

Научная статья  
УДК 004.056:539.12.04  
DOI: 10.26583/bit.2025.1.02

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕНДА «СОЧИ» ДЛЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ НЕИЗМЕННОСТИ КРИСТАЛЛА МИКРОСХЕМ\*

Дмитрий В. Бобровский<sup>1</sup>, Иван И. Швецов-Шиловский<sup>2</sup>, Александр И. Чумаков<sup>3</sup>,  
Сергей А. Соловьев<sup>4</sup>, Евгений М. Сыресин<sup>5</sup>, Алексей А. Сливин<sup>6</sup>,  
Георгий А. Филатов<sup>7</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское ш., 31, Москва,  
115409, Россия

<sup>1,2,3,4</sup>Экспериментальное научно-производственное объединение СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ  
ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия

<sup>5,6,7</sup>Объединенный институт ядерных исследований, ул. Строителей, 2, Дубна, Московская  
область, 141980, Россия

<sup>1</sup>dvbob@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3036-2953>

<sup>2</sup>iish@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8161-9926>

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

<sup>4</sup>sasol@spels.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8622-1394>

<sup>5</sup>esyresin@jinr.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8710-6606>

<sup>6</sup>slivin@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9159-0099>

<sup>7</sup>filatov@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6158-6222>

**Аннотация.** В работе проводится анализ возможной области применения стенда «СОЧИ» на базе линейного ускорителя тяжелых ионов (ЛУТИ) для целей контроля неизменности топологии кристалла в целях обеспечения доверенности ЭКБ. Одна из характеристик интегральной схемы (ИС), определяющаяся топологией и проектными нормами – чувствительность к воздействию тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) по тиристорному эффекту и сбоям. Показано, что даже незначительные и не всегда заметные изменения топологии интегральной схемы могут приводить к резким изменениям параметров чувствительности по тиристорным эффектам (ТЭ), тогда как по одиночным сбоям изменения имеют место при изменении проектных норм и библиотечных элементов. Импульсный характер пучка на стенде «СОЧИ» не позволяют проводить испытания только очень чувствительных ЭКБ к воздействию ТЗЧ по тиристорному эффекту в количественном выражении (определение сечения эффекта), однако даже в этом случае возможно определять пороговое значение линейных потерь энергии возникновения ТЭ. Во всех других случаях параметры чувствительности ИС по одиночным радиационным эффектам могут быть определены.

**Ключевые слова:** безопасность информационных систем, импульсные пучки ионов, одиночные радиационные эффекты, нуклотрон NICA, доверенность, параметры чувствительности.

**Для цитирования:** Бобровский, Дмитрий В. и др. Использование стенда «СОЧИ» для подтверждения неизменности кристалла микросхем. *Безопасность информационных технологий*, [S.l.], т. 32, № 1, с. 46–53, 2025. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/174>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2025.1.02>.

**\*Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные и прикладные исследования на экспериментальном комплексе класса мегасайенс NICA» № FSWU-2024-0024.

Scientific article

## USING THE SOCHI STAND TO CONFIRM THE IMMUTABILITY OF THE INTEGRATED CIRCUIT\*

**Dmitry V. Bobrovsky<sup>1</sup>, Ivan I. Shvetsov-Shilovskiy<sup>2</sup>, Alexander I. Chumakov<sup>3</sup>,  
Sergey A. Soloviev<sup>4</sup>, Evgeny M. Syresin<sup>5</sup>, Alexei A. Slivin<sup>6</sup>, Georgii A. Filatov<sup>7</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup>*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia*

<sup>1,2,3,4</sup>*Experimental Research and Production Association*

*SPECIALIZED ELECTRONIC SYSTEMS, Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia*

<sup>5,6,7</sup>*Joint Institute for Nuclear Research, Stroiteley str., 2, Moscow region, Dubna, 141980*

<sup>1</sup>*dvbob@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3036-2953>*

<sup>2</sup>*iish@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8161-9926>*

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

<sup>4</sup>*sasol@spels.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8622-1394>*

<sup>5</sup>*esyresin@jinr.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8710-6606>*

<sup>6</sup>*slivin@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9159-0099>*

<sup>7</sup>*filatov@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6158-6222>*

**Abstract.** The paper analyzes the possibility to apply of the SOCHI stand for the purpose of controlling the immutability of the chip's topology in order trust (in reliable and safe operation). One of the characteristics of an integrated circuit (IC), which is determined by topology and design standards, is sensitivity to SEL and SEU (Single-Event Upset). Even minor changes in the topology of an IC can lead to dramatic changes in SEL (Single-Event Latchup) sensitivity parameters, whereas for SEU, changes occur when design standards and library elements will be change. The pulse beam at the SOCHI stand does not allow testing only very sensitive ICs to SEL. However, even in this case, it is possible to determine the LET (Linear Energy Transfer) threshold for SEL. In all other cases, the sensitivity parameters of the IC can be determined.

**Keywords:** security of information systems, pulsed ion beams, single event effects, NICA nuclotron, trust, SEE sensitivity parameters.

**For citation:** Bobrovsky, Dmitry V. et al. Using the SOCHI stand to confirm the immutability of the integrated circuit. *IT Security (Russia)*, [S.l.], v. 32, no. 1, p. 46–53, 2025. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/174>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2025.1.02>.

**\*Acknowledgements:** The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project "Fundamental and Applied research at the experimental complex of the NICA megascience class" No. FSWU-2024-0024.

## Введение

Приборостроение для космической отрасли традиционно требует повышенного внимания к качеству применяемой электронной компонентной базы (ЭКБ). Контроль электрических и функциональных параметров достаточно хорошо налажен на предприятиях-изготовителях приборов, а также, как правило, дублируется на нескольких этапах при проведении цикла сертификационных испытаний. Однако это лишь одна из составных частей доверенности ЭКБ. Другая – стойкость к воздействию внешних факторов, включающих в себя специальные [1]. Один из специальных факторов, действующих на ЭКБ в космическом пространстве – тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ), вызывающие одиночные радиационные эффекты (ОРЭ), в том числе, в КМОП и БикМОП ИС потенциально катастрофический тиристорный эффект (ТЭ).

## 1. Характеристики стенда «СОЧИ»

Стенд «СОЧИ», работающий на базе линейного ускорителя тяжелых ионов (ЛУТИ), формирует пучки тяжелых ионов ( $^{197}\text{Au}^{79}$ ,  $^{131}\text{Xe}^{54+}$ ,  $^{84}\text{Kr}^{36+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{18+}$ ,  $^{12}\text{C}^{6+}$ ) с энергией 3,2 МэВ/нуклон в импульсном режиме. Длительность импульса составляет от 1 до 30 мкс, пробеги ионов в кремнии около 40 мкм, линейные потери энергии (ЛПЭ) от 94 МэВ·см<sup>2</sup>/мг до 2,8 МэВ·см<sup>2</sup>/мг соответственно. Регулировка плотности потока ионов осуществляется

как настройками ускорителя, так и установкой коллиматоров. Предусмотрено четыре режима работы: без коллиматора, коллиматор «широкая щель», коллиматор «узкая щель», коллиматор «отверстия» [2, 3].

ЛУТИ находится в составе комплекса NISA и обеспечивает инъекцию предварительно ускоренного пучка ионов. Наличие пауз между инъекцией пучка из ЛУТИ, составляющих до 40 минут, потенциально может позволить организовать процесс облучения ЭКБ практически круглый год, в то время как существующие стенды работают в сессионном режиме (около 6 сессий в год) с достаточно ограниченным временем.

## 2. Проблематика

В практике испытаний фиксировались различные случаи изменения поведения при воздействии специальных факторов по сопроводительным документам одинаковых микросхем [4]. Ряд ИС можно было сразу отбраковать на этапе входного контроля, по несовпадению размеров или маркировки кристаллов [5]. Однако это не всегда возможно, и более того даже незначительные на первый взгляд изменения в топологии или техпроцессе могут приводить к катастрофическим изменениям в параметрах чувствительности ИС по при радиационном нагружении, в том числе, к воздействию тяжелых заряженных частиц [4].

Яркие примеры – намеренное изменение топологии приемопередатчика RS-485 привело к полному подавлению тиристорного эффекта, а изменения со временем в технологическом кремний на изоляторе процессе, обладающем повышенной стойкостью к воздействию ТЗЧ, наоборот привело к возникновению «тиристороподобного эффекта», и микросхема из высоконадежной перешла в разряд потенциально отказывающей.

Процесс применения микросхем в космической технике в настоящее время не всегда предусматривает 100% проведение испытаний на стойкость к воздействию тяжелых заряженных частиц всех поставляемых партий. Нормативными документами допускается распространение результатов испытаний предыдущих партий на последующие при идентичности кристалла. При испытаниях на стойкость к воздействию ТЗЧ вне зависимости от вида регистрируемых эффектов определяют параметры чувствительности, включающие в себя пороговое значение ЛПЭ, сечение насыщения, на основе которых оценивается вероятность бессбойной или безотказной работы на заданной или типовой орбите [6–9].

Во время тестовых запусков стенда «СОЧИ» проводилась оценка возможности регистрации тиристорного эффекта на примере тестовой микросхемы памяти чувствительной к воздействию ТЗЧ по ТЭ. Типовое время парирования тиристорного эффекта, включающее в себя время детектирования, отключение питания и включение питания составляет от 100 мкс до 100 мс [10], что при длительности пучка от 1 до 30 мкс не позволит регистрировать более 1 события за сброс, что и наблюдалось в процессе эксперимента. Исследуемая микросхема имела крайне высокую чувствительность по ТЭ, при воздействии ионами с линейными потерями энергии (ЛПЭ) более 30 МэВ·см<sup>2</sup>/мг. Этот факт не позволяет оценивать сечение насыщения тиристорного эффекта на стенде «СОЧИ» при воздействии ионами криптона, однако в данном случае более критичным является изменение порогового значения ЛПЭ возникновения ТЭ. При переходе к меньшим значениям ЛПЭ возможно определение сечения ТЭ.

Для обеспечения высокой степени доверенности используемой ЭКБ космического назначения, с учетом новых возможностей стенда «СОЧИ», возможно проведение экспресс контрольных испытаний на подтверждение отсутствия/наличия тиристорного эффекта в ЭКБ при заданном значении ЛПЭ. Типовое время облучения одного образца, составляет около 30 минут, включая время смены образца, время откачки вакуумной камеры и задания температурного режима образца, а также время непосредственного облучения, что с

некоторым запасом укладывается в интервал инжекции пучка из ускорителя ЛУТИ на внешние по отношению к коллайдеру эксперименты.

Другой важный вид ОРЭ, влияющих на функционирование аппаратуры в условиях действия космической радиации, является одиночный сбой в ячейках памяти различных микросхем. Областями памяти, включая конфигурационные регистры, обладают такие микросхемы как микропроцессор, микроконтроллер, программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), приемопередатчики, ОЗУ, ПЗУ, в том числе flash типа и т.д. В отличие от ТЭ, параметры которого определяются паразитными структурами, чувствительность по одиночным сбоям зависит от характеристик активных элементов, в частности, реализацией ячеек памяти, которые, как правило, входят в состав библиотечных элементов. Именно поэтому их параметры чувствительности слабо различаются в пределах одного технологического процесса, более того, можно даже утверждать в пределах одинаковых проектных норм проектирования в рамках однотипных технологий.

Для исключения влияния динамического режима работы микросхемы на одиночные сбои в накопителе, обусловленного изменениями уровней помехоустойчивости цифровых элементов (вместо статической помехоустойчивости на предельных частотах будет уже иметь место динамическая помехоустойчивость), при решении поставленных выше задач контроль ОРЭ ОС целесообразно проводить в статическом режиме работы схемы, т.е. до начала облучения в накопитель записываются эталонные данные, после окончания облучения считывается содержимое накопителя и сравнивается с эталоном [11].

### 3. Экспериментальные результаты и анализ

Во время тестовых запусков стенда «СОЧИ» проводилась оценка влияния импульсного характера пучка на возникновение и регистрацию одиночных сбоев в микросхемах, содержащих элементы памяти. Объектами исследований были: микросхема ОЗУ (технология изготовления КМОП 0,18 мкм, XFAB); микросхема ПЛИС (технология изготовления КМОП 65 нм, TSMC); тестовый кристалл с блоками памяти (технология изготовления КМОП 90 нм, Микрон). Облучение проводилось для двух режимов работы стенда: с коллиматором («широкая щель», средняя интенсивность пучка ионов) и без коллиматора (высокая интенсивность пучка ионов). Ожидаемая плотность потока ионов без коллиматора составляла около  $5 \cdot 10^4$  ион/см<sup>2</sup>/сброс, при использовании коллиматора «широкая щель» плотность потока ионов уменьшается до уровня  $3 \cdot 10^3$  ион/см<sup>2</sup>/сброс. При этих уровнях уровни эквивалентной мощности поглощенной дозы составляли  $6,4 \cdot 10^6$  рад(Si)/с без коллиматора и  $3,8 \cdot 10^5$  рад(Si)/с с коллиматором [12]. В первом случае уровень эквивалентной дозы находится у границы, когда имеют место массовые сбои за счет эффектов мощности дозы, тогда как во втором случае находимся на достаточном удалении от этой границы [13, 14].

Все объекты предварительно облучались на ускорителе ионов У-400 в ЛЯР ОИЯИ, г. Дубна в поле квазистационарного излучения ионов. Полученные результаты сечения эффекта использовались в качестве опорных для оценки эквивалентного флюенса за один сброс на станции «СОЧИ».

Эквивалентный флюенс за сброс на станции «СОЧИ» рассчитывался по формуле:

$$\Phi_{\text{СОЧИ}} = \frac{N_{\text{ОС}}}{N \cdot \sigma_{\text{ОС}}(y-400)},$$

где  $N_{\text{ОС}}$  – количество зарегистрированных одиночных сбоев,  $\sigma_{\text{ОС}}(y-400)$  – сечение ОС, определенное на ускорителе У-400,  $N$  – количество сбросов пучка на объект.

В табл. 1 приведены результаты оценки эффективного флюенса ионов при двух интенсивностях пучка ионов на станции «СОЧИ» при облучении объектов.

Таблица 1. Результаты оценки эффективного флюенса ионов при двух интенсивностях пучка ионов на стенде «СОЧИ»

Объект	Коллиматор	$N_{OC}$	Количество сбросов пучка, $N$	$\sigma_{OC}(y-400)$ , $см^2$	$\Phi_{СОЧИ}$ $1/см^2$	
ОЗУ 180 нм Объем памяти 4194304 бит	«Широкая щель»	5296	20	$1,96 \cdot 10^{-1}$	$1,35 \cdot 10^3$	
		5448	20	$1,96 \cdot 10^{-1}$	$1,39 \cdot 10^3$	
		5361	20	$1,96 \cdot 10^{-1}$	$1,37 \cdot 10^3$	
ТК 90 нм Блок памяти №1 Объем памяти 10240 бит		6	20	$1,71 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^3$	
19		50	$1,71 \cdot 10^{-4}$	$2,22 \cdot 10^3$		
ТК 90 нм Блок памяти №2 Объем памяти 32768 бит		27	20	$3,78 \cdot 10^{-4}$	$3,57 \cdot 10^3$	
81		50	$3,78 \cdot 10^{-4}$	$4,29 \cdot 10^3$		
ТК 90 нм Блок памяти №3 Объем памяти 65536 бит		41	20	$7,96 \cdot 10^{-4}$	$2,58 \cdot 10^3$	
110		50	$7,96 \cdot 10^{-4}$	$2,76 \cdot 10^3$		
ПЛИС 65 нм Объем памяти 18147984 бит		4533	10	$1,62 \cdot 10^{-1}$	$2,80 \cdot 10^3$	
ОЗУ 180 нм Объем памяти 4194304 бит	Коллиматор отсутствует	26739	10	$1,96 \cdot 10^{-1}$	$1,36 \cdot 10^4$	
		31525	10	$1,96 \cdot 10^{-1}$	$1,61 \cdot 10^4$	
		ТК 90 нм Блок памяти №1 Объем памяти 10240 бит	110	20	$1,71 \cdot 10^{-4}$	$3,22 \cdot 10^4$
		ТК 90 нм Блок памяти №2 Объем памяти 32768 бит	324	20	$3,78 \cdot 10^{-4}$	$4,29 \cdot 10^4$
		ТК 90 нм Блок памяти №3 Объем памяти 65536 бит	699	20	$7,96 \cdot 10^{-4}$	$4,39 \cdot 10^4$
		ПЛИС 65 нм Объем памяти 18147984 бит	25987	5	$1,62 \cdot 10^{-1}$	$3,21 \cdot 10^4$
		29268	5	$1,62 \cdot 10^{-1}$	$3,61 \cdot 10^4$	

Анализируя полученные оценки эффективных флюенсов за сброс (рис. 1, 2) можно сделать вывод, что имеет место выбивающиеся из общего тренда и ожидаемых значений данные для микросхемы ОЗУ. Отклонение от ожидаемых значений составляют не более 3 раз. Данный факт может свидетельствовать как о наличии влияния импульсного характера пучка ионов на чувствительность микросхемы ОЗУ, так и влияние неравномерности пучка ионов на стенде «СОЧИ» [15, 16]. Для исключения влияния импульсного характера пучка рекомендуется проведение облучений для двух значений интенсивности. Отличия в полученных сечениях ОС будет свидетельствовать о наличии такого влияния.

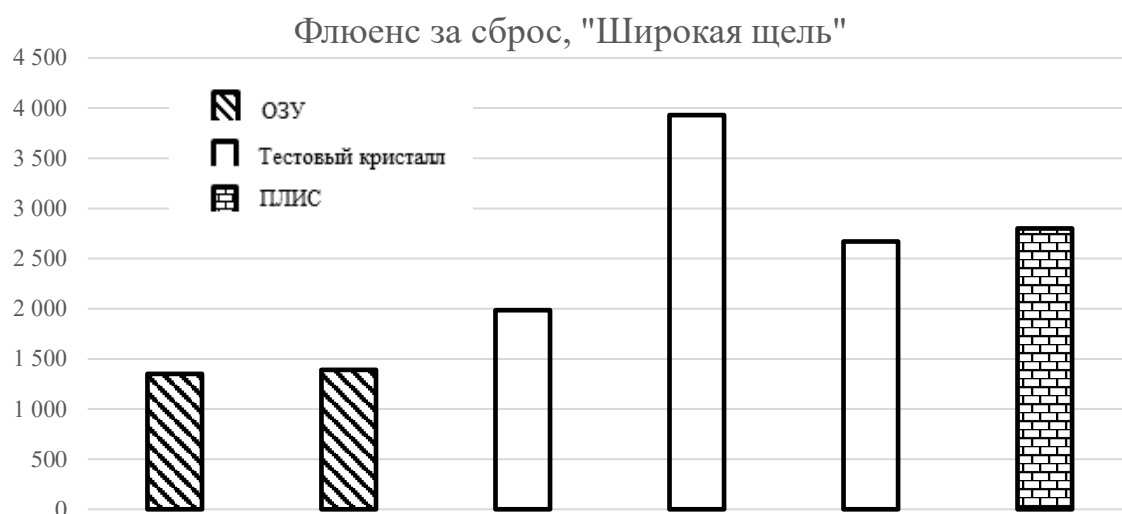


Рис. 1. Оценки эффективного флюенса за сброс для коллиматора «широкая щель»

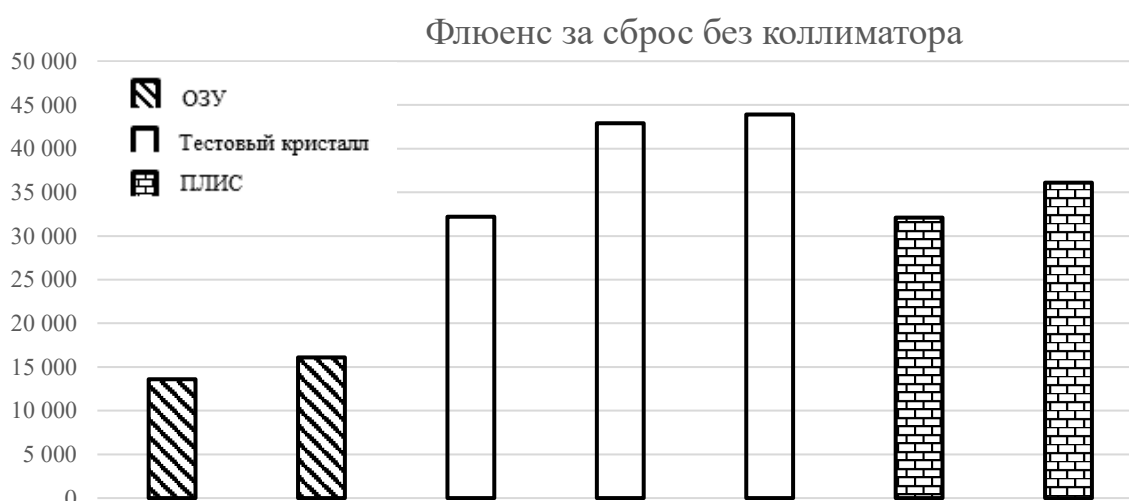


Рис. 2. Оценки эффективного флюенса за сброс без коллиматора

Из анализа представленных результатов заметно ожидаемое увеличение эффективного значения флюенса (до порядка величины) для всех исследуемых изделиях при смене коллиматора. При этом эти относительные увеличения слабо зависят от технологии. С другой стороны, абсолютные изменения в наибольшей степени проявляются в изделиях с большими проектными нормами. Полученные предварительные результаты позволяют трактовать различия в технологиях изготовления, но требуют более подробных исследований для получения окончательных выводов.

### Заключение

Представленные в настоящей работе результаты, для оценки сбое- и отказоустойчивости информационно-вычислительных систем в поле отдельных тяжелых заряженных частиц по результатам испытаний на импульсном ускорителе ионов, кратко можно сформулировать следующим образом:

- применение стенда «СОЧИ» для оценок параметров чувствительности по одиночным тиристорным эффектам потенциально возможно только для ЭКБ, обладающей слабой чувствительностью к ним;
- стенд «СОЧИ» в общем случае может использоваться для оценок параметров чувствительности по эффектам одиночных сбоев, но рекомендуется проводить облучения для двух плотностей потока частиц с целью оценки влияния импульсного характера пучка;
- возможности стенда «СОЧИ» позволяют повысить степень доверия к ЭКБ, применяемой в высоконадежных системах космического назначения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Никифоров Александр Ю. Колонка главного редактора. Безопасность информационных технологий, [S.l.], т. 31, № 4, с. 7–13, 2024. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1727> (дата обращения: 28.10.2024).
2. Slivin A., Agarov A., Butenko A. et al. Construction of Stations for Applied Research at the NICA Accelerator Complex. *Physics and technique of accelerators*. V. 19, p. 528–531, 2022. DOI: 10.1134/S1547477122050375.
3. Syresin E. et al. New Heavy Ion Facility Design Project for Single Event Effect Tests. 20th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, RADECS 2020 – Proceedings, 2020. DOI: 10.1109/RADECS50773.2020.985769.
4. Бобровский Д.В., Боруздина А.Б., Лоскутов И.О. и др. О целесообразности испытаний ЭКБ иностранного производства с заявленной радиационной стойкостью. Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2023»: Тезисы докладов 26-й Всероссийской научно-технической конференции, Лыткарино, 06–07 июня 2023 года. – Лыткарино: Научно-исследовательский институт приборов. 2023, с. 165–166. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_56420423\\_61344277.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_56420423_61344277.pdf) (дата обращения: 28.10.2024).
5. Кессаринский Леонид Н. и др. Идентификация элементной компонентной базы киберфизических систем. *Безопасность информационных технологий*, [S.l.], № 3, с. 67–78, 2018. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2018.3.07>.
6. Радиационная стойкость изделий ЭКБ. Научное издание. Под ред. А.И. Чумакова. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – 512 с.
7. Raoul Velazco, Dale McMorro, Jaime Estela, *Radiation Effects on Integrated Circuits and Systems for Space Applications*, Springer, 2019. – 401 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04660-6>.
8. Ygor Quadros de Aguiar, Frédéric Wrobel, Jean-Luc Autran, Rubén García Alía, *Single-Event Effects, from Space to Accelerator Environments*, Springer, 2025. – 146 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-71723-9>.
9. Petersen E., *Single Event Effects in Aerospace*, John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 520 p.
10. Цирков А.Н., Новиков А.А., Лукашин В.П. и др. Исследование катастрофических отказов в ПЗС при воздействии ТЗЧ. *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*. 2020, № 4, с. 231–235. DOI: 10.31114/2078-7707-2020-4-231-235.
11. Чумаков А.И., Сокоян А.В., Боруздина А.Б. и др. Механизмы многократных сбоев в микросхемах памяти. *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*. 2016, № 4, с. 145–152. – EDN: WWDHND.
12. Чумаков Александр И.; Бобровский Дмитрий В.; Соловьев Сергей А. Влияние импульсного характера излучения на параметры чувствительности интегральных схем к одиночным радиационным эффектам. *Безопасность информационных технологий*, [S.l.], т. 31, № 4, с. 141–152, 2024. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2024.4.10>.
13. Massengill E.W. and Diehl-Nagle S.E., *Transient Radiation Upset Simulations of CMOS Memory Circuits*. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1984, v. 31, no. 6, p. 1337–1343. DOI: 10.1109/TNS.1984.4333507.
14. Швецов-Шиловский, И. И. Развитие методов и средств исследований нестабильных тиристорных эффектов в КМОП СБИС при воздействии ионизирующих излучений: специальность 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Швецов-Шиловский Иван Иванович, 2022. – 127 с.
15. Gorbunov M.S., Dolotov P.S., Antonov A.A. et al. Design of 65 nm CMOS SRAM for space applications: A comparative study. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2014, v. 61, no. 4, p. 1575–1582. DOI: 10.1109/TNS.2014.2319154.
16. Боруздина А.Б., Григорьев Н.Г., Уланова А.В. Влияние топологического размещения ячеек в микросхемах памяти на кратность сбоев от ТЗЧ. *Микроэлектроника*. 2014, т. 43, № 2, с. 88. DOI: 10.7868/S0544126914020033. – EDN: RUUQNX.

REFERENCES:

- [1] Nikiforov Alexander Yu. Editor-in-chief's column. IT Security (Russia), [S.l.], v. 31, no. 4, p. 7–13, 2024. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1727> (accessed: 28.10.2024) (in Russian).
- [2] Slivin A., Agapov A., Butenko A. et al. Construction of Stations for Applied Research at the NICA Accelerator Complex. Physics and technique of accelerators. V. 19, p. 528–531, 2022. DOI: 10.1134/S1547477122050375.
- [3] Syresin E., et al. New Heavy Ion Facility Design Project for Single Event Effect Tests. 20th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, RADECS 2020 –Proceedings, 2020. DOI: 10.1109/RADECS50773.2020.985769.
- [4] Bobrovsky D.V., Boruzdina A.B., Loskutov I.O. O podderzhke EKB inostrannogo proizvodstva s zayavlennoy radiatsionnoy stoykost'yu. Radiacionnaya stoykost' elektronnyh sistem «Stoikost'-2023». 2023, p. 165–166. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_56420423\\_61344277.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_56420423_61344277.pdf) (accessed: 28.10.2024) (in Russian).
- [5] Kessarinskiy Leonid N. et al. Authentication of electronics components for cyber-physical systems. IT Security (Russia), [S.l.], no. 3, p. 67–78, 2018. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2018.3.07> (in Russian).
- [6] Radiacionnaya stoikost izdeliy EKB. Pod red. A.I. Chumakova. M. NIYaU MIFI. 2015. – 512 s. (in Russian).
- [7] Raoul Velazco, Dale McMorrow, Jaime Estela, Radiation Effects on Integrated Circuits and Systems for Space Applications, Springer, 2019. – 401 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04660-6>.
- [8] Ygor Quadros de Aguiar, Frédéric Wrobel, Jean-Luc Autran, Rubén García Alía, Single-Event Effects, from Space to Accelerator Environments, Springer, 2025. – 146 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-71723-9>.
- [9] Petersen E., Single Event Effects in Aerospace, John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 520 p.
- [10] Tsirkov A.N. & Novikov A.A. & Lukashin V.P. & Gritsaenko A.R. & Pechenkin Alexander. (2020). The investigation of catastrophic failures in the CCD under the influence of the Heavy-Charged Particles. Problems of advanced micro- and nanoelectronic systems development. P. 231-235. DOI: 10.31114/2078-7707-2020-4-231-235 (in Russian).
- [11] Chumakov A. I., Sogoyan A.V., Boruzdina A.B. et al. Mechanisms of Multiple Cell Upsets in Memory. Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development. 2017, no. 4, p. 49–54. – EDN: WWDHHD (in Russian).
- [12] Chumakov Alexander I.; Bobrovsky Dmitry V.; Soloviev Sergey A. The influence of an impulsed ion radiation on the sensitivity parameters of integrated circuits to single event effects. IT Security (Russia), [S.l.], v. 31, no. 4, p. 141–152, 2024. ISSN 2074-7136. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2024.4.10> (in Russian).
- [13] Massengill E.W. and Diehl-Nagle S.E., Transient Radiation Upset Simulations of CMOS Memory Circuits. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1984, v. 31, no. 6, p. 1337–1343. DOI: 10.1109/TNS.1984.4333507.
- [14] Shvetsov-Shilovskiy I.I. Development of methods and means for researching unstable thyristor effects in CMOS VLSI under the influence of ionizing radiation: specialty 05.13.05 "Elements and devices of computer technology and control systems": PhD dissertation, 2022. – 127 p. (in Russian).
- [15] Gorbunov M.S., Dolotov P.S., Antonov A.A. et al. Design of 65 nm CMOS SRAM for space applications: A comparative study. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2014, v. 61, no. 4, p. 1575–1582. DOI: 10.1109/TNS.2014.2319154.
- [16] Boruzdina A.B., Grigor'ev N.G., Ulanova A.V. Effect of topological placement of memory cells in memory chips on multiplicity of cell upsets from heavy charged particles. Russian Microelectronics. 2014, v. 43, no. 2, p. 96–101. DOI: 10.1134/S1063739714020036. – EDN: RUUQNX.

*Статья поступила в редакцию 29.10.2024; одобрена после рецензирования 18.11.2024;  
принята к публикации 20.01.2025  
The article was submitted 29.10.2024; approved after reviewing 18.11.2024;  
accepted for publication 20.01.2025*