

ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРНОГО ЭФФЕКТА В БИС ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОДИНОЧНЫХ ЧАСТИЦ С ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Л. Л. Акатов¹, А. Н. Аверин¹, В. Г. Малинин¹,
В. В. Маркелов¹, Г. В. Милошевский², Г. К. Платонов¹

¹РНИИ «Электронстандарт», Санкт-Петербург; ²ИТМО им. А.В.Лыкова АНБ, Минск

Представлены результаты испытаний БИС на лазерной и изотопной установках и данные математического моделирования для оценки вероятности возникновения тиристорного эффекта в БИС в условиях космического пространства. Разработана схема защиты БИС от катастрофического отказа при тиристорном эффекте.

В условиях космического пространства (КП) линейные потери энергии (ЛПЭ) тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) в кристаллах БИС, находящихся на борту космических аппаратов (КА) могут достигать величины $100 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$. В лабораторных условиях эти величины ЛПЭ ТЗЧ возможно получить на ускорителях ионов, однако, эти испытания требуют значительных материальных и финансовых затрат. Поэтому моделирование воздействия высокоэнергетичного ионизирующего излучения КП на БИС по тиристорному эффекту (ТЭ) проводятся с помощью излучения изотопа Cf^{252} , который дает точную картину взаимодействия мягкой компоненты спектра ТЗЧ с БИС, и импульсного лазерного излучения, которое позволяет определять возможность возникновения ТЭ в БИС для частиц с максимально возможным ЛПЭ.

Величины ЛПЭ падающих частиц на поверхности кристалла и на любой заданной глубине рассчитываются с помощью разработанного физико-математического программного комплекса «MONSOL» для трехмерного моделирования взаимодействия проникающих излучений со сложными слоистыми структурами.

Этот комплекс позволяет рассчитывать пространственные распределения поглощенной энергии, точечных и ядерных дефектов в мишенях, энергетические и угловые спектры прошедших и отраженных частиц, которые могут быть генерированы падающими фотонами, электронами, позитронами, протонами, нейтронами и ионами, взаимодействующими со сложными слоистыми структурами конструкции БИС и защиты. Падающие частицы могут

иметь произвольный спектр с энергией от 1 кэВ до 1 ГэВ. Первичные частицы в результате процессов столкновения в мишени генерируют вторичные частицы, при этом происходит преобразование энергии и происходит рождение новых вторичных частиц, которые учитываются в расчетах. Мишень состоит из ячеек. Ячейки представляют собой параллелепипеды, размер которых может быть произвольным от 0.1 мкм до 100 км. Ячейки состоят из чистых атомов или их сплавов. Атомы расположены по пространству равномерно (вещество ячеек является поликристаллом).

Учитываются следующие физические процессы взаимодействия электронов и позитронов с веществом: упругое рассеяние на ядрах, электронах и позитронах, энергетическое преобразование, возникающее при возбуждении, ионизации и аннигиляции. Фотопоглощение, эффект Комптона и рождение электрон-позитронных пар учитываются при рассмотрении фотонов. Для нейтронов рассчитываются процессы упругого (оптическая модель) и неупругого рассеяния. Упругое рассеяние на электронах и ядрах, ионизация и возбуждение вещества рассматриваются для ионов. Для процессов взаимодействия нейтронов, протонов и альфа-частиц с атомами мишени рассчитываются ядерные реакции по каскадной и испарительной теориям.

На рисунке 1 представлены результаты расчетов ЛПЭ осколка Pd с энергией 102.5 МэВ, вылетающего из изотопного источника Cf^{252} , в кремнии в зависимости от давления воздуха в 50 мм слое, расположенном между источником и кристаллом кремния.

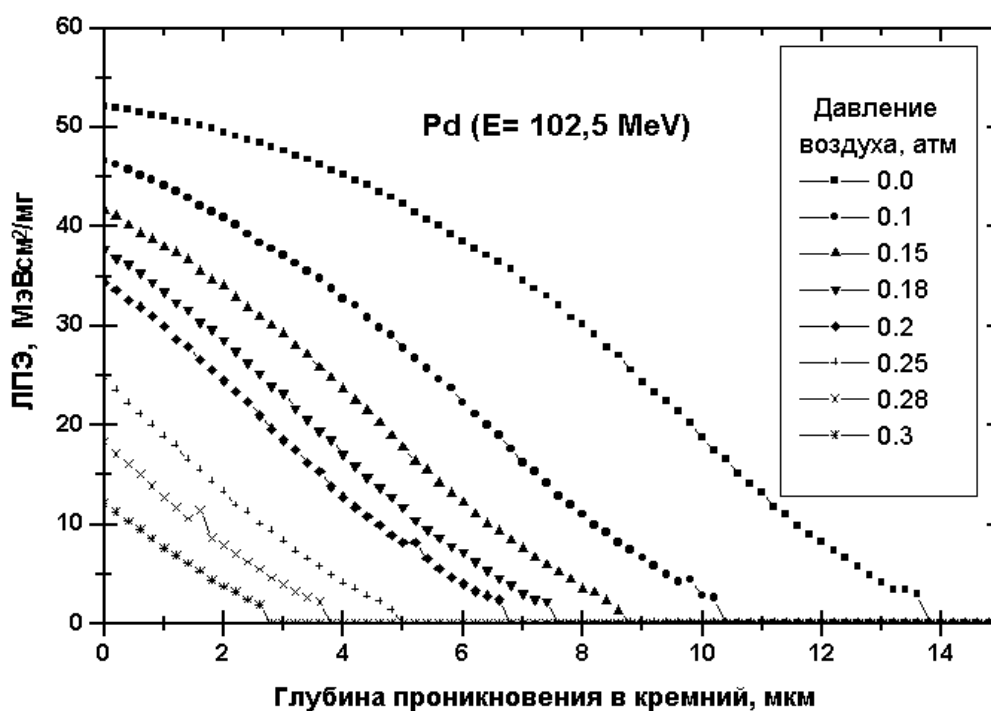


Рис. 1 Профиль ЛПЭ осколка Pd ($E=102.5$ MeV) в кремнии в зависимости от глубины проникновения при различном давлении воздуха в 50 мм слое, расположенном между Cf^{252} и кремнием.

Радиоизотопная вакуумная установка с изотопом Cf^{252} , имеющим активность порядка 50 кБк, обеспечивает проведение испытаний БИС в диапазоне давлений от атмосферного до 10^{-3} мм рт. ст.. Расстояние от источника излучения до БИС меняется от 5 до 250 мм, углы падения осколков Cf^{252} на БИС меняются от 0° до 80° . Схема измерения параметров ТЭ БИС с использованием изотопного источника приведена на рисунке 2.

ИС включается в статическом режиме по ТУ и помещается в вакуумную камеру на заданном расстоянии от источника. Ток потребления I_{cc} регистрируется с помощью резистора $R_{cc} = 1.0$ Ом. Импульс тока потребления во время включения ТЭ обеспечивается емкостью $C=1 - 5$ мкф. Релаксатор отключает источник питания от БИС и закорачивает емкость C во время ТЭ. Обзорный осциллограф С1-99 используется также в качестве интегрального дискриминатора для запуска запоминающих осциллографов С8-14, С8-17, релаксатора и частотомера ЧЗ-32, используемого в качестве счетчика числа ТЭ. Генератор Г5-63 используется при настройке измерительных трактов и для восстановления готовности С8-17 при многократных измерениях. С8-14 регистрирует передние фронты импульсов I_{cc} и U_o . С8-17 регистрирует задние фронты импульсов I_{cc} и спада напряжения питания U_{cc} , что необходимо для контроля и проверки параметров ТЭ. Форвакуумный насос и манометр служат для поддержания и измерения необходимого давления воздуха в камере при измерениях пороговых значений ЛПЭ. Эта схема обеспечивает измерение и регистрацию параметров ТЭ в БИС при частоте его возникновения 0.01 – 50 1/час, что типично для большинства испытываемых БИС.

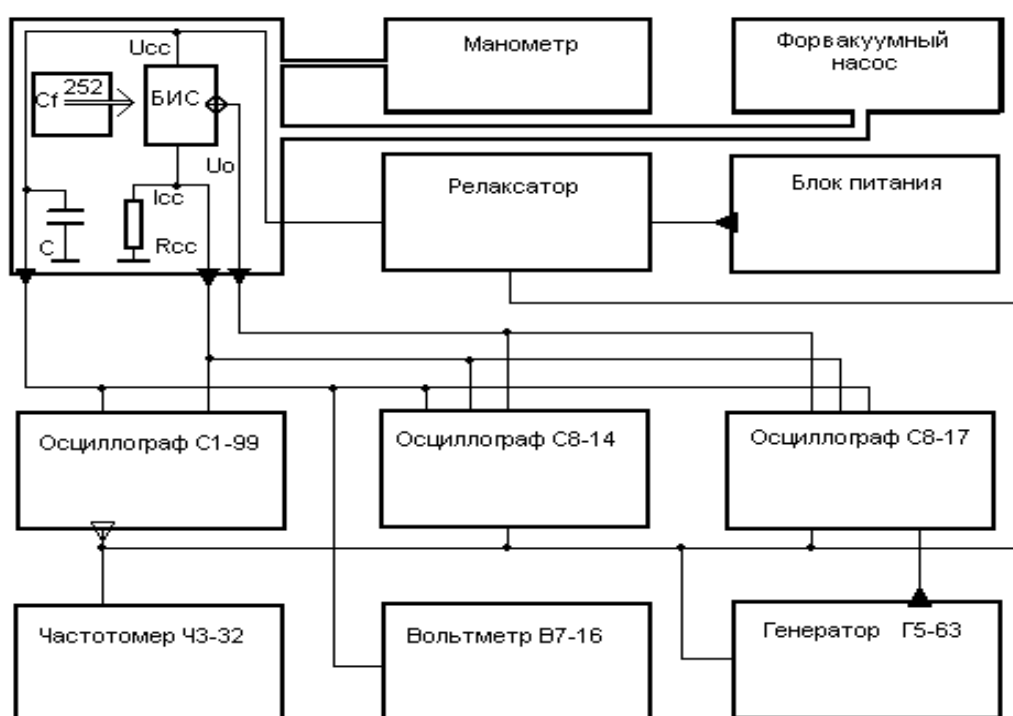


Рис. 2 Схема измерения параметров ТЭ БИС с использованием изотопного источника.

Для тестирования тиристорных структур с глубинами залегания больше 10 мкм или требующих пороговую ЛПЭ больше, чем $40 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$, применяется лазерная установка [1]. Схема лазерной установки приведена на рис.3. На этом рисунке тонкой двойной линией показаны лазерные лучи, тонкая одинарная линия со стрелками и кружочком показывает электрические соединения приборов, выполненные радиочастотным кабелем. Цифрами обозначены следующие узлы: 1- поворотное зеркало; 2-поворотное выдвижное зеркало, переключающее между острой фокусировкой лазерного луча и однородной засветкой кристалла ИС; 3 - набор калиброванных нейтральных светофильтров; 4,5 - 10% поворотные зеркала; 6-гомогенизатор, предназначенный для создания равномерной плотности потока лазерного излучения (ЛИ) на площади $5 \times 5 \text{ мм}^2$, 7- микроскоп, позволяющий фокусировать лазерное излучение в область диаметром 1.5 - 5 мкм в исследуемое место на поверхности кристалла ИС. Излучение He-Ne лазера ЛГН-207 является юстировочным. Импульсное излучение YAG:Nd лазера на длине волны 1.06 мкм, длительностью 7 нс, с энергией до 0.2 Дж расщепляется поворотными зеркалами 4 и 5 и измеряется калориметром ИКТ-1М, временная форма импульса детектируется фотоэлементом ФК-39 и регистрируется осциллографом С8-14, который регистрирует фототок, возникающий в ИС при воздействии на него ЛИ. Осциллограф С8-17 регистрирует ток потребления и напряжение на ИС при воздействии ЛИ, частотомер ЧЗ-32 регистрирует число ТЭ возникающих в ИС.

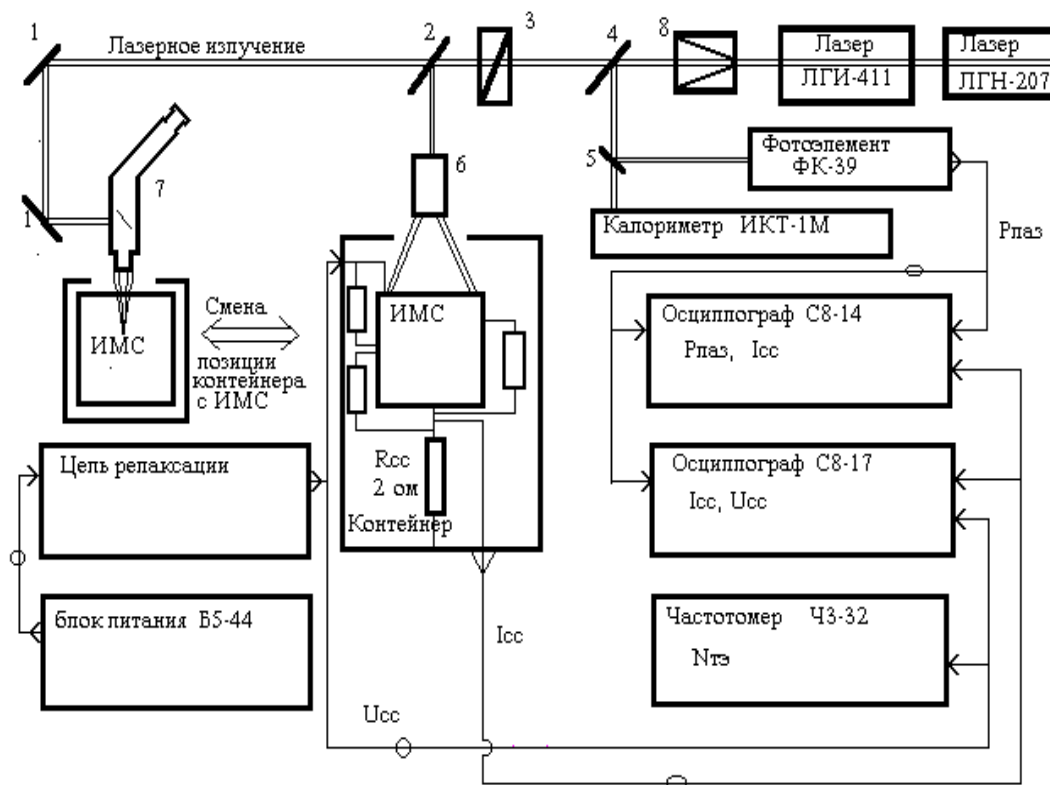


Рис 3. Схема лазерной установки для исследования ТЭ

Испытания БИС на лазерной установке проводят для определения пороговых ЛПЭ высокоэнергетичной частицы, места и площади возникновения ТЭ. Связь между пороговой энергией $W_{\text{ЛПЭ}}$ [пДж] для лазерного пучка и пороговой энергией $E_{\text{ЛПЭ}}$ [МэВ·см²/мг] для высокоэнергетичной частицы находят по формуле

$$E_{\text{ЛПЭ}} = 0.043 W_{\text{ЛПЭ}},$$

которая учитывает коэффициент поглощения (для кремния $k=10\text{см}^{-1}$ при 300 К на длине волны 1.06 мкм), коэффициент пропускания пассивирующих слоев $\text{SiO}_2 \sim 0.6$, отношение энергии, идущей на образование одной электрон - дырочной пары при воздействии ионов, к энергии, идущей на ее образование при воздействии оптического фотона (для кремния $3.6\text{эВ}/1.17\text{эВ}=3.08$) [2].

Возможность использования импульса лазерного излучения сфокусированного в 1.5 - 5 мкм длительностью 7 нс для моделирования воздействия частицы с высокой энергией на кремниевую БИС по ТЭ обосновывается теоретически тем, что задержка импульса тиристорного тока превышает 35 нс [1] и за это время длина диффузии превышает 10 мкм, и экспериментально - совпадением результатов определения пороговой ЛПЭ по изотопным и лазерным экспериментам.

Оснастка для исследования возникновения ТЭ в БИС состоит из схемы задания статических режимов работы БИС по ТУ, контрольно-измерительных приборов, обеспечивающих измерение воздействующих излучений и параметров БИС до, во время и после ТЭ, и схемы защиты БИС от катастрофического отказа из-за ТЭ. Эта схема может быть использована для защиты БИС от ТЭ в РЭА на борту космических аппаратов.

На рисунках 4 и 5, представленных ниже, показаны некоторые типовые осциллограммы $I_{\text{сэ}}$ ТЭ БИС.

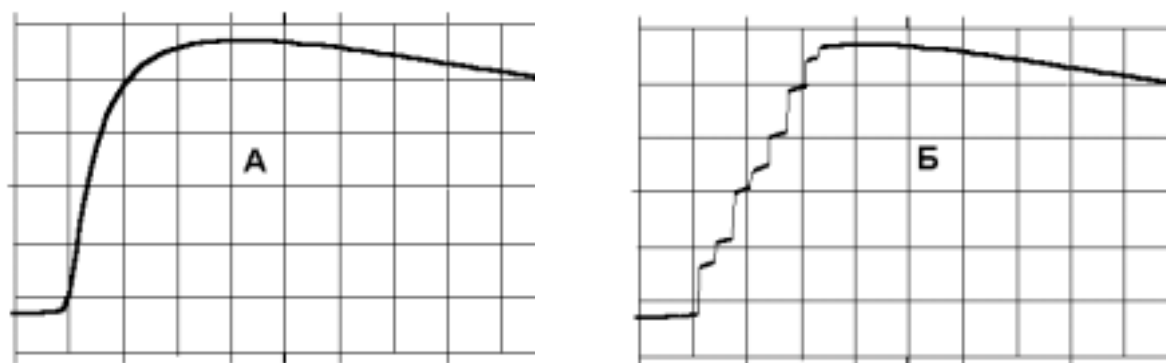


Рис. 4. Примеры осциллограмм передних фронтов импульсов ТЭ в БИС при воздействии лазерным (А) и изотопным (Б) излучениями

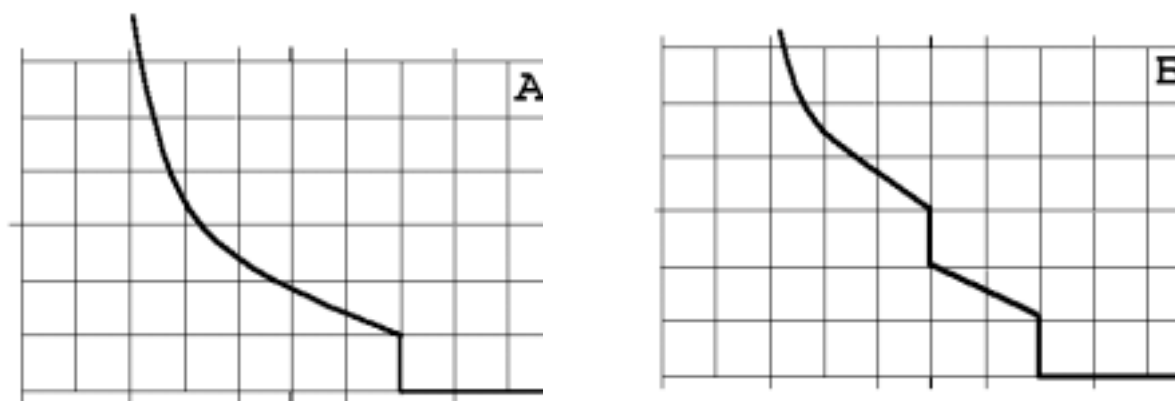


Рис. 5. Варианты осциллограмм задних фронтов импульсов ТЭ в БИС 1515ХМ1- (А) и 537РУ6 - (Б)

Анализ полученных осциллограмм тиристорных токов при лазерном и изотопном возбуждении выявил следующее:

- Длительность фронта нарастания I_{cc} и величины пороговых токов и напряжений удержания ТЭ I_h и U_h БИС не зависит от источника возбуждения.
- В БИС могут присутствовать несколько тиристорных структур с разными электрическими и пространственными характеристиками, что проявляется в передних и задних фронтах импульса I_{cc} .
- Лазерное излучение сфокусированное в область диаметром 1.5 – 5 мкм длительностью 7 нс достаточно хорошо моделирует ТЭ в БИС при воздействии ТЗЧ.
- Найдено одно отличие воздействия ТЗЧ и лазерного излучения, заключающееся, по-видимому, в том, что при лазерном возбуждении все возможные тиристорные структуры включаются одновременно, а при возбуждении ТЗЧ они включаются последовательно (см. рис.4).

Исследование ТЭ в БИС ОЗУ показало, что наиболее чувствительные элементы находятся в области дешифраторов, порог возникновения ТЭ в области ячеек памяти на порядок больше. Кроме того, обнаружено, что под воздействием излучения Cr^{252} в БИС могут возникать импульсы ионизационного тока длительностью ~ 10 мкс с большой амплитудой, сравнимой с амплитудой импульсов тиристорного тока, но ТЭ при этом не возникает (в качестве альтернативы этому выводу можно предположить, что в БИС включается тиристор с аномально высоким напряжением удержания $V_h > 4.5$ В, который гасится при снижении напряжения питания на этом пороге. Однако экспериментально подтвердить эти предположения пока не удалось). Поэтому при экспериментальной оценке вероятности возникновения ТЭ в ИС необходимо контролировать не только амплитудные значения токовых импульсов, но и их форму.

На рисунке 6 представлена зависимость частоты возникновения ТЭ для БИС 1515ХМ1 в условиях КП от толщины защиты. Эта зависимость получена с помощью разработанной программы «SEUPSET». на основании экспериментально измеренных пороговой ЛПЭ ТЭ = 39 МэВ·см²/мг, сечения ТЭ $\sigma = 4 \cdot 10^{-4}$ см²/ИС и данных о спектрах ЛПЭ ТЗЧ на орбите 500 км с наклоном 51.6° во время максимальной солнечной вспышки - экстремальная радиационная обстановка (ЭРО) и минимальной солнечной активности (МСА)

Пороговая ЛПЭ ТЭ измерена на лазерной установке. На изотопной установке получено сечение ТЭ, а величина ЛПЭ осколков Cf²⁵² на глубине 5 мкм от поверхности кристалла БИС, рассчитывалась по программе «MONSOL» (см. Рис.1).

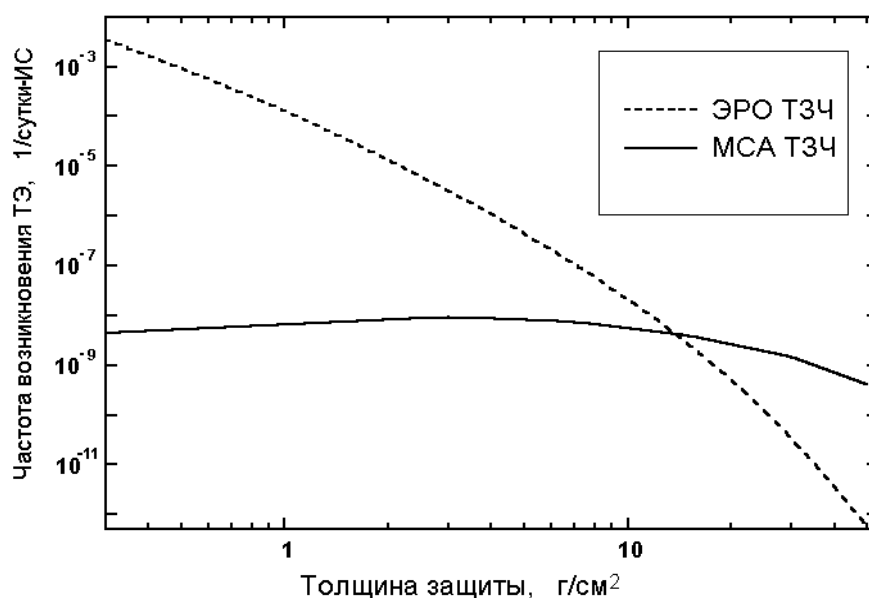


Рисунок 6. Зависимость частоты возникновения ТЭ в БИС 1515ХМ1 от толщины защиты на орбите 500 км с наклоном 51.6° во время экстремальной радиационной обстановки (ЭРО) и минимальной солнечной активности (МСА)

Таким образом представленный набор экспериментальных установок, физико-математических моделей, методик испытания и методов расчетов позволяет получать данные, необходимые для оценки частоты возникновения ТЭ в БИС в условиях КП и расчета необходимой защиты.

Литература

1. Н. Johnston et al. IEEE NS-37,(1990), N 6, p. 1886-1893; NS-43,(1996), N 2, p.505- 521.
2. Н. В. Кузнецов и др. «Методика оценки интенсивности одиночных сбоев интегральных микросхем при воздействии тяжелых ионов КП», НИЯФ МГУ, 1996 г.