

# Анализ современного программного обеспечения для оценки локальных условий функционирования СБИС на борту космических аппаратов в части ионизирующих излучений космического пространства

В.С. Анашин, С.Б. Григорьева, О.С. Козюкова, И.А. Ляхов, Г.А. Протопопов

ОАО «НИИ КП», [npk1@niikp.org](mailto:npk1@niikp.org)

**Аннотация** — Представлены результаты сравнения программного обеспечения для расчета локальных условий функционирования электронной компонентной базы, в том числе СБИС, и радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов.

**Ключевые слова** — ионизирующее излучение космического пространства, электронная компонентная база, дозовые эффекты, одиночные эффекты, программное обеспечение.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В современной микроэлектронике предъявляются специальные требования к СБИС, функционирующим в космическом пространстве (КП), т.к. кроме многочисленных факторов, влияющих на функционирование радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), можно выделить воздействие ионизирующих излучений (ИИ) КП в связи с тем, что на дозовые и одиночные эффекты (ДЭ и ОЭ), вызываемые ИИ КП, приходится до 50% всех отказов РЭА космических аппаратов (КА) [1]. Поэтому при разработке специализированных СБИС космических применений необходимо подтверждение стойкости к воздействию ИИ КП в части ОЭ и ДЭ. Одним из этапов подтверждения стойкости является расчет локальных условий (ЛУ) функционирования электронной компонентной базы (ЭКБ) и РЭА КА.

## II. ПОРЯДОК РАСЧЕТА ЛОКАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКБ КА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ИИ КП И ИЗВЕСТНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА

Расчет ЛУ функционирования ЭКБ КА включает в себя:

1) расчет энергетических спектров частиц ИИ КП на поверхности КА, исходя из параметров орбиты, времени полета и параметров используемых моделей потоков заряженных частиц (например, солнечная активность, солнечный цикл, вероятность события солнечных космических лучей (СКЛ));

2) учет геометрии КА и РЭА;

3) расчет локальных условий воздействия ИИ КП (в области ДЭ и ОЭ) в точке расположения РЭА (ЭКБ) (моделирование прохождения элементарных частиц сквозь вещество).

Для расчета энергетических спектров частиц ИИ КП (протонов и электронов естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), протонов и ионов СКЛ и галактических космических лучей (ГКЛ)) на поверхности КА наиболее известно следующее программное обеспечение (ПО): "SPENVIS" [2], "CREME96" [3], "COSRAD" [4], "OMERE" [5], "OCOT" [6] и др.

Учет геометрии защиты при воздействии ИИ КП в точке расположения ЭКБ и соответствующая оценка стойкости согласно действующим нормативным документам осуществляется в один или несколько этапов в зависимости от результатов оценки стойкости:

1) «наихудший случай» (минимальная полная массовая толщина);

2) метод «секторирования» или метод «лучевого анализа» (учет защиты на уровне конструкторской документации (КД), без учета компоновки другой ЭКБ из состава РЭА и внутренних элементов конструкции РЭА);

3) метод «секторирования», или метод «лучевого анализа» (учет защиты на уровне КД, учет компоновки другой ЭКБ из состава РЭА и внутренних элементов конструкции РЭА).

«Лучевой анализ» геометрии КА и РЭА проводится с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР) ("Solid Works" [7], "CATIA" [8], "3D MAX" [9] и др.), в которых создается модель объектов и определяется распределение толщин защиты от телесного угла из точки расположения РЭА (ЭКБ). Такая модель включает значимые элементы конструкции КА и РЭА, экранирующие ЭКБ от ИИ КП, причем для всех элементов задаются значения плотностей материалов. Для реализации лучевого анализа может использоваться следующее ПО:

"LocalDose&SEE", "FASTRAD", "SPENVIS", "Доза" и др.

Для моделирования прохождения элементарных частиц сквозь вещество и расчета воздействия ИИ КП

на ЭКБ в области ДЭ и ОЭ могут использоваться несколько ПО. Характеристики наиболее известных программных средств (все зарубежные, кроме "COSRAD") приведены в таблице 1.

Таблица 1

*Характеристики программных средств для расчета локальных условий воздействия ИИ КП в области ДЭ и ОЭ за защитой*

Название	Доступ	Геометрия защиты	Материал	Интерфейс
SPENVIS	Свободный	Стандартная (сфера, плоскость), сложная (секторный анализ)	Многослойный, любой состав	Web
GEANT4	Свободный	Любая	Любой	Пакет библиотек
MCNPX	Ограниченный	Любая	Любой	Пакет библиотек
CREME96	Свободный	Стандартная	Алюминий	Web
COSRAD	Свободный	Стандартная	Алюминий	windows-приложение
SHIELDOSE	Свободный	Стандартная	Алюминий	Текстовые файлы
OMERE	Свободный	Стандартная	Алюминий	windows-приложение

Можно выделить основные недостатки большинства из перечисленных пакетов ПО (за исключением GEANT4 и MCNPX), такие как: моделирование только простейшей геометрии (сфера, плоскость), ограниченный выбор материала защиты (алюминий). Упомянутые GEANT4 и MCNPX являются пакетом библиотек.

### III. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ОАО «НИИ КП»

В ОАО «НИИ КП» были разработаны, верифицированы, отработаны и зарегистрированы в отраслевом фонде алгоритмов и программ ПО "DSG" [10] и "OCOT" [10], предназначенное для расчета воздействия ИИ КП на ЭКБ в области ДЭ (накопленной дозы) и ОЭ (частоты сбоев), соответственно, за произвольной защитой на любой орбите КА. Программы имеют удобный windows-интерфейс пользователя и позволяют рассчитывать отдельный вклад частиц ИИ КП (протонов и электронов ЕРПЗ, протонов и ионов ГКЛ и СКЛ). Также в настоящее время ведется разработка нового ПО "DSG\_Single" для моделирования взаимодействия заряженных частиц с веществом и расчета детализированных характеристик.

#### A. ПО "DSG"

ПО позволяет моделировать оболочку КА, корпус прибора и дополнительного защитного экрана. Моделируется любой материал защиты (слоистый, сплав, один химический элемент). Пользователь может

задавать набор параметров защиты и затем получать зависимости дозы от выбранных переменных параметров (толщина защиты, элементный и процентный состав материала защиты)

Входными данными для ПО "DSG" являются:

- 1) параметры орбиты;
- 2) параметры геометрии защиты.

Выходными данными для ПО "DSG" являются накопленная доза за защитой при раздельном воздействии протонов и электронов ЕРПЗ, протонов СКЛ и ГКЛ, а также суммарная накопленная доза при разных переменных параметрах защиты. Возможно также получение спектров частиц ИИ КП на поверхности КА.

Была проведена верификация ПО путем сравнения результатов расчета на разработанном ПО и программах "COSRAD" и "SHIELDOSE", которая показала отличную сходимость результатов.

Была проведена отработка ПО "DSG" с использованием результатов испытаний защитных корпусов из материалов со специальным многослойным покрытием на изотопной установке «Бета», работающей в режиме вывода пучка электронов. Материал корпусов представляет собой трехслойную структуру Al-TaC-Al. В таблице 2 приведены экспериментальные и расчетные значения коэффициента ослабления дозовых нагрузок при

воздействии спектра электронов с энергией от 0,2 МэВ до 2 МэВ за защитой с различными характеристиками.

Таблица 2

Результаты расчетного и экспериментального определения коэффициента ослабления для трехслойных пластин с различной толщиной слоев

Материал	Толщина слоя				
	Al, мкм (1 слой)	484	485	484	488
TaC, мкм (2 слой)	186	184	162	58	139
Al, мкм (3 слой)	47	45	40	54	41
Полная толщина	717	714	686	600	662
Коэффициент ослабления					
K_расчет	4,1	4,1	2,7	1,92	2,0
K_эксп	3,9	4,80	4,5	2,3	3,2

Из таблицы 2 видно, что экспериментальные и расчетные значения наиболее близки для максимальной толщины защиты (отличие ~5%). Максимальное отличие коэффициентов ослабления наблюдается при толщине защиты 686 мкм, погрешность составляет 40%, что приемлемо для подобного типа программ.

#### В. ПО "OCOT"

ПО "OCOT" предназначено для моделирования радиационной обстановки на произвольной орбите, обработки результатов испытаний ЭКБ на стойкость к ИИ КП, расчета частоты сбоев ЭКБ при воздействии ИИ КП.

Входными данными для ПО "OCOT" являются:

- 1) параметры орбиты;
- 2) параметры защиты (толщина защиты в единицах  $г/см^2$ );
- 3) число чувствительных областей;
- 4) параметры стойкости ЭКБ (пороговая линейная потеря энергии (ЛПЭ) ОЭ, сечение насыщения ОЭ или зависимость сечения ОЭ от ЛПЭ).

Выходными данными для ПО "OCOT" являются значения частоты сбоев отдельно при воздействии протонов ЕРПЗ, СКЛ, ГКЛ, от ТЗЧ СКЛ и ГКЛ в зависимости от толщины защиты.

Верификация проводилась на зарубежных программных комплексах "CREME96" и "SPENVIS" для 4 различных орбит и 12 микросхем, кроме того, проводилось дополнительное исследование зависимости результатов расчёта от формы чувствительного объема (ЧО) (тонкий слой, параллелепипед различных размеров) и пороговых значений ЛПЭ и энергии протонов (низкий порог, средний порог, высокий порог). Разница в расчётах не превышает 6,3%.

Была проведена отработка ПО "OCOT" путем сравнения расчетов количества сбоев на ПО "OCOT", "CREME96" и данными, полученными с двух спутников (G1, G2) в период 2001-2006 гг. [11].

На график нанесены результаты расчёта по программам "OCOT" и "CREME96" для минимума и максимума солнечной активности.

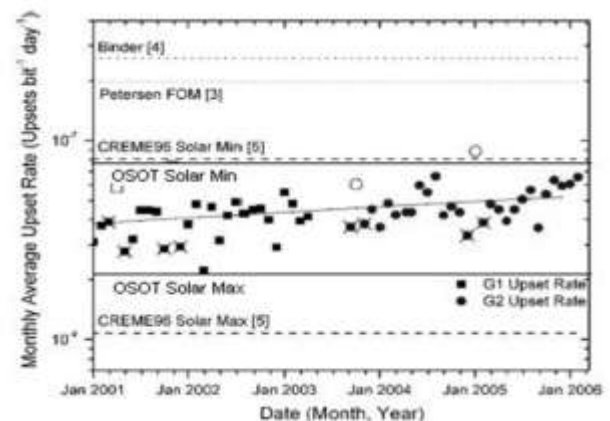


Рис. 1. Результаты сравнения с полётными данными

Из графика видно, что совпадение с полётными данными у "OCOT" лучше до 1,5 раз по сравнению с "CREME96".

#### С. ПО "DSG\_Single"

ПО "DSG\_Single" предназначено для моделирования взаимодействия элементарных частиц с веществом и расчета детализированных характеристик.

Входными данными для ПО "DSG\_Single" являются:

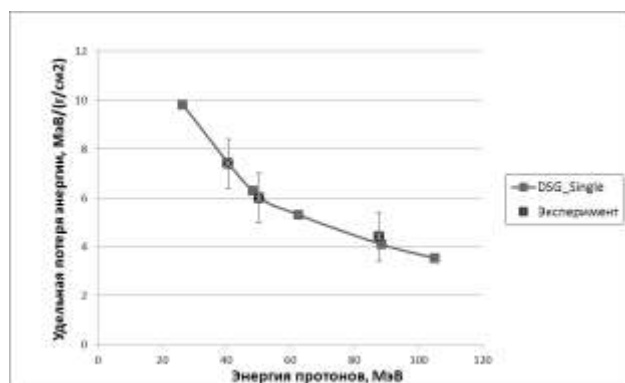
- 1) параметры источника заряженных частиц;
- 2) параметры защиты (произвольный материал);

- 3) параметры чувствительных областей;
- 4) параметры исследуемых спектров частиц.

Выходными данными для ПО "DSG\_Single" являются энергетические спектры частиц, спектры ЛПЭ, накопленная доза за защитой.

Проведена верификация ПО путем сравнения с результатами расчета на других программах ("SRIM2003", "MCNPX"). Было установлено, что результаты моделирования и расчета совпадают в пределах 10%.

На рис. 2 в качестве примера представлены результаты расчета и экспериментальные данные, полученные в результате исследований зависимости удельных потерь энергии протонов в сплаве вольфрама с медью.



**Рис. 2. Зависимости удельных потерь энергии протонов в сплаве вольфрама**

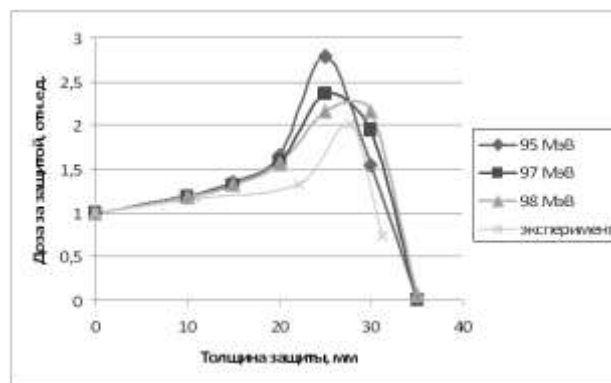
Была проведена отработка ПО "DSG\_Single" с использованием результатов испытаний защитных корпусов – вольфрамовых сплавов и сплавов на основе алюминия с добавками редкоземельных металлов. В качестве примера на рис. 3 представлены результаты расчета и экспериментальные данные зависимости накопленной дозы в детекторе от толщины защиты из сплава на основе алюминия с добавками редкоземельных металлов при воздействии моноэнергетических протонов с энергией  $97 \pm 5$  МэВ.

Из рисунков видно, что расчетные и экспериментальные данные хорошо совпадают.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен обзор ПО для проведения расчетов локальных условий РЭА (ЭКБ) КА при воздействии ИИ КП, а также описание программных средств разработки ОАО «НИИ КП» ОСОТ и DSG. Корректность и достоверность результатов расчета на данных ПО подтверждена верификацией и экспериментальной отработкой. Таким образом, разработанное ПО имеет высокое практическое значение, позволяет существенно сократить временные затраты при подтверждении стойкости РЭА КА к ИИ КП и проводить расчет накопленной

дозы и частоты сбоев в точке расположения ЭКБ внутри КА при воздействии ИИ КП.



**Рис. 3. Экспериментальные и расчетные зависимости дозы за защитой от толщины защиты из алюминиевого сплава с добавками редкоземельных металлов при воздействии луча протонов с энергией  $97 \pm 5$  МэВ**

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] H.C. Koons et al. The impact of the space environment on space systems. Aerospace technical Report TR-99 (1670 – 1, 1999).
- [2] [www.spenviis.oma.be](http://www.spenviis.oma.be) (30.01.2014).
- [3] [www.creme.isde.vanderbilt.edu](http://www.creme.isde.vanderbilt.edu) (30.01.2014).
- [4] Белова Г.Ф., Кузнецов Н.В., Новиков Л.С., Попов В.Д., Чжо Ко Вин, Черник В.Н. Исследование радиационных эффектов в МОП транзисторе в реальных условиях орбиты МКС // Стойкость – 2012.
- [5] [www.trad.fr](http://www.trad.fr) (30.01.2014).
- [6] Анашин В.С., Ишутин И.О., Протопопов Г.А. Проблемы моделирования воздействия ионизирующего излучения на радиоэлектронную аппаратуру с использованием специализированного программного обеспечения. // Высокие технологии, исследования, промышленность. Т. 3: сб. трудов Девятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». Санкт-Петербург, 22-23.04.2010. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2010. С. 19-27.
- [7] [www.solidworks.com](http://www.solidworks.com) (30.01.2014).
- [8] [www.3ds.com](http://www.3ds.com) (30.01.2014).
- [9] [www.autodesk.ru](http://www.autodesk.ru) (30.01.2014).
- [10] V.S. Anashin, V.V. Emelianov, I.O. Ishutin, N.V. Kuznetsov, G.A. Protopopov, G.I. Zebrev. The software complex for SEU rate and radiation dose calculation // The conference on Radiation and its Effects on Components and Systems. Langenfeld, Austria. 20-24 September 2010. RADECS 2010 – Conference Booklet, PG-3. P. 28.
- [11] Источник: Hansen D.L. et al. Correlation of Prediction to On-Orbit SEU Performance for a Commercial 0.25- $\mu$ m CMOS SRAM // IEEE Trans. on Nuclear Science. Dec. 2007. V. 54. № 6. P. 2525.