

# Метод разбиения сечения сбоев по кратности для прогнозирования частот множественных сбоев в космосе

А.М. Галимов<sup>1,2</sup>, М.С. Горбунов<sup>1,3</sup>, Г.И. Зебрев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва,

<sup>2</sup>АО «НИИМА Прогресс», Москва, galimov@mri-progress.ru

<sup>3</sup>НИИ системных исследований РАН, Москва

**Аннотация** — В статье предложен самосогласованный метод разбиения полного сечения сбоев на парциальные сечения множественных сбоев. Представлено применение данного метода в целях прогнозирования частот множественных сбоев. Проведена верификация метода на экспериментальных данных распределения кратностей сбоев и полетных данных частот множественных сбоев

**Ключевые слова** — множественные сбои памяти, сечение сбоев, частицы космического пространства

## I. ВВЕДЕНИЕ

Увеличение степени интеграции ячеек памяти привело к усложнению обеспечения сбоеустойчивости и прогнозирования частот сбоев микросхем памяти [1]. Согласно оценкам, проведенным в работе [2], частота сбоев на бит памяти прямо пропорциональна площади ячейки памяти  $a_c$  и обратно пропорциональна ее критическому заряду  $\propto a_c/Q_c$ . Критический заряд микросхем, изготовленных по относительно старым технологиям (более 65 нм), уменьшался приблизительно на 30% с переходом на более низкие проектные нормы, в то время как критический заряд современных проектных норм (14 – 40 нм) достиг насыщения [3]. Это объясняет тот факт, что частота сбоев на бит памяти падает, хотя частота сбоев всего массива памяти микросхемы растет с уменьшением проектных норм, что выводит задачу прогнозирования сбоеустойчивости на первый план.

Растущая доля множественных сбоев современных микросхем памяти является основной проблемой при разработке системы парирования сбоев. В данной работе под множественным сбоем подразумевается одновременный сбой нескольких ячеек памяти, вызванный попаданием одной частицы (multiple cell upsets, MCU) [4]. При экспериментальном исследовании параметров чувствительности к сбоям микросхем памяти, как правило, производится определение только полного сечения сбоев. Полученное полное сечение сбоев не содержит информацию о распределении кратности множественных сбоев, а экспериментальное исследование данного распределения не предусмотрено стандартной процедурой испытаний.

Отсутствие данной информации может привести к разработке неэффективной системы парирования сбоев и недооценке реальных показателей стойкости памяти при прогнозировании частот сбоев в космосе.

Традиционные подходы к прогнозированию частот сбоев основаны на моделировании физических процессов взаимодействия частиц с веществом и радиационного отклика микросхемы. Для корректного моделирования этих процессов требуется расширенная информация о структуре микросхемы, которая зачастую недоступна. В данной работе авторы подходят к моделированию частот сбоев с точки зрения испытателя, который обладает только ограниченным набором экспериментальных данных сечения сбоев и минимальной информацией о проектных нормах микросхемы. В такой постановке задачи единственно возможным является феноменологический подход, который оперирует только с экспериментальными данными сечения сбоя [5, 6]. В данной работе показано применение феноменологического подхода для расчета частот множественных сбоев памяти на орбите по ограниченному набору экспериментальных данных.

## II. ПАРЦИАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ МНОЖЕСТВЕННЫХ СБОЕВ

В работах [5, 6] предложена и верифицирована феноменологическая формула расчета частоты сбоев по известному экспериментальному сечению

$$R[\phi(\Lambda)] = \int_0^{\infty} \sigma(\Lambda) \phi(\Lambda) d\Lambda \quad (1)$$

где  $\sigma(\Lambda)$  - экспериментальная зависимость полного сечения сбоев от линейной передачи энергии (ЛПЭ) частиц;  $\phi(\Lambda)$  - дифференциальный ЛПЭ-спектр всенаправленного потока частиц на заданной орбите. Также показано [7], что сечение сбоев может быть представлено в виде суммы парциальных сечений сбоев:

$$\sigma(\Lambda) = \sum_{n=1}^{\infty} n \sigma_n(\Lambda) = a_c \sum_{n=1}^{\infty} n p_n(\Lambda) = a_c m(\Lambda), \quad (2)$$

где  $\sigma_n$  – парциальное сечение сбоя с кратностью  $n$ ,  $a_c$  – топологическая площадь ячейки памяти,  $p_n(\Lambda) = \sigma_n(\Lambda)/a_c$  – распределение кратностей множественных сбоев ( $n=0$  соответствует попаданию частицы в чувствительный объем без последовавшего сбоя),  $m(\Lambda) = \sigma(\Lambda)/a_c$  – средняя кратность сбоя для частицы с заданным ЛПЭ. Стоит отметить, что сумма всех парциальных сечений сбоев для частицы с заданным ЛПЭ всегда ограничена

условием полноты  $\sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n(\Lambda) = a_c$ . Применив данное

разбиение по кратностям (2) к выражению частоты сбоев в космосе (1), получено выражение для парциальных частот сбоев

$$R_{Hn}[\phi(\Lambda)] = \int_0^{\infty} \sigma_n(\Lambda) \phi(\Lambda) d\Lambda = \sum_{n=1}^{\infty} n R_n \quad (3)$$

с частотой  $n$ -кратных сбоев равной

$$R_n = a_c \int_0^{\infty} p_n(\Lambda) \phi(\Lambda) d\Lambda. \quad (4)$$

Важно, что сумма парциальных частот сбоев равна интегральной плотности потока частиц  $\phi$  на единицу площади ячейки памяти

$$\sum_{n=0}^{\infty} R_n = a_c \int \phi(\Lambda) d\Lambda = a_c \phi \equiv R_{tot} \quad (5)$$

Удобно ввести понятие эффективного сечения  $\sigma_{eff}$ , которое характеризует отклик микросхемы на поток частиц в космосе

$$\sigma_{eff} = \frac{\int \sigma(\Lambda) \phi(\Lambda) d\Lambda}{\int \phi(\Lambda) d\Lambda} = a_c \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n R_n}{\sum_{n=0}^{\infty} R_n}. \quad (6)$$

В приближении, что форма спектров слабо зависит от орбиты, данная величина описывает частоту сбоев при воздействии потока частиц с интегральной плотностью  $\phi$

$$R_{Hn} = \sigma_{eff} \phi. \quad (7)$$

В качестве нижней границы интегрирования в (6) выбрано значение  $0,5 \text{ МэВ/мг/см}^2$ , которое, как правило, является граничным значением для прямой ионизации от частиц. Таким образом,  $\sigma_{eff}$  может служить альтернативной формой числа качества [1] (figure of merit, FOM) для микросхем памяти.

### III. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СБОЕВ ПО КРАТНОСТИ

В выражении (5) распределение кратностей множественных сбоев от ЛПЭ  $p_n(\Lambda)$  задано неявно. При анализе литературных экспериментальных данных

установлено, что форма  $p_n(\Lambda)$  зачастую близка к распределению Пуассона. Приближение Пуассона для  $p_n(\Lambda)$  является достаточно грубым, однако, как будет показано далее, хорошо подходит для широкого класса современных микросхем памяти. Приняв, что  $p_n(\Lambda)$  является распределением Пуассона, получена самосогласованная функция вероятности  $n$ -кратного сбоя от ЛПЭ

$$p_n(\Lambda) = \frac{m(\Lambda)^n}{n!} e^{-m(\Lambda)}, \quad (8)$$

где средняя кратность сбоев  $m(\Lambda)$  для заданного ЛПЭ определяется экспериментально. Тогда парциальную частоту  $n$ -кратных сбоев на бит  $R_n$  можно записать как

$$R_n = a_c \int_0^{\infty} p_n(\Lambda) \phi(\Lambda) d\Lambda = a_c \int_0^{\infty} \frac{m(\Lambda)^n}{n!} e^{-m(\Lambda)} \phi(\Lambda) d\Lambda. \quad (9)$$

В частности,  $R_0$  – частота «нулевых» сбоев (попадание иона без последующего эффекта), которая равна

$$R_0 = a_c \int e^{-m(\Lambda)} \phi(\Lambda) d\Lambda; \quad (10)$$

$R_1$  – частота единичных сбоев и т.д.

$$R_1 = a_c \int m(\Lambda) e^{-m(\Lambda)} \phi(\Lambda) d\Lambda. \quad (11)$$

В случае старых проектных норм и радиационно-стойких микросхем памяти, для которых большая часть ЛПЭ-спектра частиц соответствует малой средней кратности  $m(\Lambda) \ll 1$ , получается, что

$$R_{tot} \cong R_0 + R_1 \quad (12)$$

и

$$R_{SBU} \cong R_1 \cong a_c \int m(\Lambda) \phi(\Lambda) d\Lambda. \quad (13)$$

Для расчетов частот множественных сбоев микросхем памяти с малыми пороговыми ЛПЭ [5] удобно использовать линейное приближение сечения

$$m(\Lambda) = \sigma(\Lambda)/a_c \cong K_d (\Lambda - \Lambda_c)/a_c, \quad (14)$$

где  $K_d$  – дифференциальный наклон сечения,  $\Lambda_c$  – пороговое ЛПЭ.

Однако, как и для расчета полной частоты сбоев, выбор линейной аппроксимации не является принципиальным моментом метода, и вместо линейной функции может быть использована любая другая форма аппроксимации, включая численную интерполяцию.

Таким образом, для расчета парциальных сечений (вероятностей) сбоев от ЛПЭ и частот множественных сбоев необходимы:

1) экспериментальные данные полного сечения сбоев (при использовании линейного приближении параметры  $K_d$  и  $\Lambda_c$ );

2) топологическая площадь ячейки памяти  $a_c$ .

Все входные параметры модели хорошо определены, что предполагает однозначный результат моделирования.

#### IV. ПАРЦИАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ МНОЖЕСТВЕННЫХ СБОЕВ

Экспериментальные данные распределения кратностей множественных сбоев по ЛПЭ не содержат «нулевых» событий. Для проверки приближения распределения Пуассона на экспериментальных данных необходимо ввести сокращенное распределение, исключая нулевые события

$$\tilde{p}_n = \frac{p_n}{1 - p_0} = \frac{m^n e^{-m}}{n! (1 - e^{-m})} = \frac{m^n}{n! (e^m - 1)}, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (15)$$

причем оба распределения (Пуассона и сокращенное) удовлетворяют условию полноты

$$\sum_{n=0} p_n(\Lambda) = \sum_{n=1} \tilde{p}_n(\Lambda) = 1. \quad (16)$$

Сокращенное распределение Пуассона не содержит информацию о нулевых событиях и представляет собой распределение сбоев с кратностью  $n \geq 1$ . Сравнение данных распределений по средней кратности сбоев показано на рис. 1. При малой средней кратности или малом сечении сбоев наиболее вероятными событиями являются нулевые события и единичные сбои. Стоит отметить, что сокращенное распределение Пуассона применяется только для сравнения расчетных и экспериментальных распределений кратностей сбоев.

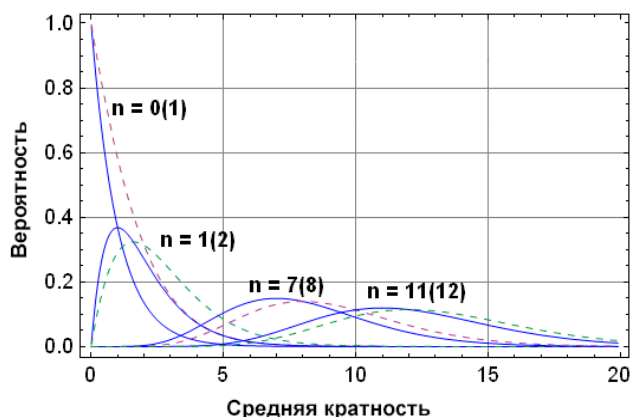


Рис. 1. Распределение Пуассона (сплошные линии) и сокращенное распределение Пуассона (пунктирные линии) для сбоев с разной кратностью

Верификация модели проведена для коммерческих микросхем памяти с известными литературными распределениями кратностей множественных сбоев по ЛПЭ [8, 9]. На рис. 2 и 3 показаны результаты сравнения  $\tilde{p}_n(\Lambda)$  и экспериментальных данных распределения кратностей от 1 до 4 для микросхем памяти, изготовленных по технологии 65 нм и 90 нм. Учитывая, что модель имеет всего 3 хорошо определенных параметра, результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

#### V. ПАРЦИАЛЬНЫЕ ЧАСТОТЫ МНОЖЕСТВЕННЫХ СБОЕВ

Для микросхем памяти миссии SAC-C (KM684000 и HM628512) проведено сравнение расчетных (формула 4) и полетных данных [10] по количеству множественных сбоев от ТЗЧ за 9 лет полета спутника. Расчет частот множественных сбоев производился по известным данным полного сечения от ЛПЭ, линейные параметры которых равны. Площади ячеек памяти выбраны  $a_c = 20 \text{ мкм}^2$  согласно проведенному исследованию данных микросхем [11]. Результаты сравнения представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, результаты моделирования хорошо коррелируют с полётными данными. Полученное расхождение для микросхемы KM684000 может быть объяснено возможным отклонением распределения кратностей множественных сбоев от распределения Пуассона.

#### VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен метод разбиения полного сечения сбоев на парциальные сечения сбоев разных кратностей. Предложена процедура расчета парциальных частот множественных сбоев, основанная на феноменологическом представлении сечения. В целях верификации произведена проверка метода на экспериментальных распределениях кратностей множественных сбоев и проведено сравнение расчетных и полетных парциальных частот множественных сбоев.

#### ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы «УМНИК-2017» №0038941.

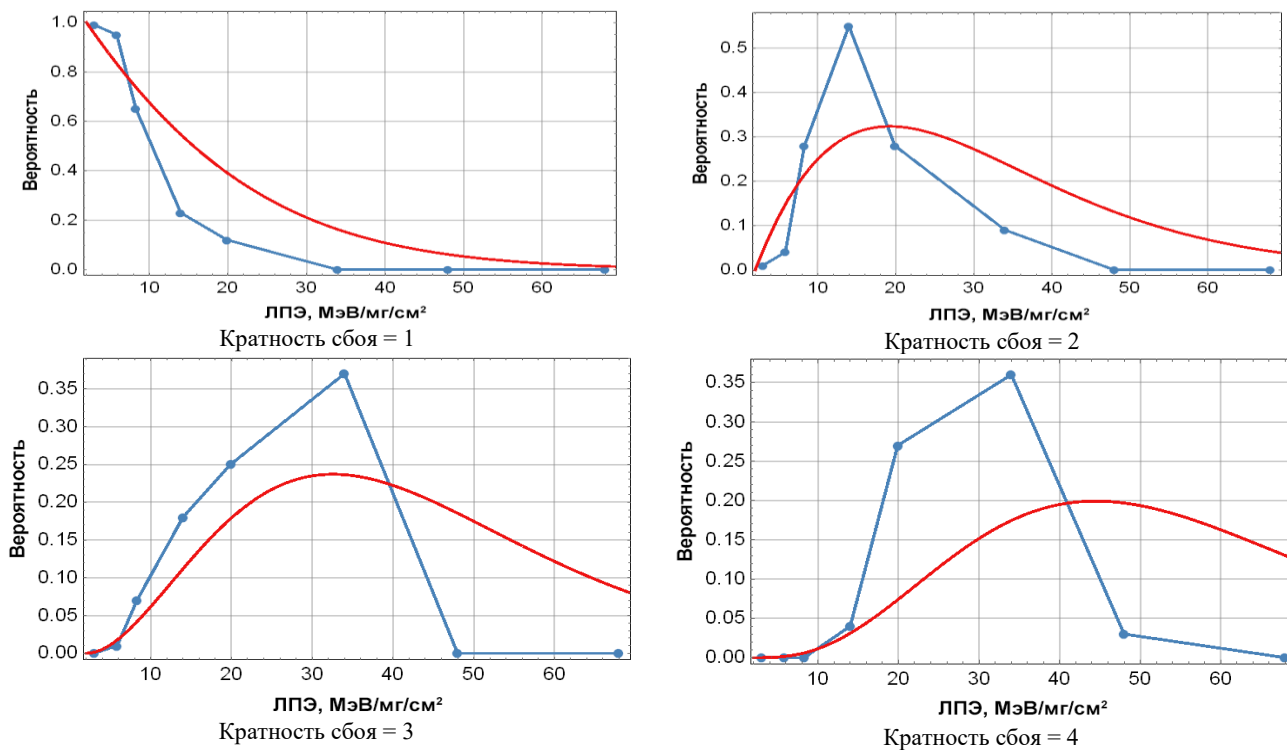


Рис. 2. Сравнение экспериментального (синия кривая с точками, рис. 5. [8]) и расчетного (красная кривая) распределения  $n$ -кратного сбоя ( $n$  от 1 до 4) от ЛПЭ. Параметры моделирования ( $K_d = 0,48 \times 10^{-9}$  мг/МэВ,  $\Lambda_c = 2$  МэВ/мг/см<sup>2</sup>,  $a_c = 0,52$  мкм<sup>2</sup>)

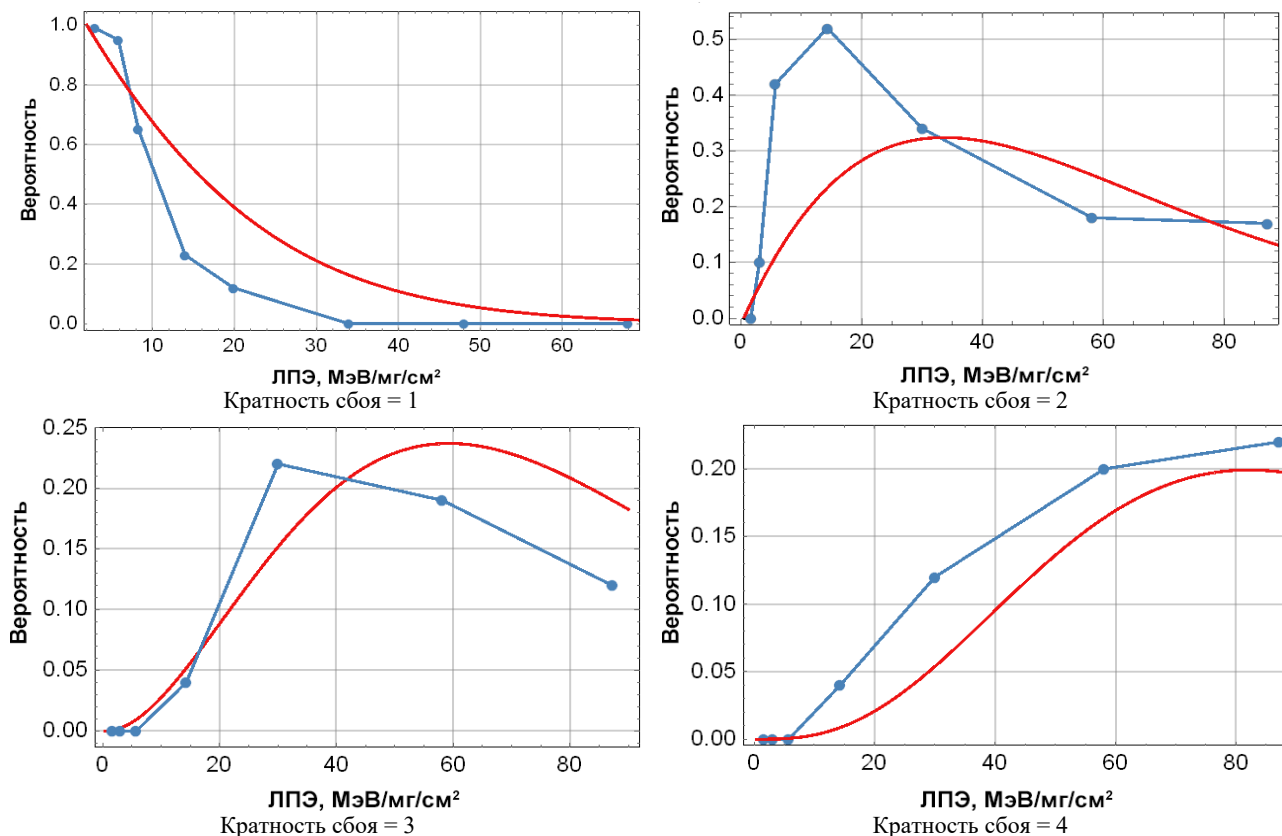


Рис. 3. Сравнение экспериментального (синия кривая с точками) [9] и расчетного (красная кривая) распределения  $n$ -кратного сбоя ( $n$  от 1 до 4) от ЛПЭ. Параметры моделирования ( $K_d = 0,40 \times 10^{-9}$  мг/МэВ,  $\Lambda_c = 0,5$  МэВ/мг/см<sup>2</sup>,  $a_c = 1$  мкм<sup>2</sup>)

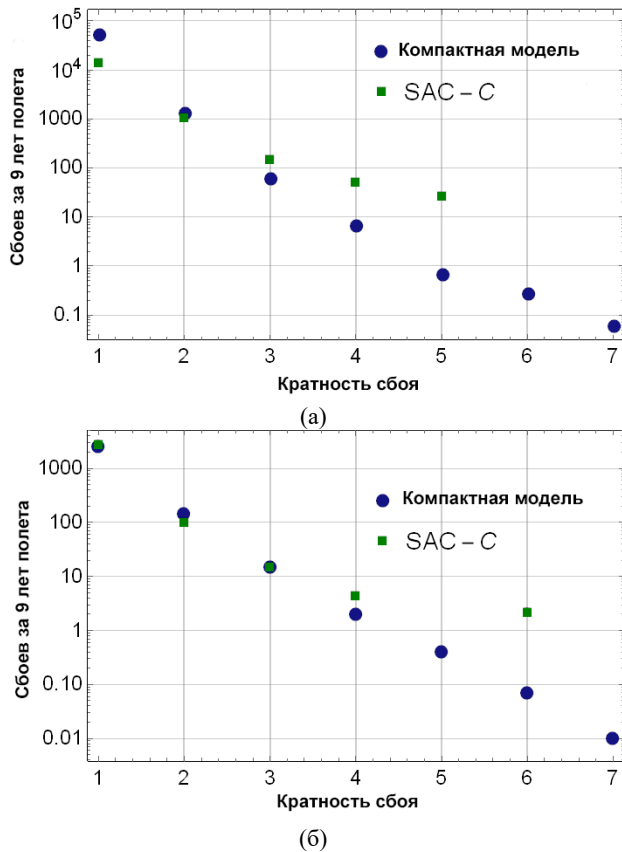


Рис. 4. Расчетные (точки) и полетные (квадраты) данные по количеству множественных сбоев от ТЗЧ за 9 лет для микросхем памяти КМ684000 (а) и NM628512 (б)

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] E. L. Petersen, R. Koga, M. A. Shoga, J. C. Pickel, W. E. Price, "Single Event Revolution," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 60, No. 3, pp. 1824-1825, 2013.

[2] G. I. Zebrev, K. S. Zemtsov, "Multiple cell upset cross-section modeling: A possible interpretation for the role of the ion energy-loss straggling and Auger recombination,"

*Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Sec. A*, Vol. 827, pp. 1-7, Aug. 2016.

[3] Norbert Seifert et al., "Soft Error Rate Improvements in 14-nm Technology Featuring Second-Generation 3D Tri-Gate Transistors," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 62, No. 4, pp. 2570-2577, Dec. 2010.

[4] URL: <https://www.jedec.org/standards-documents/dictionary/terms/multiple-cell-upset-mcu> (дата обращения: 31.03.2018)

[5] G. I. Zebrev, A. M. Galimov, "Compact Modeling and Simulation of Heavy Ion Induced Soft Error Rate in Space Environment: Principles and Validation," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 64, No. 4, pp. 2129-2135, Aug. 2017.

[6] G. I. Zebrev, I. O. Ishutin, R. G. Useinov, V. S. Anashin, "Methodology of Soft Error Rate Computation in Modern Microelectronics," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 57, No. 6, pp. 3725-3733, Dec. 2010.

[7] Зебрев Г. И. и др. Статистический подход к описанию множественных сбоев в цифровых схемах памяти высокой степени интеграции // Проблемы разработки перспективных микро-и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2014. – № 3. – С. 167-176.

[8] D. Giot, P. Roche, G. Gasiot, J.-L. Autran, and R. Harboe-Sørensen, "Heavy Ion Testing and 3-D Simulations of Multiple Cell Upset in 65 nm Standard SRAMs," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 55, no. 4, pp. 2048-2054, Aug. 2008.

[9] R. K. Lawrence and A. T. Kelly, "Single Event Effect Induced Multiple-cell Upsets in a Commercial 90 nm CMOS Digital Technology," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 55, No. 6, pp. 3367-3374, Dec. 2008.

[10] C. Boatella, G. Hubert, R. Ecoffet, and F. Bezerra, "ICARE on-board SAC-C: More than 8 years of SEU & MBU, analysis and prediction," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 57, No. 4, pp. 2000-2009, Aug. 2010.

[11] G. Hubert, S. Duzellier, C. Inguibert, C. Boatella-Polo, F. Bezerra, and R. Ecoffet, "Operational SER calculations on the SAC-C orbit using the multi-scales single event phenomena predictive platform (MUSCA SEP3)," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 56, no. 6, pp. 3032-3042, 2009.

# Cross-Section Partitioning Technique for Multiple Cell Upsets Rate Simulation in Space Environment

A.M. Galimov<sup>1,2</sup>, M.S. Gorbunov<sup>1,3</sup>, G.I. Zebrev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National research nuclear university «Mephi», Moscow,

<sup>2</sup>JSC «NIIMA Progress», Moscow, galimov@mri-progress.ru

<sup>3</sup>SRISA RAS, Moscow

**Abstract** — The rise of multiple cell upsets (MCU) has led to new challenges with the prediction of the soft error rate (SER) in space. The distribution of the event rates over multiplicities in a given memory device carries exclusively important information about their vulnerabilities to the upsets in a given space environment. Error correcting codes (ECC) are commonly implemented to protect against the soft errors. The SER prediction in the devices and systems with the ECC generally requires knowledge of the multiple cell event statistical properties, which are not typically provided by the standard testing and computational procedures. Accurate knowledge of the MCU distributions is also crucial to determine the interleaving design rules. This work is aimed to development and validation of a self-consistent partitioning procedure for the multiple upsets events, followed by a use of this information for calculation of the multiple cell event rate in the commercial memories, taking into account the linear energy transfer (LET) spectra at a given orbit. The method is based on the partitioning of the MCU into groups with different multiplicities. It was shown that the distribution of MCUs of the commercial memory devices can be fitted by the Poisson distribution. The only needed parameters for the partitioning method are the cross section on LET dependence and the area of the memory cell of the device. The proposed partitioning technique has been validated on the ground data for 65 and 90 nm memory devices and the on-orbit literature data for 500 nm commercial memories.

**Keywords** — Cross section, heavy ion, modeling, multiple cell upset, single event effects, soft error rate.

## REFERENCES

- [1] E. L. Petersen, R. Koga, M. A. Shoga, J. C. Pickel, W. E. Price, "Single Event Revolution," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 60, No. 3, pp. 1824-1825, 2013.
- [2] G. I. Zebrev, K. S. Zemtsov, "Multiple cell upset cross-section modeling: A possible interpretation for the role of the ion energy-loss straggling and Auger recombination," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Sec. A*, Vol. 827, pp. 1-7, Aug. 2016.
- [3] Norbert Seifert et al., "Soft Error Rate Improvements in 14-nm Technology Featuring Second-Generation 3D Tri-Gate Transistors," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 62, No. 4, pp. 2570-2577, Dec. 2010.
- [4] URL:<https://www.jedec.org/standards-documents/dictionary/terms/multiple-cell-upset-mcu> (дата обращения: 31.03.2018)
- [5] G. I. Zebrev, A. M. Galimov, "Compact Modeling and Simulation of Heavy Ion Induced Soft Error Rate in Space Environment: Principles and Validation," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 64, No. 4, pp. 2129-2135, Aug. 2017.
- [6] G. I. Zebrev, I. O. Ishutin, R. G. Useinov, V. S. Anashin, "Methodology of Soft Error Rate Computation in Modern Microelectronics," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 57, No.6, pp. 3725-3733, Dec. 2010.
- [7] G. I. Zebrev, M. S. Gorbunov, R. G. Useinov, V. V. Emelianov, A. I. Ozerov, V. S. Anashin, A. E. Kozyukov, K. S. Zemtsov, "Statisticheskiy podhod k opisaniu mnojestvennich sboev v cifrovich shemah pamyati visokoy stepeni integratsii," (MES). – 2014. – № 3. – pp. 167-176.
- [8] D. Giot, P. Roche, G. Gasiot, J.-L. Autran, and R. Harboe-Sørensen, "Heavy Ion Testing and 3-D Simulations of Multiple Cell Upset in 65 nm Standard SRAMs," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 55, no. 4, pp. 2048-2054, Aug. 2008.
- [9] R. K. Lawrence and A. T. Kelly, "Single Event Effect Induced Multiple-cell Upsets in a Commercial 90 nm CMOS Digital Technology," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 55, No. 6, pp. 3367-3374, Dec. 2008.
- [10] C. Boatella, G. Hubert, R. Ecoffet, and F. Bezerra, "ICARE on-board SAC-C: More than 8 years of SEU & MBU, analysis and prediction," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 57, No. 4, pp. 2000-2009, Aug. 2010.
- [11] G. Hubert, S. Duzellier, C. Inguibert, C. Boatella-Polo, F. Bezerra, and R. Ecoffet, "Operational SER calculations on the SAC-C orbit using the multi-scales single event phenomena predictive platform (MUSCA SEP3)," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 56, no. 6, pp. 3032-3042, 2009.