на входе в ЧО ИС использовался замедлитель из стали переменной величины. Начальные энергии ионов железа и серебра составляли 4,7 ГэВ и 9,7 ГэВ соответственно. Дифференциальные энергетические и ЛПЭ спектры ионов после прохождения через замедлитель были рассчитаны в рамках рассмотренного выше подхода.

После обработки экспериментальных данных была получена зависимость сечения ТЭ от ЛПЭ тяжелых ионов  $\sigma(L)$  (рис. 2). Таким образом, пучки ионов высоких энергий синхротронных ускорителей могут эффективно использоваться для проведения испытаний ЭРИ на стойкость к ЭОС

без снятия корпуса ЭРИ в нормальных условиях. ЛПЭ тяжелых ионов лежат в диапазоне от 2 до 60 МэВ·см<sup>2</sup>/мг(Si), что позволяет проводить испытания ЭРИ на стойкость к ЭОС с учетом требований, предъявляемых к изделиям и аппаратуре космического применения.

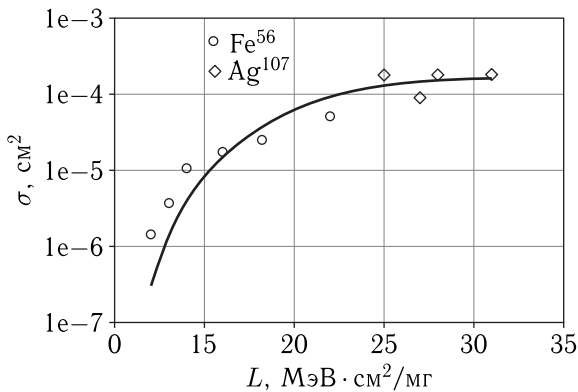


Рис. 2. Зависимость сечения ТЭ для ИС микроконтроллера от ЛПЭ тяжелых заряженных частиц. Кружки и ромбы — экспериментальные данные, кривая — аппроксимация функцией Вейбулла с параметрами  $S = 3$ ,  $L_{\text{ПОР}} = 10,5 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ ,  $W = 12 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ ,  $\sigma_{\text{НАС}} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$

Предложенный подход позволяет учесть эффекты страгглинга ЛПЭ ионов в ЧО ЭРИ после прохождения ионов через корпус изделия и дополнительный замедлитель.

## 2.2. Особенности испытаний на стойкость к ЭОС сложных электронных модулей гибридной технологии

В настоящее время в составе различных электронных модулей (ЭМ) БА применяются мощные МОПТ, например в качестве коммутаторов в импульсных источниках питания и DC/DC преобразователях, мощных источников тока, ключей общего назначения и т. д. Мощные МОПТ применяются в ЭМ обычно в качестве ключевых элементов; при этом электрический режим их функционирования при переключении из открытого состояния в закрытое характеризуется резкими скачками напряжения  $U_{\text{си}}$  на фронте импульса относительно заданного напряжения  $U_{\text{вх}}$ .

Одним из основных факторов, определяющих безотказное функционирование указанных ЭМ

при длительных САС в условиях КП, является устойчивость МОПТ к необратимым ЭОС при действии ТЗЧ КП. К данным ЭОС относятся пробой подзатворного диэлектрика (Single Event Gate Rupture — SEGR) и выгорание паразитного биполярного транзистора (Single Event Burnout — SEB).

Параметры чувствительности элементов БА к ЭОС, в частности пороговые ЛПЭ ТЗЧ и сечение насыщения, необходимые для оценки вероятности возникновения необратимых ЭОС за САС, определяют на основании результатов испытаний на ускорителях ТЗЧ. Следует, однако, отметить, что наличие в составе ЭМ, наряду с мощными МОПТ, элементов микроэлектроники, изготовленных по другим технологиям, в частности КМОП-технологии, требует учета данного обстоятельства в методиках проведения испытаний ЭМ [8].

Наиболее простой подход можно реализовать, если схема функционирования (конструкция) ЭМ позволяет провести испытания мощного МОПТ в его составе как дискретного элемента и получить необходимые параметры для прогнозирования его чувствительности к необратимым ЭОС. Однако для ЭМ гибридной технологии такой подход, как правило, неприменим, поскольку электрический режим функционирования МОПТ в составе ЭМ достаточно сложно обеспечить при испытаниях дискретного МОПТ. В этом случае испытания мощных МОПТ на устойчивость к необратимым ЭОС должны, очевидно, проводиться в составе ЭМ. При этом для корректной интерпретации результатов испытаний необходимо учитывать ряд методических вопросов, которые будут подробно рассмотрены ниже.

Поскольку ЭМ, как отмечалось выше, содержат элементы различной технологии, одним из основных вопросов при проведении испытаний в пучках ТЗЧ является выбор нормы испытаний, т. е. предельного флюенса ТЗЧ,  $\Phi_{\text{МАКС}}$ , воздействующего на ЭМ.

Для мощных МОПТ в стандартах США и Европейского космического агентства рекомендуется выбирать  $\Phi_{\text{МАКС}}$  в диапазоне от  $10^5$  до  $10^7$  част/см<sup>2</sup> (MIL-STD-750E method 1080.1; ESA ESCC basic specification no. 25100; EIA/JESD57). Следует, однако, отметить, что в работе [9], авторы которой исследовали зависимость стойкости мощных МОПТ к так называемому послерадиационному

стресс-тесту затвора (PIGST — Post Irradiation Gate Stress Test) от набранного флюенса ТЗЧ, было показано, что, начиная с флюенсов ионов выше  $\approx 2 \cdot 10^5$  част/см<sup>2</sup>, напряжение пробоя подзатворного окисла в мощных МОПТ при проведении процедуры PIGST резко снижается. При этом образующиеся в окисле остаточные дефекты показали достаточно высокую устойчивость к отжигу при температуре до 100 °С.

Для объяснения наблюдаемого эффекта в [9] была выдвинута гипотеза о формировании во время облучения МОПТ скрытого (латентного) канала пробоя вследствие кратного наложения треков тяжелых ионов в подзатворном окисле над так называемой горловиной (песк областью) рассматриваемого МОПТ, наиболее чувствительной к эффекту SEGR.

В результате проведенных расчетных исследований с использованием метода Монте-Карло было получено, что уменьшение напряжения пробоя окисла при флюенсах ионов выше  $\approx 2 \cdot 10^5$  хорошо коррелирует с ростом вероятности трехкратного наложения треков ионов в окисле над песк-областью МОПТ [9]. Можно полагать, что данный эффект представляет собой проявление «кумулятивного эффекта» больших флюенсов ионов.

Рассмотрим имеющиеся экспериментальные результаты [8] с точки зрения оценки возможного влияния «кумулятивного эффекта» на необратимые отказы МОПТ в составе ЭМ. Как известно, физическая модель влияния «кумулятивного эффекта» на устойчивость мощных МОПТ к необратимым ЭОС к настоящему времени не разработана. Тем не менее в рамках феноменологического подхода представляет интерес оценить роль наиболее вероятных механизмов возникновения пробоя подзатворного окисла мощных МОПТ в составе ЭМ. Очевидно, что наибольшую опасность для безотказного функционирования МОПТ в закрытом режиме представляют скачки напряжения  $U_{\text{си}}$  при срабатывании ключа. На основании анализа типичных осциллограмм  $U_{\text{си}}(t)$ ,  $U_{\text{зи}}(t)$  при функционировании мощного МОПТ в ключевом режиме, а также опубликованных результатов по данной тематике [9] рассмотрим наиболее вероятные механизмы возникновения пробоя подзатворного окисла МОПТ в составе ЭМ.

Согласно концепции «кумулятивного эффекта» при воздействии больших флюенсов ионов, превышающих величину порядка  $10^5$  част/см<sup>2</sup>, потенциальный канал пробоя подзатворного окисла SiO<sub>2</sub> формируется за счет многократного наложения треков ТЗЧ над песк-областью подзатворного окисла МОПТ [9]. В этом случае скачки напряжения при переключении электрического режима МОПТ играют роль триггера, инициирующего пробой окисла через сформировавшийся за счет «кумулятивного эффекта» канал пробоя.

Для оценки вероятности реализации указанного механизма SEGR необходимо иметь следующие параметры мощного МОПТ (технология HEXFET):

- полное число HEXFET-ячеек;
- площадь подзатворного окисла МОПТ над песк-областью для отдельной ячейки и для МОПТ в целом;
- максимальное расстояние между точками входа ТЗЧ в окисел,  $\Delta R$ , используемое в качестве критерия наложения треков ТЗЧ.

Исходя из анализа имеющихся данных по топологии мощных МОПТ было получено, что типичная площадь подзатворного окисла МОПТ над песк-областью составляет  $\approx 120$  мкм<sup>2</sup> для отдельной HEXFET-ячейки и  $\approx 1,44 \cdot 10^6$  мкм<sup>2</sup> для МОПТ в целом [8].

Что касается параметра  $\Delta R$ , то из анализа представленных в [10] микрофотографий поврежденной области на поверхности подзатворного окисла МОП структуры при воздействии одиночных ТЗЧ была получена характерная величина  $\Delta R$ , равная 2,5 мкм.

Были проведены расчеты вероятности кратных наложений треков ионов в окисле над песк-областью МОПТ (рис. 3).

Из сравнения рассчитанных вероятностей кратного наложения треков частиц и экспериментальных результатов [8] следует, что пробой окисла МОПТ при типичной величине флюенса ТЗЧ порядка  $10^5$  част/см<sup>2</sup> с высокой вероятностью обусловлен наложением двух и более треков частиц над песк-областью подзатворного окисла МОПТ.

Таким образом, анализ экспериментальных данных и результатов расчетов подтверждают сделанное выше предположение, что канал пробоя

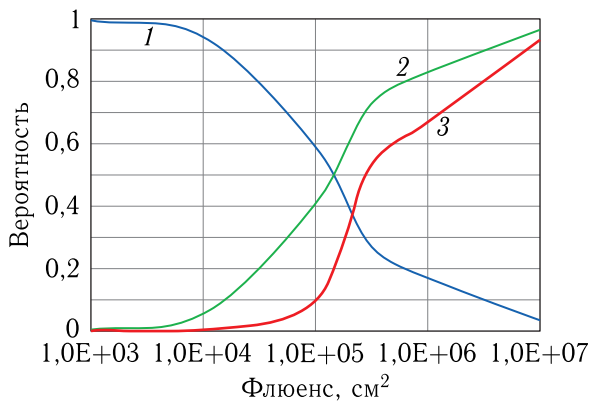


Рис. 3. Вероятности кратных наложений треков в подзатворном окисле над песк-областью МОПТ при различных флюенсах ТЗЧ (чувствительная площадь окисла  $1,44 \cdot 10^6$  мкм<sup>2</sup>): 1 — одиночные треки, 2 — наложение двух и более треков, 3 — наложение трех и более треков

подзатворного окисла МОПТ формируется вследствие наложения двух и более треков частиц при флюенсах ионов не менее  $10^5$  част/см<sup>2</sup>, а скачки напряжения на фронте импульса  $U_{си}$  играют роль триггерного механизма.

В заключение данного раздела можно сделать следующие выводы.

Существующий подход к испытаниям сложных ЭМ при использовании единой нормы испытаний ( $10^7$  част/см<sup>2</sup>), без учета технологии изготовления комплектующих элементов, может приводить к необоснованной отбраковке потенциально стойких изделий.

Проведенный анализ имеющихся экспериментальных данных подтверждает предположение о заметном влиянии «кумулятивного эффекта» на необратимые отказы МОПТ в составе ЭМ, начиная с флюенсов ТЗЧ более  $10^5$  част/см<sup>2</sup>.

При испытаниях сложных ЭМ, содержащих силовые МОПТ, на стойкость к необратимым ЭОС флюенс ионов, набираемый МОПТ за все сеансы облучения, не должен превышать  $\approx 10^5$  част/см<sup>2</sup>. Для обоснования нормы испытаний мощных МОПТ в составе ЭМ, при известной информации о топологии МОПТ, целесообразно использовать результаты расчетов вероятности кратных наложений треков ТЗЧ в подзатворном окисле.

При наличии в составе ЭМ элементов КМОП технологии облучение ЭМ, до набора требу-

емого для данных элементов флюенса ионов  $10^7$  част/см<sup>2</sup>, должно проводиться при защищенном от воздействия пучка ионов МОПТ.

Вопросы влияния «кумулятивного эффекта» на результаты испытаний ЭМ в зависимости от вида и ЛПЭ ионов, а также электрического режима функционирования мощных МОПТ в составе ЭМ являются предметом дальнейших исследований.

### 3. Повышение устойчивости бортовой аппаратуры к ЭОС, используя «холодное» резервирование критических узлов

БА должна обладать высокой надежностью в условиях действия различных дестабилизирующих факторов КП. Задача прогнозирования вероятности безотказной работы (ВБР) для конкретной БА решается в рамках теории надежности на основе анализа физико-химических процессов, протекающих в применяемых полупроводниковых приборах (ППП) и ИС при длительном функционировании в условиях КП. В общем случае ВБР определяется как нерадиационными факторами, обычно рассматриваемыми в расчетах надежности БА, так и необратимыми ЭОС в критических ЭРИ при действии ТЗЧ и ВЭП КП.

Несмотря на разнообразие физических процессов, приводящих к отказам БА, можно выделить два основных вида отказов при воздействии нерадиационных факторов:

- постепенные или параметрические отказы вследствие деградации параметров рассматриваемого ЭРИ в результате медленно протекающих физико-химических процессов, т.е. дефекты, приводящие к отказам, имеют тенденцию накапливаться в течение времени функционирования БА (аналогично интегральным дозовым эффектам);

- внезапные отказы вследствие необратимой деградации параметров критических ЭРИ, возникающие в случайные моменты времени.

В условиях КП деградацию параметров ЭРИ, обусловленную параметрическими отказами, трудно отличить от деградации параметров вследствие влияния обычных интегральных дозовых эффектов.



Это может быть связано с возможным синергизмом действия радиационных и нерадиационных факторов при возникновении параметрических отказов. Поэтому в дальнейшем имеет смысл рассматривать только внезапные случайные отказы при действии нерадиационных факторов.

Необратимые отказы ЭРИ при действии ТЗЧ и ВЭП КП имеют в основе физические механизмы, принципиально отличные от механизмов внезапных отказов, обусловленных нерадиационными факторами. Как показывает анализ опубликованных работ [11], необратимые отказы ЭРИ при действии нерадиационных факторов определяются:

- структурными несовершенствами исходных материалов изделия, обусловленных наличием примесей, дислокаций, градиентов концентраций и т. п.;
- конструктивно-технологическими дефектами процесса производства изделия;
- внешними воздействиями, включая электромагнитные и тепловые поля, механические нагрузки, определяемые режимом функционирования изделий.

С другой стороны, внезапные случайные отказы критичных ЭРИ в составе приборов БА при воздействии одиночных ТЗЧ и ВЭП КП относятся к микродозиметрическим эффектам и определяются такими параметрами, как зависимость сечения эффекта от ЛПЭ ТЗЧ (энергии протонов), пороговые ЛПЭ ТЗЧ (пороговая энергия протонов). Основной причиной возникновения необратимых ЭОС является генерация предельных уровней концентрации неравновесных носителей заряда (ННЗ) в треке ТЗЧ в ЧО рассматриваемого изделия. При генерации ННЗ в области сильного электрического поля возникают значительные локальные токи, что может мгновенно приводить к переходу ЭРИ в низкоомный режим функционирования с последующим необратимым отказом (тиристорный эффект в микросхемах, изготовленных по КМОП-технологии, или пробой подзатворного диэлектрика в мощных МОПТ).

Как показывает практика, с точки зрения обеспечения высокой ВБР для БА наиболее эффективной является схема деления рассматриваемого прибора (блока) БА, состоящая из  $n$  параллельно включенных комплектов, включая основной и  $n - 1$  резервных комплектов. При этом резервные ком-

плекты находятся при отключенном питании («холодный» резерв).

ВБР для системы с «холодным» резервированием,  $R_s$ , может быть получена на основании решения системы дифференциальных уравнений Колмогорова, описывающих динамику распределения вероятностей состояний системы для марковского случайного процесса с непрерывным временем. Формула для  $R_s$  при наличии  $n$  полного числа комплектов имеет вид

$$R_s = \exp(-\lambda T)(1 + \lambda T + \dots + (\lambda T)^{n-1}/(n-1)!), \quad (9)$$

$\lambda$  — частота отказов,  $T$  — САС системы.

Используя (9), нетрудно показать, что при  $\lambda T \leq 0,1$  вероятность отказа системы с «холодным» резервированием за САС можно представить в виде

$$F_s = 1 - R_s \approx (\lambda T)^n/n! \quad (10)$$

При оценках ВБР БА обычно учитывают только нерадиационные факторы, полагая, что заряженные частицы КП не оказывают заметного влияния на надежность БА. Однако при наличии в БА ЭРИ с пороговыми ЛПЭ ТЗЧ относительно необратимых ЭОС ниже  $60 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$  всегда необходимо оценивать степень влияния на ВБР БА указанных ЭРИ.

Следует отметить, что, согласно рекомендациям РД134-0139-2005, влиянием ТЗЧ и ВЭП КП на надежность БА можно пренебречь, если частота отказов БА, обусловленная заряженными частицами КП,  $\lambda_{зч}$ , не превышает одну десятую от частоты отказов, вызываемых нерадиационными факторами,  $\lambda_{НР}$ . В случае если указанное условие не выполняется, при расчетах ВБР БА в формулах (9), (10) в качестве частоты отказов  $\lambda$ , согласно РД134-0139-2005, целесообразно использовать сумму частот отказов  $\lambda_{зч}$  и  $\lambda_{НР}$ . Справедливость данного подхода определяется следующими обстоятельствами:

- плотность вероятности распределения временных интервалов между случайными событиями необратимых отказов, обусловленных как нерадиационными, так и радиационными факторами, подчиняется экспоненциальному распределению;
- физические процессы и области в структуре критичных ЭРИ, определяющие чувствительность

к отказам при действии радиационных и нерадационных факторов, принципиально различны, т.е. случайные события отказов, вызываемые данными факторами, являются независимыми;

– «холодные» резервные комплекты при действии ТЗЧ КП к отказам вообще нечувствительны (для нерадационных факторов в расчетах обычно принимают, что частота отказов «холодных» резервных комплектов в 10 раз меньше, чем частота отказов в «горячем» комплекте).

Как правило, частота отказа БА, обусловленная нерадационными факторами, значительно выше частоты необратимых отказов при действии ТЗЧ и ВЭП КП. Тем не менее выполнение данного условия должно контролироваться на всех этапах разработки БА [12], а применение ЭРИ с повышенной чувствительностью к необратимым ЭОС должно допускаться только после детального анализа условий их функционирования в приборах БА (электрического и температурного режима, длительности нахождения в активном состоянии), на основании которого делается заключение о возможности их применения в БА. При высокой вероятности возникновения необратимых ЭОС в критичных ЭРИ (даже при использовании «холодного» резервирования) и снижении общей ВБР аппаратуры ниже заданного уровня указанные ЭРИ подлежат замене либо требуют разработки эффективных методов парирования необратимых ЭОС.

#### 4. Особенности прогнозирования отказов и сбоев БА в условиях комплексного воздействия различных дестабилизирующих факторов КП

Проверка достоверности используемых методик прогнозирования частоты сбоев и отказов БА при воздействии ТЗЧ и ВЭП КП представляет определенные трудности ввиду ограниченной информации о нештатных ситуациях (НШС) в функционировании БА, а также в связи с тем обстоятельством, что в общем случае сбои и отказы в БА КА при эксплуатации в условиях КП определяются комплексным воздействием дестабилизи-

рующих факторов КП (ТЗЧ и ВЭП, электростатическими разрядами (ЭСР), накопленной дозой ИИ КП и др.). Поскольку в существующей НТД вопросы синергизма действия различных факторов не рассматриваются, представляет интерес провести анализ имеющейся информации о сбоях и отказах в функционировании реальной БА при длительной эксплуатации в условиях КП [13].

Как правило, количество обратимых сбоев в функционировании приборов БА КА, зарегистрированных за САС, недостаточно, чтобы получить обоснованную статистику и определить причины данных событий для конкретного КА. С этой точки зрения достаточно информативной является статистика НШС в функционировании приборов БА одного из КА на ГСО с момента запуска 15.07.2011 г. по 01.04.2018 г. Как показал проведенный анализ, наиболее вероятной причиной НШС (всего 31 за указанный период) являются «мягкие» сбои типа SEU (Single Event Upset) в функционировании микропроцессора (МП), изготовленного по КМОП технологии с проектной нормой 0,5 мкм. Указанные НШС парировались перезапуском питания прибора, в состав которого входит данный МП.

На рис. 4 представлено распределение НШС по годам за указанный период наблюдений.

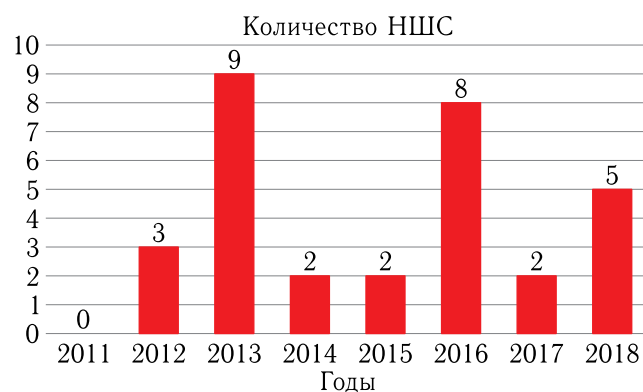


Рис. 4. Распределение сбоев в функционировании приборов БА по годам

Анализ причин возникновения НШС естественно начать с установления корреляции между датами регистрации НШС и мощных солнечных вспышек в течение текущего 24-го цикла солнечной активности. Как показало рассмотрение информации, представленной в каталогах о солнечной активности,

только в двух случаях была зарегистрирована корреляция между датами возникновения НШС и солнечных протонных событий, а именно две НШС были отмечены 08.03.2012 г. после мощной солнечной вспышки 07.03.2012 г. с увеличением интенсивности протонного излучения более чем на три порядка по сравнению с фоновым уровнем [14].

Таким образом, можно полагать, что большинство зарегистрированных НШС обусловлены случайными событиями, связанными с возникновением SEU при действии фоновых потоков ТЗЧ и высокоэнергетических протонов (ВЭП) КП, а также с импульсными электрическими наводками, обусловленными ЭСР.

Рассмотрим более подробно представленное на рис. 4 распределение НШС по годам. Отчетливо видны два максимума в распределении НШС, а именно в 2013 г. и 2016 г. Следует отметить, что начиная с 2014 г. с целью уменьшения темпов роста накопленной дозы в активных областях ЭРИ КМОП-технологии и предполагая, что чувствительность МП к SEU возрастает с дозой предварительного облучения, начали проводить периодическое чередование (раз в 2 недели) активного и пассивного режимов работы прибора БА, используя резервные комплекты. Это объясняет наблюдаемый резкий рост числа НШС в 2013 г., а также последующий их спад в 2014 г. в связи с частичным отжигом дозовых дефектов в чувствительном объеме микросхемы МП (окисле  $\text{SiO}_2$ ) при периодическом переключении прибора в пассивный режим.

Следует отметить, что в 2016 г., несмотря на принятый режим переключения активного и пассивного режимов функционирования приборов БА, вновь наблюдался резкий рост частоты возникновения НШС. В качестве одной из возможных причин данного эффекта может служить влияние ЭСР, обусловленных объемным зарядом печатных плат в приборах БА, а также диэлектрической изоляции кабельных линий связи быстрыми электронами. При этом ЭСР в диэлектрических структурах в составе БА КА могут быть инициированы отдельными ТЗЧ при напряженности электрического поля значительно ниже критической напряженности пробоя в лабораторных условиях [15, 16].

Проведем анализ распределения НШС по годам (рис. 4) с точки зрения оценки вклада ЭСР.

Будем полагать, что сбой в функционировании МП обусловлен ЭСР, если плотность потока быстрых электронов  $\varphi(E > 2)$  в течение одного–двух дней перед сбоем превышает пороговую величину  $10^3 \text{ (см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер)}^{-1}$  [15]. Данные о динамике изменения плотности потока быстрых электронов на геостационарной орбите были взяты из результатов измерений, полученных спутниками GOES. Было показано, что 3 НШС в 2013 г., 5 НШС в 2016 г. и одну НШС в 2018 г. можно считать обусловленными ЭСР, поскольку они сопровождались значительным превышением плотностью потока электронов  $\varphi(E > 2)$  указанной выше пороговой величины.

Исключив из НШС события, сопровождавшиеся высоким уровнем плотности потока быстрых электронов  $\varphi(E > 2)$  и, согласно сделанному предположению, обусловленные влиянием ЭСР, а также 2 события в 2012 г., коррелирующие с мощной солнечной вспышкой, получим распределение НШС, вызванных воздействием фоновых потоков ТЗЧ и ВЭП КП по годам (рис. 5).

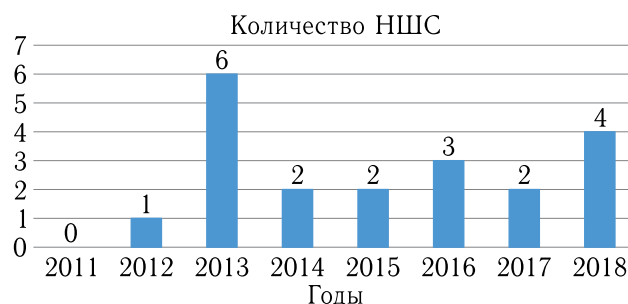


Рис. 5. Распределение сбоев в функционировании приборов БА, обусловленных ТЗЧ и ВЭП КП, по годам

Совместный анализ распределения, представленного на рис. 5, с усредненными годовыми дозовыми нагрузками на БА для ГСО [13], полученными с использованием данных спутника GOES по плотности потока быстрых электронов, позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, прослеживается заметная корреляция между дозовыми эффектами и частотой НШС. Периодическое чередование активного и пассивного режима работы прибора БА позволило существенно снизить частоту НШС в течение 2014–2015 гг. за счет частичного отжига дозовых эффектов. Тенденция роста частоты НШС с 2016 г. обусловлена в первую очередь ростом годовых дозовых нагрузок на приборы БА.

В заключение остановимся на вопросе выбора оптимального интервала времени при чередовании активного и пассивного режима функционирования приборов БА с целью уменьшения частоты НШС, обусловленных их случайным характером. С этой целью преобразуем распределение НШС по годам (рис. 5) в более удобное для анализа распределение интервалов времени между НШС (см. таблицу).

Таблица. Распределение интервалов времени между НШС в функционировании прибора БА

Интервал, мес	Число сбоев	Плотность вероятности $F(t)$ , мес <sup>-1</sup>
0–1	6	0,3
1–3	8	0,2
3–5	1	0,025
5–7	4	0,1
7–9	1	0,025

Полученное распределение интервалов времени между НШС удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальным распределением

$$F(t) = n_0 \exp(-n_0 t), \quad n_0 = 0,3 \text{ мес}^{-1}. \quad (11)$$

Используя полученную зависимость  $F(t)$ , можно показать, что вероятность возникновения НШС в интервале времени до двух недель не превышает 0,15. Ранее мы отмечали, что, начиная с 2014 г. с интервалом в 2 недели, применялось периодическое чередование активного и пассивного режимов работы прибора БА с целью снижения темпов накопления дозовых эффектов. Сделанные выше оценки показывают, что выбранный интервал позволяет также достаточно эффективно снижать частоту НШС, обусловленных воздействием фоновых потоков ТЗЧ и ВЭП КП.

В заключение данного раздела можно сделать следующие выводы.

Проведенный анализ показал, что основной причиной НШС в приборах БА за период функционирования с 2011 г. по 2018 г. на ГСО являются одиночные сбои типа SEU в микропроцессоре ИП, которые могут быть обусловлены как воздействием ТЗЧ КП (до 70 % НШС), так и ЭСР, возникающими при объемном зарядении диэлектрических материалов в БА (30 % НШС).

Наблюдается синергизм между дозовыми эффектами и чувствительностью БА к одиночным сбоям. Показано, что частота возникновения SEU может быть существенно снижена при чередовании активного и пассивного режима работы приборов БА с использованием резервных комплектов. Данный режим функционирования БА приводит к замедлению темпов роста накопленной дозы в активных областях ЭРИ и снижению их чувствительности к SEU.

## Заключение

Рассмотрены актуальные вопросы обеспечения устойчивости ЭРИ в составе приборов БА к необратимым и обратимым ЭОС при воздействии ТЗЧ и ВЭП КП. Разработано методическое обеспечение испытаний ЭРИ на стойкость к ЭОС в пучках ионов синхротронных ускорителей с энергиями ионов до 200 МэВ/нуклон. Предложены методики локализации ЧО, а также учета страгглинга ЛПЭ ионов в ЧО ЭРИ.

Предложена методика испытаний сложных электронных модулей гибридной технологии, содержащих силовые МОПТ. Показано влияние «кумулятивного эффекта» на стойкость мощных МОПТ к необратимым ЭОС при флюенсах ТЗЧ выше  $10^5$  част/см<sup>2</sup>.

На примере анализа имеющейся информации о сбоях в функционировании реальной БА при длительной эксплуатации в условиях КП показано, что возможными причинами НШС являются обратимые одиночные сбои в применяемых ЭРИ, возникающие при воздействии как ТЗЧ (до 70 % НШС), так и ЭСР (30 % НШС).

ЭСР в диэлектрических структурах в составе БА КА могут быть инициированы отдельными ТЗЧ при напряженности электрического поля значительно ниже критической напряженности пробоя в лабораторных условиях.

Эффективность разработанного методического и программного обеспечения для подтверждения РС БА командных радиолиний подтверждается успешной эксплуатацией в период 2005–2021 гг. порядка 100 КА различного назначения на НОО, СОО, ГСО, ВЭО и лунной орбитах.



## Список литературы

1. Анашин В. С., Бодин В. В., Герасимов В. Ф. и др. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 255 с.
2. Зинченко В. Ф., Лаврентьев К. В., Липский А. К., Усейнов Р. Г., Булгаков Н. Н., Сахарова Л. Ю., Прогнозирование вероятности возникновения эффектов одиночных событий в аппаратуре космических объектов при действии отдельных заряженных частиц // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2011, вып. 3. С. 80–83.
3. Зинченко В. Ф., Лаврентьев К. В., Емельянов В. В., Ватуев А. С. Сравнительный анализ механизмов пробоя тонких окислов SiO<sub>2</sub> в структурах металл-окисел-полупроводник при воздействии тяжелых заряженных частиц и импульсного электрического напряжения // Журнал технической физики, 2016, вып. 2. С. 30–36.
4. Зинченко В. Ф., Лаврентьев К. В., Усейнов Р. Г., Алексеев Н. Н., Булгаков Н. Н., Исследование возможностей использования ускорителя тяжелых частиц У-10 ИТЭФ для моделирования необратимых отказов в ИЭТ при действии отдельных заряженных частиц космического пространства // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2010. С. 98–103.
5. Зинченко В. Ф., Лаврентьев К. В., Липский А. К. Определение линейных потерь энергии высокоэнергетических ионов в чувствительном объеме изделий электронной техники при проведении испытаний на устойчивость к эффектам одиночных событий // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2012, вып. 1. С. 32–36.
6. Зинченко В. Ф., Лаврентьев К. В., Липский А. К. Экспериментальные исследования страгглинга энергии и линейных потерь энергии тяжелых заряженных частиц после прохождения замедлителя // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2013, вып. 1. С. 24–28.
7. Ziegler J.F., Biersack J.P., and Littmark U. The Stopping and range of ions in solids. New York: Pergamon, 1985.
8. Булгаков Н. Н., Зинченко В. Ф., Сидоренко И. Е. Методические особенности испытаний электронных модулей, содержащих мощные МОП-транзисторы, на стойкость к необратимым эффектам одиночных событий // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2021, вып. 1. С. 12–16.
9. Peyre D., Poivey C., Binois C., et al. SEGR study on power MOSFETs: Multiple impacts assumption // IEEE Trans. on Nucl. Sci., 2008, vol. 57, № 1. P. 2181–2187.
10. Wrobel T.F. On heavy ion induced hard-errors in dielectric structures // IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1987, vol. 34, № 6. P. 1262–1268.
11. Маклюк В. В. и др. Анализ физико-химических процессов, определяющих отказы интегральных схем // Инженерный вестник, 2006, вып. 1(21)3. С. 229-234.
12. Артюхова М. А., Полесский С. Н. Разработка методики проектной оценки надежности радиоэлектронного оборудования с учетом влияния ионизирующих излучений // Вопросы радиоэлектроники, 2019, № 1. С. 57–63.
13. Булгаков Н. Н., Зинченко В. Ф. Анализ причин сбоев в работе бортовой аппаратуры космических аппаратов при функционировании на геостационарной орбите с 2011 г. по 2018 г. // Вопросы атомной науки и техники. серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2020, вып. 1. С. 39–44.
14. [www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux](http://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux)
15. Frederickson A.R., Holeman E.G., Multen E.G. Characteristics of spontaneous electrical discharging of various insulators in space radiations // IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1992, vol. 39, № 6. P. 1773–1782.
16. Акишин А. И. Радиационные аномалии в космическом оборудовании, вызванные электроразрядными явлениями в облученных диэлектриках. В кн.: Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия, т. 17. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: ЭНЦИТЕХ, 2000. С. 5–60.