

УДК 537.591

О. В. Доценко, В. Я. Дмитренко, В. Б. Тарасов, Ю. А. Шовкопляс

Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

Метод расчета интенсивности одиночных событий с учетом реальной защищенности интегральных схем в местах их размещения внутри космического аппарата

Надійшла до редакції 15.05.06

Подастися метод розрахунку інтенсивності одиночних подій, що використовується у роботах із забезпечення стійкості космічних апаратів до впливу іонізаційного випромінювання. Метод дозволяє розраховувати інтенсивність одиночних подій з урахуванням реального розподілу захистів у місці розташування інтегральної схеми всередині космічного апарату. Результати розрахунку зіставлено із результатами, отриманими з використанням стандартної моделі CREME-96.

Эффект одиночных событий (ОС), обнаруженный в радиоэлектронной аппаратуре космического аппарата (КА) в середине 1970-х гг., до настоящего времени продолжает оставаться одной из главных проблем для безопасного функционирования КА на орбите. Его сущность состоит в том, что заряд, собранный с трека частицы при ее прохождении сквозь активную область полупроводникового прибора, в ряде случаев может инициировать изменение его логического состояния (одиночный сбой), или необратимое повреждение (зашелкивание, выгорание, пробой подзатворного диэлектрика). Достаточно отметить, что по результатам предварительного анализа [7] на долю ОС приходится 28.4 % случаев нештатного функционирования бортовой аппаратуры зарубежных КА, ассоциированных с воздействием факторов космического пространства. Наиболее известные примеры деструктивного проявления ОС — потеря КА MSTI (1993) и IRON 9906 (1997). В остальных случаях эффект ОС чаще всего проявляется в виде фантомных команд и искажения данных.

Для того чтобы адаптировать КА к функционированию в условиях воздействия ионизирующих излучений космического пространства (ИИКП), инициирующих ОС, необходимо провести комплекс работ по обеспечению стойкости бортовой аппаратуры к этому эффекту. Под стойкостью в данном случае понимают свойство приборов и подсистем КА сохранять свои функциональные характеристики в процессе и после воздействия ИИКП на уровне требований, заданных в технических заданиях. В самом общем виде проблема обеспечения стойкости КА к ИИКП сводится к решению двух равнозначных по приоритетности задач:

- разработка требований по стойкости,
- подтверждение выполнения заданных требований расчетными или экспериментальными методами.

В настоящей статье будет рассмотрена первая задача.

Неточности в формулировке требований по стойкости к ИИКП могут иметь самые серьезные последствия: заниженные требования уве-

личивают риск отказа комплектующих элементов; завышенные ведут к неоправданному снижению функциональных и габаритно-массовых характеристик подсистем, увеличению их стоимости и сроков изготовления. Корректная формулировка требований по стойкости к ИИКП, напротив, позволяет с правильных позиций подходить к выбору комплектующих элементов и избегать непродуктивного расходования ресурса массы КА для создания дополнительных радиационных защит.

В современных КА, где плотность размещения бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) очень высока, даже небольшие изменения конструкции или компоновки существенным образом сказываются на защищенности большого числа комплектующих элементов, входящих в состав различных подсистем. Часто имеет место ситуация, когда недостаток или избыток защиты для какого-либо прибора становится следствием конструкционных изменений в составе соседнего блока бортовой РЭА. В связи с этим при разработке требований по стойкости следует включать в рассмотрение все элементы конструкции и бортовой аппаратуры КА, представляющие сколь-нибудь значимую защиту на пути проникновения частиц ИИКП к точке размещения критичного элемента. Кроме того, поле защит вокруг каждого критичного элемента следует постоянно контролировать, чтобы в процессе проектирования добиваться его оптимальной конфигурации.

Применительно к задаче обеспечения стойкости к одиночным событиям эти требования не могут быть выполнены должным образом. Единственным доступным инструментом для разработки требований по стойкости к ОС в настоящее время является модель CREME-96 [3, 8], которая позволяет по известным показателям стойкости ИС рассчитывать интенсивность ОС в зависимости от параметров орбиты КА, состояния солнечной активности и величины защиты.

В модели CREME-96 реализованы две независимые ветви расчета интенсивности ОС: для ионной и для протонной составляющих ИИКП. Это связано с тем, что физические механизмы инициирования ОС для ионов и протонов не идентичны. В первом случае эффект происходит вследствие прямой ионизации активной области ИС при прохождении сквозь нее иона ИИКП.

Во втором ионизацию производят продукты взаимодействия протонов с атомами кристаллической решетки материала ИС (тормозная способность протонов не настолько велика, чтобы инициировать ОС посредством механизма прямой ионизации).

В рамках модели CREME-96 интенсивность ОС, вызванных протонами, рассчитывают по формуле

$$\nu = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} F(E)\sigma(E)dE, \quad (1)$$

где ν — интенсивность ОС, $F(E)$ — дифференциальный спектр протонного излучения в точке размещения ИС, $\sigma(E)$ — поперечное сечение сбоев ИС под воздействием протонного излучения, определяемое по результатам испытаний в соответствии с требованиями стандартов [4, 6], E_{\min} , E_{\max} — минимальная и максимальная энергии частиц в спектре. Зависимость $\sigma(E)$ обычно аппроксимируют двухпараметрической функцией Бендела:

$$\sigma(E) = (B/A)^{14} [1 - \exp(-0.18Y^{1/2})]^4, \\ Y = \begin{cases} (E-A)(18/A)^{1/2}, & E > A, \\ 0, & E \leq A, \end{cases} \quad (2)$$

где A, B — параметры аппроксимации.

Интенсивность ОС под воздействием ионов ИИКП вычисляют интегрированием произведения дифференциального спектра линейной передачи энергии (ЛПЭ) ионов и интегрального распределения длин треков ионов в чувствительной области ИС:

$$\nu = \frac{S}{4} \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} F(L)P(L)dL, \quad (3)$$

где ν — интенсивность ОС под воздействием ионов, S — площадь поверхности чувствительной области, $F(L)$ — дифференциальный спектр ЛПЭ ионов в точке размещения ИС, $P(L)$ — интегральное распределение длин треков ионов в чувствительной области ИС; L_{\min} , L_{\max} — минимальное и максимальное значения ЛПЭ ионов в спектре.

Значение площади поверхности чувствительной области S , а также функцию $P(L)$ определяют согласно стандартам [4, 6].

В модели CREME-96 в рассмотрение могут быть принятые ионы солнечных и галактических космических лучей с атомными номерами в диапазоне от $Z = 2$ (гелий) до $Z = 92$ (уран). Каждый из этих компонентов имеет спектральное распределение, трансформацию которого необходимо учитывать при прохождении ионов сквозь материалы защит. Для упрощения решения этой задачи все спектры ионов ИИКП сведены в единый спектр ЛПЭ, характеризующий количество ионов в диапазоне $[L, L + \Delta L]$, независимо от их атомного номера.

Чувствительная область определена как пространство, внутри которого заряд, образованный вдоль трека частицы, посредством механизмов дрейфа и диффузии может быть перенесен к электродам и инициировать ОС. В модели CREME-96 чувствительную область задают в виде прямоугольного параллелепипеда. Интегральное распределение длин треков ионов характеризует их количество в чувствительной области ИС, для которых при заданном значении L происходит ОС.

Не вдаваясь в детали принятых в рамках модели CREME-96 допущений и ограничений, приведем главные из присущих ей недостатков, отмеченных в [2]:

- модель CREME-96 не дает возможности адекватно учитывать распределение защит в окрестности точек размещения ИС;
- в рамках модели CREME-96 невозможно учесть анизотропию космических излучений, инициирующих ОС;
- чувствительные области ИС, накопление заряда в которых инициирует ОС, не могут иметь форму, отличную от прямоугольного параллелепипеда;
- в рамках модели CREME-96 невозможно моделировать многократные ОС, когда одна частица инициирует сбои в нескольких чувствительных областях.

Попытки решить эти проблемы путем прямого моделирования по методу Монте-Карло [5] нельзя признать успешными, поскольку даже для самых простых геометрий время решения задачи неприемлемо велико. Ниже мы представляем результаты решения задачи расчета интенсивности ОС с использованием методологии секторного анализа, применение которой позволяет избежать отмеченных выше недостат-

ков, присущих модели CREME-96.

Метод секторного анализа в настоящее время достаточно хорошо апробирован, и с успехом используется при расчете общей и неионизационной доз ИИКП. Его суть состоит в том, что пространство вокруг критичного элемента разбивают на заданное количество пространственных угловых секторов. В каждом из секторов определяют суммарную защиту X_i , которую частице необходимо преодолеть, чтобы попасть в точку, где находится критичный элемент. Затем по предварительно рассчитанным зависимостям доза-защита находят дозы D_i ИИКП, накопленные за защитой X_i . Искомые значения доз ИИКП в заданной точке внутри КА определяют суммированием по всем угловым секторам в телесном угле 4π :

$$D = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N D_i \omega_i, \quad (4)$$

где N — заданное число угловых секторов, D_i — доза ИИКП, накопленная за защитой X_i , ω_i — величина телесного угла, заключенного в i -м угловом секторе.

Рис. 1 иллюстрирует геометрию задачи расчета характеристик радиационных воздействий с использованием методологии секторного анализа.

Для того чтобы иметь возможность оптимальным образом спроектировать защиту критичных элементов подсистем КА от воздействия ИИКП, в практике работ ГКБ «Южное» предусмотрена

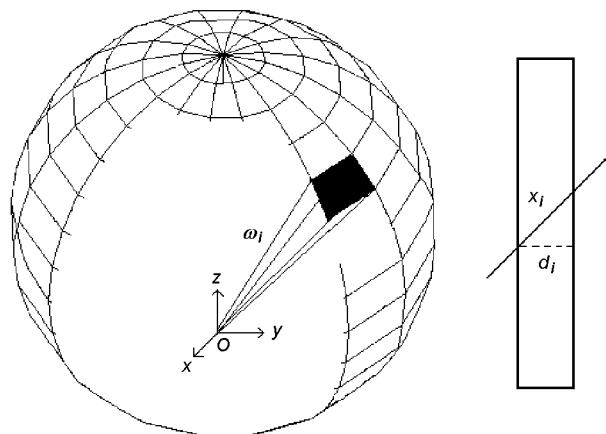


Рис. 1. Геометрия задачи расчета характеристик радиационных воздействий с использованием методологии секторного анализа

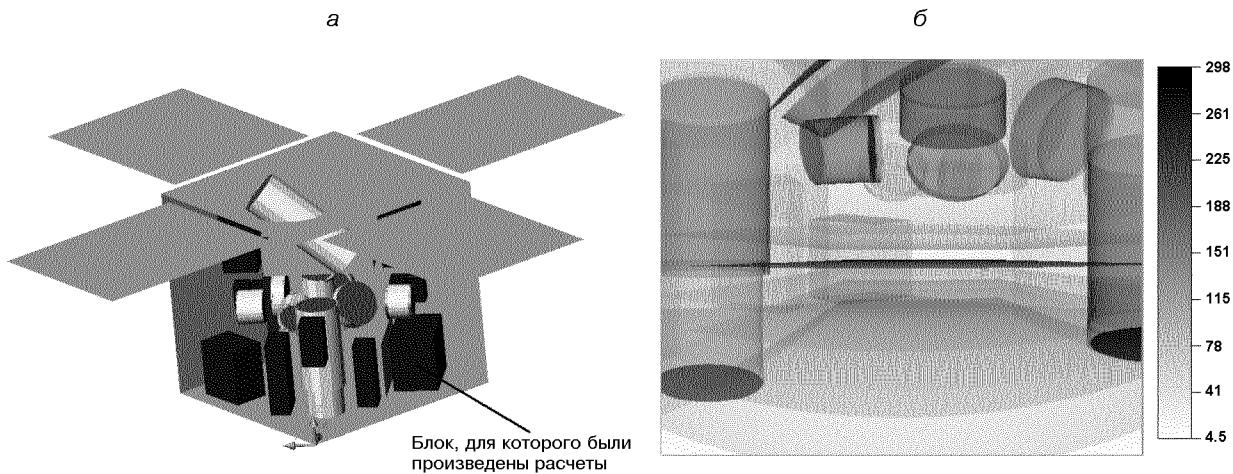


Рис. 2. Радиационная 3D-модель КА (а) и рассчитанное по ней распределение защит (б)

разработка радиационной 3D-модели КА. Эта модель, создаваемая в среде Autodesk AutoCAD Mechanical Desktop, позволяет визуализировать распределение защит и доз вокруг заданной точки, идентифицировать угловые сектора, где защита минимальна, и проектировать радиационную защиту с минимальными затратами ресурса массы КА. Отметим, что такой подход не является уникальным: аналогичные решения для обеспечения стойкости к дозе ИИКП сегодня использует большинство зарубежных разработчиков КА [3]. Пример радиационной 3D-модели КА и рассчитанного с ее помощью распределения защит в окрестности указанной точки приведен на рис. 2 (распределение защит приведено в угловом секторе $2\pi/3$ в положительном направлении оси y).

Для вычисления интенсивности ОС, инициированных протонами ИИКП, с использованием методологии секторного анализа был реализован следующий расчетный алгоритм:

- задается количество угловых секторов, в которых определяется защита (в практике работ ГКБ «Южное» это значение варьируется от $6 \cdot 10^4$ до $1.5 \cdot 10^6$ в зависимости от геометрии задачи);
- рассчитывается X_i -защита в i -м угловом секторе;
- находится дифференциальный спектр протонов ИИКП за защитой X_i . Для решения этой задачи используются предварительно рас-

читанные по модели CREME-96 спектры протонов ИИКП для заданной орбиты за различными защитами. Искомый спектр за защитой X_i находится методом интерполяции. Пример набора данных для этих вычислений представлен на рис. 3;

- определяется величина ω_i телесного угла, заключенного в i -м угловом секторе;
- с помощью формулы (1) определяется v_i — интенсивность ОС под воздействием протонов ИИКП, достигающих ИС из i -го углового сектора;
- искомая интенсивность ОС под воздействием протонов ИИКП находится суммированием значений v_i по всем угловым секторам в телесном угле 4π .

Результаты расчетов, полученные с использованием представленного выше подхода, были сопоставлены с аналогичными результатами расчетов по модели CREME-96. В последней фактически воспроизводится случай размещения ИС в геометрическом центре сплошной алюминиевой сферы. При этом учет неравномерности распределения защит может быть произведен путем импорта в программу CREME-96 файла, содержащего исходные данные по относительному содержанию величин защит в 30 интервалах, перекрывающих диапазон от минимального до максимального значений. Такой файл был сгенерирован для точки, расположенной в геометрическом центре блока, указанного на рис. 2,

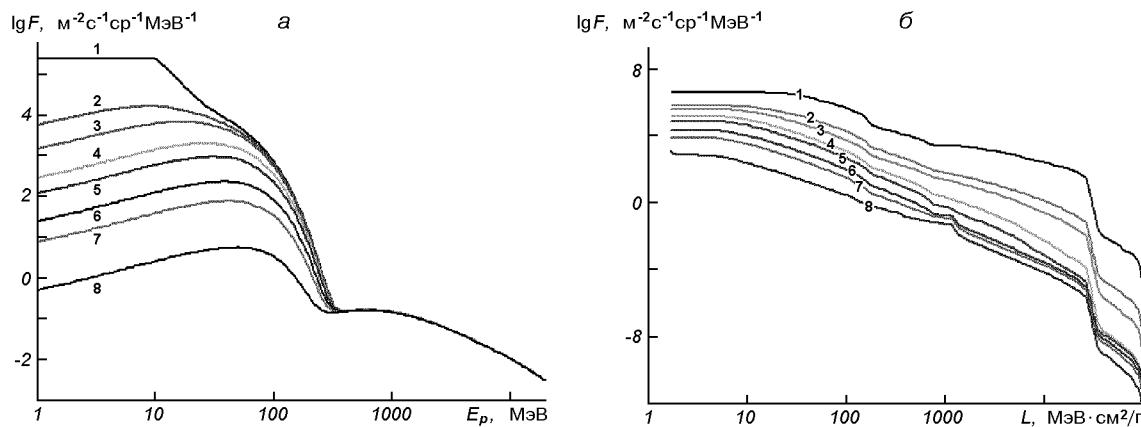


Рис. 3. Спектры протонов (а) и ионов (б) ИИКП за защитами, используемые для расчета интенсивности ОС по методу секторного анализа

что дало возможность сопоставить результаты расчетов с использованием 3D-модели КА и по модели CREME-96 как для случая однородных, так и для распределенных защит.

Для расчетов были использованы следующие исходные данные:

- высота круговой орбиты $H = 650$ км,
- наклонение орбиты $i = 98^\circ$,
- параметры аппроксимации зависимости $\sigma(E)$: $A = 12$, $B = 24$.

Рассмотрены два варианта внешнего радиационного окружения:

- минимум солнечной активности, солнечных вспышек нет,
- пиковые 5 мин аномального события октября 1989 г.

Результаты расчетов приведены в табл. 1. Для однородных защит имеет место практически

полное совпадение результатов, что неудивительно, поскольку реализованный подход не выходит за рамки формализма модели CREME-96. Некоторое расхождение результатов для случая распределенных защит может объясняться тем, что в модели CREME-96 использованы только 30 фиксированных значений защит, в то время как в расчетах с использованием 3D-модели КА их число не ограничивается. В этих условиях, чем выше градиент кривой спектрального распределения частиц, тем более значительным окажется расхождение результатов. По этой причине для варианта внешнего радиационного окружения «пиковые 5 мин» расхождение результатов выше по сравнению с аналогичными результатами для спокойных геомагнитных условий.

Для расчета интенсивности ОС, инициированных ионами ИИКП, с использованием методологии секторного анализа был разработан следующий расчетный алгоритм.

- Пользователь задает количество N угловых секторов, в которых определяется защита.
- Производится расчет X_i -защиты в i -м угловом секторе.
- Находится величина ω_i телесного угла, заключенного в i -м угловом секторе.
- Определяется интегральный спектр ЛПЭ ионов ИИКП за защитой X_i . Как и в предыдущем случае, для решения этой задачи используются предварительно рассчитанные по модели CREME-96 спектры ЛПЭ

Таблица 1. Интенсивности ОС, инициированных протонами ИИКП, рассчитанные с использованием программы CREME-96 и 3D-модели КА

| $X, \text{ mm Al}$ | Интенсивность ОС, $10^{-7} \text{ c}^{-1}\text{бит}^{-1}$ | | | |
|--------------------|---|-----------|---------------|-----------|
| | без вспышек | | пиковые 5 мин | |
| | CREME-96 | 3D-модель | CREME-96 | 3D-модель |
| 1 | 5.069 | 5.069 | 973.0 | 973.0 |
| 5 | 4.534 | 4.534 | 499.0 | 499.0 |
| 10 | 4.057 | 4.057 | 319.2 | 319.2 |
| 30 | 2.848 | 2.848 | 12.30 | 12.30 |
| 50 | 2.126 | 2.126 | 69.83 | 69.81 |
| 100 | 1.181 | 1.181 | 28.21 | 28.20 |
| точка | 4.283 | 4.298 | 495.5 | 588.4 |

ионов ИИКП для заданной орбиты за различными защитами. Искомый спектр ЛПЭ ионов за защитой X_i находят методом интерполяции. Пример набора данных для этих вычислений представлен на рис. 3.

- На гранях чувствительной области ИС с заданным шагом M разбивается сетка.
- Определяется, какие из граней чувствительной области ИС освещены при приходе иона из углового сектора, где определена защита X_i .
- В узлах сетки освещенных граней находятся длины треков ионов, приходящих из углового сектора, где определена защита X_i , в чувствительной области ИС.
- В спектре ЛПЭ ионов определяется количество $F_j(L)$ частиц, которые инициируют ОС при прохождении внутри чувствительной области ИС по треку с найденной длиной.
- Находится площадь S_j ячейки сетки, разбитой на поверхности чувствительной области ИС.
- Находится угол α между нормалью к поверхности чувствительной области ИС и направлением прихода иона.
- Результирующую интенсивность v ОС, инициированных ионами ИИКП, находим суммированием по всем угловым секторам в телесном угле 4π :

$$v = \sum_{i=1}^N \omega_i \sum_{j=1}^M F_j(L) S_j \cos(\alpha). \quad (5)$$

Использование методологии секторного анализа, применительно к задаче определения интенсивности ОС, инициированных ионами ИИКП, иллюстрирует рис. 4.

Для верификации предложенного метода, как и в предыдущем случае, результаты расчетов с использованием 3D-модели КА были сопоставлены с аналогичными результатами расчетов по программе CREME-96.

Для расчетов были использованы следующие исходные данные: высота круговой орбиты $H = 650$ км, наклонение орбиты $i = 98^\circ$, пороговая ЛПЭ возникновения ОС — 20 МэВ·см 2 /г, попечное сечение насыщения сбоев — 25 мкм 2 , толщина чувствительной области ИС — 5 мкм.

Рассмотрены два варианта внешнего радиационного окружения:

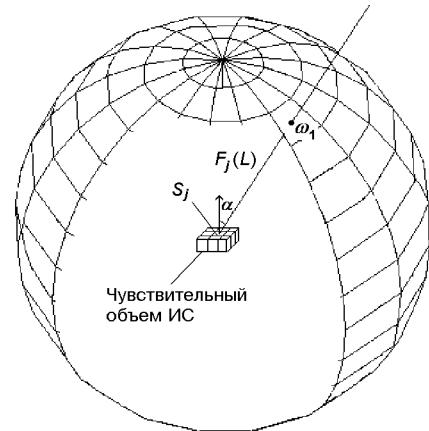


Рис. 4. Геометрия задачи расчета интенсивности ОС, инициированных ионами ИИКП, с использованием методологии секторного анализа

Таблица 2. Интенсивности ОС, инициированных ионами ИИКП, рассчитанные с использованием программы CREME-96 и 3D-модели КА

| X, мм Al | Интенсивность ОС, 10^{-14} с $^{-1}$ бит $^{-1}$ | | | |
|-------------|--|-----------|---------------|-----------|
| | без вспышек | | пиковые 5 мин | |
| | CREME-96 | 3D-модель | CREME-96 | 3D-модель |
| 1 | 7.834 | 7.795 | 1011000 | 1007000 |
| 5 | 6.797 | 6.763 | 2962 | 2948 |
| 10 | 5.439 | 5.412 | 371.6 | 369.8 |
| 30 | 3.016 | 3.00 | 14.01 | 13.94 |
| 50 | 1.967 | 1.957 | 2.562 | 2.548 |
| 100 | 0.8198 | 0.8153 | 0.1965 | 0.1954 |
| точка | 6.354 | 6.168 | 94900 | 171000 |

- минимум солнечной активности, солнечных вспышек нет,
- пиковые 5 мин аномального события октября 1989 г.

Результаты расчетов для случаев однородных защите заданной толщины, а также для точки внутри блока, указанного на рис. 2, приведены в табл. 2.

Несмотря на существенные различия в расчетных алгоритмах обеих программ, как и в предыдущем случае, степень совпадения результатов для однородных защите вполне удовлетворительна, в то время как учет реальной защищенности ИС приводит к заметному расхождению результатов. Причиной этого расхождения, по всей видимости, является более тщательный учет

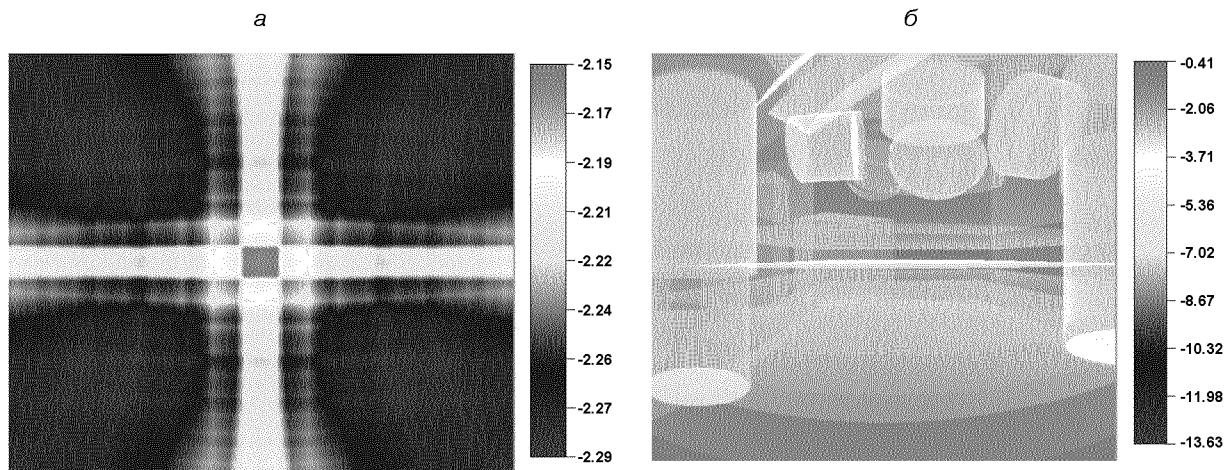


Рис. 5. Пространственное распределение интенсивности ОС: *a* — за однородной защитой, *б* — в точке, указанной на рис. 2

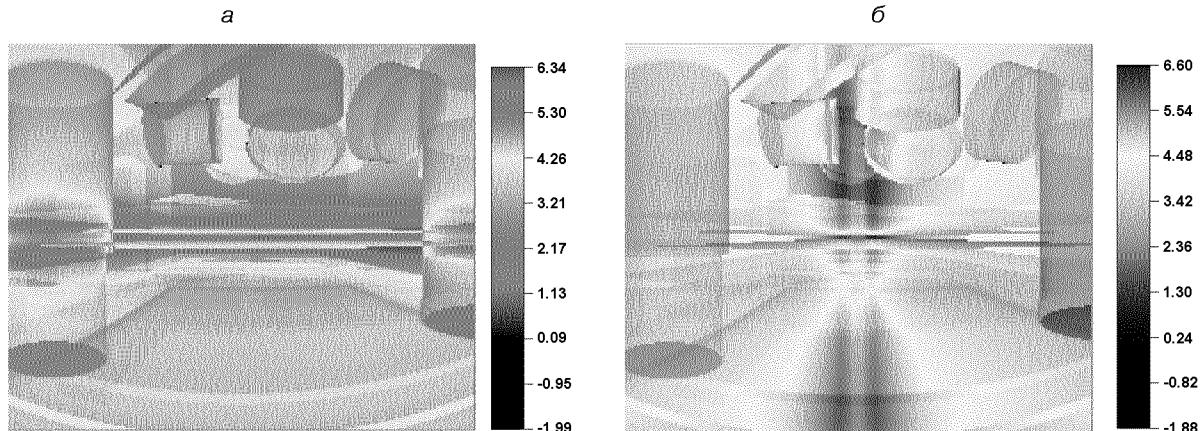


Рис. 6. Пространственное распределение интенсивности ОС при горизонтальном (*a*) и вертикальном (*б*) размещении ИС Fairchild 93L422 в точке, указанной на рис. 2

распределения защит при расчетах с использованием 3D-модели КА по сравнению с моделью CREME-96.

На рис. 5 представлены пространственные распределения интенсивности ОС в угловом секторе $2\pi/3$ для случая однородной защиты (чувствительная область находится в геометрическом центре сферы, как на рис. 4) и для точки, указанной на рис. 2. Как видим, даже при однородном распределении защит интенсивность ОС существенным образом зависит от ориентации кристалла ИС. В рассмотренном примере интенсивность ОС увеличивается в тех случаях, когда направление прихода частиц приближает-

ся к диагоналям чувствительной области, имеющей в рассмотренном случае форму куба. (Здесь длины треков частиц максимальны, и значит, частицы с меньшей энергией могут инициировать ОС). При наложении на эту картину распределенного поля защит может иметь место ситуация, когда угроза ОС будет исходить из секторов, где защита не будет минимальной.

На рис. 6 приведены результаты расчета интенсивности ОС для двух вариантов размещения ИС Fairchild 93L422 в геометрическом центре блока, изображенного на рис. 2. В первом случае плата, на которой размещена ИС, лежит в плоскости xy , во втором — xz . Параметры

стойкости ИС Fairchild 93L422 к ОС, инициированным ионами ИИКП, взяты из работы [1]. Ожидаемая интенсивность ОС, рассчитанная по формуле (5), составила в первом случае $2.237 \cdot 10^{-5}$ бит $^{-1}$ с $^{-1}$, во втором — 1.404 бит $^{-1}$ с $^{-1}$. При этом, как видно из рис. 6, в первом случае основная засветка идет из секторов, расположенных в азимутальной плоскости, а во втором случае — в угломестной. То есть, если бы потребовалась защита этой ИС, ее оптимальное размещение напрямую зависело бы от ориентации кристалла ИС.

Учесть анизотропию потоков ионов ИИКП, действующих на КА, можно двумя способами: задавая бесконечную защиту в секторах, откуда не могут появляться ионы (например, со стороны Земли), или, создавая несколько наборов данных по спектральному распределению частиц за защитами, привязав их к заданным секторам.

Интенсивность многократных ОС с использованием методологии секторного анализа можно рассчитать, моделируя случаи пересечения ионом, приходящим из заданного сектора, двух и более чувствительных областей.

Расчет интенсивности ОС для случая произвольной формы чувствительной области ИС в рамках предложенного подхода сводится к решению геометрических задач наложения на эту область сетки с заданным шагом и определения длин треков ионов, приходящих в заданную точку чувствительной области под известным углом.

Таким образом, предложенный метод позволяет существенно расширить возможности моделирования ОС, инициированных ионами и протонами ИИКП. В его рамках обеспечивается возможность учитывать факторы, которые не могут быть приняты в расчет при использовании стандартной модели CREME-96.

Помимо этого, объединение в рамках единой радиационной 3D-модели КА комплекса задач обеспечения стойкости к общей дозе, неионизационной дозе, внутренней электризации и одиночным событиям позволит с единых методологических позиций подходить к обеспечению

стойкости КА к ИИКП, обеспечивать непрерывный контроль требуемого уровня защищенности критичных элементов на протяжении всего процесса создания КА и добиваться оптимальной конфигурации всех защит, образуемых элементами конструкции и бортовой аппаратуры.

1. Кузнецов Н. В., Ныммик Р. А. Радиационные одиночные сбои микроэлектроники космических аппаратов, обусловленные событиями солнечных космических лучей // Космич. исслед.—1997.—35, № 5.—С. 465—479.
2. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. — М.: Радио и связь, 2004.—320 с.
3. ECSS-E-10-04. Space Engineering. Space Environment. — Noordwijk, The Netherlands, ECSS Secretariat, ESA-ESTEC, Requirements & Standards Division, 2000.—196 p.
4. ESA/SCC basic specification N 25100. Single event test method and guidelines. — European Space Agency, 1995.—23 p.
5. Inguimbert C., Duzellier S. SEU rate calculation with GEANT4 (Comparison with CREME-86) // IEEE Trans. Nucl. Sci.—2004.—51, N 5.—P. 2805—2810.
6. JESD89. Measurement and reporting of alpha particles and terrestrial cosmic ray-induced soft errors in semiconductor devices. — JEDEC Solid State Technology Association, 2001.—64 p.
7. Koons H. C., Mazur J. E., Selesnic R. S., et al. The impact of the space environment on space systems // Aerospace Report N TR-99(1670)-1, prepared by Space and Missile Systems Center, L. A. 1999.—202 p.
8. Tylka A. J., Adams J. H., Boberg P. R., et al. CREME96: a revision of the cosmic ray effects on micro-electronics code // IEEE Trans. Nucl. Sci.—1997.—44, N 6.—P. 2150—2160.

SINGLE EVENT EFFECT CALCULATION METHOD TAKING INTO CONSIDERATION REAL PROTECTION OF INTEGRAL CIRCUITS INSIDE A SATELLITE

*O. V. Dotzenko, V. Ya. Dmitrenko, V. B. Tarasov,
Yu. A. Shovkoplyas*

The method for single event effect rate calculation used in the practice of satellites hardness assurance to space environment is presented. We propose solutions allowing conduct single event effect rate calculation with consideration for real shielding distribution at the point of integral circuit placement inside a satellite. The results obtained through the method are compared with the ones calculated with the standard CREME-96 model.