

Александр И. Чумаков, Армен В. Согоян, Анатолий А. Смолин и др.  
ТРЕБОВАНИЯ И НОРМЫ ИСПЫТАНИЙ ПО РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ К ЭФФЕКТАМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫХ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Александр И. Чумаков<sup>1</sup>, Армен В. Согоян<sup>2</sup>, Анатолий А. Смолин<sup>3</sup>, Алексей О. Ахметов<sup>4</sup>,  
Дмитрий В. Бобровский<sup>5</sup>, Дмитрий В. Бойченко<sup>6</sup>, Николай В. Рясной<sup>7</sup>,  
Константин А. Чумаков<sup>8</sup>, Евгений В. Чурилин<sup>9</sup>, Владимир Ф. Герасимов<sup>10</sup>,  
Виталий В. Хаустов<sup>11</sup>, Александр А. Сашов<sup>12</sup>, Анастасия В. Уланова<sup>13</sup>, Андрей В. Яненко<sup>14</sup>

<sup>1,2,13</sup> *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия*

<sup>1,3,4,5,6,13,14</sup> *Акционерное общество «Экспериментальное научно-производственное объединение  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ»,  
Каширское ш., 31, 115409, Москва, 115409, Россия*

<sup>7,9</sup> *Акционерное общество «Ракетно-Космический Центр «Прогресс»,  
ул. Земеца, 18, Самара, 443009, Россия*

<sup>8</sup> *Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-  
исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»,  
Нахимовский просп., 36, к.1, Москва, 117218, Россия*

<sup>10,11</sup> *46 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны  
Российской Федерации,  
ул. Комарова 13, Мытищи, МО, 141006, Россия*

<sup>12</sup> *Акционерное общество «Российские космические системы»,  
ул. Авиамоторная, 53, Москва, 111250, Россия*

<sup>1</sup> *e-mail: aichum@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6270-2663>*

<sup>2</sup> *e-mail: avsog@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9380-239X>*

<sup>3</sup> *e-mail: aasmol@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9396-1753>*

<sup>4</sup> *e-mail: aoahm@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9305-0821>*

<sup>5</sup> *e-mail: dvbob@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3036-2953>*

<sup>6</sup> *e-mail: dvboy@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8382-4675>*

<sup>7</sup> *e-mail: n-ryasnoy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2823-5058>*

<sup>8</sup> *e-mail: kachumakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2013-1350>*

<sup>9</sup> *e-mail: evg.churilin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7640-3824>*

<sup>10</sup> *e-mail: vf.gerasimov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2459-665X>*

<sup>11</sup> *e-mail: vvkhaustov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0469-5439>*

<sup>12</sup> *e-mail: sashov.aa@spacecorp.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7171-5674>*

<sup>13</sup> *e-mail: avulan@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7376-6339>*

<sup>14</sup> *e-mail: avyan@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2371-2978>*

ТРЕБОВАНИЯ И НОРМЫ ИСПЫТАНИЙ ПО РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ К ЭФФЕКТАМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫХ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

*DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.1.07>*

*Аннотация.* В работе проводится анализ существующих подходов по оценке частоты одиночных радиационных эффектов (ОРЭ), возникающих в интегральных схемах при воздействии тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) космического пространства. Эти вопросы имеют существенное значение в свете расширения сферы практического применения киберфизических систем управления космическими объектами, так как именно за счет ОРЭ в основном и происходят потери информации в регистровых элементах и в ячейках памяти электронных блоков космических аппаратов. Показано, что существующие модели, основанные на выделении энергии в фиксированном чувствительном объеме не применимы при оценке показателей стойкости – частоты или вероятности возникновения ОРЭ при относительно больших пороговых значениях линейных потерь энергии (ЛПЭ). Предложено оценивать показатели стойкости на основе диффузионной модели собирания заряда, которая позволяет получить оценки сечений ОРЭ для изотропного поля излучения. Получена универсальная зависимость для оценки показателей стойкости интегральных схем при воздействии ТЗЧ для геостационарной орбиты, на основании

которой предложена классификация по группам стойкости. Данные результаты позволяют обосновать нормы испытаний при проведении испытаний интегральных схем на стойкость к воздействию ТЗЧ.

*Ключевые слова:* одиночные радиационные эффекты, показатели радиационной стойкости, нормы испытаний.

*Для цитирования:* ЧУМАКОВ, Александр И. et al. ТРЕБОВАНИЯ И НОРМЫ ИСПЫТАНИЙ ПО РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ К ЭФФЕКТАМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ. *Безопасность информационных технологий, [S.l.]*, v. 27, n. 1, p. 83–97, 2020. ISSN 2074-7136. Доступно на: <<https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1254>>. Дата доступа: 10 feb. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.1.07>.

Alexander I. Chumakov<sup>1</sup>, Armen V. Sogoyan<sup>2</sup>, Anatoly A. Smolin<sup>3</sup>, Alexey O. Ahmetov<sup>4</sup>, Dmitry V. Bobrovsky<sup>5</sup>, Dmitry V. Boychenko<sup>6</sup>, Nikolai V. Ryasnoy<sup>7</sup>, Konstantin A. Chumakov<sup>8</sup>, Evgeny V. Churilin<sup>9</sup>, Vladimir F. Gerasimov<sup>10</sup>, Vitaly V. Khaustov<sup>11</sup>, Alexander A. Sashov<sup>12</sup>, Anastasia V. Ulanova<sup>13</sup>, Andrey V. Yanenko<sup>14</sup>

<sup>1,2,13</sup>*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia*

<sup>1,3,4,5,6,13,14</sup>*Joint Stock Company "Experimental Research and Production Association SPECIALIZED ELECTRONIC SYSTEMS", Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia*

<sup>7,9</sup>*Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress, Zemetsa Str., 18 Samara, 443009, Russia*

<sup>8</sup>*Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences", Nakhimovskiy pr., 36/1, Moscow, 117218, Russia*

<sup>10,11</sup>*Branch of 46 Central Research Institute of the Russian Defense Ministry, Komarova Str., 13, Mytishchi, Moscow Region, 141006, Russia*

<sup>12</sup>*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Aviamotornaya Str., 53, Moscow, 111250, Russia*

<sup>1</sup>*e-mail: aichum@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6270-2663>*

<sup>2</sup>*e-mail: avsog@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9380-239X>*

<sup>3</sup>*e-mail: aasmol@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9396-1753>*

<sup>4</sup>*e-mail: aoahm@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9305-0821>*

<sup>5</sup>*e-mail: dvbob@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3036-2953>*

<sup>6</sup>*e-mail: dvboy@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8382-4675>*

<sup>7</sup>*e-mail: n-ryasnoy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2823-5058>*

<sup>8</sup>*e-mail: kachumakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2013-1350>*

<sup>9</sup>*e-mail: evg.churilin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7640-3824>*

<sup>10</sup>*e-mail: vf.gerasimov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2459-665X>*

<sup>11</sup>*e-mail: vvkhaustov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0469-5439>*

<sup>12</sup>*e-mail: sashov.aa@spacecorp.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7171-5674>*

<sup>13</sup>*e-mail: avulan@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7376-6339>*

<sup>14</sup>*e-mail: avyan@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2371-2978>*

### **Hardness assurance levels and requirements for single event effects testing of integrated circuits**

*DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.1.07>*

*Abstract.* The paper presents an analysis of existing approaches to estimation of single event rate (SER) in integrated circuits under effects of charged particles of space radiation environment. These issues are of significant importance in the light of the expansion of the scope of practical application of cyber-physical control systems for space objects, since it is mainly due to the SER that information is lost in the register elements and in the memory cells of the electronic blocks of spacecraft. It is shown that existing models

based on energy deposition in fixed sensitive volume are not applicable for SER estimations in case of high threshold linear energy transfer (LET) values. An alternative approach is proposed. It is based on diffusion charge collection model, which can be used to estimate the SER cross-sections in isotropic particle field. A universal dependence for SER estimation in integral circuits (ICs) at geostationary orbit is proposed and used as a basis for establishing classification of devices based on hardness assurance levels. The obtained results provide the grounds for setting test requirements that has to be met during single event effects testing of ICs.

*Keywords: single event effects, hardness assurance levels, test requirements.*

*For citation: CHUMAKOV, Alexander I. et al. Hardness assurance levels and requirements for single event effects testing of integrated circuits. IT Security (Russia), [S.l.], v. 27, n. 1, p.83–97, 2020. ISSN 2074-7136. Available at: <<https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1254>>. Date accessed: 10 feb. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.1.07>.*

### Введение

В настоящее время наиболее критичным радиационным эффектом в интегральных схемах электронной аппаратуры космического назначения из-за воздействия отдельных тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) стали одиночные радиационные эффекты (ОРЭ) [1–4]. Именно за счет этих эффектов в основном и происходят потери информации в регистровых элементах и в ячейках памяти, а также потеря функционирования отдельных микросхем.

Наиболее вероятным ОРЭ является одиночный сбой, т.е. переключение отдельных цифровых элементов в другое логическое состояние. Вследствие уменьшения порогового заряда переключения логических элементов именно эффекты сбоев демонстрируют наиболее выраженную зависимость от проектных норм. Пороговый заряд для современных интегральных схем достигает значений в десятые доли фКл (фемтокулон), что эквивалентно нескольким тысячам электронов. С другой стороны, переход к меньшим проектным нормам также ведет к уменьшению эффективности собирания заряда отдельным чувствительным элементом с трека заряженной частицы из-за снижения размеров элементов [4, 5]. Стабильное уменьшение напряжения питания при переходе к меньшим проектным нормам до перехода в диапазон менее 100 нм также способствует росту частоты одиночных сбоев (ОС).

Нужно отметить, однако, что уменьшение размеров чувствительных элементов сопровождается для микросхем памяти ростом их числа на одном кристалле, то есть увеличением степени интеграции. Это ведет к тому, что интенсивность сбоев на устройство увеличивается с уменьшением проектных норм, несмотря на уменьшение интенсивности сбоев на бит. Еще одним важным следствием уменьшения размеров чувствительных элементов является увеличение, так называемой, области воздействия [5–7] отдельной заряженной частицы, что ведет к возможности возникновения сбоев сразу в нескольких элементах при попадании одной ТЗЧ. Доля многократных сбоев в общем числе событий стремительно растет с уменьшением проектных норм в технологиях на основе объемного кремния.

По мере увеличения степени интеграции увеличивается и чувствительность к воздействию ТЗЧ по эффектам отказов, среди которых для интегральных схем (ИС), выполненных по КМОП технологии, преобладает одиночный тиристорный эффект [2, 4]. Чувствительность к этому эффекту в значительной степени зависит от топологического решения, размещения отдельных транзисторов и контактов к ним, количества контактов к шинам питания, «земли» и т.п.

В ходе разработки электронной аппаратуры для космических аппаратов необходимо обеспечить требуемые надежность характеристики, при оценке которых надо учитывать возможность возникновения ОРЭ. Однако разработчику

радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космического назначения достаточно сложно выбрать корректную модель для оценки частоты/вероятности сбоев/отказов и использовать полученные результаты при оценке общих надежностных характеристик [8]. В настоящей работе представлен анализ существующих подходов и предложена относительно простая модель для оценки частоты ОРЭ в ИС при воздействии ТЗЧ космического пространства.

### 1. Анализ существующих подходов

В настоящее время существующие модели по оценке показателей стойкости – частоты/вероятности возникновения ОРЭ – базируются на допущениях, предложенных в 80-х годах прошлого века [1–4, 9]. Основной проблемой при оценке показателей стойкости является переход от экспериментальных результатов, полученных при нормальном падении ТЗЧ, к изотропному полю излучения. Используются несколько подходов, основанных на следующих приближениях:

- нормального падения ТЗЧ со ступенчатой функцией чувствительности;
- нормального падения ТЗЧ с плавно изменяющейся функцией чувствительности;
- эффективного потока или модели тонкой чувствительной области;
- чувствительной области в виде прямоугольного параллелепипеда (RPP);
- чувствительной области в виде прямоугольного параллелепипеда с плавно изменяющейся функцией чувствительности (IRPP).

Действующими документами допускается проводить оценку показателей стойкости изделий электронной компонентной базы (ЭКБ) к воздействию ТЗЧ, принимая во внимание только нормальное падение, т.е. без учета изотропного характера излучения космического пространства (КП) [10]. Этот случай обычно реализуется в экспериментальных исследованиях образцов ИС на ускорителях ионов. В простейшем случае – нормального падения ТЗЧ и ступенчатой функции чувствительности – используется всего два параметра: пороговое значение ЛПЭ –  $L_{z0}$  и сечение насыщения к воздействию ТЗЧ –  $\sigma_{нас}$ . Пренебрегая геометрическими факторами, можно считать, что частота ОРЭ равна:

$$v = \sigma_{нас} I(L_{z0}) \quad (1)$$

где  $I(L_z)$  – интегральный ЛПЭ спектр ТЗЧ с ЛПЭ больше порогового значения  $L_{z0}$ .

В более общем случае оценка проводится с учетом зависимости сечения ОРЭ от ЛПЭ по соотношению:

$$v = \int_{L_{z0}}^{L_{zmx}} \varphi_z(L_z) \cdot \sigma(L_z) dL_z, \quad (2)$$

где  $\varphi_z$  – дифференциальная ЛПЭ плотность потока ТЗЧ КП,  $\sigma(L_{z0})$  – функция чувствительности, т.е. зависимость сечения ОРЭ от ЛПЭ.

Наиболее распространенным способом задания плавно изменяющейся функции чувствительности, является использование функции Вейбулла с четырьмя параметрами:

$$\sigma_z(L_z) = \sigma_{zs} \left( 1 - \exp \left[ - \left( \frac{L_z - L_{z0}}{W} \right)^s \right] \right) \text{ при } L_z > L_{z0}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{zs}$  – сечение насыщения эффекта ОРЭ в ИС;  $L_z$  – ЛПЭ ТЗЧ при прохождении через кристалл изделия;  $L_{z0}$  – пороговое значение линейных потерь энергии при возникновении в изделии ОРЭ;  $W, s$  – параметры аппроксимации.

В ряде случаев используются другие аппроксимации. В частности, в программе КОСРАД [1] применяется двухпараметрическая экспоненциальная функция с обратной зависимостью от ЛПЭ:

$$\sigma_z(L_z) = \sigma_{sz} \cdot \exp(-L_{za}/L_z), \quad (4)$$

где  $L_{za}$  – параметр аппроксимации. Подход на основе соотношений (2) и (4) используется в программе КОСРАД при использовании модели «куб».

Еще одним способом описания зависимости сечения эффекта от ЛПЭ является использование экспоненциальной функции вида:

$$\sigma(L_z) = \sigma_s \cdot \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{L_z - L_{zo}}{W_a}\right] \right\}, \quad (5)$$

где  $W_a$  – параметр, определяемый по соотношению [10]:

$$W_a(L_{zo}) = 9.135789 + 1.400938 \cdot L_{zo} - 0.011644 \cdot L_{zo}^2 \quad (6)$$

На рис. 1 в качестве примера представлено сравнение различных нормированных аппроксимаций для описания экспериментальных зависимостей сечений одиночных сбоев и тиристорных эффектов. Здесь представлены логарифмические зависимости (13) и (14), о которых информация будет представлена ниже.

Анализ представленных результатов позволяет заметить, что простые двухпараметрические зависимости (4) и (5) не всегда корректно описывают экспериментальные данные. Например, в приведенных примерах по эффектам ОС можно считать, что зависимости (4) и (5) дают консервативные оценки. В то же время, по тиристорным эффектам они дают заметно более низкую чувствительность. Поэтому при расчетных оценках они могут зависить показатели стойкости.

Наиболее приемлемыми оказываются зависимости вида (3). Этот вывод достаточно очевиден, так как для нее имеет место четыре независимых параметра, что позволяет подстроить ее под широкий набор экспериментальных данных. Следует отметить, что подстроочные коэффициенты значительно отличаются. Например, в рассматриваемых примерах по эффектам одиночных сбоев  $s=0.7$  и  $W=15$ , а для тиристорных эффектов –  $s=4$  и  $W=5$ , другими словами очень проблематично использовать параметры по умолчанию. Можно также заметить, что лучшее совпадение с экспериментальными зависимостями будет иметь место, если нормированное пороговое значение ЛПЭ сделать меньше единицы.

Таким образом, следует отметить, что в общем случае используемые аппроксимации для описания зависимостей сечений ОС от ЛПЭ во многих случаях дают не очень хорошее соответствие с экспериментальными данными.

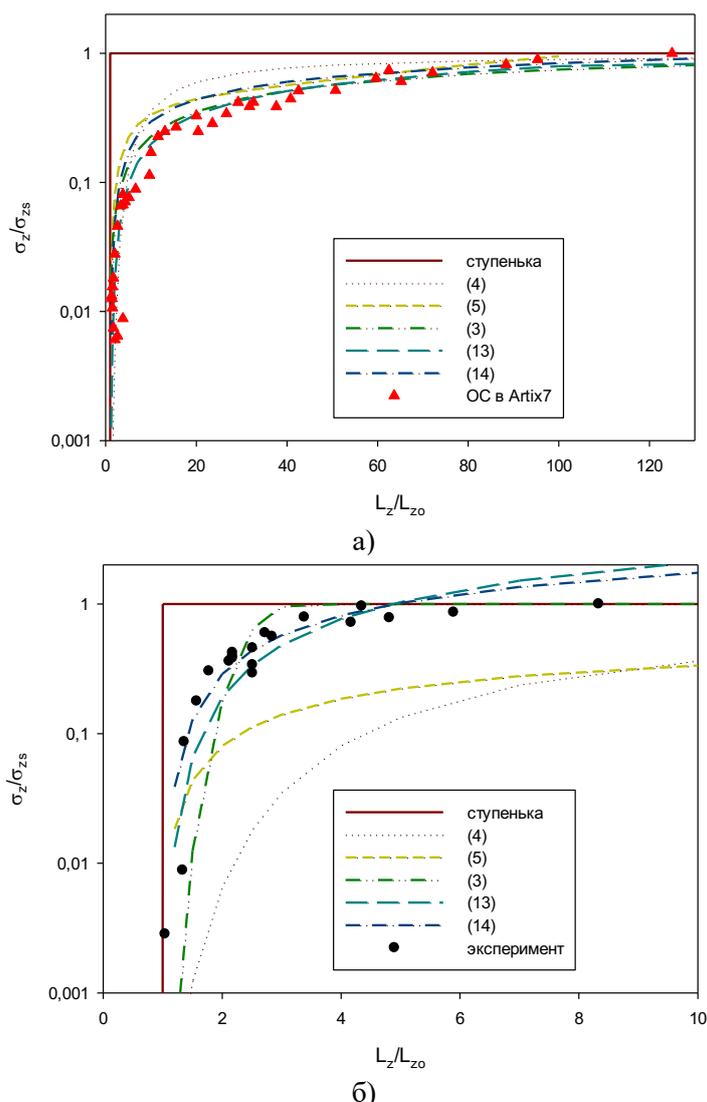


Рис. 1. Нормированные зависимости сечений ОРЭ от значений ЛПЭ при использовании различных аппроксимаций, символы экспериментальные значения:  
 а) одиночные сбои в ПЛИС XC7S25; б) тиристорные эффекты в микроконтроллере ATTiny13  
 (Fig. 1. Normalized SEE cross-section curves for different approximations. Symbols represent experimental data: a) SEUs in XC7S25 FPGA, b) SELs in ATTiny13 microcontroller)

На рис. 2 показаны значения частоты ОРЭ, рассчитанные на основе представленных подходов для ИС с различными значениями порогового ЛПЭ при воздействии ТЗЧ галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ) за защитой 1 г/см<sup>2</sup> на геостационарной орбите. Даже при использовании упрощённых подходов без учета изотропности излучения расхождения между кривыми достигает несколько порядков. На самом деле точность прогнозирования при воздействии ТЗЧ космического пространства остается крайне низкой для всех рассмотренных аппроксимаций, так как не учитывается возможность падения частиц под углами, отличными от нормального. Поэтому более точные модели принимают во внимание угловые зависимости.

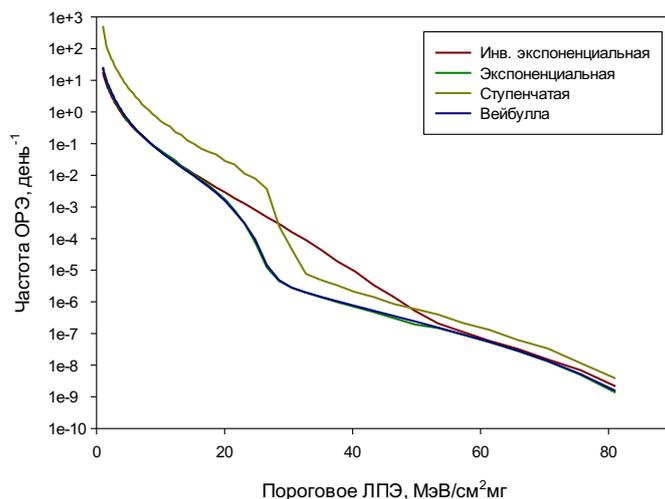


Рис. 2. Зависимости частоты ОПЭ на геостационарной орбите от порогового ЛПЭ, рассчитанные в приближении нормального падения  
 (Fig. 2. Single event rate dependence on threshold LET for geostationary orbit calculated using normal ion hit approximation)

Самым простым способом повысить точность расчетных оценок можно, если предположить, что чувствительная область является тонкой, т.е. толщина чувствительной области  $d_s$  существенно меньше ее поперечных размеров:

$$d_s \ll \sqrt{\sigma_{\text{нас}_i}} \quad (7)$$

В этом приближении можно считать, что при угле падения ТЗЧ на поверхность кристалла равном  $\theta$  эффективное значение ЛПЭ  $L_{zef}$  равно:

$$L_{zef} = L_z / \cos \theta \quad (8)$$

Произведя простейшие операции для изотропного потока ТЗЧ, нетрудно получить оценку частоты локальных радиационных эффектов в случае изотропного падения ТЗЧ для ступенчатой функции чувствительности при указанных выше предположениях:

$$\nu = \sigma_{\text{нас}_i} \int_0^{\theta_{\max}} I(LET \cdot \cos \theta) \cdot d\theta, \quad (9)$$

где  $\theta_{\max}$  – максимально допустимый угол падения ТЗЧ для модели плоской области (модель эффективного потока). Этот угол может быть оценен из минимально допустимой величины ЛПЭ для анализируемого потока ТЗЧ.

Проведем оценку частоты возникновения локальных эффектов в случае аппроксимации интегрального спектра ТЗЧ простой функцией вида:

$$I(L_z) = I_1 \cdot (L_{z1}/L_z)^2 \quad (10)$$

где  $L_{z1}$  – коэффициент нормировки равный 1 МэВ·мг/см<sup>2</sup>,  $I_1$  – интегральный поток ТЗЧ с ЛПЭ больше 1 МэВ·мг/см<sup>2</sup>. При указанных выше предположениях частота эффектов получается несколько выше, чем при однонаправленном потоке:

$$\nu = \sigma_{\text{нас}_i} I(L_{z0}) \cdot \text{tg} \theta_{\max} \approx \sigma_{\text{нас}_i} I(L_{z0}) / \cos \theta_{\max}. \quad (11)$$

Полученный результат соответствует представлениям о том, что учет угловых зависимостей увеличивает частоту локальных радиационных эффектов из-за роста чувствительности при косых попаданиях ядерных частиц в активный объем элемента ИС. Например, при  $\cos \theta_{max} = 0.1$  частота возрастает на порядок. Даже этот простейший пример показывает, что учет геометрических факторов очень сильно влияет на конечный результат при оценке частоты возникновения ОРЭ в реальных условиях эксплуатации.

Наиболее распространенной моделью для оценки частоты ОРЭ в реальных условиях эксплуатации является подход на основе представления чувствительной области в виде прямоугольного параллелепипеда [11]. Если используется ступенчатая функция чувствительности, то имеет место подход, который называется RPP. В случае представления функции чувствительности в виде (3) получаем интегральную модель прямоугольного параллелепипеда (IRPP).

Частота возникновения ОРЭ в ИС при воздействии ТЗЧ изотропного поля в общем случае для модели IRPP определяется по формуле:

$$v_z = \sum_i^n \frac{S_i}{4} \int_{L_{zmoi}}^{L_{zmax}} w_i(L_{zw}) \int_{L_{zmoi}}^{L_{zw}} \varphi(L_z) \cdot C_i \left( \frac{E_{oi}}{\rho \cdot L_z} \right) dL_z dL_{zw}, \quad (12)$$

где  $S_i$  – полная поверхность  $i$ -ой чувствительной области изделия для конкретного вида ОРЭ,  $L_{zmoi}$  – минимальное значение ЛПЭ, при котором возникает ОРЭ в  $i$ -ой чувствительной области изделия;  $L_{zmax}$  – максимальное значение ЛПЭ в спектре ТЗЧ;  $L_z, L_{zw}$  – линейные потери энергии ТЗЧ при прохождении через кристалл изделия (переменные интегрирования);  $w_i(L_{zw})$  – нормированная на сечение насыщения дифференциальная функция зависимости сечения ОРЭ для  $i$ -ой чувствительной области изделия от ЛПЭ;  $\varphi(L_z)$  – дифференциальный спектр ЛПЭ ТЗЧ;  $C_i(x)$  – интегральное распределение хорд в  $i$ -ой чувствительной области изделия;  $\rho$  – плотность вещества;  $E_{oi}$  – пороговая энергия возникновения ОРЭ в  $i$ -ой чувствительной области изделия;  $n$  – количество областей в изделии, чувствительных к ОРЭ.

Следует отметить, что наиболее распространенный метод расчетов (IRPP) частот ОРЭ требует, как минимум, шесть независимых параметров, часть из которых (например, толщина чувствительной области) выбирается достаточно произвольно. Поэтому разброс в оценках частот может быть очень большим.

Ряд из этих допущений не имеет под собой физического обоснования и не может быть распространен на современные устройства, и, как следствие, не позволяет описывать некоторые эффекты, например, многократные сбои, а площадь чувствительных областей (ЧО), определенная через сечение насыщения, существенно превышает площади реальных чувствительных структур. Одним из таких допущений является полный сбор заряда из неизменной чувствительной области и вариативность критического заряда в широких пределах, описываемых распределением Вейбулла (3).

В действительности ситуация прямо противоположная. Область собирания неравновесного заряда в ЧО увеличивается по мере увеличения ЛПЭ ТЗЧ, а величина критического заряда меняется в очень небольших пределах вследствие технологического разброса и во многих случаях может считаться постоянной. В этом случае, чем дальше расположен трек частицы от чувствительного элемента (например, от закрытого стокового перехода) тем большее значение ЛПЭ ТЗЧ необходимо для возникновения эффекта. Именно это обстоятельство и определяет зависимость сечений ОРЭ от ЛПЭ.

## 2. Диффузионная модель

Выход из этой ситуации возможен, если исходные предпосылки поменять местами. Энергия возникновения ОРЭ является постоянной величиной, а размеры чувствительной области зависят от ЛПЭ. Чем более высокие значения ЛПЭ имеют место, тем большая площадь (объем) собирания заряда задействована, или, другими словами, тем больше сечение ОРЭ. В подобной постановке задачи становится очевидным, что доминирующим механизмом собирания заряда является процесс диффузии [12–14]. Отличительной особенностью такой постановки задачи является то, что при решении ее можно реализовать модель с учетом угла падения иона.

В рамках диффузионного подхода возможно решение поставленной задачи по оценке сечений одиночных сбоев для приближенного аналитического решения или использовании модели точечной области собирания. В обоих случаях решения дают близкие результаты – при нормальном падении ТЗЧ логарифмические зависимости сечений ОС  $\sigma$  от значений линейных потерь энергии  $L_z$ . В первом случае зависимость имеет вид

$$\sigma(L_z) \cong a^2 \cdot [\ln(L_z/L_{z0})]^2, \quad (13)$$

а для точечной модели

$$\sigma(L_z) \cong b^2 \cdot [\ln(L_z/L_{z0})]^{1.5}, \quad (14)$$

где  $L_{z0}$  – пороговые значения ЛПЭ,  $a$  и  $b$  – параметры моделей. Нетрудно заметить, что представленные зависимости имеют всего два независимых параметра, которые относительно просто определяются из результатов экспериментальных исследований.

На рис. 1 эти зависимости также нанесены на графиках. Несложно заметить, что по эффектам ОС они наиболее адекватно описывают экспериментальные зависимости, тогда как по тиристорным эффектам они дают несколько консервативные оценки при больших значениях ЛПЭ из-за отсутствия насыщения. Однако следует отметить, что, во-первых, имеет место консервативная оценка, а во-вторых, наибольшие отличия наблюдаются при ТЗЧ с большими значениями ЛПЭ, вклад которых очень мал из-за их очень малого количества.

Основным преимуществом представленного подхода для оценки сечений ОРЭ в функции ЛПЭ является возможность оценки этих зависимостей не только при нормальном падении ТЗЧ, но и для любого угла падения, в том числе, для изотропного поля излучения. В последнем случае можно получить приближенные соотношения по аналогии с формулами (13) и (14) соответственно

$$\sigma_{is}(L_z) \cong 0.1 \cdot a^2 \cdot [\ln(2L_z/L_{z0})]^{2.42} \quad (15)$$

и для точечной модели

$$\sigma_{is}(L_z) \cong 0.26 \cdot b^2 \cdot [\ln(2L_z/L_{z0})]^2. \quad (16)$$

В общем случае полученные соотношения справедливы при оценке чувствительности ИС к эффектам ОС при воздействии ТЗЧ. Однако формально их можно распространить и на другие эффекты, в первую очередь, тиристорные эффекты, так как механизм собирания заряда остается тем же. Основные ограничения при таком формальном подходе заключаются в двух аспектах. Во-первых, в отличие от эффектов сбоев в КМОП ИС потенциально возможны тиристорные структуры с разными параметрами чувствительности, например, пороговыми значениями ЛПЭ. Во-вторых, фактически невозможно оценить количество областей, чувствительных к воздействию ТЗЧ по одиночному тиристорному эффекту (ТЭ), поэтому невозможно оценить кратность

возникающих ТЭ. Тем не менее, предлагаемый подход формально ничем не отличается от уже существующих при использовании других аппроксимаций.

### 3. Частота ОРЭ

Таким образом, если удастся решить задачу по определению зависимости сечений ОРЭ от ЛПЭ в изотропном поле излучения ТЗЧ, то оценка частоты ОРЭ в реальных условиях эксплуатации  $R_{SEE}$  будет производиться из достаточно простого соотношения

$$R_{SEE} = \int \sigma_{is}(L_z) \cdot \varphi_z(L_z) \cdot dL_z, \quad (17)$$

где  $\varphi_z(L_z)$  – дифференциальная плотность потока ЛПЭ ТЗЧ,  $\sigma_{is}$  – сечение ОРЭ в изотропном поле ТЗЧ.

Интересно сравнить между собой результаты, получаемые при разных используемых подходах. На рис. 3 показаны оценки частоты ОРЭ полученные с использованием разных методов для одного набора исходных данных, имитирующих экспериментальные зависимости сечения от ЛПЭ с различными порогами.

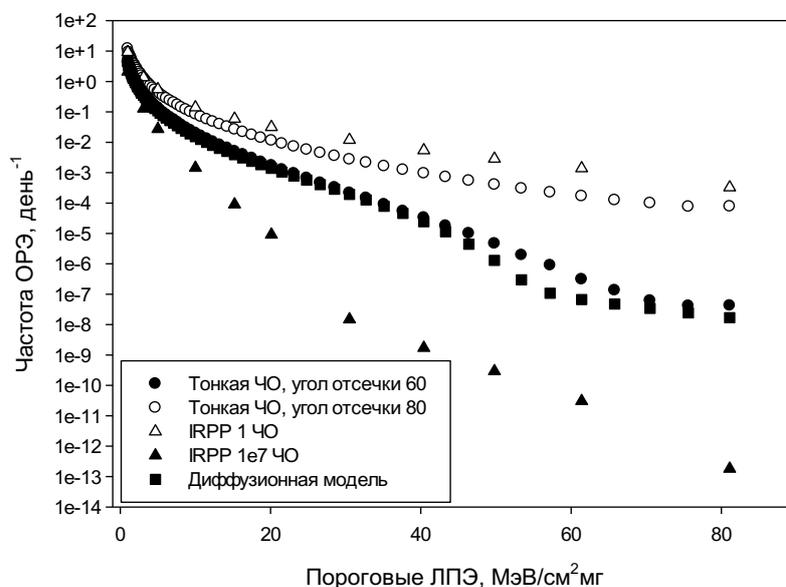


Рис. 3. Сравнение результатов оценки частоты ОРЭ как функции порогового значения ЛПЭ на геостационарной орбите (ГСО) для различных моделей  
(Fig. 3. Comparison of SER calculation results as a function of threshold LET at geostationary orbit (GEO) for different models)

Для обеспечения консервативности оценки использовались сечения насыщения на уровне  $0.1 \text{ см}^2$ . Все оценки проводились для ЛПЭ спектра частиц ГКЛ и СКЛ за защитой  $1 \text{ г/см}^2$  на геостационарной орбите.

Как видно из графика, выбор метода расчета может оказывать сильное влияние на итоговый результат. Для приближения тонкой чувствительной области большую роль играет выбор угла отсечки. Для метода IRPP значительное влияние на результат оказывает число чувствительных областей, используемое при расчете, а его выбор его значения не всегда очевиден, особенно для эффектов отказов. Помимо этого, не учитываются другие источники неопределенностей, такие как невозможность однозначного определения всех параметров IRPP метода из-за большого числа степеней свободы данной задачи. Как показывают оценки, даже для одних и тех же условий, но при разных алгоритмах оценки

параметров чувствительности, разница в расчетах частот может достигать нескольких порядков [15].

Необходимо отметить, что практически все расчетные методы верифицировались для ИС с малыми пороговыми значениями ЛПЭ, что позволяло сравнивать их с данными натурального эксперимента. Вместе с тем, как видно из полученных результатов, расхождения оценок для различных методов достигают нескольких порядков при высоких пороговых ЛПЭ. К тому же при рассмотрении требований к ИС по отказоустойчивости больший интерес представляют области больших пороговых значений ЛПЭ. Здесь прямое сравнение фактически невозможно из-за крайне редких событий, которые могут происходить с частотой одно событие за несколько лет. Поэтому важно выбрать такой метод расчета, который с запасом гарантирует требуемую отказоустойчивость. На наш взгляд, наиболее обоснованный подход базируется на диффузионных моделях.

#### 4. Задание требований

Представленные выше результаты позволяют предложить обоснованный подход для задания требований к ИС с точки зрения сравнения чувствительности ИС между собой. Достаточно часто эти требования задаются в виде ограничений на пороговые значения ЛПЭ. Однако в реальных условиях эксплуатации даже при одинаковых пороговых значениях  $L_{zo}$  разница в частотах возникновения ОРЭ может достигать нескольких порядков из-за разброса в сечениях насыщения разного характера зависимостей (см. рис. 1). Задание ограничения на оба параметра одновременно приводит к необходимости построения некоего функционала от этих параметров, что является не совсем тривиальной задачей. На наш взгляд, выходом из создавшейся ситуации является задание требований в виде ограничений на частоту ОРЭ, рассчитанную на основе экспериментальных данных, для эталонного спектра излучения орбиты космического аппарата. При этом у разработчика РЭА не должно возникнуть серьезных проблем по учету вклада возникающих ОРЭ в общую работоспособность, так как частота, по сути дела, будет одной из составляющих, определяющих суммарную интенсивность отказов.

С целью обоснования возможных требований были проведены оценки частоты ОРЭ отказов и вероятности безотказной работы для суммарных ЛПЭ спектров ГКЛ и СКЛ для различных орбит. Результаты оценок частоты ОРЭ показаны на рис. 4. Все расчеты проводились с использованием диффузионной модели. Аналогично предыдущим расчетам, в качестве входных данных использовались зависимости сечения ОРЭ от ЛПЭ, имитирующие экспериментальные данные с различными значениями порогового ЛПЭ.

С использованием результатов расчета частоты эффектов были проведены оценки вероятности безотказной работы (ВБР) для различных орбит, толщины защиты и сроков активного существования КА. На основании полученных оценок можно выделить пять уровней стойкости к воздействию ТЗЧ, обеспечивающих вероятность безотказной работы на уровне 0.99 или 0.999 для рассмотренных типовых орбит за срок активного существования. Дополнительный шестой уровень соответствует отсутствию отказов вызванных воздействием высокоэнергетических протонов и нейтронов (без учета взаимодействия протонов с материалами с высоким атомным номером, что может быть необходимо для современных ИС). Расчетные показатели вероятности безотказной работы для данных шести уровней представлены в табл. 1. Выделены значения ВБР выше 0.99 и выше 0.999.

Для задания требований к стойкости к воздействию ТЗЧ по эффектам отказов предлагается использовать частоту ОРЭ рассчитанную для одного эталонного ЛПЭ спектра ТЗЧ для всех шести уровней из табл. 1. В качестве данного эталонного спектра

предлагается использовать ЛПЭ спектр ТЗЧ СКЛ и ГКЛ за защитой  $1 \text{ г/см}^2$  на геостационарной орбите. В этом случае частота возникновения ОРЭ может быть оценена с помощью универсальной кривой, представленной на рис. 4 (ГСО,  $1 \text{ г/см}^2$ ), которая приведена для виртуального сечения насыщения равного  $0.1 \text{ см}^2$ . В качестве сечения насыщения предлагается брать значение сечения при ЛПЭ в 10 больше порогового значения.

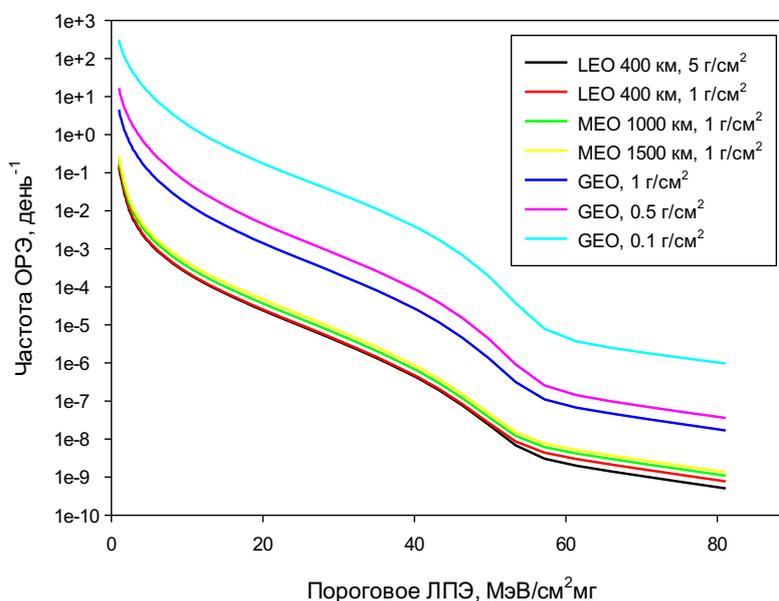


Рис. 4. Зависимость частоты ОРЭ от величины порогового значения ЛПЭ для различных орбит и толщин защиты  
 (Fig. 4. SER dependence on threshold LET for different orbits and shielding thickness values)

Таблица 1. Оценки вероятности безотказной работы для различных орбит

Исходные данные (пороговое ЛПЭ, сечение насыщения)	ВБР для заданной орбиты, срока активного существования и показателей защиты						
	LEO 400км 5 лет, 5 г/см <sup>2</sup>	LEO 400км 5 лет, 1 г/см <sup>2</sup>	MEO 1000км 10 лет, 1 г/см <sup>2</sup>	MEO 1500км 10 лет, 1 г/см <sup>2</sup>	GEO 10 лет, 1 г/см <sup>2</sup>	GEO 15 лет, 0.5 г/см <sup>2</sup>	GEO 15 лет, 0.1 г/см <sup>2</sup>
15 МэВ/см <sup>2</sup> ·мг, 0.1 см <sup>2</sup>	8.896E-01	8.841E-01	7.013E-01	6.355E-01	5.748E-07	3.395E-32	0.000E+00
30 МэВ/см <sup>2</sup> ·мг, 0.1 см <sup>2</sup>	9.940E-01	9.936E-01	9.818E-01	9.768E-01	4.923E-01	3.310E-02	7.370E-63
40 МэВ/см <sup>2</sup> ·мг, 0.1 см <sup>2</sup>	9.993E-01	9.992E-01	9.977E-01	9.971E-01	9.144E-01	6.431E-01	3.256E-09
50 МэВ/см <sup>2</sup> ·мг, 0.1 см <sup>2</sup>	9.999E-01	9.999E-01	9.999E-01	9.998E-01	9.951E-01	9.764E-01	3.455E-01
57 МэВ/см <sup>2</sup> ·мг, 0.1 см <sup>2</sup>	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	9.996E-01	9.986E-01	9.580E-01
80 МэВ/см <sup>2</sup> ·мг, 0.1 см <sup>2</sup>	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	9.999E-01	9.998E-01	9.947E-01

Группы исполнения, выбранные на основе данных значений показателей стойкости, и их краткая характеристика представлены в таблице 2.

*Таблица 2. Классификация групп исполнения изделий ЭКБ по уровню стойкости к воздействию ТЗЧ по эффектам одиночных отказов*

Группа исполнения	Частота отказов вызванных воздействием ТЗЧ на геостационарной орбите за защитой 1 г/см <sup>2</sup> , сутки <sup>-1</sup>	Примечания
I	1·10 <sup>-3</sup>	Соответствует ВБР ~0.8 за 5 лет для LEO с защитой 5 г/см <sup>2</sup> и отсутствуют отказы от протонов и атмосферных нейтронов
II	1·10 <sup>-4</sup>	Соответствует ВБР >0.99 за 5 лет для LEO с защитой 1 г/см <sup>2</sup>
III	1·10 <sup>-5</sup>	Соответствует ВБР >0.99 за 10 лет для МЕО с защитой 1 г/см <sup>2</sup> и ВБР >0.999 за 5 лет для LEO с защитой 1 г/см <sup>2</sup>
IV	1·10 <sup>-6</sup>	Соответствует ВБР >0.99 за 10 лет для GEO с защитой 1 г/см <sup>2</sup> и ВБР >0.999 за 10 лет для МЕО с защитой 1 г/см <sup>2</sup>
V	1·10 <sup>-7</sup>	Соответствует ВБР >0.99 за 15 лет для GEO с защитой 0.5 г/см <sup>2</sup> и ВБР >0.999 за 15 лет для GEO с защитой 1 г/см <sup>2</sup>
VI	1·10 <sup>-8</sup>	Соответствует ВБР >0.99 за 15 лет для GEO с защитой 0.1 г/см <sup>2</sup> и ВБР >0.999 за 15 лет для GEO с защитой 0.5 г/см <sup>2</sup>

### Заключение

Анализ существующих подходов для аппроксимации экспериментальных данных зависимостей сечений ОРЭ от ЛПЭ показал, что экспериментальные данные не могут быть достоверно описаны в рамках существующих двухпараметрических зависимостей. Применение функции Вейбулла дает возможность с приемлемой точностью аппроксимировать экспериментальные зависимости, но для этого требуется четыре подгоночных параметра. Однако из-за большого количества подгоночных параметров (реально шесть параметров) прогнозируемые значения показателей стойкости при одних экспериментальных данных могут отличаться на несколько порядков, что является неприемлемым на практике при оценке безотказной работы в реальных условиях эксплуатации.

Анализ выявил, что физически обоснованным приближением для оценки сечений ОРЭ являются модели, основанные на диффузионном механизме собирания заряда, которые приводят к логарифмической зависимости сечений ОРЭ от ЛПЭ. В рамках диффузионного подхода удастся найти значение сечений ОРЭ для изотропного поля излучения. В этом случае получается однозначная связь между показателями стойкости и набором экспериментальных данных.

Предложенный подход позволяет обосновать и выделить шесть различных групп исполнения с разными значениями показателей стойкости. При этом эта оценка может быть приведена с помощью универсальной кривой, полученной для геостационарной орбиты за конструкционной защитой толщиной 1 г/см<sup>2</sup> за десятилетний срок активного существования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ионизирующее излучение космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / Под ред. Г.Г. Райкунова. М.: Физматлит, 2013. – 256 с.
2. Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. М.: Радио и связь. 2004. – 320 с.
3. Petersen E., Single Event Effects in Aerospace, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
4. Радиационная стойкость изделий ЭКБ. Научное издание. /Под ред. А.И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – 512 с.
5. Согоян А.В., Чумаков А.И. Диффузионная модель ионизационной реакции элементов БИС при воздействии ТЗЧ // Микроэлектроника. 2017. Т. 46. № 4. С. 305–312.
6. Чумаков А.И. Оценка многократных сбоя в интегральных схемах от воздействия тяжелых заряженных частиц // Микроэлектроника. 2014. Т.43. №2. С. 83–87.
7. Boruzdina A.B., Sogoyan A. V., Smolin A.A., Ulanova A. V., Gorbunov M.S., Chumakov A.I., Boychenko D. V., Temperature Dependence of MCU Sensitivity in 65nm CMOS SRAM // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2015, vol. 62. P. 2860–2866.
8. 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. 2017. № 1. С. 73–84.
9. Bradford J.N., Geometric Analysis of Soft Errors and Oxide Damage Produced by Heavy Cosmic Rays and Alpha Particles // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1980. Vol. 27. P. 941–947.
10. Микросхемы интегральные. Методы испытаний и оценки стойкости больших и сверхбольших интегральных схем к одиночным сбоям от воздействия отдельных высокоэнергетических тяжелых заряженных частиц и протонов космического пространства. РД В 319.03.24. М.: 22 ЦНИИИ МО, 1997. – 54 с.
11. Edmonds L.D., Recommendations Regarding the Use of CREME96 for Heavy-Ion SEU Rate Calculations, 2005, URL: [https://www.researchgate.net/publication/309494195\\_Recommendations\\_Regarding\\_the\\_Use\\_of\\_CREME96\\_for\\_Heavy-Ion\\_SEU\\_Rate\\_Calculations](https://www.researchgate.net/publication/309494195_Recommendations_Regarding_the_Use_of_CREME96_for_Heavy-Ion_SEU_Rate_Calculations) (дата обращения: 14.12.2019).
12. Согоян А.В., Чумаков А.И. Оценка ионизационной реакции полупроводниковых элементов в диффузионном приближении при воздействии тяжёлых заряженных частиц // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. 2016. № 2 (241). С. 46–57.
13. 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.
14. Чумаков А.И. Оценка чувствительности интегральных схем к одиночным радиационным эффектам для точечной области сбора заряда // Микроэлектроника. Т.44, 2015. №1. С. 34–40.
15. 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.

REFERENCES:

- [1] Ioniziruyushcheye izlucheniye kosmicheskogo prostranstva i ikh vozdeystviye na bortovuyu apparaturu kosmicheskikh apparatov /Pod red. G.G. Raykunova. M.: Fizmatlit, 2013. – 256 s. (in Russian).
- [2] Chumakov A.I., Deistvie kosmicheskoi radiatsii na IS (Effects of Cosmic Radiation on IC), Moscow: Radio i Svyaz', 2004. – 320 s. (in Russian).
- [3] Petersen E., Single Event Effects in Aerospace, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [4] Radiacionnaya stoikost izdeliy EKB. /Pod red. A.I. Chumakova. M.: NRNU MEPhI, 2015. – 512 p. (in Russian).
- [5] Sogoyan A.V., Chumakov A.I. Diffusion model of the ionization response of LSI elements under exposure to heavy charged particles, Russian Microelectronics. 2017, vol. 46, n. 1. P. 282–289 (in Russian).
- [6] Chumakov A.I., Evaluation of multibit upsets in integrated circuits under heavy charged particles, Russian Microelectronics. 2014, vol. 43, n. 1. P. 91–95 (in Russian).
- [7] Boruzdina A.B., Sogoyan A.V., Smolin A.A., Ulanova A.V., Gorbunov M.S., Chumakov A.I., Boychenko D.V. Temperature Dependence of MCU Sensitivity in 65nm CMOS SRAM. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2015, vol. 62. P. 2860–2866.
- [8] 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, 2017. n. 1. P. 73–84 (in Russian).
- [9] Bradford J.N., Geometric Analysis of Soft Errors and Oxide Damage Produced by Heavy Cosmic Rays and Alpha Particles. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1980. Vol. 27. P. 941–947.

- [10] Mikroskhemy integralnye. Metody ispytaniy i ocenki stojkosti bolshih i sverhbolshih integralnyh skhem k odinochnym sboyam ot vozdeystviya otdelnyh 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).
- [11] Edmonds L.D., Recommendations Regarding the Use of CREME96 for Heavy-Ion SEU Rate Calculations, 2005, URL: [https://www.researchgate.net/publication/309494195\\_Recommendations\\_Regarding\\_the\\_Use\\_of\\_CREME96\\_for\\_Heavy-Ion\\_SEU\\_Rate\\_Calculations](https://www.researchgate.net/publication/309494195_Recommendations_Regarding_the_Use_of_CREME96_for_Heavy-Ion_SEU_Rate_Calculations) (accessed: 14.12.2019).
- [12] Sogoyan A.V., Chumakov A.I. Ocenka ionizacionnoj reakcii poluprovodnikovyx elementov v diffuzionnom priblizhenii pri vozdeystvii tyazhyolyx zaryazhennyx chasticz. E'lektronnaya texnika. Seriya 2: Poluprovodnikovye pribory. 2016. N 2 (241). S. 46–57. (in Russian).
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.

*Поступила в редакцию – 30 декабря 2019 г. Окончательный вариант – 12 февраля 2020 г.  
Received – December 30, 2019. The final version – February 12, 2020.*