

## **ПРОБЛЕМЫ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ РАСЧЕТА СТОЙКОСТИ КМОП МИКРОСХЕМ К ПРОТОННОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ**

В.В. Котляров

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет  
имени Г.Ф. Морозова»

В работе рассмотрены актуальные проблемы существующих способов расчёта стойкости КМОП-микросхем к протонному излучению в условиях космического пространства. Проведён анализ методологических ограничений моделей TID, DDD и NIEL-масштабирования, а также факторов мощности дозы и термического отжига. Показана необходимость интегрированного подхода, объединяющего расчёты, испытания и моделирование для повышения достоверности прогнозов радиационной стойкости.

Ключевые слова: КМОП, протонное излучение, TID, DDD, NIEL-масштабирование, SEE, радиационная стойкость, космическая электроника.

## **PROBLEMS OF EXISTING METHODS FOR CALCULATING THE RADIATION HARDNESS OF CMOS INTEGRATED CIRCUITS UNDER PROTON IRRADIATION**

V.V. Kotlyarov

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

The paper examines current issues in existing methods for assessing the radiation hardness of CMOS integrated circuits under proton irradiation in the space environment. Methodological limitations of TID, DDD, and NIEL-scaling models, as well as dose-rate and thermal annealing effects, are analyzed. The need for an integrated approach combining modeling, experimental testing, and simulation to improve the reliability of radiation hardness prediction is demonstrated.

Key words: CMOS, proton irradiation, TID, DDD, NIEL-scaling, SEE, radiation hardness, space electronics.

## Введение

Космическое пространство (КП) формирует для электронной компонентной базы смешанное радиационное поле, в котором ионизационные и смещающие эффекты от протонов сосуществуют с единичными эффектами в приборах (SEE) и существенно зависят от спектрально-углового состава, геометрии экранирования и технологического узла КМОП [1-3]. На практике расчёт стойкости часто сводят к независимой оценке накопленной ионизационной дозы в диэлектриках (TID) и смещающего ущерба в кремнии (DDD) по табличным удельным потерям энергии и модели NIEL-масштабирования с последующим сопоставлением с результатами испытаний облучением [1,4]. Такой подход демонстрирует удобство и переносимость между миссиями, хотя в последние 5–10 лет накоплено достаточно экспериментальных фактов, указывающих на систематические погрешности расчёта предельной дозы и ресурса КМОП, особенно для техпроцессов 180–65 нм [2,3,5-7]. Обнаруженные отклонения вызываются сочетанием недоучёта протон-индуцированной прямой ионизации в тонких активных объёмах, спектрального «ожесточения» за экранированием, а также историей мощности дозы и температурно-временной историей, определяющими кинетику ловушек на границе Si–SiO<sub>2</sub> и в объёме оксидов [1-3,6,7].

Статья концентрируется на методологических ограничениях принятых способов расчёта и на тех аспектах, которые нуждаются в уточнении при разработке программ обеспечения радиационной стойкости (ОРС) для бортовой электроники.

### Ключевые методологические ограничения и источники погрешности

Базовая оценка TID в оксидах по протонному спектру  $\varphi(E)$  обычно записывается в виде

$$D_{TID}(x) = \int \varphi(E) \cdot \frac{S_{e,SiO_2}(E)}{\rho_{SiO_2}} e^{-\mu(E)x} dE$$

где  $S_{e,SiO_2}(E)$  - электронное (ионизационное) торможение в SiO<sub>2</sub>,  $\rho_{SiO_2}$  - плотность SiO<sub>2</sub>,  $\mu(E)$  - линейный коэффициент ослабления,  $x$  эквивалентная толщина экрана [1].

Формула неявно предполагает, что радиационно-химические превращения и транспорт вторичных  $\delta$ -электронов в сложном многослойном стекле оксидов эквивалентны однородной среде, тогда как современные структуры используют стек из термического SiO<sub>2</sub>, SiON, STI и

межметаллических диэлектриков с различной ловушечной микроструктурой и полем в диэлектрике, что приводит к систематическому завышению или занижению эффективной дозы, определяющей дрейф пороговых напряжений и тока утечки [1,6]. Для техпроцессов 180-90нм вклад TID в смещение порога каналов I/O транзисторов часто доминирует ресурс, но при переходе к 65нм начинают существенно проявляться комбинации TID+DDD, влияющие на тёмные токи пикселей CIS и деградацию аналоговых блоков смешанных сигналов [5-7].

Оценка смещающего ущерба традиционно ведётся через дозу от неионизирующих потерь (DDD):

$$D_{DDD} = \int \varphi(E) \cdot \frac{NIEL_{Si}(E)}{\rho_{Si}} dE$$

Где  $NIEL_{Si}(E)$  — неионизирующие потери энергии в Si [4,7]. Модель NIEL-масштабирования успешно объясняет деградацию параметров, связанных с рекомбинационными центрами, однако подтверждённые расчётно-экспериментальные исследования последних лет показывают необходимость поправок к «эффективному NIEL», учитывающих вклад электронного торможения в формирование первичных дефектов и особенности каскадов при МэВ-протонах [4].

Наиболее заметный источник недооценки риска связан с SEE от протонов. Расчёт частоты отказов по спектру миссии часто подменяют пересчётом через нейтронные/гамма-эквиваленты или используют аппроксимацию  $\sigma_S EU(E)$  по данным тяжёлоионных испытаний, что некорректно для протонной прямой ионизации в глубоко-субмикронных узлах. У 65-нм SRAM чувствительность к моноэнергетическим протонам остаётся высокой не только ниже 3 МэВ, но и в десятках МэВ, причём с немонотонной энергозависимостью с максимумами, обусловленными комбинацией прямой ионизации и вторичных ядерных взаимодействий [3]. Тогда интегральная оценка частоты SEU (1) при использовании «универсальной»  $\sigma_S EU(E)$  приводит к ошибке в расчёте отказов на орбите [2,3].

$$R_{SEU} = \int \sigma_{SEU}(E) \cdot \varphi(E) dE \quad (1)$$

К погрешностям расчётов добавляются эффекты мощности дозы и эффекты термического отжига. Для BSI-CIS и аналоговых КМОП-узлов показано, что восстановление характеристик после протонного облучения зависит от спектра и истории температуры, а также от распределения поля в

диэлектриках [5,6]. Российские работы по схемотехническому моделированию деградации показывают, что корректная прогностическая симуляция требует модификации SPICE-поверхностно-потенциальных моделей через физически осмысленные добавочные источники смещения и проводимости, калибруемые на низкоинтенсивные ионизирующие воздействия, иначе перенос результатов «пучок → орбита» оказывается ненадёжным [7]. На уровне стандартизации в ОРС-процессах обозначена необходимость специфической таксономии требований, интеграции испытаний и расчётов на ранних стадиях и учёта SEE от протонов как отдельной ветви анализа, что напрямую противоречит традиции «доза+NIEL» без связанного учёта единичных событий [1,2].

Для наглядности сводка распространённых подходов и их ограничений приведена в Табл. 1, а на Рис. 1 показана рекомендуемая структура связанного расчёта, объединяющая транспорт, TID/DDD-модели и SEE-верификацию.

Таблица 1– Сильные и слабые стороны используемых подходов к расчёту стойкости КМОП в протонном поле (миссии КП).

| Подход                                     | Что учитывает                                  | Ограничения для протонов                                                   | Типичные последствия для оценки ресурса                              |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| TID по удельным потерям в SiO <sub>2</sub> | Дозу в оксидах, дрейф V <sub>TH</sub>          | Игнор многослойных диэлектриков и поля; упрощённый δ-электронный транспорт | Смещение ресурса I/O-транзисторов и аналоговых узлов [1,6]           |
| DDD через NIEL-масштабирование             | Смещающий ущерб в Si                           | Неучёт «эффективного NIEL» и роли электронного торможения                  | Недооценка дефектов для малых объёмов/композитных стеков [4]         |
| SEE через пересчёт от тяжёлых ионов        | Ядерные вторичные, частично - прямую ионизацию | Некорректная $\sigma_s EU(E)$ для протонов; немонотонность по E            | Ошибка в частоте SEU/MBU на орбите, особенно при экранировании [2,3] |
| «Пучок орбита» → без геометрии             | Интеграл по флюенсу                            | Игнор спектрального «ожесточения» за экраном                               | Систематический сдвиг расчётной дозы/отказов [1,2]                   |



Рисунок 1 – Схема связанного расчёта стойкости КМОП в протонном поле КП

Предложенная структура непосредственно соотносится с обновлёнными требованиями ECSS-Q-ST-60-15C Rev.1 и NASA OPC-процессом, где закладывается проектно-ориентированная интеграция расчётов, испытаний и критериев рисков с учётом среды миссии, области применения и срока службы изделия [1,2]. Публикации последних лет по прямой протонной ионизации в 65-нм SRAM и по деградации BSI-CIS подтверждают, что без обязательных протонных SEE-испытаний и верифицированной геометрической модели транспорта перенос лабораторных данных на условия КП ненадёжен [3,5,6].

### Заключение

Совокупность современных экспериментальных и нормативных данных показывает, что традиционная парадигма «TID + NIEL-масштабирование» недостаточна для достоверного прогноза стойкости КМОП к протонному излучению в условиях КП при техпроцессах 180-65нм. Корректная оценка предельной дозы и ресурса требует совместного учёта трёх механизмов с привязкой к геометрии и экрану, включения поправок к эффективному NIEL и обязательной валидации  $\sigma_{SEU}(E)$  на протонных пучках в диапазоне от единиц до десятков МэВ. OPC-процессы ECSS и NASA прямо предписывают такую интеграцию и раннюю калибровку моделей, а российские и международные исследования по CIS и схемотехническому моделированию показывают практическую реализуемость связанного подхода с последующим анализом

эффектов термического отжига и влияния мощности дозы [1–7]. Применение этой методологии уменьшает разрыв между данными радиационно-испытательных стендов и поведением аппаратуры на орбите, и тем самым снижает неопределённость в расчёте ресурса бортовой электроники.

### Список литературы

1. ECSS-Q-ST-60-15C Rev.1. Radiation hardness assurance. – Noordwijk: European Cooperation for Space Standardization, 2025. – URL: [ecss.nl](https://ecss.nl) (дата обращения: 27.09.2025).
2. Gaza, R. и др. The NASA Radiation Hardness Assurance (OPC) Process Standard. – Washington, DC: NASA Technical Reports Server, 2024. – 32 p. – URL: [ntrs.nasa.gov](https://ntrs.nasa.gov) (дата обращения: 27.09.2025).
3. Coronetti, A. Proton Direct Ionization Upsets at Tens of MeV. – CERN Document Server, 2023. – 10 p. – URL: [cds.cern.ch](https://cds.cern.ch) (дата обращения: 27.09.2025).
4. Chen, N.; Wang, Y.; Zhang, S. Atomistic simulation of displacement damage and effective NIEL // Physical Review Materials. – 2021. – Vol. 5, № 3. – Art. 033603. – URL: [link.aps.org](https://link.aps.org) (дата обращения: 27.09.2025).
5. Impact of proton radiation and annealing of CMOS image sensors // AIP Advances. – 2024. – Vol. 14, № 9. – Art. 095221. – URL: [pubs.aip.org](https://pubs.aip.org) (дата обращения: 27.09.2025).
6. Radiation Effects on Scientific CMOS Detectors for X-ray Astronomy : preprint. – arXiv:2403.15764, 2024. – 28 p. – URL: [arxiv.org](https://arxiv.org) (дата обращения: 27.09.2025).
7. Шумарин, С. В.; Мартынов, А. В.; Бабурин, Н. В. Модификация SPICE-моделей КМОП-микросхем для имитации частотного отклика кольцевого генератора на низкоинтенсивное ионизирующее воздействие // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2024. – № 2. – С. 5–16. – URL: [cyberleninka.ru](https://cyberleninka.ru) (дата обращения: 27.09.2025).
8. Согоян, А. В.; Мартынов, Е. А.; Долгов, Е. Н. Нормы испытаний на стойкость к протонному и нейтронному излучениям: подходы и ограничения // Безопасность информационных технологий. – 2025. – Т. 32, № 1. – С. 45–63. – URL: [bit.spels.ru](https://bit.spels.ru) (дата обращения: 27.09.2025).
9. High Total Ionizing Dose Effects on Backside-Illuminated CMOS Image Sensors : preprint. – 2025. – URL: [researchgate.net](https://researchgate.net) (дата обращения: 27.09.2025).

10. Pellish, J. A. и др. Criticality of Low-Energy Protons in Single-Event Effects Testing. – Greenbelt, MD: NASA/GSFC, 2014. – 25 p.– URL: [ntrs.nasa.gov](https://ntrs.nasa.gov) (дата обращения: 27.09.2025).
11. Schwank, J. R. и др. Hardness Assurance Testing for Proton Direct Ionization Effects. – Sandia Report SAND2011-(номер не указан). – Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2011. – 18 p.– URL: [osti.gov](https://osti.gov) (дата обращения: 27.09.2025).
12. Dijks, J. и др. Systematic review of engineering and testing approaches in radiation hardness assurance // *Acta Astronautica*. – 2025. – In press. – URL: [sciencedirect.com](https://sciencedirect.com) (дата обращения: 27.09.2025).
13. The Influence of Electronic Stopping on Displacement Damage and the Correction of Effective NIEL Model : preprint. – 2024/2025.– URL: [researchgate.net](https://researchgate.net) (дата обращения: 27.09.2025).
14. Котляров В. В., Анциферова В. И. Воздействия статических потоков протонов на физические процессы в биполярных транзисторах, различного конструктивного исполнения // *Моделирование систем и процессов*. 2025. №. 2. С. 78-86. DOI: <https://doi.org/10.12737/2219-0767-2025-18-2-78-86> (дата обращения: 15.10.2025).

### References

1. ECSS-Q-ST-60-15C Rev.1. Radiation hardness assurance. Noordwijk: European Cooperation for Space Standardization, 2025. Available at: [ecss.nl](https://ecss.nl) (accessed 27.09.2025).
2. aza, R., et al. The NASA Radiation Hardness Assurance (RHA) Process Standard. Washington, DC: NASA Technical Reports Server, 2024. 32 p. Available at: [ntrs.nasa.gov](https://ntrs.nasa.gov) (accessed 27.09.2025).
3. oronetti, A. Proton Direct Ionization Upsets at Tens of MeV. CERN Document Server, 2023. 10 p. Available at: [cds.cern.ch](https://cds.cern.ch) (accessed 27 Sep 2025).
4. Chen, N.; Wang, Y.; Zhang, S. Atomistic simulation of displacement damage and effective NIEL. *Physical Review Materials*, 2021, 5(3): 033603.
5. Impact of proton radiation and annealing of CMOS image sensors. *AIP Advances*, 2024, 14(9): 095221.
6. Radiation Effects on Scientific CMOS Detectors for X-ray Astronomy. Preprint, [arXiv:2403.15764](https://arxiv.org/abs/2403.15764), 2024. 28 p. Available at: [arxiv.org](https://arxiv.org) (accessed 27.09.2025).

7. humarin, S. V.; Martynov, A. V.; Baburin, N. V. Modification of SPICE models of CMOS ICs to simulate the frequency response of a ring oscillator under low-intensity ionizing radiation. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and Electrical Equipment of Transport], 2024, no. 2, pp. 5–16. Available at: [cyberleninka.ru](http://cyberleninka.ru) (accessed 27.09.2025).
8. Sogoyan, A. V.; Martynov, E. A.; Dolgov, E. N. Standards for testing radiation resistance to proton and neutron irradiation: approaches and limitations. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologii* [Information Technology Security], 2025, **32**(1), pp. 45–63. Available at: [bit.spels.ru](http://bit.spels.ru) (accessed 27.09.2025).
9. High Total Ionizing Dose Effects on Backside-Illuminated CMOS Image Sensors. Preprint, 2025. Available at: [researchgate.net](https://researchgate.net) (accessed 27 Sep 2025).
10. Pellish, J. A., et al. Criticality of Low-Energy Protons in Single-Event Effects Testing. Greenbelt, MD: NASA/GSFC, 2014. 25 p. Available at: [ntrs.nasa.gov](http://ntrs.nasa.gov) (accessed 27.09.2025).
11. Schwank, J. R., et al. Hardness Assurance Testing for Proton Direct Ionization Effects. Sandia Report SAND2011-[number], Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2011. 18 p. Available at: [osti.gov](http://osti.gov) (accessed 27 Sep 2025).
12. Dijks, J., et al. Systematic review of engineering and testing approaches in radiation hardness assurance. *Acta Astronautica*, 2025, in press. Available at: [sciencedirect.com](https://sciencedirect.com) (accessed 27.09.2025).
13. The Influence of Electronic Stopping on Displacement Damage and the Correction of Effective NIEL Model. Preprint, 2024/2025. Available at: [researchgate.net](https://researchgate.net) (accessed 27 Sep 2025).
14. Kotlyarov V. V., Antsiferova V. I. Effects of static proton fluxes on physical processes in bipolar transistors of various design designs. // Modeling of systems and processes. 2025. No. 2. pp. 78-86. DOI: <https://doi.org/10.12737/2219-0767-2025-18-2-78-86> (accessed 15/10/2025).