

На правах рукописи

Галимов Артур Маратович

**Метод расчета частоты множественных сбоев коммерческих
микросхем памяти в космосе**

05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



МОСКВА – 2018 г.

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель:

доктор технических наук
Зебрев Геннадий Иванович,
профессор кафедры «Микро- и нанoeлектроники»
НИЯУ «МИФИ», г. Москва

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Зинченко Владимир Федорович,
АО «Российские космические системы»

кандидат технических наук
Ужегов Вячеслав Михайлович,
ФГУП ЦНИИмаш

Ведущая организация:

Филиал АО «ОРКК» - «НИИ КП»

Защита состоится 27 сентября 2018 г. в 15.00 в конференц-зале К-608 на заседании диссертационного совета Д 212.130.13 НИЯУ «МИФИ» по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ «МИФИ» и на сайте <http://ods.mephi.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенным печатью организации, по адресу НИЯУ «МИФИ».

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



Д.С. Веселов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации

В связи с развитием микроэлектронных технологий повышаются требования к производительности радиоэлектронной аппаратуры космического назначения. Современная радиационно-стойкая компонентная база обладает высокой надежностью, однако зачастую имеет недостаточные показатели производительности. В связи с этим в настоящее время существует тенденция использования в составе процессорных систем космических аппаратов (КА) коммерческих интегральных микросхем (ИМС). В частности, коммерческие ИМС памяти имеют высокую производительность и информационную емкость, однако обладают выраженной чувствительностью к сбоям от отдельных ядерных частиц (ОЯЧ) космического пространства (КП). Достоверный прогноз частот сбоев микросхем памяти от ОЯЧ КП во многом определяет производительные характеристики процессорных систем КА.

Существует две основные задачи прогнозирования частот сбоев в космосе. Первой задачей является прогнозирование частот сбоев на этапе разработки ИМС, которая требует моделирования физических процессов сбора заряда в чувствительных узлах и схемотехнических расчетов. Для решения этой задачи используются инструменты физического (TCAD) и схемотехнического (Spice) моделирования одиночных сбоев. Второй задачей, которой посвящена данная диссертация, является прогнозирование частот сбоев микросхемы по результатам испытаний на ускорителе частиц. Для решения данной задачи требуется простая и однозначная процедура расчета, использующая в качестве входных данных экспериментальные сечения сбоев и спектры ОЯЧ на заданной орбите.

Традиционный подход к характеристике параметров чувствительности и прогнозированию частот сбоев ИМС от ТЗЧ предложен около 40 лет назад и является действующим на сегодняшний день стандартным методом расчета. Данный метод разрабатывался с учетом современных на тот момент времени проектных норм, которые составляли единицы микрометров. Для микрометровых проектных норм, как и для класса радиационно-стойких ИМС памяти, характерна локальность воздействия ТЗЧ на чувствительные области ячейки памяти. Однако, современная компонентная база коммерческих микросхем памяти изготавливается по проектным нормам 250 нм и менее. При уменьшении проектных норм воздействие ТЗЧ на чувствительные области микросхемы становится нелокальным, появляются более сложные для парирования эффекты - множественные сбои. Данное обстоятельство нарушает базовые физические принципы традиционного подхода, что делает прогнозирование частот сбоев от ТЗЧ в современных коммерческих ИМС памяти недостоверным.

Кроме того, растущая доля множественных сбоев в современных ИМС памяти является основной проблемой при разработке системы парирования сбоев в процессорных системах. Полученное на ускорителе частиц сечение сбоев не содержит информацию о распределении кратности множественных сбоев, а экспериментальное исследование данного распределения, как правило, не проводится. Отсутствие данной информации может привести к недооценке частот множественных сбоев в космосе и разработке неэффективной системы парирования.

Зачастую экспериментальное исследование сечения сбоев проводится только на одном типе ускорителя, как правило, ТЗЧ. С усложнением конструкции корпуса экспериментальное исследование сечения на ускорителе ТЗЧ затрудняется, что предполагает использование ускорителя протонов. Поэтому отдельной задачей прогнозирования является разработка процедуры взаимопересчета параметров чувствительности по результатам испытаний на одном типе ускорителя. Данная задача требует физического моделирования процессов ядерного взаимодействия протонов с веществом ИМС.

Вопросам характеристики параметров чувствительности и методам расчета частот одиночных сбоев ИМС памяти посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных авторов. В работах 80-х годов американскими авторами N. Bradford, J. Pickel, D. Binder, E. Petersen предложены методы характеристики сечения и расчета частот сбоев ИМС памяти, выполненных по микронным проектным нормам. Предложенные подходы являются стандартными и используются для расчетов частот сбоев всех типов ИМС памяти. Однако они не учитывают особенностей взаимодействия частиц с наноразмерными ячейками памяти.

В современных коммерческих ИМС памяти актуальной проблемой являются множественные сбои. Данной теме посвящены работы Чумакова А.И., Согояна А.В., Улановой А.В. и Борuzziной А.Б. В работах предложены методы физического моделирования и характеристики множественных сбоев. Вопросам расчета частот сбоев от протонов посвящены работы авторов E. Normand, L. Edmonds, J. Barak, R. Reed и H. Tang. В данных работах предложены методы расчета параметров чувствительности коммерческих ИМС к сбоям от протонов по экспериментальным данным на ТЗЧ.

В соответствии с вышеизложенным, применительно к современным коммерческим ИМС памяти остаются нерешенными следующие задачи прогнозирования частот сбоев:

1. оценка парциальных частот множественных сбоев по полному сечению сбоев от ТЗЧ в целях разработки эффективной системы парирования сбоев;
2. процедура пересчета параметров чувствительности ИМС к сбоям от ТЗЧ по экспериментальным данным сечения от протонов.

Предметом исследования являются методы и средства прогнозирования показателей стойкости ИМС памяти к эффектам одиночных сбоев от ОЯЧ КП, в частности методы характеристики сечения сбоев и методы расчета частот сбоев.

Объектом диссертационного исследования являются эффекты одиночных сбоев коммерческих ИМС памяти, имеющих малые экспериментальные значения пороговых линейных передач энергии.

Цель диссертации заключается в развитии методов прогнозирования и создании средств расчета частот множественных сбоев коммерческих ИМС памяти в условиях воздействия ТЗЧ и протонов космического пространства.

Для достижения поставленной цели решались следующие **основные задачи**:

- Разработка метода характеристики и расчета частот сбоев коммерческих ИМС памяти от ТЗЧ, основанного на едином описании единичных и множественных событий.
- Разработка метода разбиения сбоев по кратностям и метода расчета парциальных частот множественных сбоев по полному сечению сбоев, полученному в ходе наземных испытаний.
- Разработка метода характеристики сбоев от вторичных частиц взаимодействия протонов с веществом микросхемы.
- Разработка метода взаимопересчета параметров чувствительности к сбоям от ТЗЧ коммерческих ИМС памяти к сбоям от протонов, и наоборот.
- Реализация разработанных методов в виде программы расчета.

Научная новизна диссертации:

1. Предложен подход к расчету частот сбоев от ТЗЧ, основанный на феноменологическом представлении экспериментального сечения, позволяющий проводить расчет частот сбоев при отсутствии параметров чувствительных областей и характеризовать единичные и множественные сбои единым образом.
2. Предложен и обоснован самосогласованный метод разбиения полного сечения сбоев по группам событий с разными кратностями, основанный на замене распределения кратностей множественных сбоев коммерческих ИМС памяти распределением Пуассона.
3. Обоснована эквивалентность потока первичных ТЗЧ и вторичных частиц взаимодействия протонов с веществом в коммерческих ИМС памяти, что позволяет расширить разработанный феноменологический подход на расчет частот сбоев от протонов.

Практическая значимость диссертации заключается в разработке программы расчета частоты сбоев коммерческих ИМС памяти.

1. Программа напрямую использует в качестве входных данных экспериментальные данные сечения сбоев и спектры космических частиц, что позволяет повысить достоверность прогнозирования.
2. В состав программы интегрирована процедура расчета парциальных частот множественных сбоев, которая служит предпосылкой создания надежных методов парирования сбоев ИМС памяти.
3. Разработан физический симулятор спектра вторичных частиц взаимодействия протонов с веществом ИМС, который совместно с программой расчета частоты сбоев позволяет сократить материальные затраты на испытания коммерческих ИМС памяти на сбой от ТЗЧ и протонов космического пространства.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Метод расчета, основанный на феноменологическом подходе к характеристике сбоев, однозначно определяющий частоту сбоев коммерческих ИМС памяти от ТЗЧ по экспериментальным данным сечения без произвольных параметров и экспертных оценок.
2. Математическая модель, позволяющая получить распределение кратностей множественных сбоев коммерческих ИМС памяти исходя из экспериментальных данных полного сечения сбоев от ТЗЧ.
3. Метод пересчета параметров чувствительности коммерческих ИМС к сбоям от ТЗЧ по результатам испытаний на ускорителе протонов, и наоборот.

Реализация и внедрение результатов исследований.

1. Результаты диссертации внедрены в АО «НИИМА «Прогресс» при выполнении опытной конструкторской работы «Схема-ИБ-Т».
2. Разработанная автором программа PRIVET-2 прошла конкурсный отбор и стала победителем в программе УМНИК-2016.
3. Программа PRIVET-2 представлена к регистрации в ФГУ «Федеральный институт промышленной собственности Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам».

Апробация результатов диссертации.

Основные результаты диссертации докладывались на ежегодных всероссийских конференциях «Радиационная стойкость» (Лыткарино, 2016, 2017); Всероссийской научно-технической конференции «Электроника, микро- и нанoeлектроника» (Суздаль, 2017, 2018); Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов (Зеленоград, 2016); Международной конференции "International Conference on Micro- and Nanoelectronics" (ICMNE, 2016); ежегодных Европейских конференциях RADECS (2016, 2017), Московском семинаре по электронным и сетевым технологиям (MWENT, 2018).

Опубликованные результаты. По теме диссертации опубликовано 8 статей в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science (IEEE Transactions on Nuclear Science, IEEE Radecs proceedings); 3 статьи в российских научно-технических журналах (Вопросы атомной науки и техники, Труды НИИСИ РАН); 8 тезисов докладов в сборниках российских научных конференций.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации – 111 страниц. Диссертация содержит 45 рисунков. Список литературы содержит 100 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Во введении обоснована актуальность темы, определена цель диссертации. Сформулирована постановка задачи исследования и основные положения, выносимые на защиту. Изложены научная новизна и практическая значимость диссертации.

1. Модели расчета частот сбоев

Анализ методов расчета частот сбоев ИМС памяти в космосе показывает, что большинство существующих процедур расчета основывается на подсчете заряда, выделенного в чувствительных узлах ИМС. При этом используется концепция изолированного чувствительного объема в форме прямоугольного параллелепипеда (RPP), в котором происходит сбор заряда. При условии изотропии спектра космического излучения, усреднение по всем событиям при заданном ЛПЭ частиц сводится к усреднению по функции распределения длин случайных треков, пронизывающих заданный чувствительный объем. Считается, что сбой происходит, если заряд, собранный после ионизации в чувствительных узлах, превосходит некоторый критический заряд. Такое приближение носит по своей сути дозиметрический характер и ставит задачу прогнозирования частот сбоев в разряд расчета ионизационного энерговыделения в изолированных чувствительных микрообъемах.

Как показывает практика, приближение RPP более или менее выполняется для случая ИМС низкой степени интеграции, когда характерные размеры трека много меньше размеров чувствительных объемов. Для современных схем памяти с нормами менее 250 нм данное условие нарушается. Площадь ячеек памяти современных схем составляет порядка 1 мкм², и характерные размеры трека могут превышать топологические размеры ячейки памяти. Данное обстоятельство приводит к нелокальности воздействия отдельного иона. Результатом такого воздействия могут являться множественные сбои, когда на одно попадание иона приходится более одного физического сбоя. Таким образом, в базовом принципе RPP не предполагается нелокальное воздействие иона, что делает данный метод некорректным для современных коммерческих ИМС памяти.

Следствием нелокального воздействия также является отсутствие насыщения сечения сбоев коммерческих ИМС памяти при высоких линейных передачах энергии (ЛПЭ) частиц. При этом затрудняется характеристика сечения традиционной функцией Вейбулла, а именно возникает неоднозначность определения параметров аппроксимации. В диссертации показано, что неоднозначность параметров функции Вейбулла может

привести к значительному разбросу расчетных частот сбоев (до 6 раз). Кроме того, неоднозначность размеров RPP может привести к разбросу расчетных частот сбоев, составляющему более двух порядков величины.

Учитывая данные обстоятельства, в последнее время были предложены альтернативные физические модели, характеризующие одиночные сбои в современных ИМС памяти. Согояном А.В и Чумаковым А.И. предложена модель, основанная на решении уравнения диффузии заряда в чувствительной области ИМС. Диффузионное приближение также используется в модели F. Wrobel, которая использует метод Монте-Карло для расчета параметров импульса тока от ионизации одиночных частиц. Данные физические модели характеризуют зависимости сечения сбоев от ЛПЭ с учетом множественных сбоев, но не позволяют оценивать парциальные частоты множественных сбоев на орбите.

На основе метода Монте-Карло построено множество инструментов моделирования одиночных сбоев в микросхемах, такие как американский MRED, французские MUSCA SEP, TIARA и др. При условии знания полной информации о топологии и технологического процесса изготовления микросхемы, данные инструменты показывают высокую точность прогнозирования частот сбоев. Однако при прогнозировании частот сбоев по экспериментальным данным использование Монте-Карло моделирования радиационного отклика микросхемы не является целесообразным из-за отсутствия полной информации о топологии ИМС. В рамках решаемой задачи метод Монте-Карло находит применение в расчетах спектров продуктов ядерных взаимодействий высокоэнергетических частиц с веществом. Данные спектры используются в существующих подходах к пересчету параметров чувствительности от ТЗЧ к протонам. Анализ существующих подходов показывает, что, как и методы расчета частот сбоев, подходы основаны на дозиметрическом приближении RPP и не подходят для современных коммерческих ИМС памяти.

В результате обзора предметной области выделены нерешенные задачи прогнозирования частот сбоев коммерческих ИМС памяти. Поставлена главная задача диссертации, заключающаяся в разработке единого метода, который позволит рассчитывать частоты единичных и множественных сбоев от протонов и ТЗЧ по экспериментальному сечению, полученному на одном типе ускорителя, с возможностью взаимопересчета параметров чувствительности.

2. Компактная модель расчета частоты сбоев от ТЗЧ

В данном разделе представлена компактная модель расчета частот сбоев от ТЗЧ, основанная на феноменологическом описании одиночных сбоев. Феноменологическое описание заключается в том, что все физические процессы, связанные с ионизационным откликом микросхемы, со-

держатся в экспериментально измеренном сечении сбоев. В связи с этим компактная модель оперирует только с сечениями сбоев, не используя плохо-определенных параметров ИМС, а именно размеров чувствительных областей и величины критического заряда.

В рамках предложенного подхода выражение для частоты сбоев от ТЗЧ определяется следующим образом

$$R_{HI} = \int \sigma(\Lambda) \phi(\Lambda) d\Lambda, \quad (1)$$

где $\phi(\Lambda)$ – дифференциальный ЛПЭ-спектр изотропного потока частиц, $\sigma(\Lambda)$ – сечение сбоев, усредненное по полному телесному углу. Стоит отметить, что данное выражение справедливо для всех типов ИМС памяти и не зависит от конкретного вида $\sigma(\Lambda)$.

Особенность современных коммерческих ИМС памяти заключается в высокой плотности интеграции ячеек, что является причиной нелокальности воздействия ТЗЧ и появления множественных сбоев (рисунок 1). Факт нелокального воздействия ТЗЧ в плотном массиве ячеек памяти переводит набор отдельных чувствительных областей ИМС памяти в единую чувствительную область с площадью равной площади всей памяти на кристалле $M a_{cell}$, где M – количество ячеек памяти, a_{cell} – топологическая площадь ячейки памяти.

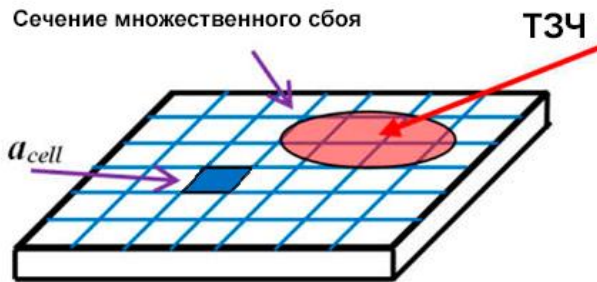


Рисунок – 1 Иллюстрация нелокального воздействия ТЗЧ на ИМС памяти

В такой форме чувствительной области средней длины трека изотропного потока ТЗЧ является удвоенная толщина этой области. Данной длиной трека обладают ионы, падающие под углом 60 градусов к поверхности ИМС. Поэтому экспериментальное усреднение по телесному углу в выражении (1) для коммерческих ИМС памяти можно выполнить с использованием ТЗЧ, падающих под углом 60 градусов. Преимуществом данного подхода перед методом IRPP является то, что для расчета частоты сбоев не требуется знания толщины чувствительной области.

Анализ экспериментальных данных показывает, что сечение сбоев коммерческих ИМС от ЛПЭ $\sigma(\Lambda)$ хорошо описывается линейной функцией

$$\sigma(\Lambda) = K_d (\Lambda - \Lambda_c) \quad (2)$$

где K_d – дифференциальный наклон надпорогового участка ($\Lambda > \Lambda_c$) сечения от ЛПЭ, Λ_c – пороговое значение ЛПЭ. На рисунке 2 представлены экспериментальные данные $\sigma(\Lambda)$ и их линейная аппроксимация для коммерческой ИМС памяти, изготовленной по технологическим нормам 90 нм.

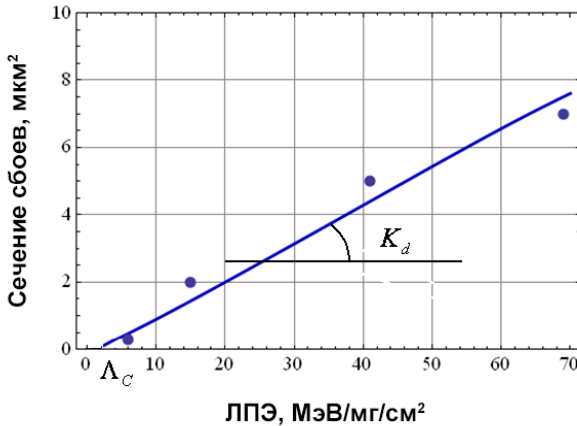


Рисунок – 2 Линейная аппроксимация экспериментальных данных $\sigma(\Lambda)$ коммерческой ИМС памяти с технологической нормой 90 нм. Параметры аппроксимации: $K_d = 1,1 \times 10^{-9}$ мкг/МэВ, $\Lambda_c = 1,9$ МэВ/мг/см².

В отличие от традиционной функции Вейбулла, линейная функция имеет всего два параметра и учитывает особенности коммерческих ИМС памяти. Выражение частоты сбоев для линейного вида $\sigma(\Lambda)$ имеет вид

$$R_{HI} = M K_d \int_{\Lambda_c} (\Lambda - \Lambda_c) \phi(\Lambda) d\Lambda \quad (3)$$

Таким образом, в отличие от традиционного метода расчета IRPP, где в расчете частоты сбоев участвуют 7 параметров (3 размера чувствительного объема и 4 параметра функции Вейбулла), компактная модель оперирует только двумя параметрами K_d и Λ_c , которые определяются напрямую из эксперимента.

В диссертации показано, что экспериментально измеренное сечение сбоев может быть представлено следующим образом:

$$\sigma(\Lambda) = \sum_{n=1} n \sigma_n(\Lambda) = a_c \sum_{n=1} n p_n(\Lambda) = a_c m(\Lambda), \quad (4)$$

где σ_n – парциальное сечение сбоев кратности n , a_c – топологическая площадь ячейки памяти, $p_n(\Lambda) = \sigma_n(\Lambda)/a_c$ – распределение кратностей множественных сбоев (где $n = 0$ соответствует попаданию ТЗЧ без эффекта, $n = 1$ соответствует единичным сбоям и т.д.), $m(\Lambda) = \sigma(\Lambda)/a_c$ – средняя кратность сбоев.

Распределение кратности множественных сбоев, строго говоря, является уникальным для каждой микросхемы, и может быть получено экспериментально. В диссертации показано, что распределение кратностей множественных сбоев в коммерческих ИМС памяти зачастую близко к распределению Пуассона. Используя данное приближение, получено выражение для оценки вероятности n -кратного сбоя при попадании иона с заданным ЛПЭ

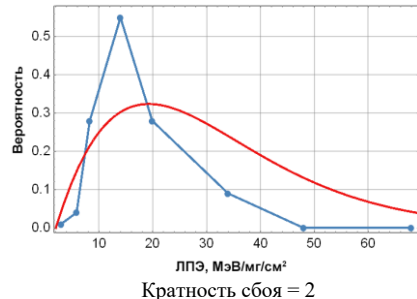
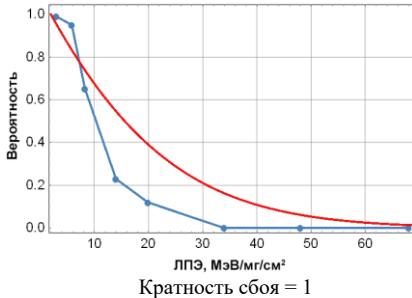
$$p_n(\Lambda) = \frac{m(\Lambda)^n}{n!} e^{-m(\Lambda)}, \quad (5)$$

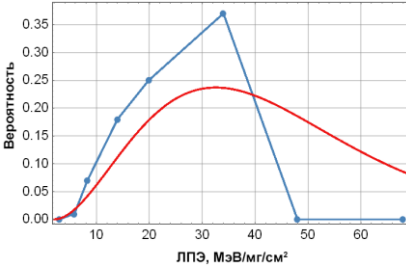
где $m(\Lambda) = K_d(\Lambda - \Lambda_c)/a_c$.

Поскольку экспериментальные данные распределения кратностей множественных сбоев по ЛПЭ не содержат «нулевых» событий p_0 , для проверки приближения (5) введено сокращенное распределение Пуассона, исключаяющее нулевые события

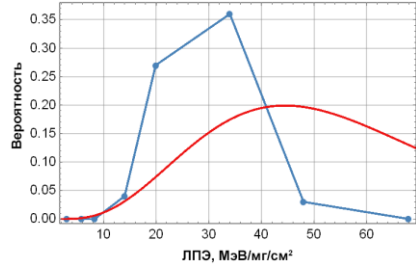
$$\tilde{p}_n = \frac{p_n}{1 - p_0} = \frac{m^n}{n!} \frac{e^{-m}}{1 - e^{-m}} = \frac{m^n}{n!} \frac{1}{e^m - 1}, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (6)$$

Проведено сравнение расчетных $\tilde{p}_n(\Lambda)$ с экспериментальными данными. На рисунках 3 и 4 показаны результаты сравнения $\tilde{p}_n(\Lambda)$ для n от 1 до 4 для ИМС памяти, изготовленных по технологии 65 нм и 90 нм.



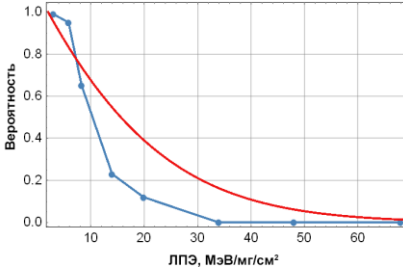


Кратность сбоя = 3

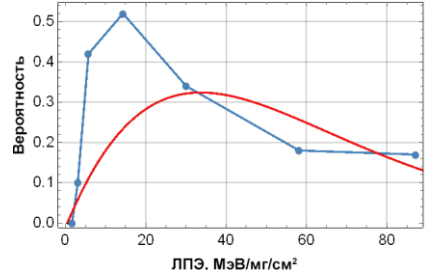


Кратность сбоя = 4

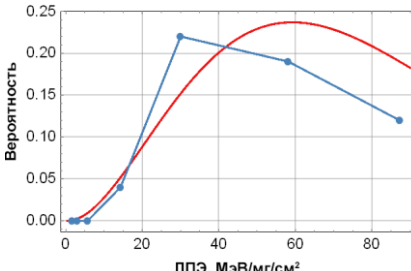
Рисунок – 3 Экспериментальные (синия кривая с точками) и расчетные (красная кривая) распределения кратностей множественных сбоев для ИМС памяти, изготовленной по 65 нм техпроцессу. Параметры модели: $K_d = 0,48 \times 10^{-9}$ мг/МэВ, $\Lambda_C = 2$ МэВ/мг/см², $a_C = 0,52$ мкм²



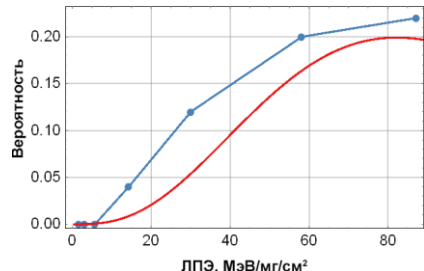
Кратность сбоя = 1



Кратность сбоя = 2



Кратность сбоя = 3



Кратность сбоя = 4

Рисунок – 4 Экспериментальные (синия кривая с точками) и расчетные (красная кривая) распределения кратностей множественных сбоев для ИМС памяти, изготовленной по 90 нм техпроцессу. $K_d = 0,40 \times 10^{-9}$ мг/МэВ, $\Lambda_C = 0,5$ МэВ/мг/см², $a_C = 1$ мкм²

Как видно из рисунков, приближение Пуассона адекватно характеризует экспериментальные распределения.

С учетом выражений (1) и (4) получено выражение для парциальной частоты n -кратных сбоев на бит памяти R_n

$$R_n = a_C \int_0^{\infty} p_n(\Lambda) \phi(\Lambda) d\Lambda, \quad (7)$$

где $p_n(\Lambda)$ может быть получено из полного сечения $\sigma(\Lambda)$ с помощью (5) или измерено экспериментально.

Таким образом, в данном разделе предложена феноменологическая модель, которая позволяет единым образом характеризовать сечение и рассчитывать полные частоты сбоев и парциальные частоты множественных сбоев коммерческих ИМС памяти от ТЗЧ.

3. Моделирование одиночных сбоев коммерческих ИМС от протонов космического пространства

В современных коммерческих микросхемах памяти наиболее остро стоит проблема сбоев от протонов КП. Протоны имеют гораздо большие потоки, чем тяжелые ионы, и, как правило, частоты сбоев от протонов в разы превышают частоты сбоев от тяжелых ионов. Особенностью сбоев от протонов является то, что сбои происходят не от прямой ионизации первичных протонов, а от вторичных продуктов взаимодействия протонов с веществом микросхемы в окрестности чувствительной области. Разработанный автором метод моделирования сбоев от протонов основывается на том, что спектры первичных ТЗЧ и вторичных частиц взаимодействия протонов рассматриваются эквивалентными. Причем чувствительность микросхемы к первичным и вторичным частицам с заданным ЛПЭ единым образом характеризуется зависимостью $\sigma(\Lambda)$. В связи с этим полную частоту сбоев от ОЯЧ R можно выразить через $\sigma(\Lambda)$:

$$R = R_{HI} + R_P = \int_0^{\infty} \sigma(\Lambda) [\phi_{PRIM}(\Lambda) + \phi_{SEC}(\Lambda)] d\Lambda, \quad (8)$$

$\phi_{PRIM}(\Lambda)$ - дифференциальный спектр изотропного потока ТЗЧ, $\phi_{SEC}(\Lambda)$ - дифференциальный спектр вторичных частиц взаимодействия протонов с веществом микросхемы. Вычисление первого слагаемого выражения (8) R_{HI} рассмотрено в разделе 2. Расчет $\phi_{SEC}(\Lambda)$ проводится в разработанном автором инструменте физического моделирования. Данный инструмент построен на базе специализированной библиотеки Geant4 (v. 10.3). Инструмент позволяет рассчитывать $\phi_{SEC}(\Lambda)$ в тонком чувствительном слое с учетом спектра внешнего потока протонов и конфигурации слоев ИМС.

В разделе 3 рассматриваются две задачи пересчета параметров чувствительности ИМС. Первой задачей, условно называемой прямой задачей, является пересчет линейных параметров K_d и Λ_C к сечению сбоев

от протонов $\sigma_p(\varepsilon_p)$. Используя выражение (8), получено выражение для частоты сбоев от протонов R_p с энергией ε_p

$$R_p \cong K_d \phi_{SEC} [\langle \Lambda \rangle - \Lambda_c], \quad (9)$$

где ϕ_{SEC} – интегральная плотность потока вторичных частиц $\phi_{SEC} = \int \phi_{SEC}(\Lambda) d\Lambda$, $\langle \Lambda \rangle$ – «жесткость» спектра вторичных частиц, определяемая как

$$\langle \Lambda \rangle \equiv \frac{\int \Lambda \phi_{SEC}(\Lambda) d\Lambda}{\int \phi_{SEC}(\Lambda) d\Lambda}. \quad (10)$$

Преобразовав (9), получено выражение для сечения сбоев от протонов

$$\sigma_p(\varepsilon_p) = \frac{R_p}{\phi_p} = K_d \alpha(\varepsilon_p) [\langle \Lambda \rangle - \Lambda_c], \quad (11)$$

где ϕ_p – интегральная плотность потока первичных протонов, $\alpha(\varepsilon_p) = \phi_{SEC} / \phi_p$ – эффективность генерации вторичных частиц. Выражение (11) является решением прямой задачи восстановления $\sigma_p(\varepsilon_p)$ по экспериментальным данным от ТЗЧ. Решение прямой задачи верифицировано прямым сравнением с экспериментальными данными для коммерческих ИМС памяти AT68166, HM628512. Как видно из рисунка 5, расчетные кривые хорошо согласуются с экспериментальными данными.

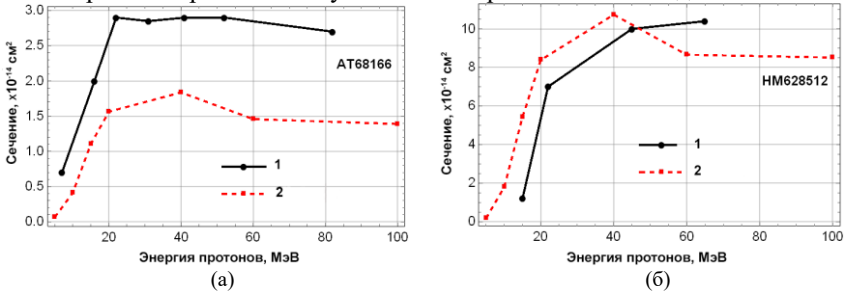


Рисунок – 5 Расчетные (пунктирные) и экспериментальные (сплошные) кривые $\sigma_p(\varepsilon_p)$ для ИС памяти AT68166 (а) и HM628512 (б)

Второй задачей, условно обозначаемой обратной задачей, является восстановления $\sigma(\Lambda)$ по экспериментальному сечению от протонов. В случае произвольной формы $\sigma(\Lambda)$ задача не имеет однозначного решения. Однако, в рамках линейной аппроксимации $\sigma(\Lambda)$, задача восстановления параметров сильно упрощается. Как правило, коммерческие микро-

схемы памяти имеют Λ_c менее 1 МэВ/мг/см². Такие малые значения Λ_c имеют экспериментальную погрешность порядка самой величины. Поэтому для решения обратной задачи можно зафиксировать Λ_c на уровне 0,5 МэВ/мг/см². Тогда, используя решение прямой задачи (11), параметр K_d может быть рассчитан как

$$K_d = \frac{\sigma_p(\varepsilon_p)}{[\langle \Lambda \rangle - \Lambda_c] \alpha(\varepsilon_p)}, \quad (12)$$

что является решением обратной задачи. Для проверки корректности (12) проведено сравнение расчетов с экспериментальными данными микросхем АТ60142F и КМ6840003. Расчетные и экспериментальные зависимости $\sigma(\Lambda)$ для данных микросхем представлены на рисунке 6.

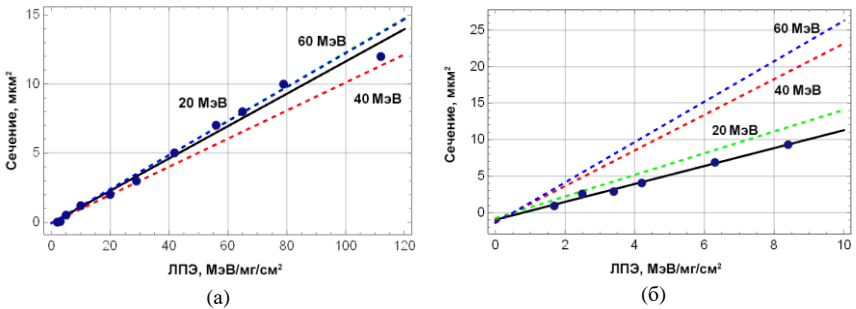


Рисунок – 6 Сравнение экспериментальной зависимости $\sigma(\Lambda)$ (точки и сплошная линия) и расчетной по данным от протонов (пунктирные линии) для энергий протонов $\varepsilon_p = 20, 40$ и 60 МэВ для ИС памяти АТ68166 (а) и КМ6840003 (б)

Как видно, из результатов сравнения, предложенное решение обратной задачи хорошо соответствует экспериментальным данным. Таким образом, феноменологический подход к описанию сбоев обобщен на протоны, что позволило разработать процедуру взаимопересчета параметров чувствительности от ТЗЧ к протонам, и наоборот.

4. Верификация предложенного метода и разработка программы PRIVET-2 расчета частот сбоев

Данный раздел диссертации посвящен верификации предложенного метода и разработке программы расчета частот сбоев PRIVET-2. Верификация проводилась для каждой процедуры расчета в отдельности путем прямого сравнения с литературными экспериментальными и полетными данными.

Во-первых, произведена проверка процедуры расчета частот сбоев от ТЗЧ сравнением с литературными полетными данными, а также с резуль-

татами расчета стандартным методом IRPP. Сравнение проводилось для полетных данных ИМС памяти HM628512 и KM684000 миссии SAC-C. Расчет частот сбоев методом IRPP сделан для трех значений параметра глубины чувствительной области $z = 0,5, 1$ и 2 мкм. Результаты сравнения полетных и расчетных частот сбоев представлены на рисунке 7.

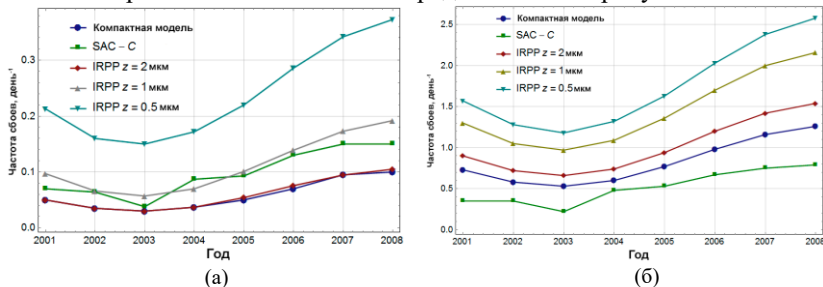


Рисунок – 7 Полетные и расчетные частоты сбоев для ИМС памяти (а) HM628512 и (б) KM684000

Как видно из рисунка 7, полученные результаты расчетов разработанной автором компактной модели не уступают в точности стандартному методу расчета IRPP. Преимуществом компактной модели перед методом IRPP является однозначность результатов расчетов частот сбоев.

Во-вторых, произведена проверка обобщенного выражения для расчета частот сбоев от ТЗЧ и протонов (1). В таблице 1 в отдельности представлены полетные и расчетные частоты сбоев от ТЗЧ R_{HI} и протонов R_P для 4 коммерческих ИМС памяти. Как видно, расчеты хорошо коррелируют с полетными данными.

Таблица 1. Сравнение полетных и расчетных частот сбоев

ИМС памяти	R_{HI} , частота сбоев от ТЗЧ (сбой/день)		R_P , частота сбоев от протонов (сбой/день)	
	Полетные данные	Расчётные значения	Полетные данные	Расчётные значения
AT68166	0,168	0,132	1,75	5,20
HM628512	0,05	0,07	1,03	2,49
KM6840003	0,35	0,73	3,59	7,43
IS62W2048	0,386	0,1	2,79	3,35

В-третьих, проведена верификация процедуры расчета парциальных частот множественных сбоев для ИМС HM628512 и KM6840003. На рисунке 8 представлены результаты сравнения расчетных и полетных парциальных частот множественных сбоев от ТЗЧ, на рисунке 9 – от протонов. Разбиение сбоев по кратности и расчет парциальных частот сбоев от ТЗЧ и протонов производились для известных зависимостей $\sigma(\Lambda)$.

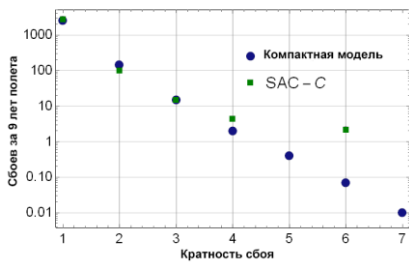
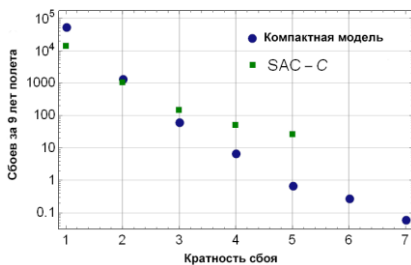


Рисунок – 8 Расчетные (точки) и полетные (квадраты) данные по количеству множественных сбоев от ТЗЧ за 9 лет для ИМС KM684000 (а) и HM628512 (б)

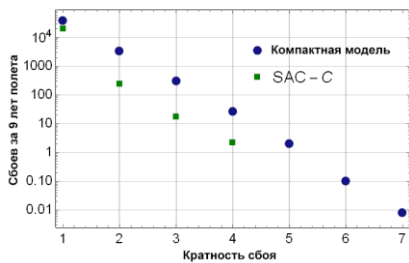
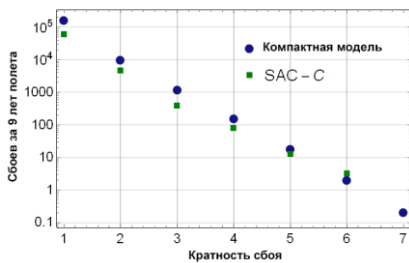


Рисунок – 9 Расчетные (точки) и полетные (квадраты) данные по количеству множественных сбоев от протонов за 9 лет для ИМС KM684000 (а) и HM628512 (б)

Из графиков видно, что, несмотря на простую процедуру расчета парциальных частот, результаты расчета хорошо согласуются с реальными полетными данными.

Предложенный в разделах 2 и 3 метод расчета частот единичных и множественных сбоев от ТЗЧ и протонов был запрограммирован на языке Си++ и выполнен в виде программы расчета PRIVET-2. Программа PRIVET-2 предназначена для расчета частот сбоев ИМС памяти на произвольной орбите

1. по прямым результатам испытаний на ТЗЧ и протонов;
 2. по одному типу экспериментальных данных (ТЗЧ или протонов).
- В частности, программа решает следующие задачи
1. Параметризация экспериментальной зависимости сечения сбоев от ЛПЭ ТЗЧ для ИМС памяти (расчет параметров K_d и Λ_C) в линейной аппроксимации;
 2. Прямая задача расчета частот сбоев от протонов по экспериментальным данным ТЗЧ;
 3. Обратная задача расчета линейных параметров K_d и Λ_C , и частот сбоев от ТЗЧ по экспериментальным данным сечения сбоев от протонов;

4. Расчет частот множественных сбоев по заданным линейным параметрам аппроксимации K_d и Λ_c , и топологической площади ячейки a_c .

На рисунке 10 изображен графический интерфейс PRIVET-2 при запуске. В диссертации приведена подробная инструкция по использованию данной программы.

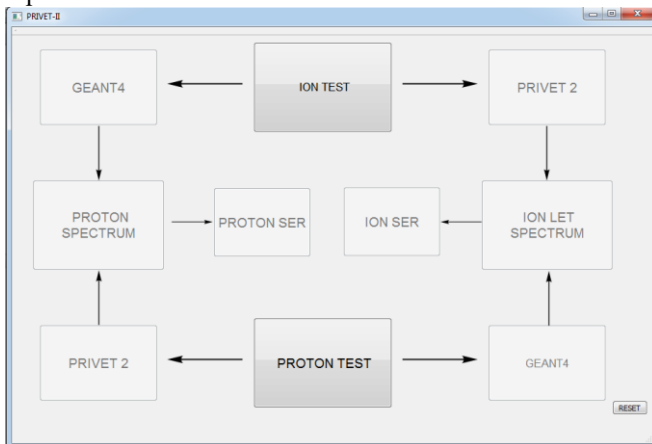


Рисунок – 10 Интерфейс программы PRIVET-2 при запуске

Программа PRIVET-2 принята к регистрации в ФИПС и внедрена на предприятие АО «НИИМА Прогресс».

Заключение

Основной научный результат диссертации заключается в разработке метода прогнозирования и создании средств расчета частот множественных сбоев коммерческих ИМС памяти в условиях воздействия ТЗЧ и протонов космического пространства, что указывает на достижение цели диссертации.

Основной теоретический результат:

На основе исследования экспериментальных данных сечения сбоев ИМС памяти разработана и верифицирована феноменологическая модель, позволяющая единым образом прогнозировать частоты множественных сбоев коммерческих ИМС памяти от ТЗЧ и протонов космического пространства.

Частные теоретические результаты:

1. Показано, что феноменологический подход и приближение единого чувствительного слоя ИМС памяти позволяет корректно и однозначно рассчитывать частоты сбоев от ТЗЧ и протонов.
2. В целях расчета парциальных частот множественных сбоев распределение вероятности Пуассона является удовлетворительным приближением распределения кратностей множественных сбоев.
3. Эквивалентность потоков первичных ТЗЧ и вторичных частиц взаимодействия протонов с веществом позволяет решить задачу пересчета параметров чувствительности коммерческих ИМС памяти от ТЗЧ к протонам, и наоборот.

Основной практический результат

Разработан программный инструмент PRIVET-2 расчета частоты сбоев коммерческих ИМС памяти на орбите по входным данным спектров ОЯЧ и сечений сбоев, полученных в ходе наземных испытаний.

Частные практические результаты диссертации заключается в следующем:

1. В предложенной компактной модели отсутствуют трудно определяемые параметры, связанные с технологическими особенностями изготовления ИМС, что позволяет повысить достоверность расчетов частоты сбоев.
2. Разработан вспомогательный Geant4-симулятор, позволяющий производить моделирование ЛПЭ-спектра вторичных частиц взаимодействия потока протонов заданного спектра и направления.
3. Предложенная процедура взаимопересчета сечений сбоев позволяет существенно сократить объем испытаний коммерческих ИМС памяти в целях расчета частот сбоев за счет выбора одного источника заряженных частиц (ускоритель ТЗЧ или протонов).

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science:

1. Zebrev G. I., Galimov A. M. Compact Modeling and Simulation of Heavy Ion Induced Soft Error Rate in Space Environment: Principles and Validation //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2017. – Т. 64. – №. 8. – С. 2129-2135.
2. Galimov A. M., Alexandrov A. V., Galimova R. M., Zebrev G. I. Monte Carlo simulation of nuclear reaction induced soft error rate in modern commercial circuits // IEEE MWENT. – 2018.
3. Zebrev G. I., Galimov A. M., Zemtsov K. S., Gorchichko M. E., Koziukov A. E., Anashin V. S. Compact modeling of soft error rate in space environment //Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), 2016 16th European Conference on. – IEEE, 2016. – С. 1-5.
4. Zemtsov K.S., A. M. Galimov, M. E. Gorchichko, I. V. Elushov, Impact of recombination on heavy ion induced single event upset cross-section //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – Т. 151. – №. 1. – С. 012040.
5. Zebrev G. I., Galimov A. M., Mrozovskaya L. V., Gorbunov M. S., Petrov K. A. Multiple Cell Upset Partitioning for Simulation of Soft Error Rates in Space Systems with Error Correcting Codes//Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), 2017 17th European Conference on. – IEEE, 2017. – С. 1-5.
6. Galimov A. M., Elushov I. V., Zebrev G. I. A simple calculation method for heavy ion induced soft error rate in space environment //International Conference on Micro-and Nano-Electronics 2016. – International Society for Optics and Photonics, 2016. – Т. 10224. – С. 1022414.
7. Zebrev G. I. Petrov A. S., Useinov R. G., Ikhsanov R. S., Ulimov V. N., Anashin V. S., Elushov I. V. Drosdetsky M. G. and Galimov A. M. Simulation of bipolar transistor degradation at various dose rates and electrical modes for high dose conditions //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2014. – Т. 61. – №. 4. – С. 1785-1790.
8. Zebrev G. I., Drosdetsky M. G., Galimov A. M. Non-equilibrium carrier capture, recombination and annealing in thick insulators and their impact on radiation hardness //Journal of Semiconductors. – 2016. – Т. 37. – №. 11. – С. 115001.

Статьи и материалы конференций

1. Галимов А.М., Компактное моделирование одиночных сбоев: прогнозирование частоты сбоев в космосе по экспериментальным данным на ускорителе тяжелых заряженных частиц // Вопросы атомной науки и техники, серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру».– 2017.– вып. 4.– С. 5-10 – Москва.
2. Галимов А.М., Мрозовская Е. В., Жиленков И. В., Галимова Р. М., Зебрёв Г. И., Параметрический анализ расчетов интенсивности сбоев в условиях космического пространства // Вопросы атомной науки и техники, серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру».– 2017.– вып. 1.– С. 26-30 – Москва.
3. Галимов А.М., Галимова Р.М., Елушов И.В., Мрозовская Е.В., Зебрёв Г.И., Программа расчета интенсивности одиночных сбоев от ТЗЧ космического пространства //Труды НИИСИ РАН.– 2017– том 7.– вып. №2.– С. 92-96.
4. Галимов А.М., Пивко О.С., Зебрёв Г.И., Экспериментальное усреднение сечения сбоев от ТЗЧ по полному телесному углу// 17-я Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника, микро- и нанoeлектроника».– 2018.– С. 31-32.
5. Галимов А.М., Александров А.В., Зебрёв Г.И., Прогнозирование частот сбоев элементов памяти с помощью Монте-Карло моделирования спектра вторичных частиц// 17-я Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника, микро- и нанoeлектроника».– 2018.– С. 29-30.
6. Галимов А.М. Модернизированная модель оценки интенсивности сбоев в условиях космического пространства // 23-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов "Микроэлектроника и информатика – 2016".– М: МИЭТ, 2016.– С. 39-40.
7. Галимов А.М., Земцов К.С., Зебрёв Г.И. // Проблемы традиционного метода прогнозирования интенсивности сбоев в условиях космического пространства. // Сборник научных трудов конференции «Стойкость – 2016».– 2017.– С. 39-40.
8. Зебрёв Г. И., Галимов А. М., Галимова Р. М., Горбунов М. С. Методы расчета частот сбоев в космосе от ТЗЧ и протонов для современных интегральных схем с системами коррекции. // Сборник научных трудов конференции «Стойкость – 2017».– 2017.– С. 39-40.

9. Зебрев Г.И., Галимов А.М. Метод расчета парциальных интенсивностей множественных сбоев основанный на ограниченном наборе данных// 16-я Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника, микро- и наноэлектроника».– 2017.– С. 1-5.
10. Галимов А.М., Метод оценки частот сбоев коммерческих микросхем памяти от тяжелых заряженных частиц по экспериментальным данным испытаний на протонах// «Микроэлектроника – 2017». Алушта.
11. Галимов А.М., Фатеев И.А. Анализ надежности и повышение архитектурной устойчивости навигационного канала слежения к одиночным радиационным эффектам // 23-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов "Микроэлектроника и информатика – 2016".– М: МИЭТ, 2016.– С. 39-40.