

Дмитрий О. Титовец¹, Николай Д. Кравченко², Андрей Б. Каракозов³,
Александр И. Чумаков⁴, Дмитрий В. Бобровский⁵

¹⁻⁵Акционерное общество «Экспериментальное научно-производственное объединение
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ»

Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия

¹e-mail: dotit@spels.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4934-5945>

²e-mail: ndkrav@spels.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4891-3733>

³e-mail: abkar@spels.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2910-8870>

⁴e-mail: aichum@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6270-2663>

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИИ ГЕНЕРАЦИИ ЗАРЯДА ПРИ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КМОП МИКРОСХЕМ К ОДИНОЧНЫМ СБОЯМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕЙТРОНОВ

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.3.08>

Аннотация. В связи с текущей тенденцией уменьшения проектных норм микросхем все чаще возникает проблема возникновения одиночных радиационных эффектов сбоев (ОРЭ ОС) в микросхемах при воздействии нейтронов, что приводит к сбоям в работе аппаратуры и потере информации. Для оценки частоты данного эффекта в заданных условиях эксплуатации необходимо иметь зависимость сечения эффекта от энергии нейтронов или параметры чувствительности. В статье предлагается использовать методику на основе функции генерации заряда (ФГЗ) или Burst Generation Rate (BGR) для оценок параметров чувствительности микросхемы по ОРЭ ОС при воздействии нейтронов, а также приведены результаты ее апробации на нескольких микросхемах с малыми проектными нормами: программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) семейств Artix-7 и Spartan-7 фирмы Xilinx и микроконтроллер (МК) семейства STM32 фирмы ST Microelectronics. В качестве контрольно-измерительного оборудования, необходимого для проведения контроля возникновения ОС, использовались модульные измерительные приборы фирмы National Instruments. Рассмотрены области, для которых актуальна данная тема, проведен обзор имеющихся результатов исследований ОС в микросхемах при воздействии нейтронов, описана методика на основе ФГЗ и представлены результаты эксперимента по оценке параметров чувствительности микросхем при воздействии нейтронов.

Ключевые слова: безопасность информации, одиночные сбои, нейтроны, КМОП сверхбольшая интегральная схема (СБИС), функция генерации заряда, микропроцессоры (МП), микроконтроллеры (МК), программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).

Для цитирования: ТИТОВЕЦ, Дмитрий О. et al. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИИ ГЕНЕРАЦИИ ЗАРЯДА ПРИ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КМОП МИКРОСХЕМ К ОДИНОЧНЫМ СБОЯМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕЙТРОНОВ. *Безопасность информационных технологий, [S.I.]*, v. 27, n. 3, p. 89–97, 2020. ISSN 2074-7136. Доступно на: <<https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1295>>. Дата доступа: 08 sep. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.3.08>.

Dmitry O. Titovets¹, Nikolay D. Kravchenko², Andrey V. Karakozov³,
Alexander I. Chumakov⁴, Dmitry V. Bobrovsky⁵

Joint Stock Company “Experimental Research and Production Association
SPECIAL ELECTRONIC SYSTEM”,

Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409, Russia

¹e-mail: dotit@spels.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4934-5945>

²e-mail: ndkrav@spels.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4891-3733>

³e-mail: abkar@spels.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2910-8870>

⁴e-mail: aichum@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6270-2663>

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

Using the burst generation rate function to evaluate the parameters of cmos chip sensitivity to single event upsets when exposed to neutrons

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.3.08>

Abstract. The development of the technological process in electronics has led to the problem of single event upsets (SEU) in microchips when exposed to neutrons causing loss of information and errors. To evaluate sensitivity of CMOS VLSI to SEU caused by neutrons we propose BGR method. To test this approach we apply BGR method to the data obtained by irradiation of several types of ICs: Artix and Spartan FPGAs (Xilinx) and STM32 microcontroller (ST Microelectronics). Test setup was built using modular devices by National Instruments. In this study, we also consider the areas for which neutron influence evaluation is relevant and present an overview of the available data on neutron induced SEU in CMOS chips. A description of the BGR method and experimental results are given.

Keywords: information security, single event upset (SEU), neutrons, CMOS Very Large-Scale Integration (VLSI), Burst Generation Rate (BGR), microprocessors (MPU), microcontrollers (MCU), field-programmable gate array (FPGA).

For citation: TITOVETS, Dmitry O. et al. Evaluating CMOS chip sensitivity parameters to single event upsets under influence of neutrons by the burst generation rate function. IT Security (Russia), [S.l.], v. 27, n. 3, p. 89–97, 2020. ISSN 2074-7136. Available at: <<https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1295>>. Date accessed: 08 sep. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.3.08>.

Введение

Безопасность информации зависит от устойчивости ее носителей к влиянию различных внешних факторов, в том числе специальных факторов. На протяжении многих лет в России и за рубежом ведутся разработки электронной компонентной базы (ЭКБ), устойчивой к воздействию различных специальных факторов [1–4]. Тенденция уменьшения технологических норм проектирования сверх больших интегральных схем (СБИС) очевидно приводит к снижению пороговых энергий переключений и отказов модулей СБИС [5–7], что в свою очередь приводит к росту чувствительности микросхем к воздействию нейтронного излучения.

1. Актуальные области применения оценок сбоеустойчивости микросхем при воздействии нейтронов

Проблема сбоев от нейтронного излучения актуальна как для микросхем специального применения, например, атомные электростанции и другие ядерные силовые установки, так и для микросхем, применяемых в гражданских отраслях, таких как авионика, суперкомпьютеры, дата-центры и т.д.

Поток нейтронов на высоте 12000 м примерно на три порядка превосходит поток над уровнем моря, а сложность систем управления в авиации требует применения все более мощных вычислительных средств, что объясняет актуальность проблемы оценок сбоеустойчивости системы при воздействии нейтронного излучения.

Поток нейтронов у поверхности Земли на несколько порядков ниже, чем на высотах эксплуатации авиационной аппаратуры, однако из-за огромного количества процессорных СБИС и микросхем памяти, используемых в наземных вычислительных комплексах, частоты сбоев могут превосходить частоты для авионики [8].

ЭКБ современных ядерных установок (как промышленных, так и современных) может включать в себя компоненты, выполненные по техпроцессу менее 500 нм, т.е. потенциально существует риск возникновения ОРЭ ОС в электронных системах ядерных установок [9].

Также оценка параметров чувствительности СБИС по ОРЭ ОС при воздействии нейтронов становится актуальной в области испытаний ЭКБ на стойкость к спецфакторам.

В настоящее время ЭКБ принято испытывать на стойкость к воздействию нейтронов по эффектам структурных повреждений. Однако для ЭКБ с современными проектными нормами выясняется, что изделия, стойкие к эффектам структурных повреждений при воздействии спецфакторов зачастую могут быть чувствительными к эффектам ОС.

2. Методика оценки параметров чувствительности микросхем по ОРЭ ОС при воздействии нейтронов на основе функции генерации заряда

В [10] предложена BGR – методика оценки параметров чувствительности КМОП СБИС к ОС при воздействии нейтронов. Методика BGR основана на использовании функции генерации заряда (ФГЗ), предложенной E. Normand в [11].

Данная методика позволяет построить зависимость сечения ОРЭ в зависимости от энергии нейтронов. Для использования методики BGR достаточно иметь данные о сечении ОС при воздействии нейтронов 2,5 МэВ, 14 МэВ и более 50 МэВ. Воздействие нейтронов с энергией более 50 МэВ допускается заменять протонами с аналогичной энергией.

Зависимость строится в следующей последовательности:

1. Проводятся облучения изделия протонами с энергией более 50 МэВ (рекомендуется 200 МэВ) и нейтронами с энергиями 2,5 МэВ и 14 МэВ и определяются сечения ОРЭ ОС.

2. Определяются отношения сечений ОРЭ ОС:

- отношение сечения ОРЭ ОС при воздействии 200 МэВ протонов к сечению ОРЭ ОС при воздействии 14 МэВ нейтронов;

- отношение сечения ОРЭ ОС при воздействии 14 МэВ нейтронов к сечению ОРЭ ОС при воздействии 2,5 МэВ нейтронов.

3. По графику семейства кривых BGR (рис. 1) определяются отношения значений BGR-функций для каждой кривой при энергиях, равных энергиям в п.2.

4. Из семейства кривых BGR (рис. 1) выбирается та кривая, отношение значений которой наиболее близко с отношениями значений сечений ОРЭ ОС испытуемого объекта. Более высокий приоритет имеет отношение при энергиях 14 МэВ и 2,5 МэВ. Отношение при энергиях 200 МэВ и 14 МэВ используется в случае отсутствия ОРЭ ОС при воздействии 2,5 МэВ нейтронов.

5. Выбранная кривая нормируется таким образом, чтобы она проходила через экспериментально полученные значения сечений ОРЭ ОС.

6. Нормированная кривая принимается за зависимость сечения ОРЭ ОС от энергии нейтронов и используется в дальнейшем для расчета частот событий для заданных условий эксплуатации.

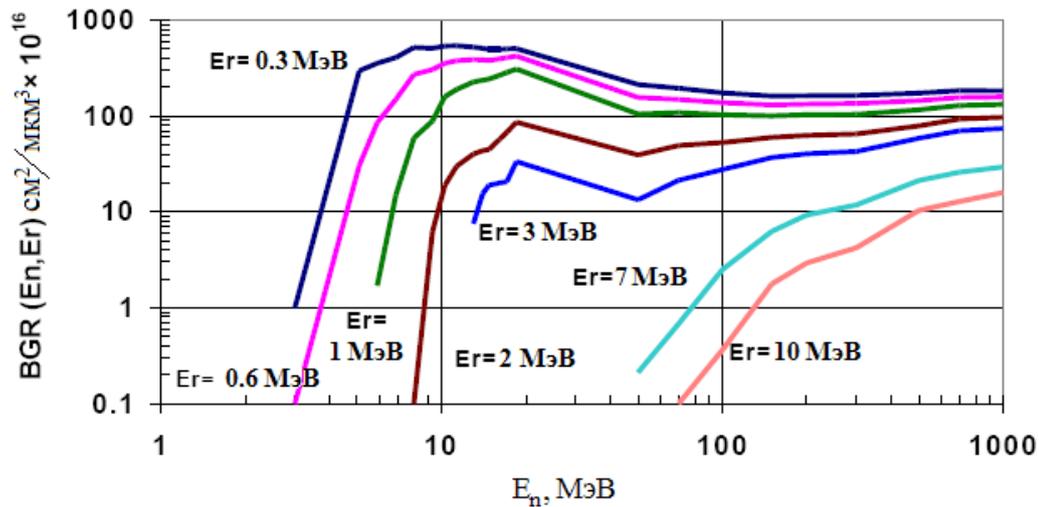


Рис. 1. Семейство кривых BGR
(Fig. 1. Family of graphs)

3. Подготовка КМОП СБИС к проведению испытаний на чувствительность к ОРЭ ОС при воздействии нейтронов

Выбор объектов испытаний

В качестве объектов испытаний были выбраны следующие изделия:

1. XC7A100T (Далее – Artix-7) – ПЛИС;
 - 215000 логических ячеек
 - 13 Мбит памяти ОЗУ
 - Напряжение питания 1,2–3,3 В
 - Проектные нормы 28 нм
2. XC7S25 (Далее – Spartan-7) – ПЛИС;
 - 102000 логических ячеек
 - 4,2 Мбит памяти ОЗУ
 - Напряжение питания 1,2–3,3 В
 - Проектные нормы 28 нм
3. STM32H743 (Далее – STM32) – МК;
 - Техпроцесс 40 нм
 - Ядро ARM Cortex-M7
 - Разрядность 32 бита
 - 2 МБ Flash памяти
 - 512 КБ СОЗУ
 - Проектные нормы 40 нм

Выбор объектов обусловлен, прежде всего, малыми проектными нормами и потенциальным наличием ОРЭ ОС при воздействии нейтронов.

Выбор установок для проведения испытаний

Для проведения экспериментальных испытаний были выбраны следующие установки:

1. НГ-24. Источник нейтронов с возможностью генерации нейтронов с энергиями 2,5 МэВ и 14 МэВ. Использовался в режиме генерации 2,5 МэВ нейтронов. Поток нейтронов $1,3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$.

2. НГ-14. Источник нейтронов с возможностью генерации нейтронов с энергиями 2,5 МэВ и 14 МэВ. Использовался в режиме генерации 14 МэВ нейтронов. Поток нейтронов равен $2,0 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$.

3. ПРОМЕТЕУС. Источник протонного пучка с энергией протонов от 50 до 250 МэВ. Использовался в режиме генерации протонного пучка с энергией 200 МэВ.

Методика регистрации ОС в объектах испытаний

Методика регистрации ОС в объектах испытаний имеет принципиальное различие для объектов Artix-7, Spartan-7 и объекта STM32.

В случае испытаний объектов Artix-7 и Spartan-7 до воздействия в конфигурационную память ПЛИС через интерфейс JTAG загружается тестовая прошивка. Затем проводилась верификация зашивки. В случае успешной верификации проводилось облучение частицами с заданной энергией и флюенсом, после которого еще раз производилась верификация, показывающая количество сбившихся ячеек памяти.

В случае испытаний объекта STM32 до испытательного воздействия в МК загружалась тестовая программа, позволяющая проводить запись и контроль сохранности информации в блоках памяти МК во время испытательного воздействия и передавать результаты по интерфейсу UART. Во время воздействия непрерывно тестировался блок памяти ОЗУ МК. ОС накапливались и информация об их количестве записывалась в лог-файл.

4. Результаты испытаний изделий по ОРЭ ОС при воздействии нейтронов

Количество ОС в объектах испытаний, а также сечение ОС при различных значениях энергий частиц приведено в табл. 1.

Таблица 1. Количество ОС в объектах испытаний при различных значениях энергий частиц

Образец	Энергия частиц, МэВ	Количество ОС	Емкость, бит	Флюенс, $1/\text{см}^2$	Сечение, $\text{см}^2/\text{бит}$
Artix-7	2,5	24	13 Мбит	$2,7 \cdot 10^{10}$	$7,0 \cdot 10^{-17}$
	14	1517		$1,0 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^{-14}$
	200	1254		$1,0 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{-14}$
Spartan-7	2,5	8	4,2 Мбит	$4,7 \cdot 10^{10}$	$4,3 \cdot 10^{-17}$
	14	3274		$1,0 \cdot 10^{10}$	$7,9 \cdot 10^{-14}$
	200	407		$1,0 \cdot 10^{10}$	$9,8 \cdot 10^{-15}$
STM32	14	152	4 Мбит	$6,0 \cdot 10^{10}$	$6,1 \cdot 10^{-16}$
	200	35		$6,0 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{-16}$

Из табл. 2 и 3 видно, что для образца Artix-7 наиболее точно подходит кривая BGR с $E_r = 0,3 \text{ МэВ}$, а для образца Spartan-7 кривая с $E_r = 0,6 \text{ МэВ}$.

Таблица 2. Отношения значений функции BGR при энергиях частиц 2,5 МэВ, 14 МэВ и 200 МэВ

Кривая BGR	Отношение 200 к 14 МэВ	Отношение 14 к 2,5 МэВ
Er = 0,3 МэВ	0,321	110,703
Er = 0,6 МэВ	0,339	750,027
Er = 1 МэВ	0,422	157,620
Er = 2 МэВ	1,366	–
Er = 3 МэВ	2,633	–

Таблица 3. Отношения значений сечений ОС в испытанных образцах при энергиях частиц 2,5 МэВ, 14 МэВ и 200 МэВ

Образец	Отношение 200 к 14 МэВ	Отношение 14 к 2,5 МэВ
Artix-7 ()	0,867	164,835
Spartan-7	0,124	1833,333
STM32	0,229	–

Пронормировав выбранные кривые BGR на экспериментальные значения сечений эффекта получаются зависимости сечения эффекта от энергии нейтронов (рис. 2–4).

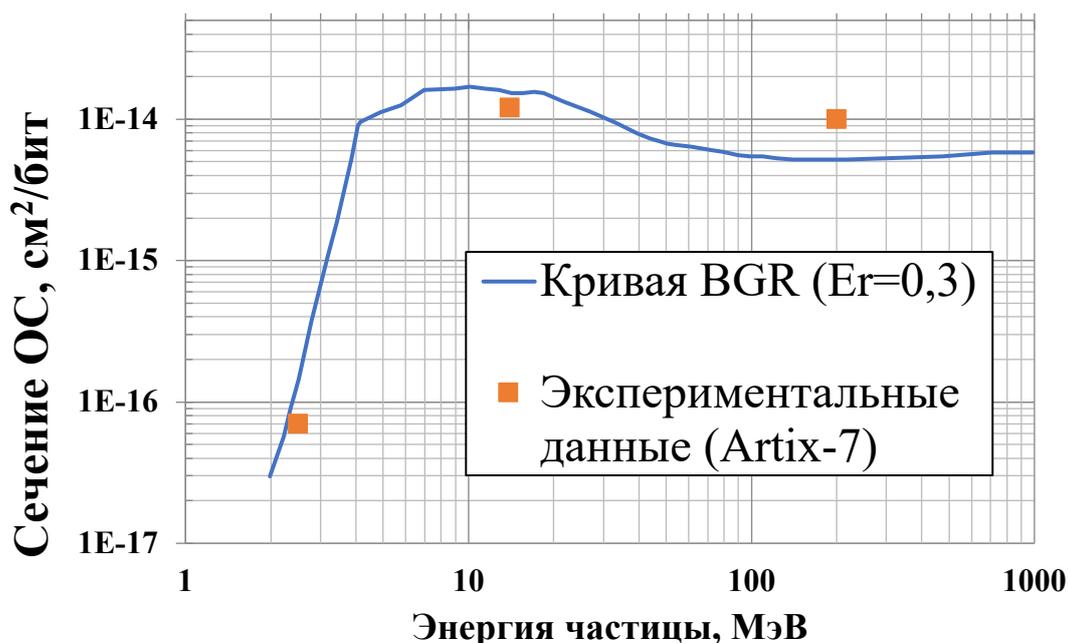


Рис. 2. Зависимость сечения ОС в Artix-7 от энергии нейтронов
 (Fig. 2. Dependence of the cross section of SEU in Artix-7 on the energy of particles)

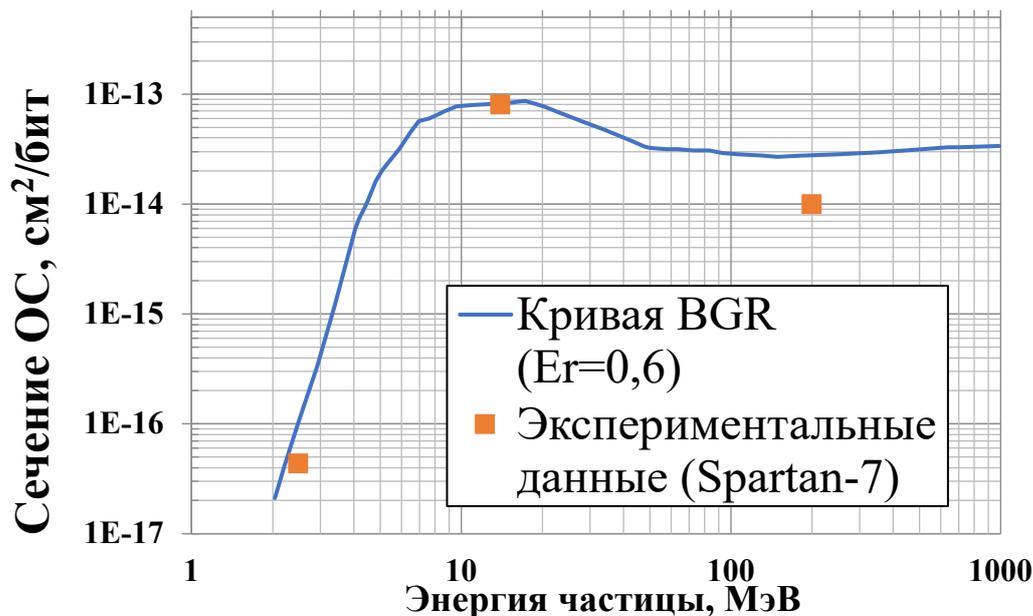


Рис. 3. Зависимость сечения ОС в Spartan-7 от энергии нейтронов
(Fig. 3. Dependence of the cross section of SEU in Spartan-7 on the energy of particles)

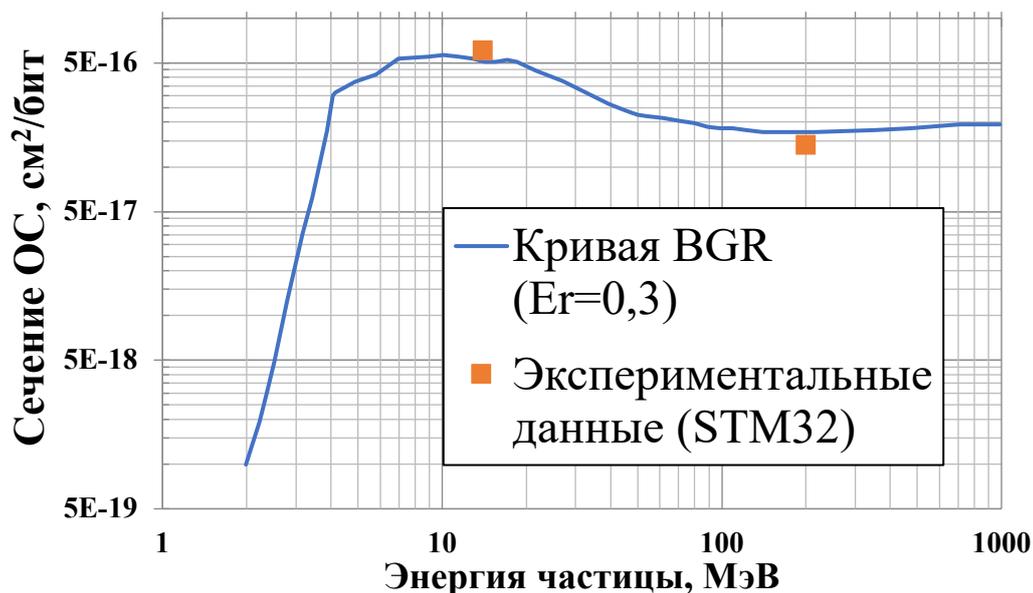


Рис. 4. Зависимость сечения ОС в STM32 от энергии нейтронов
(Fig. 4. Dependence of the cross section of SEU in STM32 on the energy of particles)

Заключение

В статье представлены результаты апробации методики оценки параметров чувствительности микросхем к воздействию нейтронов по ОРЭ ОС на трех типах микросхем (микроконтроллер STM32H743, ПЛИС XC7A100T, ПЛИС XC7S25), которая основана на пропорциональности зависимостей сечения эффекта ОС и функции BGR от энергии воздействующего нейтронного излучения. Выбор объектов обуславливался

малыми проектными нормами и потенциальной чувствительностью к воздействию нейтронного излучения.

Экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются с теоретическими зависимостями BGR и являются аргументом в пользу применимости данного метода оценки параметров чувствительности микросхем к воздействию нейтронов по ОРЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Никифоров А.Ю. / Радиационные эффекты в КМОП ИС.//Телец В.А., Чумаков А.И. – М.: Радио и связь, 1994. – 165 с.
2. Чумаков А.И. / Действие космической радиации на интегральные схемы. – М. – Радио и связь, 2004. – 319 с.
3. G.C. Messenger and M. Ash Single Event Phenomena London U.K.:Chapman & Hall 1997. – 368 p.
4. Чумаков, Александр И. и др. Требования и нормы испытаний по радиационной стойкости интегральных схем к эффектам воздействия тяжёлых заряженных частиц. Безопасность информационных технологий, [S.I.], Т. 27, №. 1. С. 83–97, фев. 2020. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1254> (дата обращения: 18.08.2020). DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.1.07>.
5. A.E. Rudenkov, A.O. Akhmetov, D.V. Bobrovsky, A.I. Chumakov, A.V. Yanenko and V.M. Uzhegov, "The prediction for single event latchup sensitivity parameters of digital CMOS ICs based on its technological features," 2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL), Nis, 2017. P. 287–290. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MIEL.2017.8190123>.
6. A.B. Boruzdina, A.V. Yanenko, A.V. Ulanova, A.I. Chumakov, D.V. Bobrovskiy and V.M. Uzhegov, "Microdose effects in SRAM cells under heavy ion irradiation," 2017 17th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Geneva, Switzerland, 2017. P. 1–3, DOI: <https://doi.org/10.1109/RADECS.2017.8696109>.
7. Chumakov, A.I., Bobrovsky, D.V., Pechenkin, A.A. et al. Mechanisms of Initiation of Unstable Latchup Effects in CMOS ICs. Russ Microelectron 48, 250–254 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063739719040036>.
8. E. Normand, "Single-event effects in avionics," in IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 43, no. 2. P. 461–474, April 1996. DOI: <https://doi.org/10.1109/23.490893>.
9. A.I. Chumakov, A.V. Sogoyan, A.B. Boruzdina, A.A. Smolin and A. A. Pechenkin, "Multiple Cell Upset Mechanisms in SRAMs," 2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Moscow, 2015. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/RADECS.2015.7365638>.
10. А.И. Чумаков, А.В. Афонин. Оценка энергетической зависимости сечений одиночных радиационных эффектов при нейтронном облучении// Научн.-техн. Сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2015».-М.: СПЭЛС-НИИП. 2015. С. 177–178.
11. E. Normand and W.R. Doherty, "Incorporation of ENDF-V neutron cross section data for calculating neutron-induced single event upsets," in IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 36, no. 6. P. 2349–2355, Dec. 1989. DOI: <https://doi.org/10.1109/23.45447>.

REFERENCES:

- [1] Nikiforov A.Yu. Radiation effects in CMOS IC. Telets V.A., Chumakov A.I. – M.: Radio and communications, 1994. – 165 p. (in Russian).
- [2] Chumakov A.I., Effects of Cosmic Radiation on IC, Moscow: Radio i Svyaz', 2004. – 319 p. (in Russian).
- [3] G. C. Messenger and M. Ash Single Event Phenomena London U.K.:Chapman & Hall 1997. – 368 p.
- [4] Chumakov, Aleksandr I. et al. Hardness assurance levels and requirements for single event effects testing of integrated circuits. IT Security (Russia), [S.I.]. V. 27, no. 1. P. 83–97, feb. 2020. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1254> (accessed: 18.08.2020). DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2020.1.07> (in Russian).
- [5] A.E. Rudenkov, A.O. Akhmetov, D.V. Bobrovsky, A.I. Chumakov, A.V. Yanenko and V.M. Uzhegov, "The prediction for single event latchup sensitivity parameters of digital CMOS ICs based on its technological features," 2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL), Nis, 2017. P. 287–290. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MIEL.2017.8190123>.
- [6] A.B. Boruzdina, A.V. Yanenko, A.V. Ulanova, A.I. Chumakov, D.V. Bobrovskiy and V.M. Uzhegov, "Microdose effects in SRAM cells under heavy ion irradiation," 2017 17th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Geneva, Switzerland, 2017. P. 1–3, DOI: <https://doi.org/10.1109/RADECS.2017.8696109>.

- [7] Chumakov A.I., Bobrovsky D.V., Pechenkin A.A. et al. Mechanisms of Initiation of Unstable Latchup Effects in CMOS ICs. Russ Microelectron 48, 250–254 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063739719040036>.
- [8] E. Normand, "Single-event effects in avionics," in IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 43, no. 2. P. 461–474, April 1996. DOI: <https://doi.org/10.1109/23.490893>.
- [9] A.I. Chumakov, A.V. Sogoyan, A.B. Boruzdina, A.A. Smolin and A. A. Pechenkin, "Multiple Cell Upset Mechanisms in SRAMs," 2015 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Moscow, 2015. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/RADECS.2015.7365638>.
- [10] A.I. Chumakov, A.V. Afonin. Estimation of the energy dependence of cross sections of single radiation effects under neutron irradiation // Sci.-tech. Magazine «Radiation resistance of electronic systems – Stoikost-2015».- M.: SPELS-NIIP. 2015. P.177–178 (in Russian).
- [11] E. Normand and W.R. Doherty, "Incorporation of ENDF-V neutron cross section data for calculating neutron-induced single event upsets," in IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 36, no. 6. P. 2349–2355, Dec. 1989. DOI: <https://doi.org/10.1109/23.45447>.

*Поступила в редакцию – 26 июля 2020 г. Окончательный вариант – 20 августа 2020 г.
Received – July 26, 2020. The final version – August 20, 2020.*