

Армен В. Согоян¹, Анатолий А. Смолин², Александр И. Чумаков³

^{1,3}Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия

²Акционерное общество «Экспериментальное научно-производственное объединение
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ»,
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия

¹e-mail: avsog@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9380-239X>

²e-mail: aasmol@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9396-1753>

³e-mail: aichum@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6270-2663>

ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ТРЕБОВАНИЯМ ПО СТОЙКОСТИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.1.06>

Аннотация. Целью проведения квалификационных или контрольных радиационных испытаний является подтверждение соответствия стойкости изделия заданным требованиям, что в ряде случаев может быть достигнуто без полной характеристики радиационного поведения изделия, обеспечивая тем самым существенное снижение затрат на проведение испытаний. В данной работе предлагается подход к определению норм испытаний при оценке соответствия интегральных схем (ИС) требованиям по радиационной стойкости при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства, заданных в виде ограничений на частоты одиночных радиационных эффектов (ОРЭ). Расчет частоты ОРЭ основан на известном спектре ТЗЧ космического пространства (КП) и результатах испытаний, в результате которых определяется зависимость сечений эффектов от значений линейных потерь энергии (ЛПЭ). Оценка соответствия требованиям по стойкости к воздействию ТЗЧ КП по результатам облучения ионами только с одной величиной ЛПЭ проводится при вводе консервативных ограничений на значения сечения насыщения и порогового значения ЛПЭ. На основании анализа массива результатов испытаний установлена статистическая связь порогового значения ЛПЭ и сечения насыщения по отношению к эффектам отказов. При данных предположениях могут быть оценены необходимые флюенсы и минимальные ЛПЭ ионов для подтверждения в ходе испытаний соответствия изделия заданным требованиям. Эти значения зависят от критериальных значений предельных частот ОРЭ. Предложенный подход позволяет обосновано выбирать уровни воздействия при проведении испытаний на ускорителях ионов. В работе представлены ряд оценок норм испытаний для ИС в составе космического аппарата со сроком активного существования около 10 лет, функционирующего на геостационарной орбите, для типовых значений вероятности отказов ИС.

Ключевые слова: одиночные радиационные эффекты, тяжелые заряженные частицы, нормы испытаний, показатели радиационной стойкости, квалификационные испытания, интегральные схемы.

Для цитирования. СОГОЯН, Армен В.; СМОЛИН, Анатолий А.; ЧУМАКОВ, Александр И. ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ТРЕБОВАНИЯМ ПО СТОЙКОСТИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ. Безопасность информационных технологий, [S.l.], v. 27, n. 1, p. 68-82, 2020. ISSN 2074-7136. Доступно на: <<https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1253>>. Дата доступа: 10 feb. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.1.06>.

Armen V. Sogoyan¹, Anatoly A. Smolin², Alexander I. Chumakov³

^{1,3}National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),
Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia

²Joint Stock Company "Experimental Research and Production Association
SPECIAL ELECTRONIC SYSTEM",
Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia

¹e-mail: avsog@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9380-239X>

²e-mail: aasmol@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9396-1753>

³e-mail: aichum@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6270-2663>

Single event effects qualification of integrated circuits

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.1.06>

Abstract. The goal of qualification or monitoring of electronic device radiation testings is to ensure that devices meet the set of requirements. In some cases, this can be achieved without full characterization of radiation behavior, which leads to significant cost reduction of radiation testing. In this paper, we propose an approach to determining the test standards for evaluating the compliance of integrated circuits with the requirements for radiation hardness under heavy charged particle fluxes in outer space, set as restrictions on the frequency of single radiation effects (SER). The SER calculation is based on the known cosmic rays spectrum and effect's cross-section dependence on linear energy transfer (LET) obtained during radiation testing. The SEE qualification based on test results for just one LET value is performed using additional conservative limits on saturated cross-section and threshold LET values. Analysis of compendium of experimental data has shown that for main SEE types these limiting values can be set as 3 MeVcm²/mg for threshold LET and 30% of chip surface area for saturated cross-section. Those assumptions allows us to calculate fluence and ion LET value required for part qualification for the required SER values. The proposed approach can be used to justify test requirements for SEE testing of integrated circuits.

Keywords: single event effects, heavy ions, test requirements, radiation hardness parameters, qualification testing, integral circuits.

For citation: SOGOYAN, Armen V.; SMOLIN, Anatoly A.; CHUMAKOV, Alexander I. Single event effects qualificatoin of integrated circuits. *IT Security (Russia)*, [S.l.], v. 27, n. 1, p. 68-82, 2020. ISSN 2074-7136. Available at: <<https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1253>>. Date accessed: 10 feb. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.1.06>.

Введение

Традиционный подход к оценке соответствия интегральных схем (ИС) требованиям по стойкости к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства (КП) базируется на определении как минимум двух параметров: пороговых значений линейных потерь энергии (ЛПЭ) – L_{z0} и сечения насыщения – σ_m [1–3]. Однако наличие двух независимых параметров крайне затрудняет оценку общей характеристики стойкости интегральных схем (ИС) и сравнение их между собой. Действительно, какая из двух ИС является «более стойкой»: имеющая малые порог и сечение насыщения или имеющая больший порог и большее сечение насыщения? Однозначный ответ на этот вопрос не представляется возможным, так как в различных условиях эксплуатации, в зависимости от значений L_{z0} и σ_m , будут получаться разные результаты. Выход из сложившейся ситуации видится в задании требований в виде ограничений на максимальную частоту (вероятность) возникновения одиночных радиационных эффектов (ОРЭ) в реальных условиях эксплуатации [4, 5], так как такой подход позволяет связать характеристики параметров чувствительности и оценить стойкость ИС в заданных условиях.

В общем случае реальные условия эксплуатации могут сильно отличаться друг от друга, поэтому необходимо проводить оценку показателей стойкости ИС для типовой орбиты с наиболее жёсткими условиями воздействия ТЗЧ КП. Очевидно, что такие условия реализуются на геостационарной орбите, на которой отсутствуют условия экранировки полей ТЗЧ магнитосферой и атмосферой Земли. При этом желательно уменьшить влияние различных стохастических процессов, определяющих изменения интенсивностей излучений КП, поэтому наиболее рациональным является задание частот на геостационарной орбите, например, за 10 лет активного существования космического аппарата.

С учетом вышеизложенного частота ОРЭ ν будет определяться соотношением:

$$\nu = \int_{L_{z0}}^{L_{zmax}} \sigma_{is}(L_z) \cdot f(L_z) dL_z, \quad (1)$$

где L_z – значения ЛПЭ, L_{zmax} – максимальное значение ЛПЭ в спектре ТЗЧ КП, $\sigma_{is}(L_z)$ – зависимость сечения ОРЭ от ЛПЭ для изотропного поля излучения, $f(L_z)$ – дифференциальная ЛПЭ плотность потока ТЗЧ.

На практике оценка соответствия требованиям проводится по результатам испытаний ИС на ускорителях ионов или лазерных установках со сфокусированным лазерным излучением пикосекундной длительности при нормальном падении излучения на кристалл ИС. При этом экспериментально определяется зависимость сечения ОРЭ от ЛПЭ ТЗЧ [5]. На следующем этапе проводится пересчет результатов экспериментов для изотропного поля излучения, определение плотности ЛПЭ плотности потока для заданных условий эксплуатации и расчет с помощью соотношения (1) частот ОРЭ. Наиболее сложным в этой схеме является пересчет зависимости сечений ОРЭ как функции ЛПЭ для изотропного поля излучения, однако данный вопрос не является предметом настоящей работы.

С другой стороны, во многих случаях требуется не определение экспериментальной зависимости сечения от ЛПЭ, а лишь подтверждение того, что данное изделие соответствует заданным требованиям, т.е. оказывается достаточным ограничиться проведением только квалификационных (контрольных) испытаний. При проведении подобной оценки необходимо облучить ИС требуемым флюенсом ТЗЧ с фиксированным значением ЛПЭ и убедиться в отсутствии ОРЭ, как правило, одиночного отказа. Очевидно, в этом случае возникает вопрос, как по одному экспериментальному значению убедиться, что в заданных условиях эксплуатации частота ОРЭ не будет превышать требуемых значений. Оценке требуемого флюенса ТЗЧ (нормы испытаний) и минимального ЛПЭ при испытаниях и посвящена настоящая работа.

1. Задание зависимости сечения эффекта от ЛПЭ

Очевидно, что в общем случае для оценки частоты ОРЭ необходимо определить зависимость сечений ОРЭ от значений ЛПЭ (1). Получить подобную зависимость, исходя только исходя из проведения одного испытания при определенном значении ЛПЭ, не представляется возможным. Действительно, как показано на рис. 1, через одно экспериментальное значение можно в общем случае провести две консервативные зависимости. Первая зависимость будет определяться ограничениями по пороговому значению ЛПЭ, а вторая – сечением насыщения. Определить, какая из них будет накладывать ограничения на частоту ОРЭ, априори невозможно, поэтому необходимо проводить анализ всех возможных значений сечения насыщения и порогового ЛПЭ.

Проблема дополнительно усложняется, если при испытаниях ОРЭ не наблюдались – в этом случае можно установить лишь верхнюю границу доверительного интервала для величины сечения. При решении задачи принципиально необходимо ввести дополнительные ограничения, основанные на априорной информации об особенностях проявления ОРЭ в объекте испытаний. В качестве подобных ограничений наиболее удобно рассматривать предельно допустимые значения сечений насыщения и пороговых значений ЛПЭ.

Поскольку при отсутствии ОРЭ фактический вид зависимости $\sigma(L_z)$ для испытываемого изделия неизвестен, еще одним ключевым элементом является априорное предположение о форме зависимости сечения ОРЭ σ от ЛПЭ иона. В условиях минимума

информации наиболее подходящими для проведения оценок оказываются двухпараметрические зависимости.

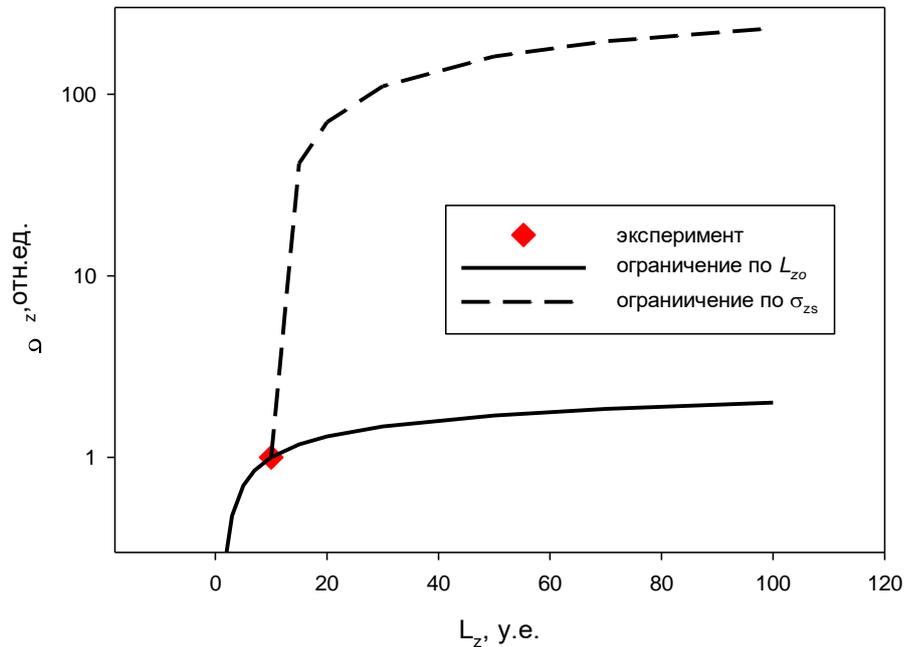


Рис. 1. Возможные варианты проведения зависимостей сечений ОРЭ от ЛПЭ при наличии одной экспериментальной точки
 (Fig. 1. Possible shapes of cross-section curves for a single experimental datapoint)

Наиболее консервативной из них является ступенчатая функция η , которую удобно использовать при аналитических оценках, но она дает очень большую погрешность при описании экспериментальных зависимостей [1, 6]:

$$\sigma_z(L_z) = \sigma_m \cdot \eta(L_z - L_{z0}), \quad (2)$$

где σ_m – сечение насыщения.

Более распространенными двухпараметрическими зависимостями являются экспоненциальная [7]:

$$\sigma(L_z) = \sigma_m \left[1 - \exp\left(-\frac{L_z - L_{z0}}{W}\right) \right] \eta(L_z - L_{z0}), \quad (3)$$

где W – параметр, определяемый по соотношению [7]:

$$W(L_{z0}) = 9.135789 + 1.400938 \cdot L_{z0} - 0.011644 \cdot L_{z0}^2 \quad (4)$$

и обратно экспоненциальная, используемая в программе КОСРАД [8]:

$$\sigma(L_z) = \sigma_m \exp\left(-\frac{10L_{z0}}{L_z}\right) \eta(L_z - L_{z0}). \quad (5)$$

Функция зависимости сечения сбоев от ЛПЭ (в расчете на бит) может быть получена из диффузионной модели [9, 10]:

$$\sigma(L_z) = a^2 \ln^2\left(\frac{L_z}{L_{z0}}\right) \eta(L_z - L_{z0}), \quad (6)$$

где a – параметр модели, коррелирующий с расстоянием между карманами.

Близкая зависимость получается и для «точечной» модели [11]:

$$\sigma(L_z) = b^2 \ln^{3/2} \left(\frac{L_z}{L_{z0}} \right) \eta(L_z - L_{z0}), \quad (7)$$

где b – параметр модели, коррелирующий с длиной собирания.

Зависимости (6) и (7), в силу специфики учета многократного характера сбоев, в общем случае не имеют ограничений по величине. Вместе с тем, как показывает проведенный анализ, они могут быть использованы для эмпирического описания экспериментальных данных при введении ограничения на область значений:

$$\sigma(L_z) = \sigma_m \begin{cases} \ln^\alpha \left(\frac{L_z}{L_{z0}} \right) / \ln^\alpha \left(\frac{L_{zs}}{L_{z0}} \right) \eta(L_z - L_{z0}), & L_z < L_{zs} \\ 1, & L_z > L_{zs} \end{cases}, \quad (8a)$$

$$L_{zs}/L_{z0}=10, \alpha=3/2 \text{ или } 2$$

Функция (8a) может быть также аппроксимирована функцией Вейбулла в виде

$$\sigma(L_z) = \sigma_m \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{L_z / L_{z0} - 1}{W} \right)^{3/2} \right) \right] \eta(L_z - L_{z0}), \quad (8б)$$

$$W=5.54 \text{ при } a=2.$$

На рис. 2 показан общий вид зависимостей (3), (5) и (8a), которые в той или иной степени аппроксимируют экспериментальные данные [12] и могут быть использованы как консервативные функции для оценки частоты возникновения ОРЭ при введении ограничений на значения L_{z0} и σ_m . При этом анализ показывает, что функция (8) обеспечивает консервативность оценки для современных изделий даже в случаях, когда этого не позволяют добиться зависимости (3) и (5).

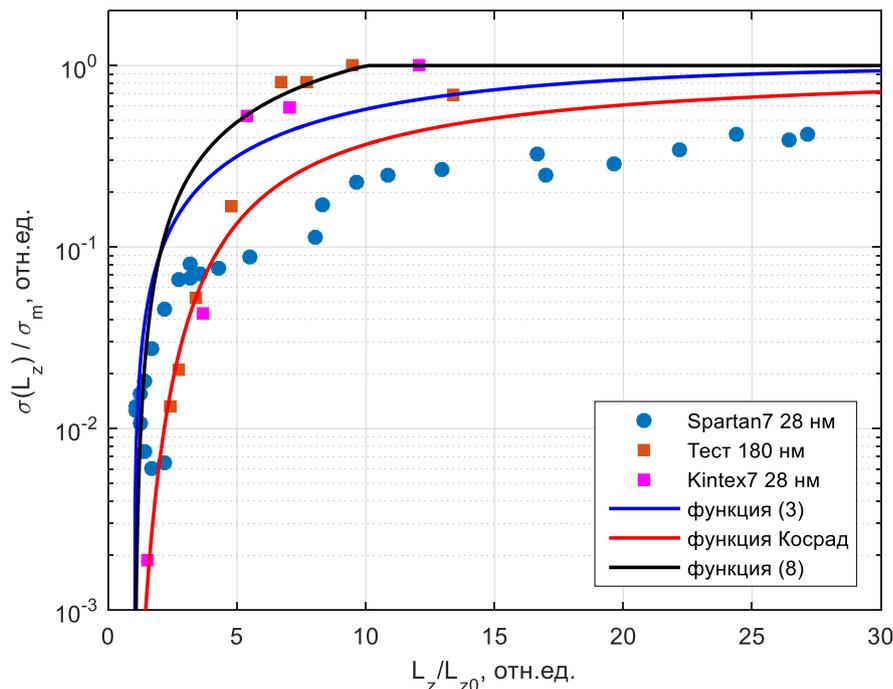


Рис. 2. Общий вид зависимостей сечения ТЭ от ЛПЭ ионов

(Fig. 2. General view of cross-section dependence on LET)

2. Анализ экспериментальных данных

Как указывалось выше, для определения норм испытаний при отсутствии ОРЭ необходимо ввести априорные ограничения на значения L_{z0} и σ_m .

Относительно просто оценки можно провести при определении сечения насыщения. Действительно, в общем случае сечение насыщения коррелирует с площадью кристалла, поэтому при оценке одиночных отказов или «иголок» сечение насыщения не может превышать площадь кристалла. Проведенный анализ более 200 типов ИС показал, что для современных изделий микроэлектроники сечение насыщения по эффектам отказов с доверительной вероятностью 95% не превышает 10% от площади кристаллов [13].

Несколько иначе дело обстоит с сечением насыщением по эффектам одиночных сбоев, которые, в силу специфики учета их многократности и приведения сечения на бит, в общем случае не имеют ограничений по величине (соотношения (6) и (7)). Однако для оценочных расчетов можно ввести аналогичный параметр, который будет коррелировать как с проектными нормами, так и с площадью кристалла. В консервативном приближении можно положить эту зависимость следующей:

$$\sigma_{m_oc} \approx 0.05 \cdot A_{uc} \cdot (1 + 2/\delta x), \quad (9)$$

где σ_{zs_oc} – сечение насыщения по эффектам одиночных сбоев на весь кристалл ИС с площадью кристалла A_{uc} и проектными нормами δx в мкм.

Более сложно провести оценку пороговых значений ЛПЭ. По эффектам одиночных сбоев величина L_{z0} коррелирует с проектными нормами, так как она определяется через заряд переключения. Однако эта пропорциональность затеняется величиной области собирания заряда, которая зависит от площади чувствительного элемента и соответственно падает по мере уменьшения проектных норм. Оценки показывают, что для 2 мкм проектных норм пороговое значение ЛПЭ лежит в районе 3...5 МэВ·см²/мг, а при 45 нм проектных нормах эта величина уже находится в диапазоне 0,1...0,2 МэВ·см²/мг. Очевидно, что на эту корреляцию накладываются ограничения технология (например, объемная или кремний-на-изоляторе (КНИ)), схемотехника (наличие сбоеустойчивых ячеек памяти) и т.п.

По мере увеличения степени интеграции увеличивается чувствительность и к эффектам отказов, среди которых для КМОП ИС преобладает одиночный тиристорный эффект (SEL) [1–3]. Чувствительность к этому эффекту в значительной степени зависит от топологического решения, размещения отдельных транзисторов и контактов к ним, количества контактов к шинам питания и земля и т.п. К сожалению, установить корреляцию для этих эффектов практически невозможно, так как пороговые значения ЛПЭ определяются параметрами паразитных структур. Единственным выходом здесь, как и выше, является задание нижнего значения на основе анализа экспериментальных данных.

В данной работе был проведен анализ результатов экспериментальных исследований и испытаний более 200 типов ИС. Использовались экспериментальные результаты [12, 14–16]. Рассматривались ИС различного функционального назначения и степени интеграции, выполненные по КМОП и биполярной технологии. На рис. 3 приведена диаграмма значений L_{z0} и σ_m для нескольких типов важнейших ОРЭ.

Анализ представленных результатов позволяет количественно подтвердить представление о том, что в подавляющем большинстве случаев малым значениям порогового ЛПЭ эффектов SEL соответствуют относительно большие значения сечения насыщения эффекта, и наоборот – большим пороговым значениям соответствуют малые сечения насыщения. Наиболее сложная ситуация имеет место с эффектами SEFI – как

видно на рис. 3, для них этот вывод справедлив не всегда. Однако следует подчеркнуть, что параметры чувствительности по SEFI, практически равны параметрам чувствительности по одиночным сбоям, с учетом приведения их сечений на один бит. Тем не менее, проведенный анализ позволяет провести некоторые «красные линии», отделяющие область «возможных» (наиболее вероятных) значений комбинаций (L_{z0}, σ_m) от областей «невозможных» (маловероятных) значений. «Красные линии», показанные пунктиром на рис. 3, описываются соотношениями

$$\sigma_{m_l}(L_{z0}) \sim 7 \cdot 10^{-4} \cdot L_{z0}^{-4} \quad (\text{нижняя линия}) \quad (10a)$$

$$\sigma_{m_h}(L_{z0}) \sim 7 \cdot 10^4 \cdot L_{z0}^{-4} \quad (\text{верхняя линия}) \quad (10б)$$

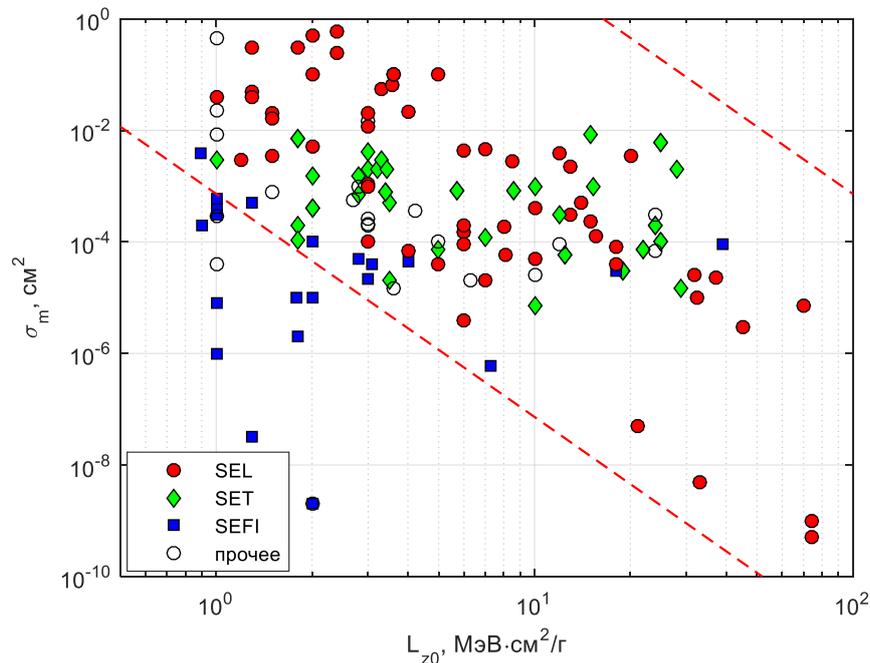


Рис. 3. Экспериментальные значения L_{z0} и σ_m для нескольких типов важнейших ОПЭ (по данным [12, 14–16]): SEL – тиристорный эффект, SEFI – функциональное прерывание, SET – кратковременный импульс на выходе элемента («изголка»)

(Fig. 3. Experimental values of L_{z0} and σ_m for several main types of SEE (based on data from [12, 14–16]): SEL – Single event latchup, SEFI – Single event functional interrupt, SET – Single event transient)

Между указанными линиями лежат более 99% проанализированных значений пар (L_{z0}, σ_m) для эффектов SEL и SET и более 90% всех ОПЭ, включая SEFI.

3. Расчет норм испытаний

Полученные выше консервативные оценки для значений L_{z0} и σ_{zs} позволяют провести корректную оценку требуемого флюенса с определенным значением ЛПЭ, необходимого для подтверждения требований, заданных в виде ограничений на максимальную частоту ОПЭ.

Как было отмечено выше, предельный флюенс можно связать с требованиями по максимальной частоте отказов в процессе эксплуатации или вероятности безотказной работы. Потребуем, чтобы за срок активного существования T вероятность безотказной работы (ВБР) была не ниже заданного уровня P . Тогда при $P \rightarrow 1$ имеем соотношение

$$v_{\alpha} T \leq 1 - P, \quad (11)$$

где v_{α} – верхняя граница доверительного интервала оценки фактической частоты отказов.

Предположим, что зависимость сечения от ЛПЭ при нормальном падении ТЗЧ имеет вид в соответствии с одним из соотношений (2) – (8)

$$\sigma(L_z) = \sigma_m \varphi(L_z, L_{z0}) \quad (12)$$

при нормальном падении и

$$\sigma_{is}(L_z) = \sigma_m \varphi_{is}(L_z, L_{z0}) \quad (13)$$

при изотропном падении частиц, где L_{z0} – физический порог возникновения ОРЭ. Тогда в соответствии с (1)

$$v_{\alpha} T \approx \sigma_m \int_{L_{z0}}^{\infty} \varphi_{is}(L_z, L_{z0}) f(L) dL \equiv \sigma_m G(L_{z0}), \quad (14)$$

где $f(L)$ – суммарный дифференциальный спектр ЛПЭ за время эксплуатации T . Заметим, что в соотношении (14) параметры σ_m и L_{z0} должны определяться так, чтобы частота соответствовала верхней границе доверительного интервала.

Допустим, что в процессе испытаний на ускорителе ионов с ЛПЭ L_t ОРЭ не наблюдаются до предельного флюенса Φ . На основе данного результата можно утверждать только, что с вероятностью $1-\alpha$ сечение ОРЭ $\sigma(L_t)$, при этом ЛПЭ не превосходит величины

$$\sigma(L_t) < \frac{Z_{\alpha}}{\Phi}, \quad (15)$$

где $Z_{\alpha} = -\ln(\alpha)$.

Из соотношения (15) следует, что

$$\sigma_m \varphi(L_t, L_{z0}) \leq \frac{Z_{\alpha}}{\Phi}. \quad (16)$$

Условие (16) может быть выполнено как за счет $L_t < L_{z0}$, так и за счет

$$\sigma_m \leq \frac{Z_{\alpha}}{\Phi} \frac{1}{\varphi(L_t, L_{z0})}. \quad (17)$$

Другими словами, если при испытаниях не наблюдалось ни одного отказа, то достоверно утверждать, что $L_{z0} > L_t$ **в принципе нельзя** ни при каком испытательном флюенсе. Это – фундаментальная проблема действующей системы испытаний, которая не всегда в полной мере осознается при оценке полученных результатов.

Таким образом, задача сводится к совместному решению неравенства (17) для экспериментальных результатов и неравенства, получаемого из требования (11):

$$\sigma_m \leq \frac{1 - P}{G(L_{z0})}. \quad (18)$$

Решение системы неравенств (17) – (18) удобно рассматривать на координатной плоскости (L_{z0}, σ_m) (рис. 4). Точке на этой плоскости соответствует пара значений (L_{z0}, σ_m) , характеризующая изделие. Если точки (L_{z0}, σ_m) находятся в «области соответствия требованиям» (рис. 4), то условие (18) выполняется и изделие является годным. Если

точка находится выше кривой (16) (в «области выявляемых значений»), то в таком изделии при испытаниях на ионах с ЛПЭ L_t с флюенсом Φ будет выявлен отказ (неравенство (17) не выполнено).

Если же изделие характеризуется значениями (L_{z0}, σ_m) , которые соответствуют одной из «областей риска», то это означает, что в изделии с большой вероятностью не будет зафиксирован отказ при испытаниях, но может возникнуть отказ при эксплуатации.

Как было отмечено выше, к неравенствам (17-18) необходимо добавить априорные ограничения на сечение насыщения и пороговое значение ЛПЭ:

$$\sigma_m \leq \sigma_{\max} \quad (19)$$

$$L_{z0} > L_{z0 \min} \quad (20)$$

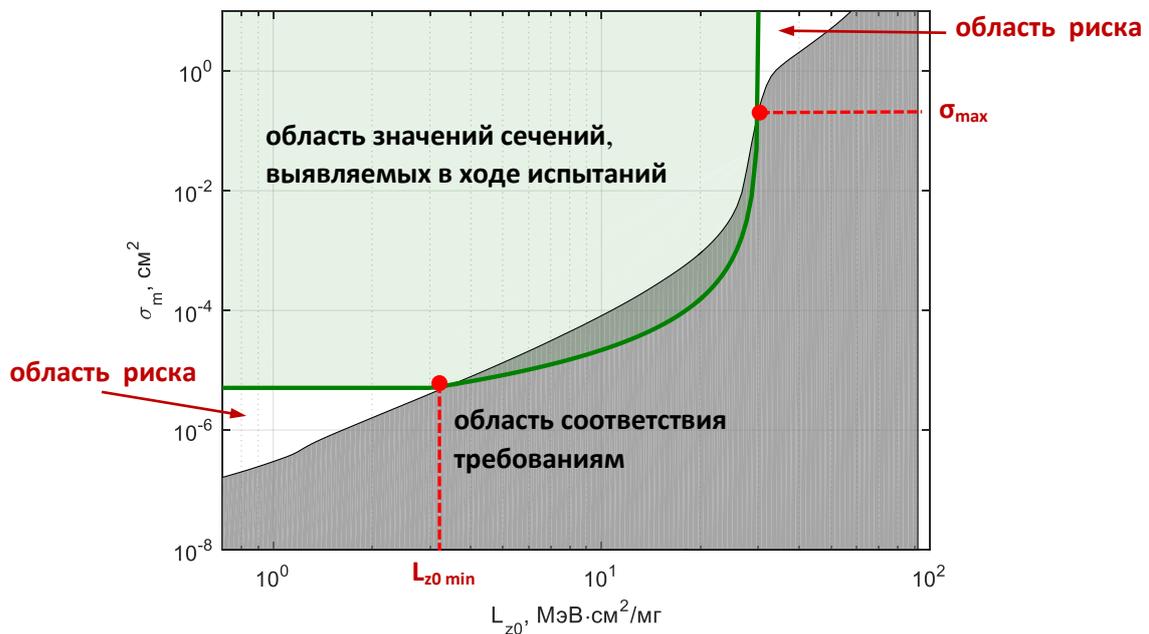


Рис. 4. Иллюстрация областей решения неравенств (17)-(18)
 (Fig. 4. Illustration of solution space for expressions (17)-(18))

Запишем уравнения для точек пересечения кривых, описываемых соотношениями (17) и (18) при $L_{z0} = L_{z0 \min}$ и $L_{z0} = L_{z0}^*$ (рис. 4):

$$\frac{Z_\alpha}{\Phi} \frac{1}{\varphi(L_t, L_{z0 \min})} = \frac{1-P}{G(L_{z0 \min})}, \quad (21a)$$

$$\frac{Z_\alpha}{\Phi} \frac{1}{\varphi(L_t, L_{z0}^*)} = \sigma_{\max}, \quad (21b)$$

$$G(L_{z0}^*) = \frac{1-P}{\sigma_{\max}}. \quad (21c)$$

В результате L_t найдем из уравнения

$$\frac{\varphi(L_t, L_{z0 \min})}{\varphi(L_t, L_{z0}^*)} = \frac{G(L_{z0 \min})}{G(L_{z0}^*)} \quad (22)$$

и определим испытательный флюенс из соотношения

$$\Phi = \frac{Z_{\alpha}}{1-P} \frac{1}{\varphi(L_t, L_{z0min})} G(L_{0min}). \quad (23)$$

На основании анализа, проведенного в п. 2, целесообразно выбирать значения L_{z0min} и σ_m с учетом «красных линий» (10) таким образом, чтобы вероятность попадания точки в «область риска» была минимальной. Тогда величины L_{z0min} и σ_m будут определяться уравнениями:

$$\frac{1-P}{G(L_{0min})} = \sigma_{m_l}(L_{0min}), \quad (24a)$$

$$\sigma_{max} = \frac{1-P}{G(L_{z0}^*)} = \sigma_{m_h}(L_{z0}^*). \quad (24б)$$

В работе расчет параметров L_t и Φ проводился для геостационарной орбиты для ИС, расположенных за сферической конструкционной защитой толщиной 0.5 г/см^2 при нескольких значениях ВБР P за срок активного существования (САС) 10 лет. Использовались функция (5) и более консервативная оценка (8). Дифференциальный флюенс ТЗЧ (рис. 5а) и частоты ОРЭ (удельное количество отказов за время САС $G(L_{z0})$) (рис. 5б) рассчитывались с помощью программы «Косрад» [8] для функции (5) и «OMERE» [17] для функции (8б).

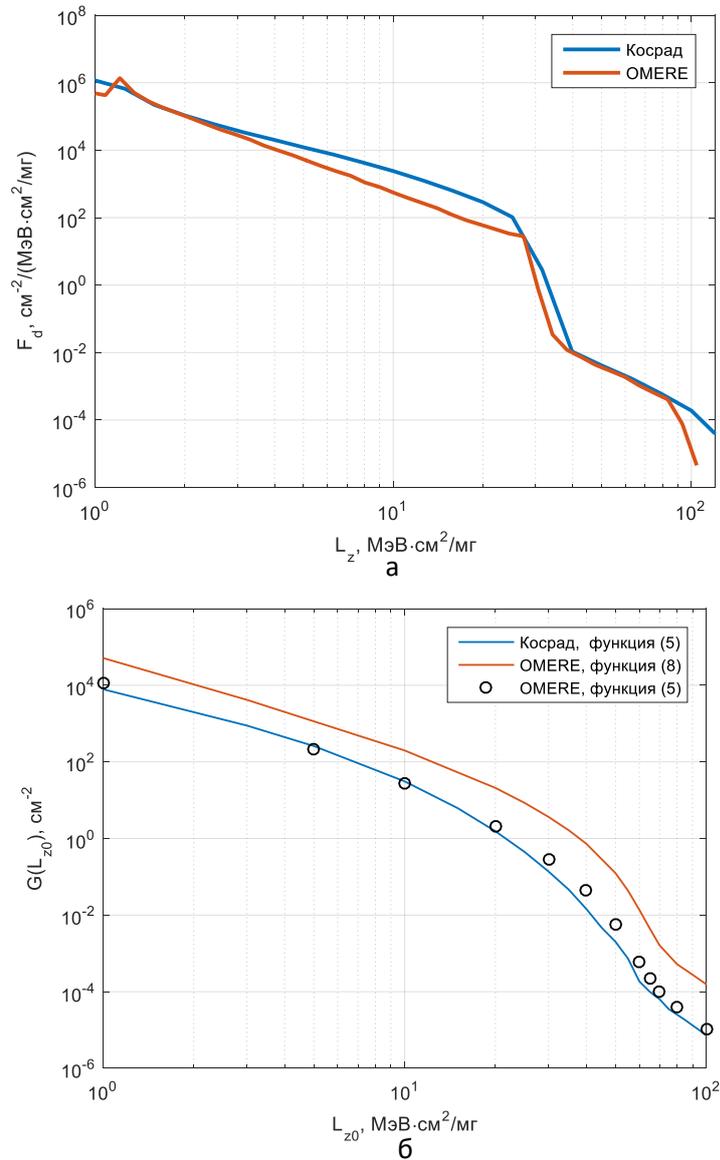


Рис. 5. Дифференциальный флюенс ТЗЧ (а) и удельное количество отказов за время САС $G(L_{z0})$ (б)
 (Fig. 5. Differential fluence of heavy ions (a) and unit number of failures during spacecraft lifetime $G(L_{z0})$ (b))

На рис.6 представлены области решений неравенств (17) и (18) на координатной плоскости (L_{z0}, σ_m) вместе с массивом экспериментальных данных п. 2 для функции (8б). Системе (17) и (18) удовлетворяют точки «области соответствия» (серый цвет), находящиеся под зелёной кривой.

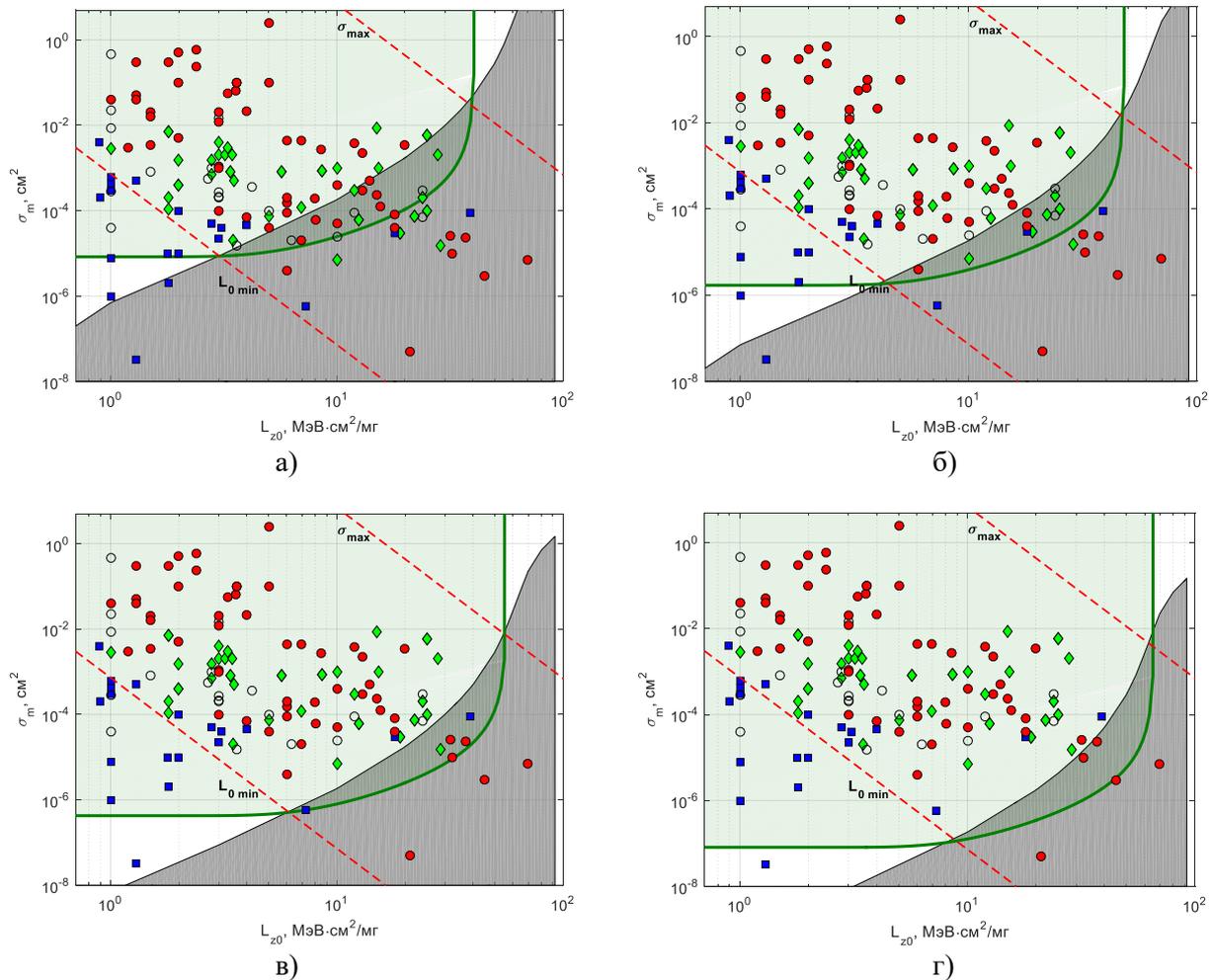


Рис. 6. Области решений неравенств для функции (8) (расчет частот ОПЭ – пакет «OMERE») при: а) $P=0.964$, $L_i=41$ МэВ·см²/мг, б) $P=0.9964$, $L_i=49$ МэВ·см²/мг, в) $P=0.99964$, $L_i=57$ МэВ·см²/мг, г) $P=0.999964$, $L_i=67$ МэВ·см²/мг
 (Fig. 6. Solution spaces of inequalities for function (8) (SER calculation – «OMERE») for а) $P=0.964$, $L_i=41$ MeV·cm²/mg, б) $P=0.9964$, $L_i=49$ MeV·cm²/mg, в) $P=0.99964$, $L_i=57$ MeV·cm²/mg, г) $P=0.999964$, $L_i=67$ MeV·cm²/mg)

Результаты расчета для функций (5) и (8б) представлены также в табл. 1 и 2. При указанных в табл. 1 и 2 значениях параметров вероятность попадания в «зоны риска» с учетом массива экспериментальных данных п. 2 составляет менее 2% для SEFI и менее 1% для ТЭ.

Таблица 1. Результаты расчета для функции (5) (расчет частот ОПЭ – пакет «Косрад»)

P (10 лет)	0.964	0.9964	0.99964	0.999964
L_i , МэВ·см ² /мг	32	41	50	60
Φ_{min} , см ⁻²	$2.5 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$	$3.5 \cdot 10^7$

Таблица 2. Результаты расчета для функции (8) (расчет частот ОПЭ – пакет «OMERE»)

P (10 лет)	0.964	0.9964	0.99964	0.999964
L_i , МэВ·см ² /мг	41	49	57	67
Φ_{min} , см ⁻²	$3.6 \cdot 10^5$	$1.8 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^6$	$3.7 \cdot 10^7$

Результат расчета, как и следовало ожидать, зависит от априорных допущений о:

- виде зависимости сечения от ЛПЭ;
- способах выбора предельных значениях $L_{z0\ min}$ и σ_m ;
- модели пересчета сечения ОРЭ к условиям изотропного поля излучения.

Отметим, что последний фактор в рассмотренных случаях не играл принципиальной роли. На рис. 5б показаны результаты расчета удельной частоты ОРЭ (функции $G(L_{z0})$) с помощью пакетов «Косрад» и «OMERE» для функций (5) и (86). Видно, что для функции (5) пакеты «Косрад» и «OMERE» дают близкие результаты, несмотря на некоторые отличия в дифференциальных спектрах частиц (рис. 5а) и методах учета изотропного характера излучения [8, 17].

Как показывает анализ, в зависимости от требований и условий эксплуатации расчетные нормы испытаний могут меняться в широких пределах от 10^5 до 10^8 ион/см². Важно понимать, что неопределенность результата не есть следствие приближенного характера предложенного метода, а является **прямым следствием** неопределенности априорной информации о свойствах изделия при отсутствии экспериментальных данных. Предложенный подход позволяет выявить источники неопределенности и оценить их вклад в расчет нормы испытаний. Кроме того, оказывается возможным с единых позиций проследить связь между методами задания требований, их подтверждения в ходе испытаний изделия и методами расчета частоты отказов изделия в целевой аппаратуре.

Заключение

В работе предложен подход по определению норм испытаний при оценке соответствия ИС требованиям по радиационной стойкости при воздействии ТЗЧ, заданных в виде ограничений на частоты ОРЭ. При наличии экспериментальных данных для сечений ОРЭ при разных значениях ЛПЭ частота возникновения ОРЭ оценивается исходя из заданного дифференциального спектра, и ее значение сравнивается с критериальной величиной. Оценка соответствия требованиям по стойкости к воздействию ТЗЧ КП по результатам облучения ионами только с одной величиной ЛПЭ при отсутствии наблюдаемых ОРЭ возможна при задании консервативных ограничений на значения сечения насыщения и пороговое значение ЛПЭ для определенного класса ОРЭ. Проведенный анализ результатов экспериментальных исследований и испытаний более 200 типов ИС позволил выявить статистическую связь между пороговым значением ЛПЭ и диапазоном возможных значений сечений насыщения. При данных предположениях могут быть оценены флюенсы ионов необходимые для подтверждения соответствия, которые зависят как от значений ЛПЭ используемых при испытаниях ионов, так и в сильной степени от критериальных значений частот. Предложенный подход позволяет обосновано выбирать уровни воздействия ионов при испытаниях, которые в зависимости от требований могут меняться в широких пределах от 10^5 до 10^8 ион/см².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь. 2004. – 320 с.
2. Petersen E., Single Event Effects in Aerospace, John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 520 p.
3. Методология обеспечения стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к воздействию ионизирующего излучения космического пространства: Монография под общ. ред. М.В. Яковлева. М.: НИЯУ МИФИ. 2017. – 380 с.
4. Чумаков А.И., Ужegov В.М., Ахметов А.О., Бойченко Д.В., Яненко А.В., Рясной Н.В. Оценка показателей стойкости интегральных схем при воздействии тяжелых заряженных частиц с использованием различных моделей. Безопасность информационных технологий, [S.I.]. Т. 24, № 1. С. 73–84, 2017. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/58> (дата обращения: 01.12.2019).

- DOI:<http://dx.doi.org/10.26583/bit.2017.1.09>.
5. Чумаков А.И., Ужегов В.М., Ахметов А.О., Бойченко Д.В., Яненко А.В., Рясной Н.В. Вопросы задания требований по стойкости интегральных схем при воздействии тяжелых заряженных частиц // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2017. № 1. С. 18–21.
 6. Радиационная стойкость изделий ЭКБ. Научное издание. / Под ред. А.И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ. 2015. – 512 с.
 7. Микросхемы интегральные. Методы испытаний и оценки стойкости больших и сверхбольших интегральных схем к одиночным сбоям от воздействия отдельных высокоэнергетичных тяжелых заряженных частиц и протонов космического пространства. РД В 319.03.24. М.: 22 ЦНИИИ МО, 1997. – 54 с.
 8. Кузнецов Н.В., Малышкин Ю.М., Николаева Н.И. и др. Программный комплекс COSRAD для прогнозирования радиационных условий на борту космических аппаратов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2011. № 2. С. 72–78.
 9. Sogoyan A.V., Chumakov A.I., Smolin A.A., Ulanova A.V, Boruzdina A.B. A simple analytical model of single-event upsets in bulk CMOS // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. 2017. Vol. 400. P. 31–36.
 10. Sogoyan A.V., Chumakov A.I., Smolin A.A. SEE rate estimation based on diffusion approximation of charge collection // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. 2018. Vol. 418. P. 87–93.
 11. Чумаков А.И. Оценка чувствительности интегральных схем к одиночным радиационным эффектам для точечной области сбора заряда // Микроэлектроника. Т. 44, 2015. №1. С. 34–40.
 12. Bobrovsky D., Akhmetov A., Smolin A., Chumakov A. Application of effective LET approach for modern CMOS devices // 2019 European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2019.
 13. Rudenkov, A.E. Akhmetov, A.O. Bobrovsky, D.V., Chumakov, A.I. Yanenko, A.V., Uzhegov, V.M. The prediction for single event latchup sensitivity parameters of digital CMOS ICs based on its technological features // Proceedings of the International Conference on Microelectronics. 2017. P. 287–290.
 14. NASA Tehnical Reports Server, URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?Ntx=mode+matchallany&Ntk=All&N=0&No=0&Ntt=compendium+single+event+effects> (дата обращения: 14.12.2019).
 15. Chumakov, A.I., Pechenkin, A.A., Savchenkov, D.V., Yanenko, A.V., Kessarinskiy, L.N., Nekrasov, P.V., Sogoyan, A.V., Tararaksin, A.I., Vasil'Ev, A.L., Anashin, V.S., Chubunov, P.A Compendium of SEE comparative results under ion and laser irradiation // 2013 European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems (RADECS), 2013.
 16. Akhmetov, A.O., Bobrovsky, D.V., Tararaksin, A.Sa, Petrov, A.G., Kessarinskiy, L.N., Boychenko, D.V., Chumakov, A.I., Rousset, A., Chatry, C. IC SEE comparative studies at UCL and JINR heavy ion accelerators // IEEE Nuclear & Space Radiation Effects Conference (NSREC 2016).
 17. Our Radiation Software – TRAD. URL: <https://www.trad.fr/en/space/omere-software> (дата обращения: 14.12.2019).

REFERENCES:

- [1] Chumakov A.I., Deistvie kosmicheskoi radiatsii na IS (Effects of Cosmic Radiation on IC), Moscow: Radio i Svyaz?. 2004. – 320 s. (in Russian).
- [2] Petersen E., Single Event Effects in Aerospace, John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 520 p.
- [3] Metodologiya obespecheniya stojkosti bortovoj apparatury` kosmicheskix apparatov k vozdeystviyu ioniziruyushhego izlucheniya kosmicheskogo prostranstva: Monografiya pod obshh. red. M.V. Yakovleva. M. NIYaU MIFI. 2017. – 380 p. (in Russian).
- [4] Chumakov A.I., Uzhegov V.M., Akhmetov O.A., Boychenko D.V., Yanenko A.V., Ryasnoy N.V. Single event effects rate calculation with different models. Bezopasnost` Informatsionnykh Tekhnologiy. [S.I.]. Vol. 24, N 1. P. 73–84, 2017. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/58> (accessed: 01.12.2019). DOI:<http://dx.doi.org/10.26583/bit.2017.1.09> (in Russian).
- [5] Chumakov A.I., Uzhegov V.M., Akhmetov O.A., Boychenko D.V., Yanenko A.V., Ryasnoy N.V. Voprosy zadaniya trebovanij po stojkosti integral'nyh skhem pri vozdeystvii tyazhelyh zaryazhennyh chastic. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiacionnogo vozdeystviya na radioelektronnyu apparaturu. 2017. N. 1. S. 18–21 (in Russian).
- [6] Radiacionnaya stoikost izdeliy EKB. Pod red. A.I. Chumakova. M. NIYaU MIFI. 2015. – 512 s. (in Russian).
- [7] Mikroskhemy integralnye. Metody ispytaniy i oenki stojkosti bolshih i sverhbolshih integralnyh skhem k odinochnym sboyam ot vozdeystviya odelnyh vysokoehnergetichnyh tyazhelyh zaryazhennyh chastic i

- protonov kosmicheskogo prostranstva. RD V 319.03.24. M.: 22 Central Research Institute of the Ministry of Defense, 1997. – 54 s. (in Russian).
- [8] Kuznetsov N.V., Malyshkin Y.M., Nikolaeva N.I. et al. Programmnyj kompleks COSRAD dlya prognozirovaniya radiacionnyh uslovij na bortu kosmicheskikh apparatov. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya: fizika radiacionnogo vozdejstviya na radioelektronnuyu apparaturu. 2011. N. 2. S. 72–78 (in Russian).
- [9] Sogoyan A.V., Chumakov A.I., Smolin A.A., Ulanova A.V, Boruzdina A.B. A simple analytical model of single-event upsets in bulk CMOS. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. 2017. Vol. 400. P. 31–36.
- [10] Sogoyan A.V., Chumakov A.I., Smolin A.A. SEE rate estimation based on diffusion approximation of charge collection. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. 2018. Vol. 418. P. 87–93.
- [11] Chumakov A.I., An evaluation of the sensitivity of integrated circuits to single event effects for the point charge collection area, Russian Microelectronics. 2015. Vol. 44. N. 1. P. 34–40.
- [12] Bobrovsky D., Akhmetov A., Smolin A., Chumakov A. Application of effective LET approach for modern CMOS devices. 2019 European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2019.
- [13] Rudenkov, A.E. Akhmetov, A.O. Bobrovsky, D.V., Chumakov, A.I. Yanenko, A.V., Uzhegov, V.M. The prediction for single event latchup sensitivity parameters of digital CMOS ICs based on its technological features // Proceedings of the International Conference on Microelectronics. 2017. P. 287–290.
- [14] NASA Tehnical Reports Server, URL:<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?Ntx=mode+matchallany&Ntk=All&N=0&No=0&Ntt=compendium+single+event+effects> (accessed: 14.12.2019)
- [15] Chumakov, A.I., Pechenkin, A.A., Savchenkov, D.V., Yanenko, A.V., Kessarinskiy, L.N., Nekrasov, P.V., Sogoyan, A.V., Tararaksin, A.I., Vasil'Ev, A.L., Anashin, V.S., Chubunov, P.A Compendium of SEE comparative results under ion and laser irradiation. 2013 European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems (RADECS), 2013.
- [16] Akhmetov, A.O., Bobrovsky, D.V., Tararaksin, A.Sa, Petrov, A.G., Kessarinskiy, L.N., Boychenko, D.V., Chumakov, A.I., Rousset, A., Chatry, C. IC SEE comparative studies at UCL and JINR heavy ion accelerators. IEEE Nuclear & Space Radiation Effects Conference (NSREC 2016).
- [17] Our Radiation Software – TRAD. URL: <https://www.trad.fr/en/space/omere-software> (accessed: 14.12.2019).

*Поступила в редакцию – 26 декабря 2019 г. Окончательный вариант – 09 февраля 2020 г.
Received – December 26, 2019. The final version – February 09, 2020.*