

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЁТА СЕЧЕНИЯ СБОЯ
МИКРОСХЕМ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**
MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE FAILURE CROSS-SECTION OF
MICROCIRCUITS UNDER PROTON RADIATION EXPOSURE

Котляров В.В., аспирант, ФГБОУ ВО **Kotlyarov V.V.**, Postgraduate student,
«Воронежский государственный Voronezh State University of Forestry and
лесотехнический университет имени Technologies named after G.F. Morozov
Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия Voronezh, Russia

Аннотация. Предложена математическая модель для оценки сечения сбоя интегральных микросхем при воздействии высокоэнергетичных протонов космического пространства. Модель учитывает параметры чувствительного объёма, спектр протонного излучения, вероятность ядерных взаимодействий и энерговыделение вторичных частиц. Получены аналитические выражения для расчёта интенсивности единичных эффектов. Представлены графические зависимости, иллюстрирующие влияние параметров микросхемы на радиационную стойкость, а также проведён анализ чувствительности модели к изменениям входных данных.

Ключевые слова: радиационная стойкость, микросхемы, протонное излучение, сечение сбоя, математическое моделирование, вторичные ионы.

Abstract. A mathematical model is proposed to estimate the failure cross-section of integrated circuits exposed to high-energy cosmic protons. The model takes into account the sensitive volume geometry, proton energy spectrum, nuclear interaction probability, and energy deposition from secondary particles. Analytical expressions for the rate of single event effects are derived. Graphical dependencies illustrating the effect of microcircuit parameters on radiation resistance are presented, as well as an analysis of the sensitivity of the model to changes in input data.

Keywords: radiation hardness, microcircuits, proton radiation, failure cross-section, mathematical modeling, secondary ions.

Современные электронные компоненты, используемые в космической технике, подвержены воздействию жесткого радиационного окружения. Один из наиболее опасных видов радиационных эффектов – единичные эффекты (SEE), возникающие при попадании отдельной высокоэнергетичной частицы в чувствительный элемент интегральной схемы. В результате такого попадания в небольшом объеме полупроводника локально высвобождается значительное количество заряда, что может приводить к сбоям (SEU) или необратимым отказам элемента. Математическое моделирование стойкости полупроводниковых изделий к единичным эффектам позволяет на этапе проектирования предсказать надежность аппаратуры в космическом пространстве и обосновать выбор элементной базы. Данная работа посвящена разработке и анализу модели оценки стойкости интегральных микросхем (ИМС) к

воздействию высокоэнергетичных протонов космического пространства. Модель опирается на физические принципы генерации заряда в объеме полупроводника при радиационном облучении и учитывает спектр энергий космических протонов, а также геометрию чувствительных областей микросхемы.

Единичные радиационные эффекты в микросхемах были подробно изучены в ряде предыдущих работ [1, 2]. Показано, что критическим условием возникновения сбоя или отказа является превышение некоторой пороговой величины заряда в чувствительном объеме прибора. Согласно зарядовой модели единичного сбоя [1], поражающая частица вызывает сбой, если сгенерированный ею избыточный заряд Q в чувствительном объеме $V_{эф}$ превышает критический уровень $Q_{кр}$. Этот критерий можно выразить через граничные условия на энерговыделение частицы. Пусть $(dE/dx)_i$ – линейные потери энергии на ионизацию (ЛПЭ) частицы в веществе с кинетической энергией E . Тогда условие генерации критического заряда формулируется как:

$$\int_0^{X_{ак}} \left(\frac{dE}{dx} \right)_i dx \geq E_p, \quad (1)$$

где $X_{ак}$ – длина пробега частицы внутри чувствительного объема (активная толщина); E_p – пороговая энергия, которую должна передать частица в объеме $V_{эф}$ для генерации заряда $Q_{кр}$. Величина E_p связана с критическим зарядом $Q_{кр}$ следующим образом:

$$E_p = 22.5 Q_{кр}, \quad (2)$$

где $Q_{кр}$ выражен в пикокулонах (пКл), а E_p – в МэВ. Коэффициент 22,5 МэВ/пКл соответствует энергии, необходимой для образования данного заряда в кремнии [1], а E_p – это эквивалентная энергия ионизации, порог сбоя по энергии, соответствующий критическому заряду $Q_{кр}$. Условия (1) – (2) означают, что единичный эффект (сбой памяти, переключение триггера и т.п.) произойдет, если интегральное энерговыделение частицы в пределах эффективного чувствительного объема $V_{эф}$ достигает порогового значения E_p , эквивалентного критическому заряду схемы.

При аналитическом моделировании чувствительный элемент ИМС обычно представляют в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами $a \cdot b \cdot c$ (характерными размерами диффузионной области, зоны коллектора или объема памяти). Эффективный объем чувствительного элемента определяется как:

$$V_{эф} = a \cdot b \cdot c$$

и имеет размерность см^3 . Длина пути частицы внутри такого параллелепипеда при случайном изотропном попадании может принимать значения от 0 до максимальной хорды l_{max} , равной диагонали параллелепипеда: $l_{max} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$. Для упрощения анализа часто рассматривается случай равномерного распределения длины трека l от 0 до l_{max} при изотропном облучении. Задавая параметры a, b, c на основе конструктивно-технологических данных конкретной микросхемы, можно определить $V_{эф}$ и оценить типичные значения $X_{ак} = \rho_{Si} \cdot l$ и, следовательно, оценить необходимое линейное энерговыделение для достижения порога E_p .

В общем случае можно выделить два механизма, приводящих к генерации избыточного заряда в чувствительном элементе [4]:

1. Прямое ионизационное воздействие (ЛПЭ) первичной заряженной частицы, обладающей достаточно высокой удельной ионизационной способностью (большим атомным номером или энергией, соответствующей максимальным потерям на ионизацию). Такой механизм характерен для тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), например, ядер космических лучей или осколков ядерных реакций с большим Z . Именно этот случай обычно рассматривается при традиционных испытаниях на тяжелых ионах и моделируется с помощью критического линейного переноса энергии (LET) [2]. Если LET частицы превышает некоторый порог $LET_{кр}$, соответствующий (1) и (2), то частица способна породить критический заряд и вызвать сбой.

2. Косвенное воздействие через вторичные ядерные фрагменты – высокоэнергетичная первичная частица (например, протон) не обладает достаточным LET, чтобы напрямую вызвать сбой, однако при ядерном неупругом взаимодействии с атомом решетки полупроводника может порождать вторичные тяжелые частицы (дочерние ядра, осколки ядер реакции), которые, двигаясь в веществе, обладают значительно более высоким LET. Эти вторичные ионы, возникшие внутри или около чувствительного объема, выступают как внутренний источник тяжелых частиц, способный вызвать локальное энерговыделение, превышающее порог E_p [3].

На рисунке 1 иллюстрируются оба механизма. Тяжелая заряженная частица (красная стрелка) при прохождении через чувствительный объем $V_{эф}$ непосредственно ионизирует вещество по своему треку, генерируя плотный столб заряда. Напротив, протон (синяя стрелка), проходя через кристалл, сам по себе имеет малые потери на ионизацию и не способен создать критический заряд напрямую. Однако при столкновении протона с ядром кремния (черная точка на рисунке) происходит ядерная реакция, в результате которой выбивается вторичный осколок – тяжелый ион (зеленая пунктирная стрелка). Этот осколок, рожденный внутри кристалла, обладает высоким LET и может локально создать заряд, достаточный для сбоя.

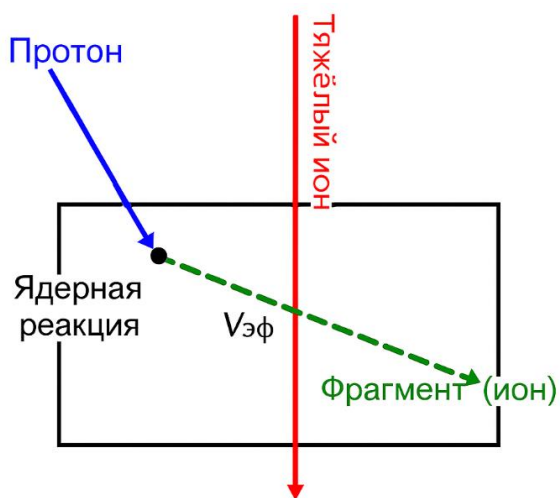


Рисунок 1 – Схема механизмов энерговыделения: тяжелый ион непосредственно ионизует чувствительный объем $V_{эф}$; протон инициирует в кремнии ядерную реакцию с выбросом вторичного тяжелого фрагмента, который ионизует материал вдоль своего трека

Высокоэнергетичные протоны (ВЭП) космического пространства относятся ко второму механизму. Протоны, являясь легкими частицами с единичным зарядом, имеют сравнительно низкую ионизационную способность. Максимальное линейное энерговыделение первичного протона в кремнии составляет порядка $0.2 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ [4], что значительно меньше типичных пороговых значений E_p для большинства интегральных схем (критические заряды обычно требуют эквивалент E_p в несколько МэВ).

Одиночный протон, пролетая через чувствительный объем, как правило, не способен напрямую сгенерировать критический заряд $Q_{\text{кр}}$ и вызвать сбой. Однако при энергиях порядка десятков и сотен МэВ и выше протоны способны вступать в неупругие ядерные реакции (реакции типа $p + \text{Si}$), выбивая из атомов кремния различные вторичные частицы: осколки ядер кремния, лёгкие ядра (литий, бериллий и др.), а также нуклоны и мезоны. Тяжелые ядра-осколки, образующиеся при таких реакциях, обладают высокой плотностью ионизации (высоким LET) и, пройдя небольшой путь вблизи точки взаимодействия, могут отдать в чувствительном объеме энергию, сравнимую с энергией тяжелого космического иона [3, 4]. Иначе говоря, внутри кристалла возникает вторичный тяжелый фрагмент, способный вызвать единичный эффект подобно внешнему тяжелому иону. Этот процесс можно рассматривать как основной источник сбоев от протонов для элементов с достаточно большим $Q_{\text{кр}}$.

Следует отметить, что для новейших субмикронных технологий пороговые заряды $Q_{\text{кр}}$ значительно снизились (до единиц фемтокулон), и в ряде случаев даже прямое ионизационное действие протонов низких энергий может приводить к сбоям [8]. Так, экспериментально обнаружено появление SEU от протонов с энергией менее $\sim 10 \text{ МэВ}$ в 65-нм SRAM.

Этот эффект обусловлен тем, что при небольшом критическом заряде даже относительно малое линейное энерговыделение протона на своем пути через чувствительную область может оказаться достаточным для переключения ячейки памяти [8]. В данной работе, однако, рассматривается классический сценарий для более «крупных» технологий, когда $Q_{\text{кр}}$ велик и прямое воздействие протонов несущественно, а основную опасность представляют именно вторичные осколки ядер. Тем не менее, учитывая прогресс технологий, при оценке стойкости современной элементной базы важно принимать во внимание и возможность прямых протон-индуцированных сбоев [5, 8] наряду с рассмотренной ниже моделью ядерных реакций.

Для количественной оценки частоты единичных эффектов от космических протонов необходимо учитывать два аспекта: (а) вероятность того, что протон при столкновении с атомом кремния породит тяжелый фрагмент, способный вызвать сбой; (б) поток и спектр протонов, достигающих прибора на данной орбите (с учетом защиты). В рамках предлагаемой модели (а) описывается с помощью параметра $\epsilon(E_p)$ – доли ядерных взаимодействий, приводящих к возникновению фрагмента с энерговыделением в $V_{\text{эф}}$ выше порога E_p [4]. Другими словами, $\epsilon(E_p)$ – это вероятность того, что при реакции протона с кремнием выделится вторичная тяжёлая частица, которая в пределах чувствительного объема отдаст энергию E_p или более (т.е. сгенерирует заряд $Q_{\text{кр}}$ или выше). Этот параметр зависит как от порога E_p (то есть от специфики конкретного прибора), так и от энергии самого протона: при

росте энергии протона растет и вероятность более «жесткого» взаимодействия, дающего тяжелый осколок. На основании анализа доступных экспериментальных данных по протон-индуцированным сбоям [3] и их обобщения в работе [4] авторы модели получили приближенное выражение для функции выхода ϵ в виде экспоненциальной зависимости:

$$\epsilon(E_p, E) \approx 1 - \exp[-0.172(E - E_{p0})], \quad (3)$$

справедливое для $E \geq E_{p0}$ (при меньших энергиях протонов вероятность выхода фрагмента с пороговым энерговыделением практически нулевая). Здесь E – кинетическая энергия протона, а E_{p0} – минимальная энергия протона, начиная с которой возможны ядерные реакции, дающие энерговыделение E_p в чувствительном объеме. Значение E_{p0} по сути является порогом реакций типа (p, Si) с выходом тяжелых осколков: для протонов с энергией ниже E_{p0} ни один вторичный фрагмент не сможет пробежать в $V_{эф}$ с достаточным LET, чтобы обеспечить E_p . Из эмпирических оценок было найдено соотношение [4]:

$$E_{p0} \approx 29(E_p - 0.69), \quad (4)$$

где E_{p0} и E_p подставляются в МэВ. Формула (4) задаёт связь между требуемым порогом энерговыделения E_p и пороговой энергией протонов, способных генерировать такие события. Например, если для данной ИМС $E_p = 10$ МэВ (что соответствует $Q_{кр} \approx 0.44$ пКл по (2)), то только протоны с энергией выше $E_{p0} \approx 29(10 - 0.69) \approx 270$ МэВ могут вызывать сбои. Для меньшего порога $E_p = 5$ МэВ ($Q_{кр} \approx 0.22$ пКл) достаточны протоны с $E > E_{p0} \approx 125$ МэВ, а для более «крепкой» схемы с $E_p = 15$ МэВ ($Q_{кр} \approx 1$ пКл) потребуется $E_{p0} \approx 415$ МэВ.

Вся совокупность взаимодействий протонов с кремнием, ведущих к сбоям, определяется двумя параметрами конкретного прибора: $V_{эф}$ и E_p или эквивалентно $Q_{кр}$. Модель расчёта интенсивности сбоев строится следующим образом. Рассмотрим поток протонов с дифференциальным энергетическим спектром $\varphi_p(E)$, проникающий к микросхеме (например, спектр галактических космических лучей или солнечных протонов за известной защитой). Для каждого протона с энергией E вероятность того, что он взаимодействует с атомом кремния в пределах чувствительного объема $V_{эф}$, равна произведению сечения ядерной реакции на число целей (атомов) в этом объеме. Число атомов кремния в объеме $V_{эф}$ составляет $N_{ядр}V_{эф}$, где $N_{ядр}$ – объемная концентрация атомов Si. При плотности кремния 2.33 г/см³ и атомном весе 28 это значение составляет примерно

$$N_{ядр} \approx 5.0 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3},$$

что согласуется с табличной атомной концентрацией кремния [4]. Сечение неупругого взаимодействия протона с ядром кремния $\sigma_{ядер}$ можно оценить геометрически или по экспериментальным данным. Для высокоэнергетичных протонов полное неупругое сечение на ядре кремния порядка $\sim 10^{-25}$ (сотни миллибарн) [4]. В частности, использовалась оценка $\sigma_{ядер} \approx 6.4 \times 10^{-25}$, полученная из модели ядерного радиуса. Значит, вероятность того, что единичный протон, пролетая через чувствительный объем, вступит в ядерную реакцию с атомом кремния, равна $N_{ядр}V_{эф}\sigma_{ядер}$. Если такая реакция произошла, то с вероятностью $\epsilon(E_p, E)$ (3) она приведет к появлению критического энерговыделения в объеме. С учетом этого

полный дифференциальный выход сбоев (число сбоев в единицу времени на единицу энергии протонов) запишется как:

$$\omega(E) = \varphi_p(E) N_{\text{ядр}} V_{\text{эф}} \sigma_{\text{ядер}} \epsilon(E_p, E).$$

Интегрируя $\omega(E)$ по всему спектру протонов, получаем суммарную частоту единичных эффектов ν (число сбоев в приборе в единицу времени):

$$\nu = M \int_{E_{p0}}^{E_{\text{max}}} \varphi_p(E) N_{\text{ядр}} V_{\text{эф}} \sigma_{\text{ядер}} \epsilon(E_p, E) dE, \quad (5)$$

где M – число чувствительных элементов в приборе (например, число ячеек памяти, бит). Если интересует сечение сбоя (вероятность сбоя на частицу), можно нормировать ν на поток. В частности, сечение единичного эффекта на один бит определяется как отношение частоты сбоев в одной ячейке к потоку протонов выше пороговой энергии E_{p0} :

$$\sigma_i(E_p) = \frac{\nu}{M F(>E_{p0})} = N_{\text{ядр}} V_{\text{эф}} \sigma_{\text{ядер}} \epsilon(E_p), \quad (6)$$

где $F(>E_{p0}) = \int_{E_{p0}}^{\infty} \varphi_p(E) dE$ – интегральный поток протонов выше порога реакций. Формула (6) непосредственно следует из предыдущего выражения, если спектр считать постоянным выше E_{p0} , однако в практике расчёта обычно используют более точное интегрирование по спектру. Тем не менее, (6) полезна для понимания: σ_i пропорционально объему $V_{\text{эф}}$ и вероятности ядерного взаимодействия, умноженной на долю реакций, дающих сбой.

Подставляя численные значения $N_{\text{ядр}}$ и $\sigma_{\text{ядер}}$ в (6), получим удобное приближенное выражение. При $N_{\text{ядр}} = 5.0 \times 10^{22-3}$ и $\sigma_{\text{ядер}} = 6.4 \times 10^{-25} \text{ см}^2$ их произведение равно $N_{\text{ядр}} \sigma_{\text{ядер}} \approx 3.2 \times 10^{-2} \text{ см}^{-1}$. Тогда:

$$\sigma_i(E_p) \approx 3.2 \times 10^{-2} V_{\text{эф}} \epsilon(E_p). \quad (7)$$

Здесь $V_{\text{эф}}$ подставляется в кубических сантиметрах.

Функция $\epsilon(E_p)$ при интегрировании по спектру превращается в эффективную вероятность сбоя для данного прибора. В работе [4] эмпирическую формулу (3) для ϵ дифференцировали и строили семейство кривых $\sigma_i(E)$, зависящих как от энергии протона, так и от параметров прибора ($E_p, V_{\text{эф}}$). На рисунке 2 приведены расчетные зависимости сечения сбоя σ_i на бит от энергии протона для фиксированного порога $E_p = 10 \text{ МэВ}$ и нескольких значений эффективного объема $V_{\text{эф}}$. Видно, что при достижении протонами пороговой энергии $E_{p0} \approx 270 \text{ МэВ}$ сечение резко нарастает от нуля до некоторого плато. Увеличение $V_{\text{эф}}$ (размера чувствительного элемента) приводит к пропорциональному росту предельного значения σ_i на плато, поскольку большая мишень содержит больше ядер и дает выше вероятность реакции. Так, для объема $V_{\text{эф}} = 8 \times 10^{-9} \text{ см}^3$ (например, чувствительная область $20 \times 20 \times 20 \text{ мкм}^3$) максимальное сечение на бит примерно в 8 раз превышает таковое для объема $1 \times 10^{-9} \text{ см}^3$ ($10 \times 10 \times 10 \text{ мкм}^3$). При этом положение крутой части кривой (энергетический порог включения эффекта) определяется E_p и не зависит от объема: во всех случаях скачок происходит около $E \sim 270 \text{ МэВ}$, соответствующих $E_p = 10 \text{ МэВ}$. Размеры чувствительной области влияют на абсолютную вероятность сбоя (путем масштабирования σ_i), но не на минимальную энергию протонов, способных вызвать эффект.

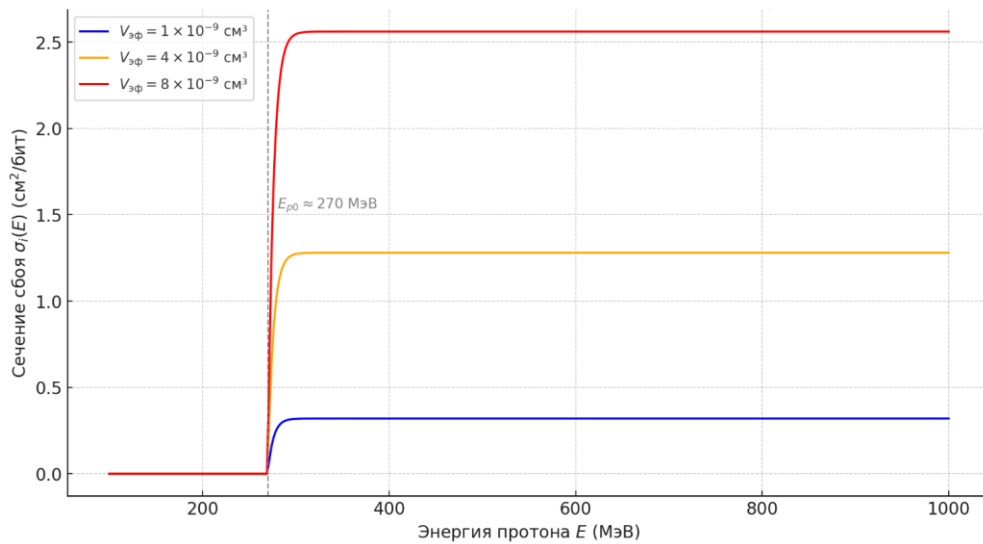


Рисунок 2 – Расчетные кривые сечения сбоя $\sigma_i(E)$ для порога $E_p = 10$ МэВ и разных эффективных объемов: 1) $V_{эф} = 1 \times 10^{-9}$ см³ (синяя кривая); 2) $V_{эф} = 4 \times 10^{-9}$ см³ (желтая); 3) $V_{эф} = 8 \times 10^{-9}$ см³ (красная). Сечения нормированы "на бит". Рост σ_i начинается при $E \approx 270$ МэВ (вертикальная область кривых), что соответствует достижению порогового энерговыделения $E_p = 10$ МэВ вторичными фрагментами

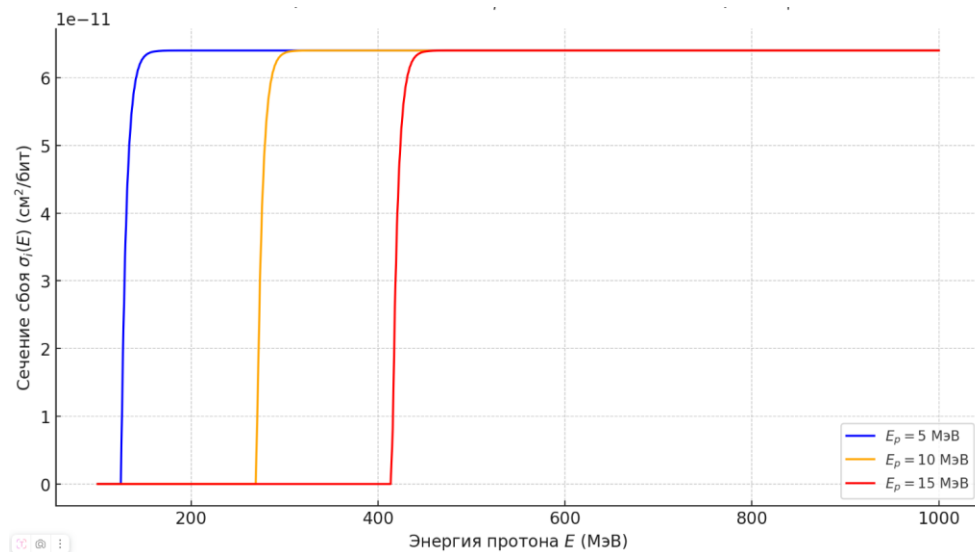


Рисунок 3 – Влияние порога стойкости E_p на сечение сбоя (при $V_{эф} = 2 \times 10^{-9}$ см³). Показаны зависимости $\sigma_i(E)$ для порогового энерговыделения 5 МэВ (синяя кривая), 10 МэВ (желтая) и 15 МэВ (красная). Более "чувствительный" элемент (меньший E_p) начинает испытывать сбои от протонов с существенно более низких энергий. При достаточно высоких энергиях протонов ($E \gg E_{p0}$) все кривые выходят на одинаковое плато σ_i^{max} определяемое геометрией чувствительного объема

На рисунке 3 показано влияние величины порога E_p на зависимость $\sigma_i(E)$ при фиксированном объеме (для примера взят $V_{эф} = 2 \times 10^{-9}$ см³). С уменьшением E_p (т.е. при менее требовательном устройстве с меньшим критическим зарядом) пороговая энергия протонов E_{p0} смещается в область меньших значений, и кривая $\sigma_i(E)$ сдвигается влево. Так,

для $E_p = 5$ МэВ начало роста σ_i лежит около $E_{p0} \approx 125$ МэВ, в то время как для $E_p = 15$ МэВ эффект возникает лишь с $E > 400$ МэВ. Все кривые стремятся к одному и тому же уровню при больших энергиях (в пределе $E \gg E_{p0}$), поскольку максимальное σ_i определяется в основном геометрией и в рассмотренном примере одинаково для всех – около 6.4×10^{-11} см² на бит. Однако площадь под кривой (интеграл по спектру, пропорциональный ожидаемому числу сбоев) будет существенно больше для приборов с низким E_p за счет захвата более широкого диапазона энергий протонов. Это означает, что схемы с более низким критическим зарядом статистически более уязвимы в реальных условиях космического облучения.

Для практического использования полученной модели необходимы данные о спектре протонов $\varphi_p(E)$ в условиях интересующей орбиты или миссии. Космический протонный фон обычно формируется двумя составляющими: галактическими космическими лучами, дающими сравнительно постоянный изотропный спектр высоких энергий (от сотен МэВ до нескольких ГэВ), и протонами радиационных поясов или солнечного происхождения, спектры которых могут быть различны и зависят от активности Солнца, высоты орбиты, экранировки и т.д. [10]. Как правило, для оценки стойкости применяются либо эмпирические модели среды (модель CREME96 [10] для ГКЛ и солнечных всплесков, модели AP-8/AE-8 для радиационных поясов), либо прямые данные по спектрам, полученные со спутников (NOAA/GOES и др.). В любом случае, задача сводится к подстановке спектра в интеграл (5). Если спектр задан в виде таблицы или эмпирической функции, интегрирование, как правило, выполняется численно в составе программного обеспечения расчёта радиационной стойкости. В простейшем приближении можно оценить ν через интегральный поток $F(> E_{p0})$ выше пороговой энергии, как в (6), однако для большей точности следует интегрировать по полному спектру, учитывая вклад протонов всех энергий выше порога.

Модель (5) – (7) была реализована авторами [4] в виде программного комплекса для оперативной оценки стойкости ИМС. Этот комплекс позволяет пользователю задавать параметры прибора ($V_{эф}$, $Q_{кр}$ и др.), выбирать модель радиационной обстановки (типичный спектр ГКЛ для солнечного минимума/максимума, спектры вспышек, орбитальные модели и пр.) и рассчитывать ожидаемую интенсивность сбоев. Полученные результаты были верифицированы на основе экспериментальных данных. В частности, проведено сравнение расчетов с результатами натурных испытаний на орбитальных спутниках для статических ОЗУ за период 2001–2006 гг. Отмечено, что модель дает хороший прогноз: расхождение между рассчитанным числом сбоев и фактически наблюдаемым в полете не превышало 5–20%, что находится в пределах погрешности ввода исходных данных. Для сравнения, использование распространённого зарубежного кода CREME96 дало значительно большие отклонения.

Данный подход позволяет предсказывать сечения протонно-индуцированных сбоев и интенсивность SEU/SEL в электронных компонентах как функцию от условий полёта и свойств самого компонента. Зная рассчитанное по (6) сечение на бит $\sigma_i(E_p)$ и интегральный протонный флюенс за время миссии, можно оценить вероятность накопления хотя бы одного сбоя за заданный период. Модель наглядно показывает зависимость радиационной стойкости

от размеров чувствительных областей и уровней критического заряда, что важно при выборе технологий для космического применения.

Полученные результаты согласуются с общими тенденциями: уменьшение размеров ячеек (снижение $V_{эф}$) и порога сбоя $Q_{кр}$ делает прибор менее стойким к воздействию протонов, хотя и уменьшает влияние тяжелых ионов (поскольку для них $Q_{кр}$ тоже снижается). Этот компромисс следует учитывать при радиационно-стойком проектировании. Дополнительно, модель может быть расширена для учета других эффектов – множественных сбойных бит (MBU) при попадании нескольких осколков или группы протонов, эффектов вторичных нейтронов и т.п.

Для более строгого анализа возможно сопряжение аналитической модели с Монте-Карло симуляциями на уровне траекторий (с помощью GEANT4 или аналогичных инструментов), что позволит учесть геометрию кристалла и распределение энергии от каскада реакций более детально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агаханян, Т.М. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах / Т.М. Агаханян, Е.Р. Аствацатурьян, П.К. Скоробогатов. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
2. Пашковский, М.Е. Модель оценки стойкости полупроводниковых изделий к воздействию тяжёлых заряженных частиц космического пространства / М.Е. Пашковский, И.Е. Пашковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 1. – С. 58–60.
3. Лобанов, О.В. Перемежающиеся отказы, вызванные ядерными реакциями в устройствах электронной техники при облучении первичными ускоренными частицами / О.В. Лобанов, М.В. Мирошкин, М.В. Стабников // Средства радиоэлектроники. – 1988. – Вып. 2. – 32 с.
4. Пашковский, М.Е. Модель энергосвечения от высокоэнергетичных протонов космического пространства / М.Е. Пашковский, В.Ф. Барабанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6, № 9. – С. 45–48.
5. Методические указания по оценке и обеспечению сбоеустойчивости и отказоустойчивости бортовой аппаратуры. Ч. 2. / Е.В. Горчаков, В.В. Герасимов, А.В. Чумаков, В.В. Ужегов. – 2009. – 74 с.
6. Барабанов, В.Ф. Интерактивные средства моделирования сложных технологических процессов / В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2000. – 124 с.
7. Моделирование и симуляция сечения сбоев, индуцированных протонами и нейтронами: унифицированный аналитический подход / Г.И. Зебрев, Н.Н. Самотаев, Р.Г. Усейнов [и др.] // Radiation. – 2024. – Т. 4, № 1. – Статья 4. – DOI: 10.3390/radiation4010004.
8. Прямая ионизация протонами в субмикронных технологиях: методики испытаний и моделирование / S. Lüdeke, G.D. Cardenás, W. Hajdas [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2023. – Т. 70, № 3. – С. 667–677. – DOI: 10.1109/TNS.2023.3241937.
9. Новая модель предсказания сечений SEE от протонов на основе данных по тяжёлым ионам / J. Han, G. Guo, J. Liu [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 2022. – Т. 526. – С. 62–67. – DOI: 10.1016/j.nimb.2022.02.009.

10. CREME96: обновлённая версия кода оценки воздействия космических лучей на микроэлектронику / A.J. Tylka, J.H. Jr. Adams, P.R. Boberg [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1997. – Т. 44, № 6. – С. 2150–2160. – DOI: 10.1109/23.659030.

11. Котляров, В.В. Методы защиты цифровых устройств на базе ПЛИС от ионизирующего излучения в условиях космического пространства / В.В. Котляров, А.В. Шевченко, В.И. Анциферова // Моделирование систем и процессов. – 2024. – №. 4. – С. 59-67. – DOI: <https://doi.org/10.12737/2219-0767-2024-17-4-59-67>.

REFERENCES

1. Agakhanyan, T.M. Radiation effects in integrated circuits / T.M. Agakhanyan, E.R. Astvatsaturyan, P.K. Skorobogatov. – Moscow: Energoatomizdat, 1989. – 256 p.

2. Pashkovsky, M.E. Model for assessing the resistance of semiconductor products to the effects of heavy charged particles of outer space / M.E. Pashkovsky, I.E. Pashkovsky // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2012. – Vol. 8, No. 1. – P. 58-60.

3. Lobanov, O.V. Intermittent failures caused by nuclear reactions in electronic devices under irradiation with primary accelerated particles / O.V. Lobanov, M.V. Miroshkin, M.V. Stabnikov // Means of radio electronics. – 1988. – Issue 2. – 32 p.

4. Pashkovsky, M.E. Model of energy release from high-energy protons of outer space / M.E. Pashkovsky, V.F. Barabanov // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2010. – Vol. 6, No. 9. – P. 45–48.

5. Guidelines for assessing and ensuring failure tolerance and fault tolerance of onboard equipment. Part 2. / E.V. Gorchakov, V.V. Gerasimov, A.V. Chumakov, V.V. Uzhegov. – 2009. – 74 p.

6. Barabanov, V.F. Interactive tools for modeling complex technological processes / V.F. Barabanov, S.L. Podvalny. – Voronezh: VSTU Publishing House, 2000. – 124 p.

7. Modeling and Simulation of Proton- and Neutron-Induced Slip Cross Sections: A Unified Analytical Approach / G. I. Zebrev, N. N. Samotaev, R. G. Useynov [et al.] // Radiation. – 2024. – Vol. 4, No. 1. – Article 4. – DOI: 10.3390/radiation4010004.

8. Direct Ionization by Protons in Submicron Technologies: Testing Methodologies and Modeling / S. Lüdeke, G. D. Cardenás, W. Hajdas [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2023. – Vol. 70, No. 3. – P. 667–677. – DOI: 10.1109/TNS.2023.3241937.

9. A New Model for Predicting Proton SEE Cross Sections Based on Heavy Ion Data / J. Han, G. Guo, J. Liu [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 2022. – Vol. 526. – Pp. 62–67. – DOI: 10.1016/j.nimb.2022.02.009.

10. CREME96: An Updated Version of the Code for Assessing the Impact of Cosmic Rays on Microelectronics / A.J. Tylka, J.H. Jr. Adams, P.R. Boberg [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1997. – Vol. 44, No. 6. – Pp. 2150–2160. – DOI: 10.1109/23.659030.

11. Kotlyarov, V.V. Methods of protecting digital devices based on FPGA from ionizing radiation in outer space / V.V. Kotlyarov, A.V. Shevchenko, V.I. Antsiferova // Modeling of systems and processes. – 2024. – No. 4. – P. 59-67. – DOI: <https://doi.org/10.12737/2219-0767-2024-17-4-59-67>.