

Оценка и прогнозирование стойкости изделий микроэлектроники к радиационному воздействию космического пространства

А.И.Чумаков

НИЯУ МИФИ «МИФИ»,

ОАО «ЭНПО СПЭЛС»

г. Москва

Aichum@spels.ru



План доклада

- Введение
- Радиационные факторы
- Структурные повреждения
- Дозовые эффекты
- Локальные радиационные эффекты
- Методы экспериментальных исследований
- Заключение

Общая характеристика и оценка состояния вопроса

- Отказы и функциональные сбои радиоэлектронной аппаратуры КА в значительной степени определяются радиационными эффектами в современной ЭКБ
- Наиболее радиационно-критичная ЭКБ РЭА КА – изделия микроэлектроники, твердотельные СВЧ и оптоэлектроника
- Доминирующие механизмы отказов – дозовые и одиночные
- Научно-методическое обеспечение требует постоянной верификации в реальных условиях натурального эксперимента
- Проблема применения ЭКБ с критически низким уровнем радиационной стойкости
- Отсутствует методическое обеспечение и рекомендации по проектированию РЭА КА с учетом всей совокупности возможных радиационных эффектов

Актуальность радиационных эффектов

- По зарубежным данным общее количество сбоев и отказов РЭА КА из-за радиационных факторов составляет 35...40%, из них 2/3 приходится на эффекты от воздействия ВЭП и ТЗЧ
- В связи с переходом на открытые платформы и увеличением САС значительно снижается эффективность применения конструкционной защиты
- В РФ в связи с применением промышленных (несертифицированных) ИС регулярно имеют отказы и сбои РЭА КА из-за радиационных факторов («Персона», «Глонасс» и т.п.)
- Несогласованность нормативных документов по линии МО, Минпромторга, Роскосмоса и ГК «Росатом»

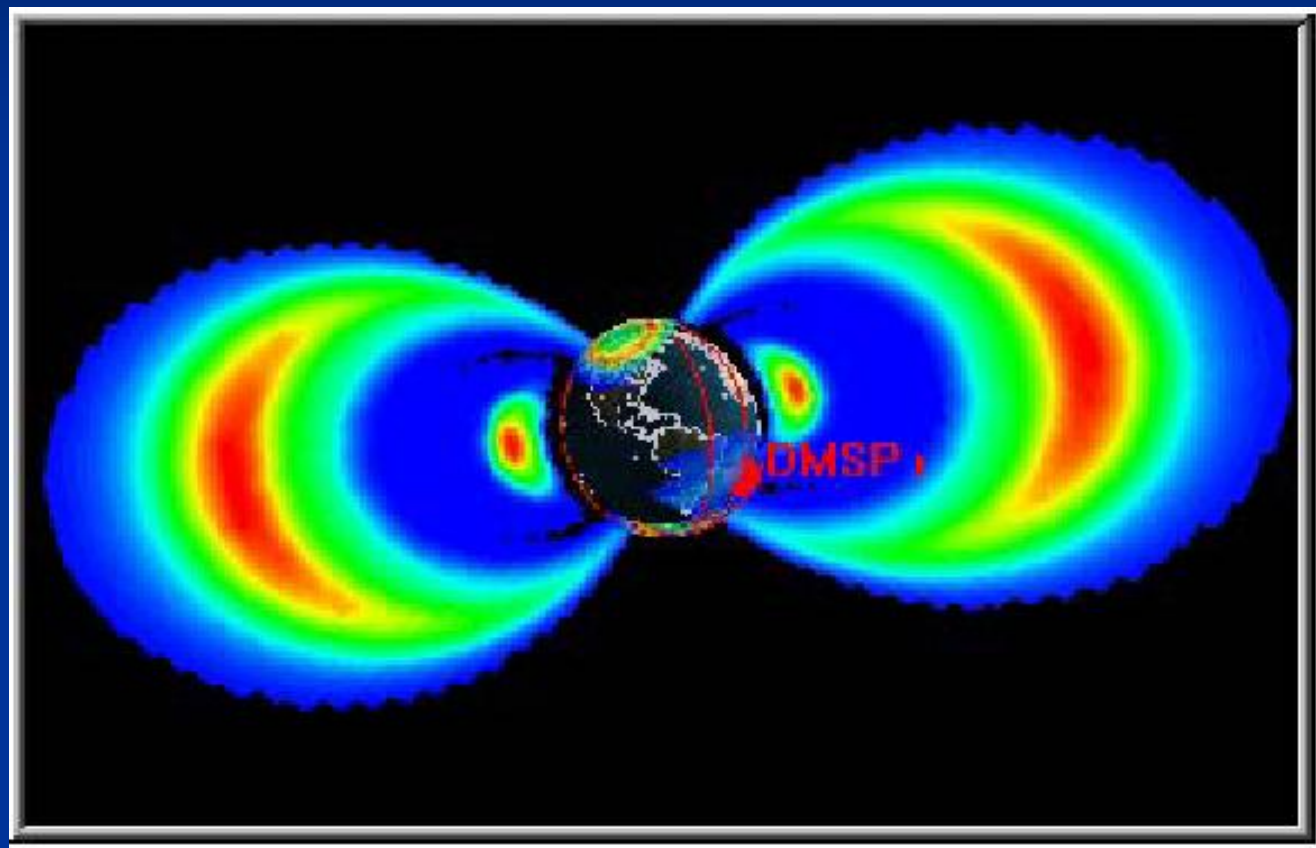
Радиационные факторы

Радиационные пояса Земли

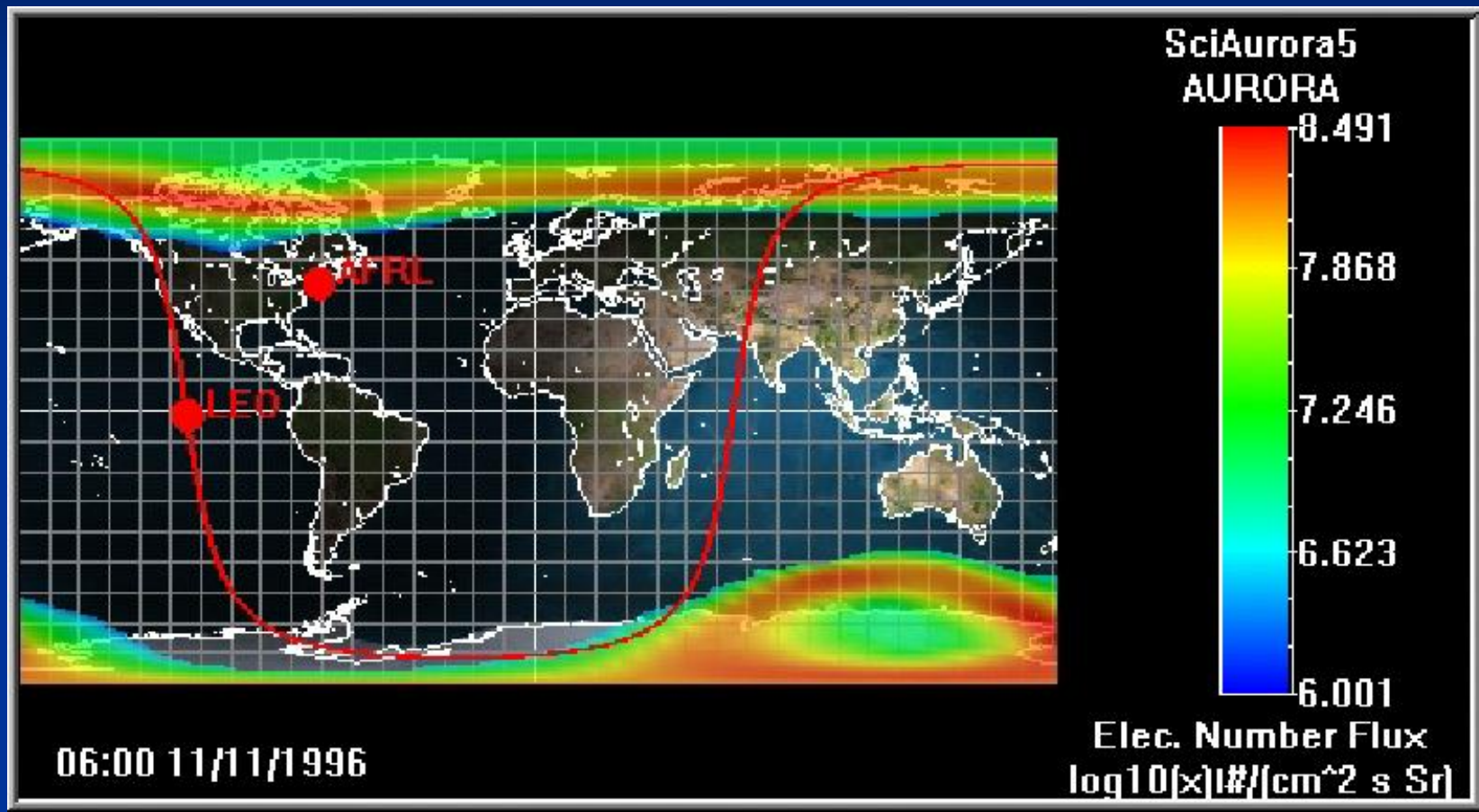
- Причина – захват магнитным полем Земли электронов и протонов
- Движение – по винтовой орбите меж полюсами
- Внешний и внутренний радиационные пояса
- Использование специальных координат L-V

Внешний вид РПЗ

- Макс. уровни у полюсов Земли
- Внутри – протоны
- Вне - электроны



Типовая траектория КА



Солнечные космические лучи СКЛ

- Вспышки на солнце – поток ядерных частиц от этой вспышки попадает в магнитосферу
- Максимум – в эпоху солнечной активности
- Процесс вероятностный
- Для больших вспышек доза может быть до 1 крад
- Экранирование магнитным полем на низких орбитах

Классификация вспышек

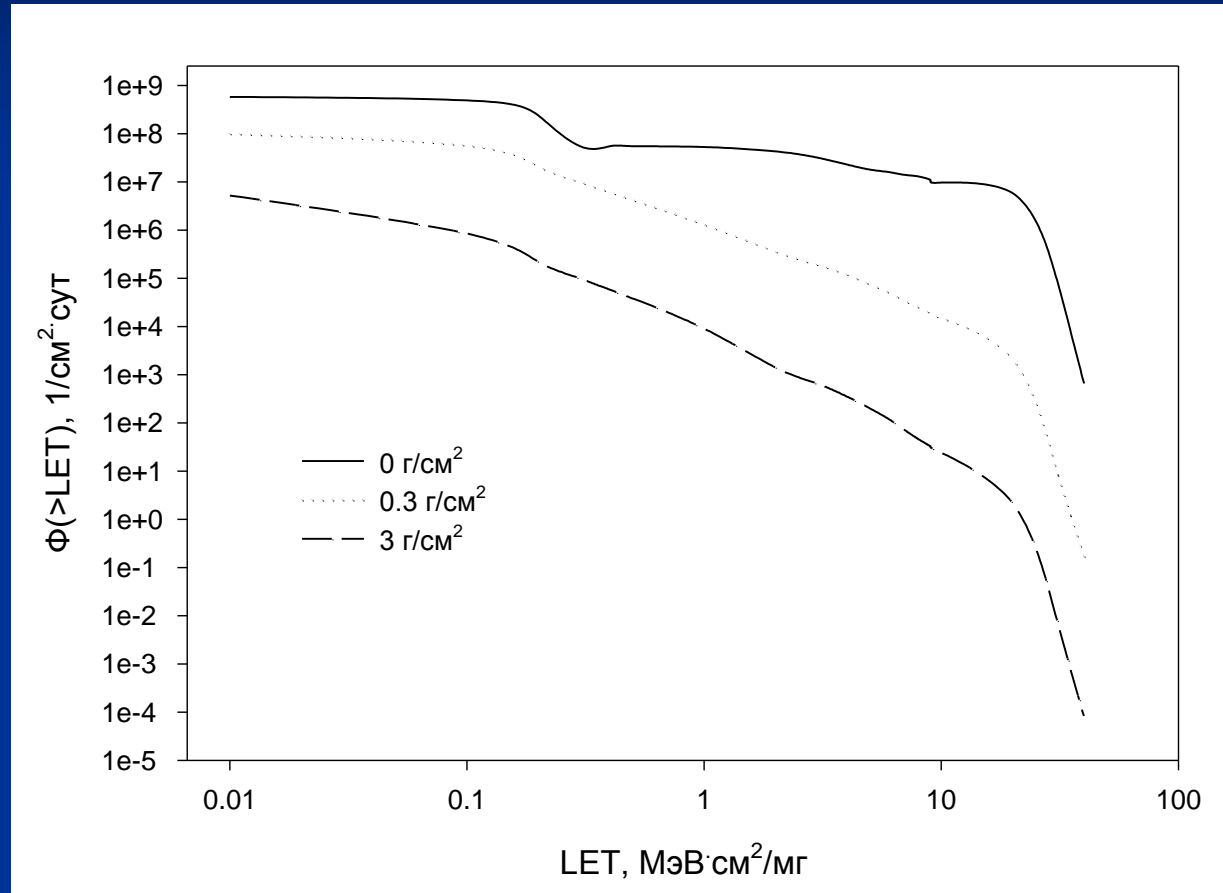
Поток протонов с энергией > 30 МэВ

- $>10^5$ протон/см² - малое событие (S);
- $>10^6$ протон/см²- среднее событие (M);
- $>10^7$ протон/см²- большое событие (L);
- $>10^8$ протон/см²- очень большое событие (VL);
- $>10^9$ протон/см²- экстремально большое событие (EL).

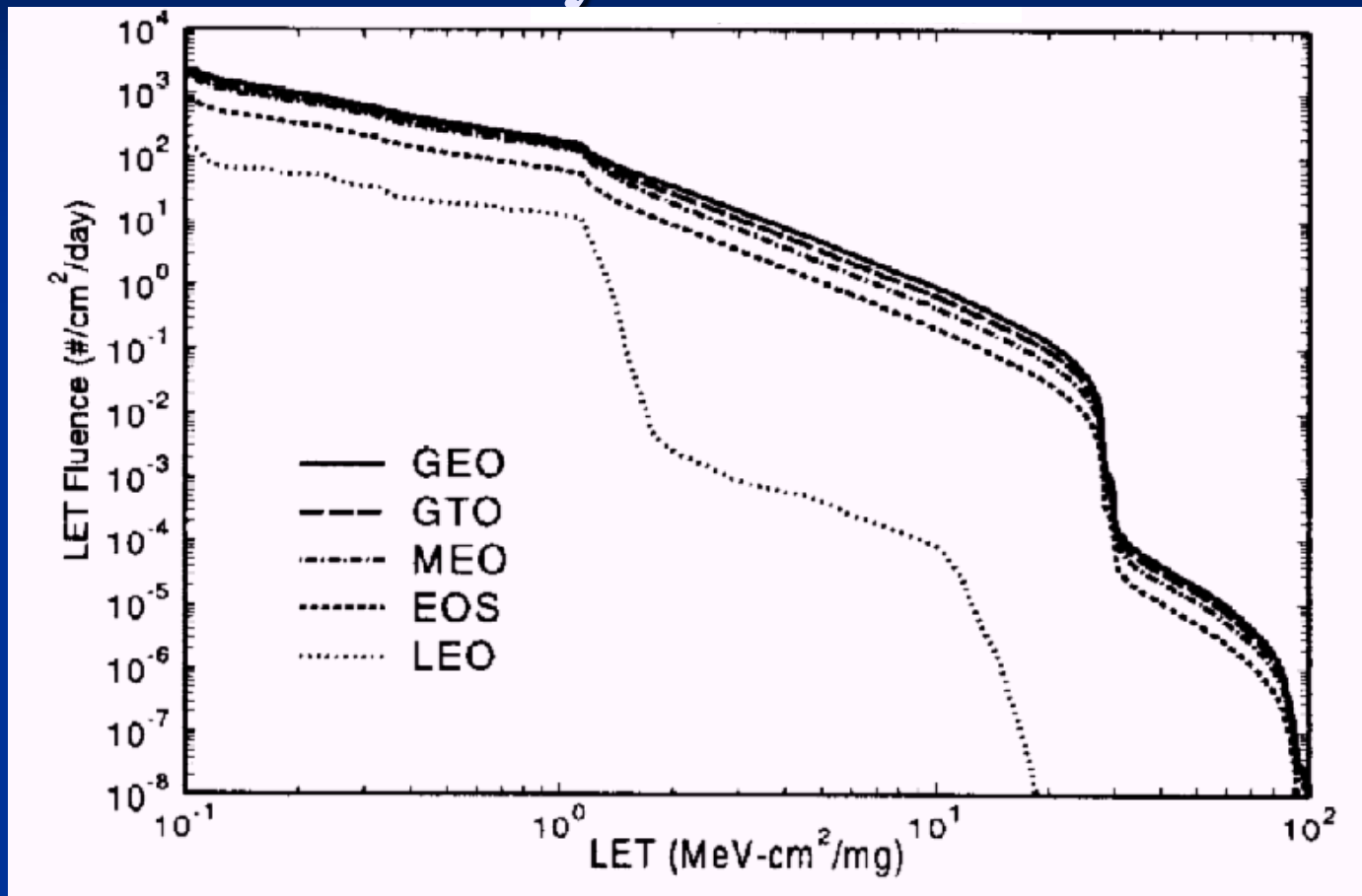
Количество солнечных вспышек за три последних солнечных цикла

Группа	Цикл 20	Цикл 21	Цикл 22
E _L	1	0	8
V _L	5	9	5
L	23	18	21
M	14	24	24
S	1	0	20
Итого	44	51	78

В СКЛ присутствуют ТЗЧ



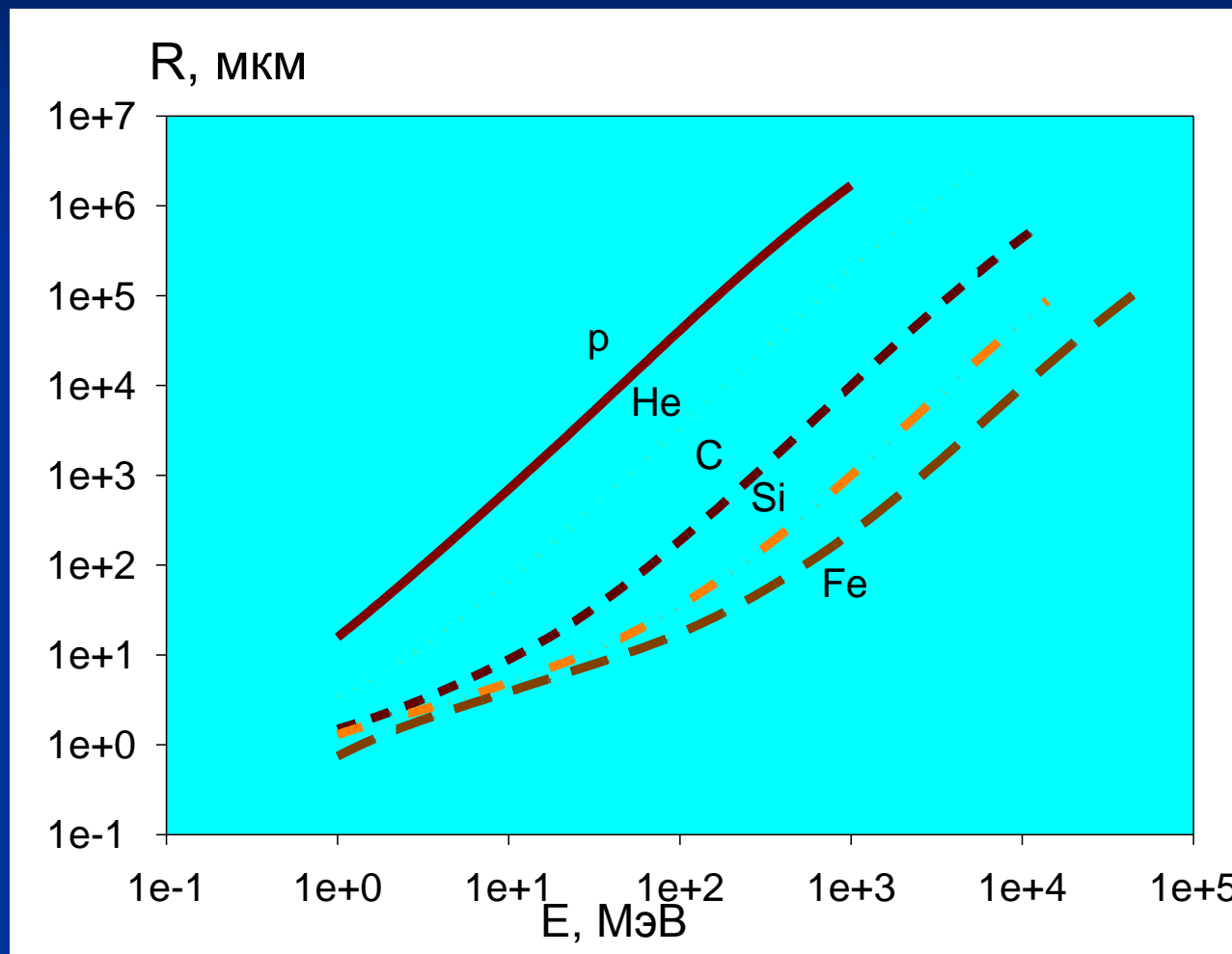
Галактические космические лучи ГКЛ



Взаимодействие ИИ с веществом

- Ионизационные потери $(dE/dx)_{\text{ион}} = LET$
($> 90\%$ от суммарных потерь заряженных частиц)
- Упругое рассеяние на ядрах
- Ядерные реакции (для протонов с энергией больше 15 МэВ)

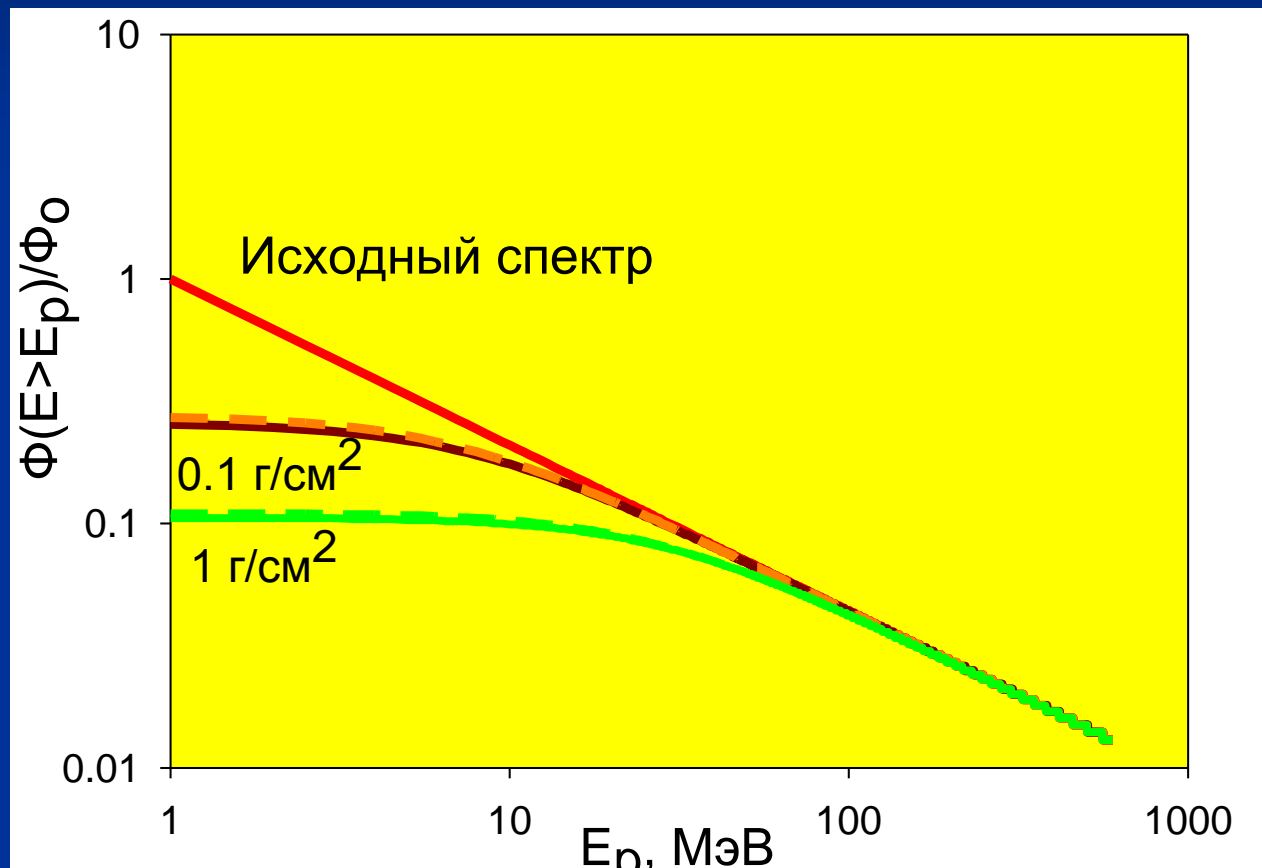
Пробеги заряженных частиц в кремнии



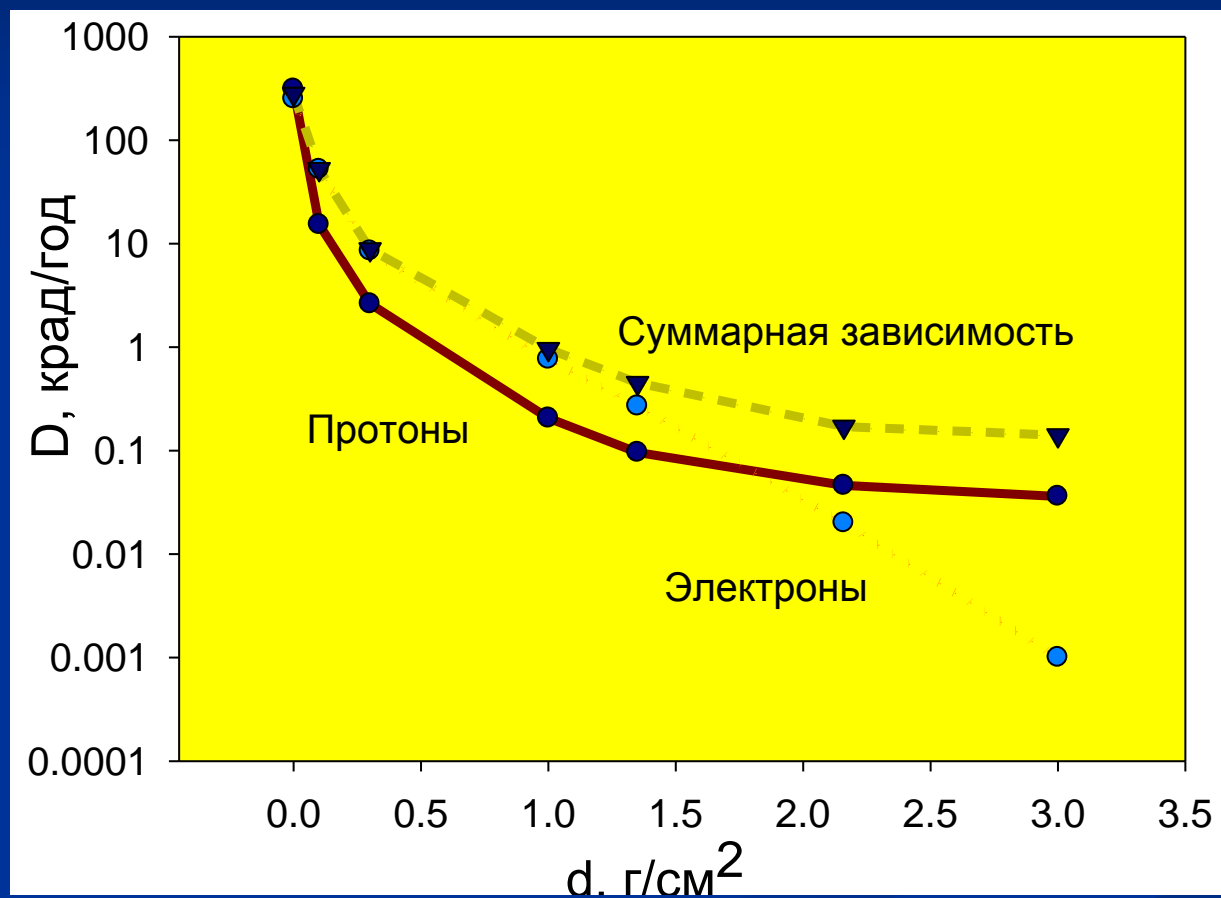
Влияние защиты

- Электроны не проходят слой более 3 г/см^2
- Используются модели сферической и плоской защиты
- Для внутренних элементов – сфера
- Для ИС около поверхности – плоскость
- На высоких орбитах – доза за счет СКЛ

Трансформация нормированного интегрального спектра протонов за защитой 0.1 и 1 г/см²



Расчетные значения поглощенных доз от электронов и протонов РПЗ

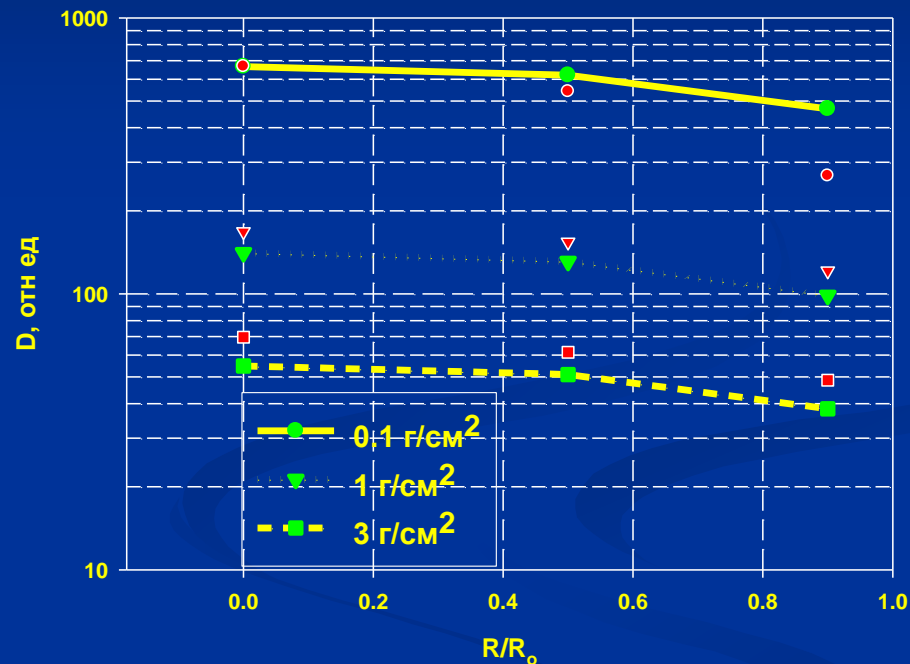


Проблема расчетных оценок радиационной обстановки

Модель космоса – основа модели США типа AP-8 и AE-8

Расчетные оценки внутренней радиационной обстановки базируются на модели сферы или плоскости

Широкое распространение неverifiedированного ПО



Расчет дозы от протонов внутри сферы разной толщины

Структурные повреждения

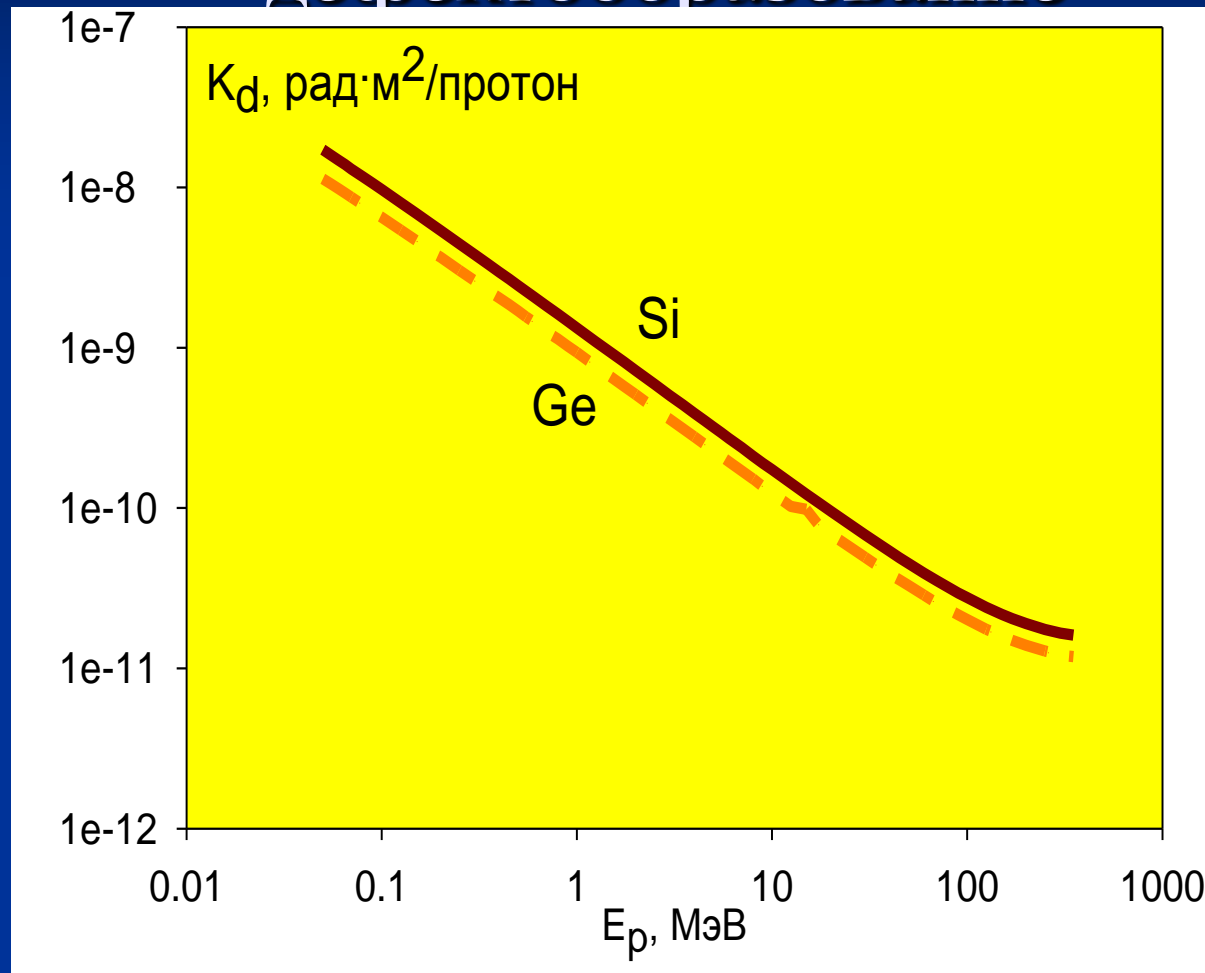
Образование точечных радиационных дефектов и разупорядоченных областей

- - увеличение скорости рекомбинации;
- - захват основных носителей заряда;
- - уменьшение подвижности.

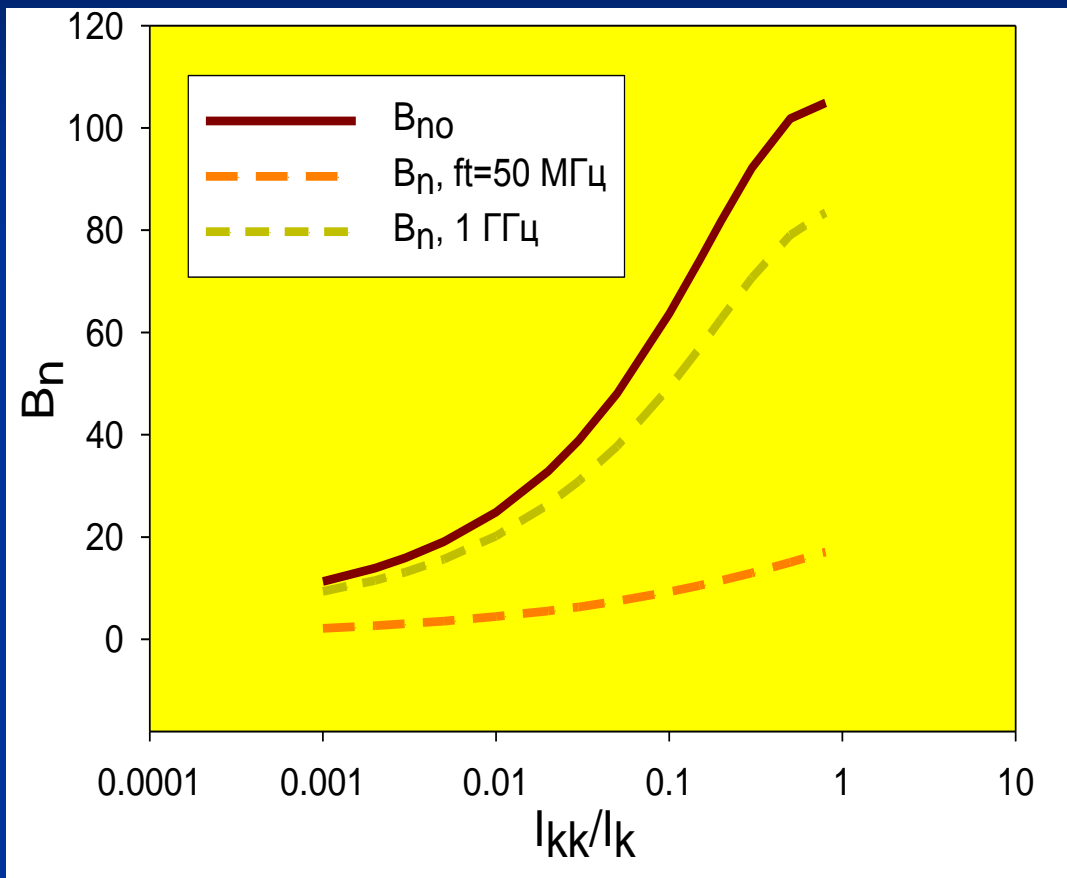
Стойкость характеризуется флюенсом нейтронов
нейтрон/см²

Типовые уровни $10^{13} \dots 10^{15}$ нейтрон/см²

Значения энергии, затрачиваемой протонами в кремнии и германии на дефектообразование



Биполярный транзистор



Упрощенная модель:

$$(1/B_n) \approx$$

$$A \cdot (1 + P_{e^x_e}/S_e) K_{\tau} \cdot \Phi(I_{kk}/I_k) (1/n) / t_{np}$$

Поверхностные радиационные эффекты

- первичная рекомбинация
- дисперсионный перенос дырок через окисел
- захват и отжиг дырок на уровни ловушек
- образование поверхностных состояний

Стойкость характеризуется в рад (изредка в Р)

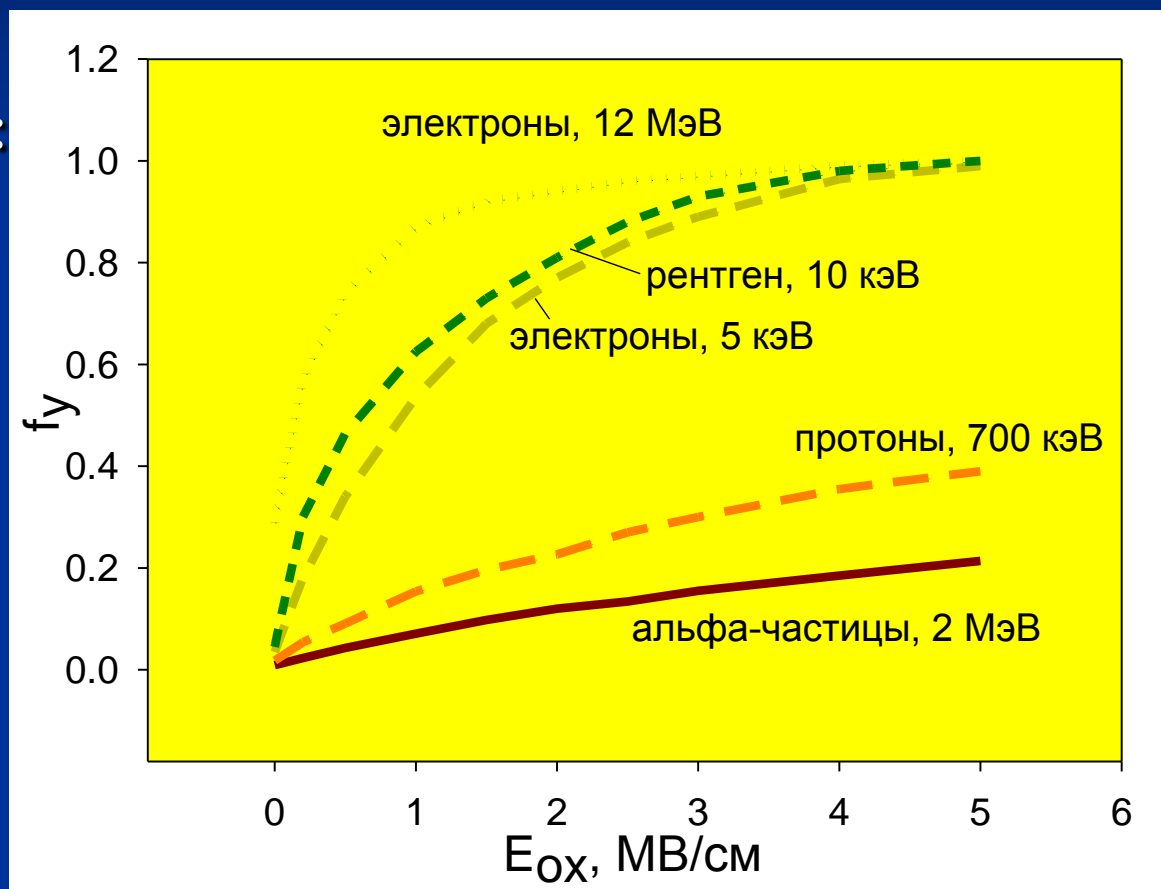
Типовые уровни 10...100 крад

Первичная рекомбинация

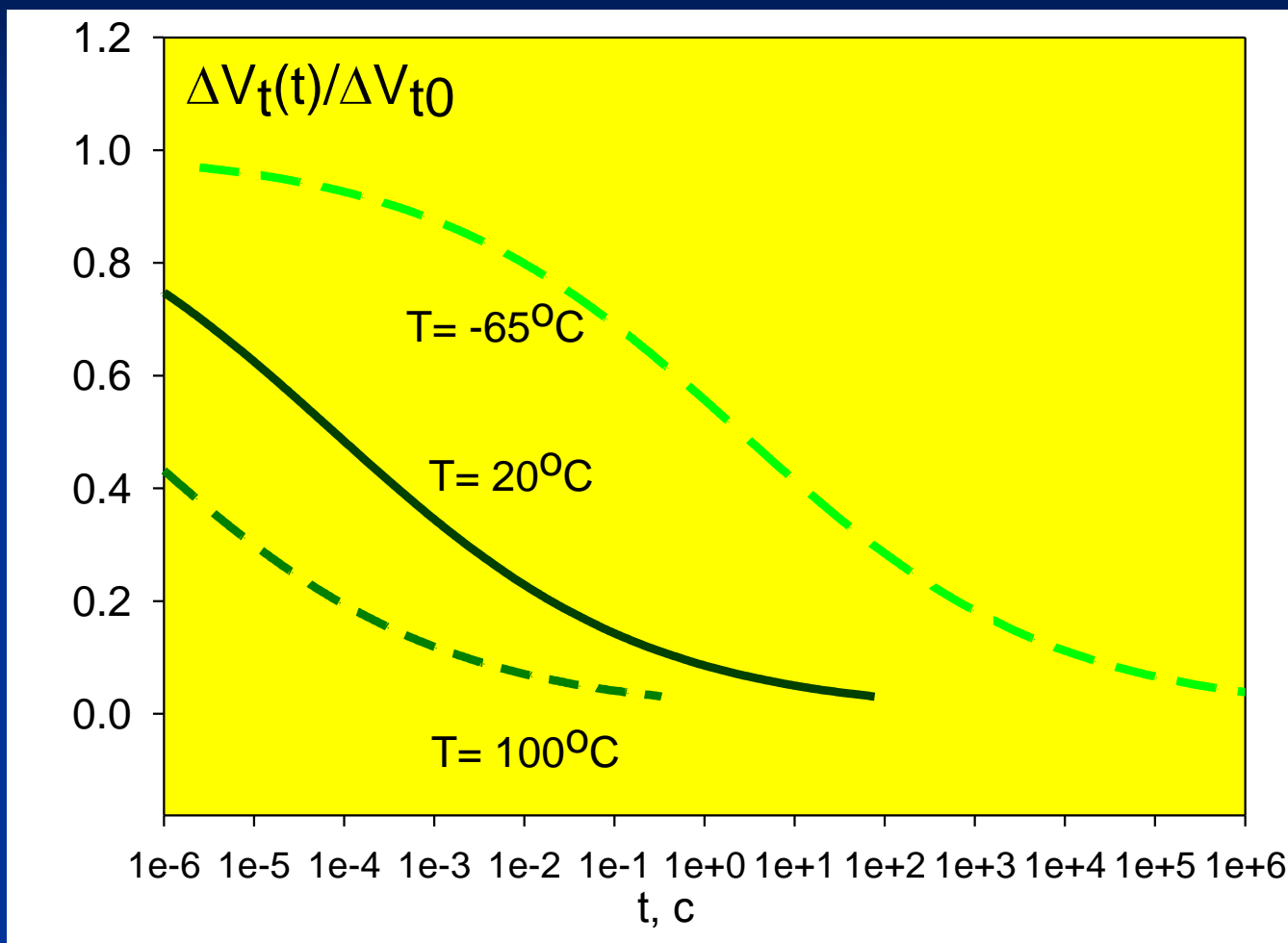
Понятие

эффективной дозы:

$$D_{ef} = f_y(E_{ох}, LET) \cdot D$$

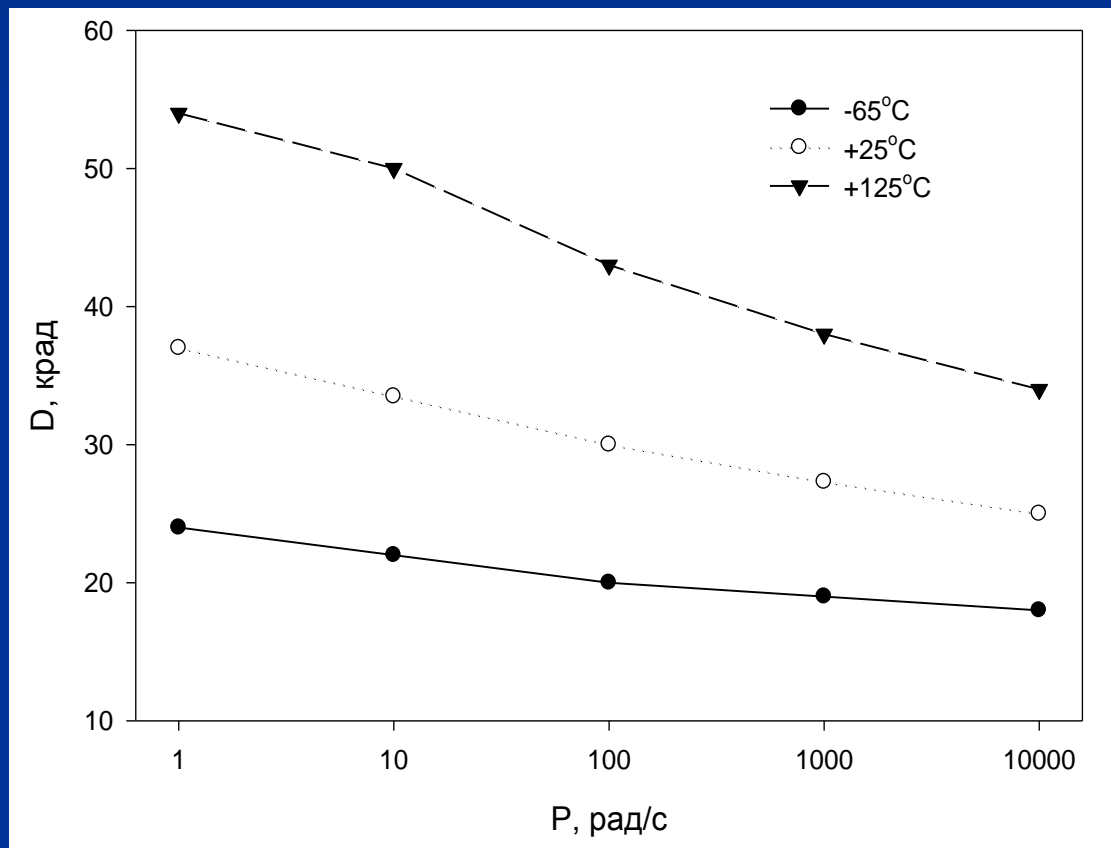


Дисперсионный перенос



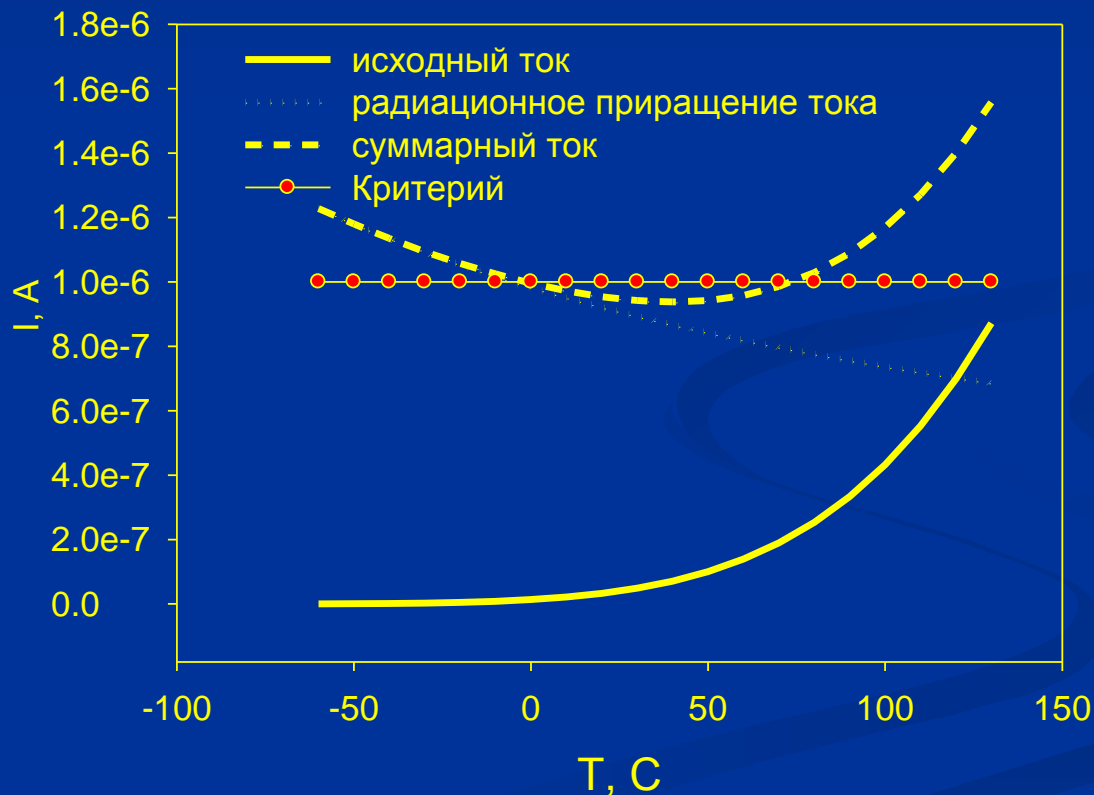
Пример оценки

Расчетные зависимости изменения уровня стойкости от интенсивности стационарного ИИ для трех значений температуры эксплуатации



Влияние температуры

«Коварство» температурных эффектов – исходные значения параметров-критериев могут гораздо сильнее зависеть от температуры, чем радиационные приращения



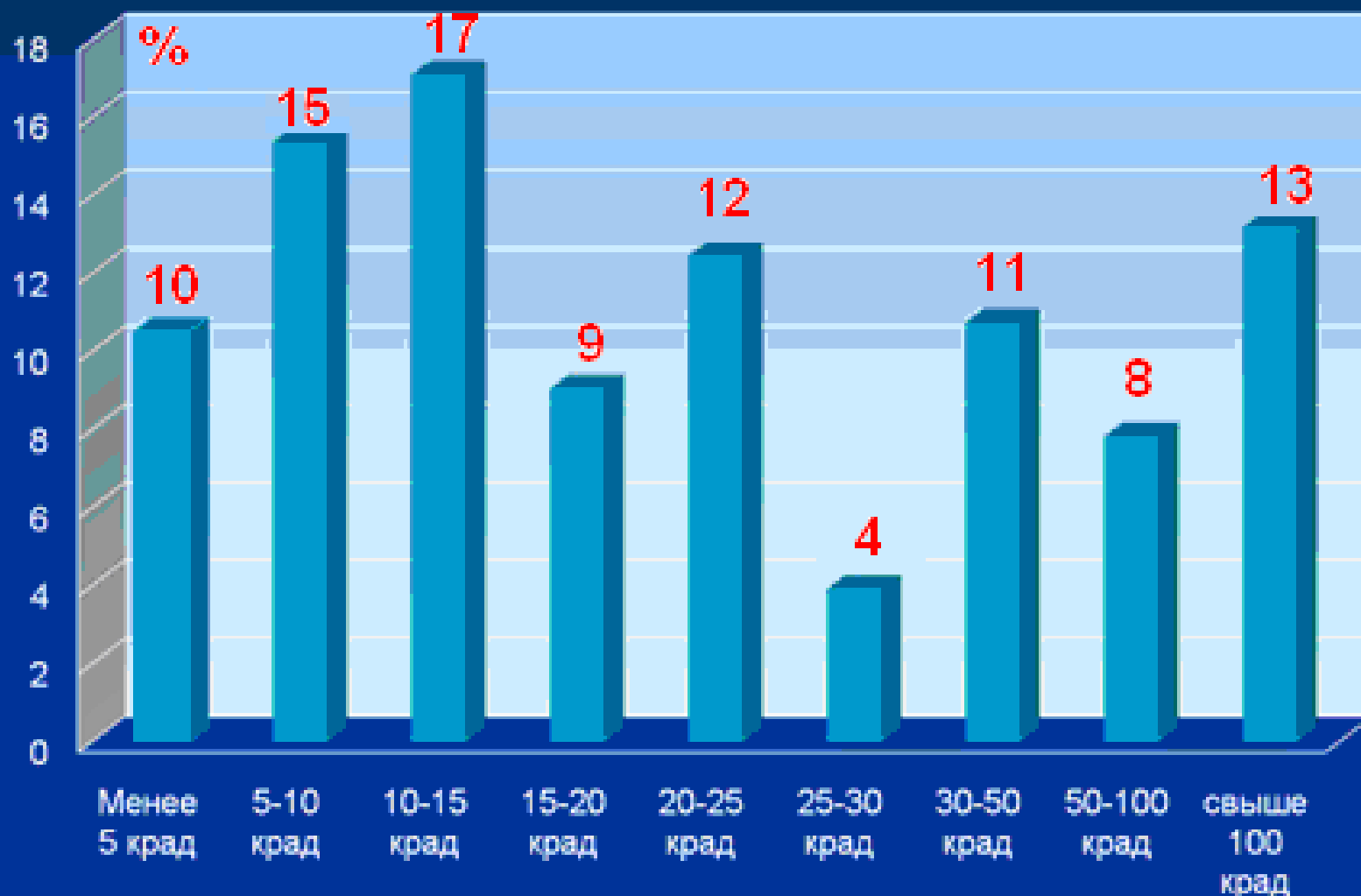
Низкая интенсивность

Сказываются процессы отжига и встраивания поверхностных состояний

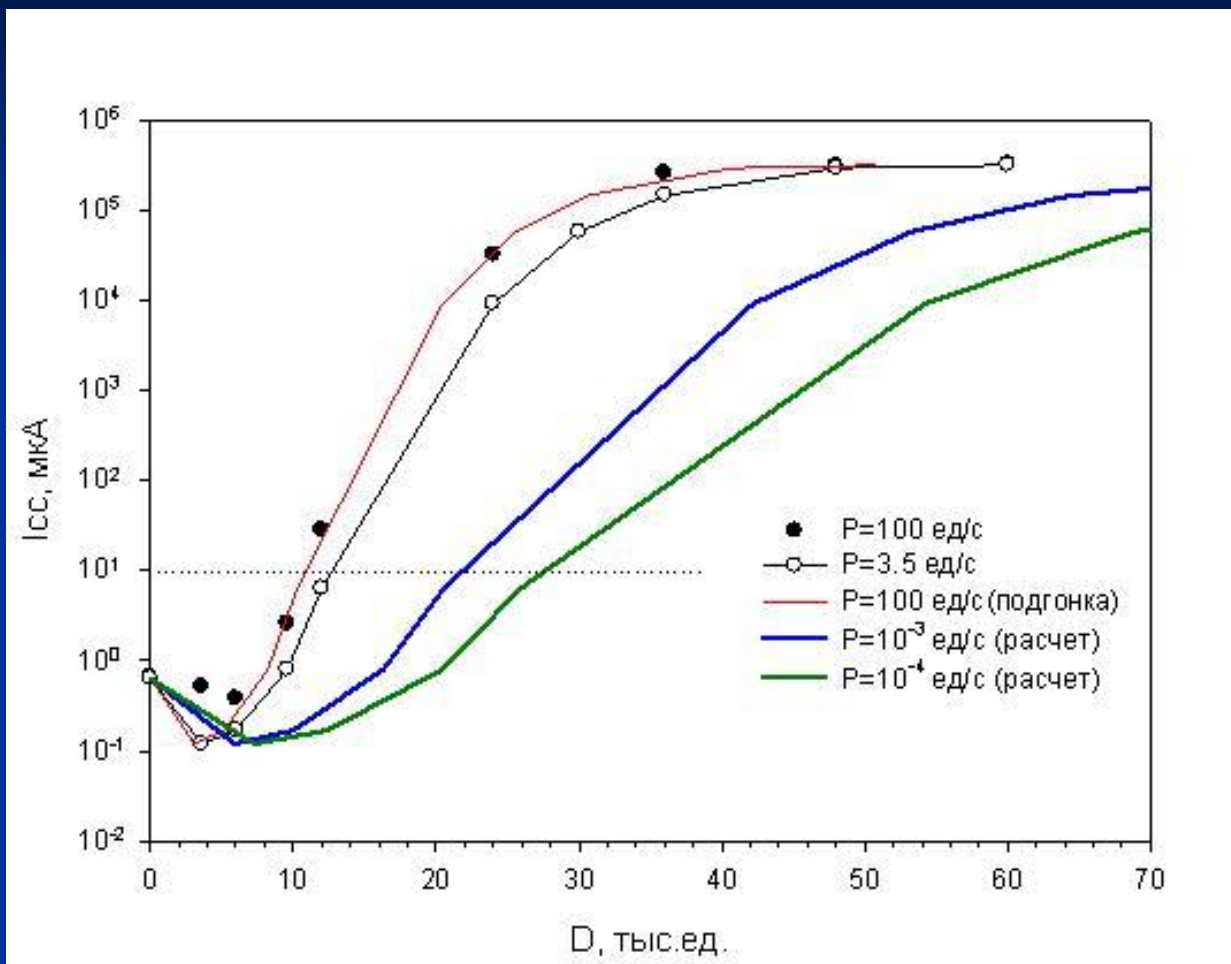
Проблема пересчета испытаний (проводятся при средней интенсивности, необходим пересчет к низкой)

Режим функционирования

Распределение испытанных микросхем ИП по уровням дозовой стойкости:



Эффекты низкой интенсивности:



БИС ОЗУ СУ62256LL-70SNXI: результаты расчетно-экспериментального прогнозирования без учета статистического разброса и погрешности эксперимента – различие в 2...3 раза (для КМОП при низкой интенсивности порог отказа выше)

Локальные радиационные эффекты

Значительная доля функциональных сбоев РЭА
КА обусловлена одиночными сбоями в
управляющих регистрах МП, КЭШ-памяти,
конфигурационной памяти ПЛИС и т.п.

Заметная доля функциональных отказов РЭА
КА обусловлена тиристорными эффектами в
КМОП ИС

Эффекты от ОЯЧ будем называть локальными
радиационными эффектами

Стойкость характеризуется
вероятностью/частотой каждого эффекта

Физические основы

Определение дозы — отношение поглощенной энергии к массе чувствительной области

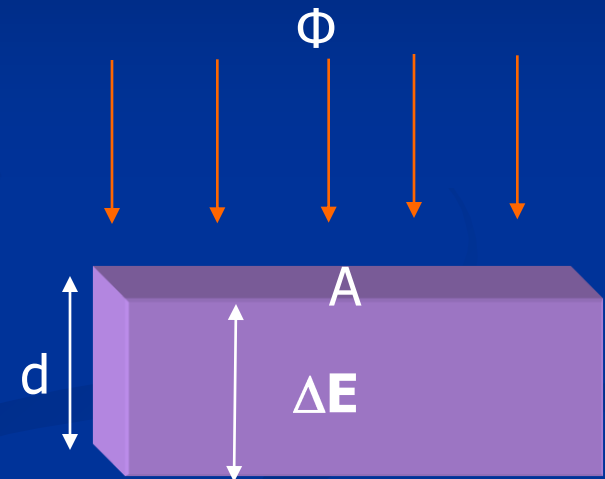
$$D = \Delta E / \Delta m$$

Что такое поглощенная энергия? — Количество, попавших частиц в чувствительный объем, умноженные на их энергетические потери (ЛПЭ×хорда)

$$\Delta E \sim N \cdot LET \cdot d = \Phi \cdot A \cdot d \cdot LET$$

Доза «классическая» не зависит от размера

$$D \sim \Phi \cdot A \cdot d \cdot LET / (\rho \cdot A \cdot d) = \Phi \cdot LET / \rho$$



Микрообъемы

Количество частиц $N \geq 1$.

В микрообъемах

$$D \sim 1 \cdot d \cdot LET / (\rho A \cdot d) = 1 \cdot LET / (\rho A)$$

Зависимость от площади элемента!!!

Например, для иона Si с энергией 50 МэВ

$$D \sim 20 \text{ крад} / \text{А} (\text{мкм}^2)$$

Длительность импульса ИИ менее 1 Пс

(мощность дозы **!!??** более 10^{15} рад/с)

Это только оценки, для понимания порядка величин

Радиационные факторы

Космическое пространство:

высокоэнергетичные протоны ЕРПЗ, СКЛ и ГКЛ (энергия от 10...400(10000) МэВ);

ТЗЧ СКЛ и ГКЛ (ЛПЭ 1...60 МэВ·см²/мг).

Естественная радиация:

альфа активность материалов (1...5 МэВ);

атмосферные нейтроны (1...1000 МэВ).

ЯВ: нейтроны (энергия 1...14 МэВ).

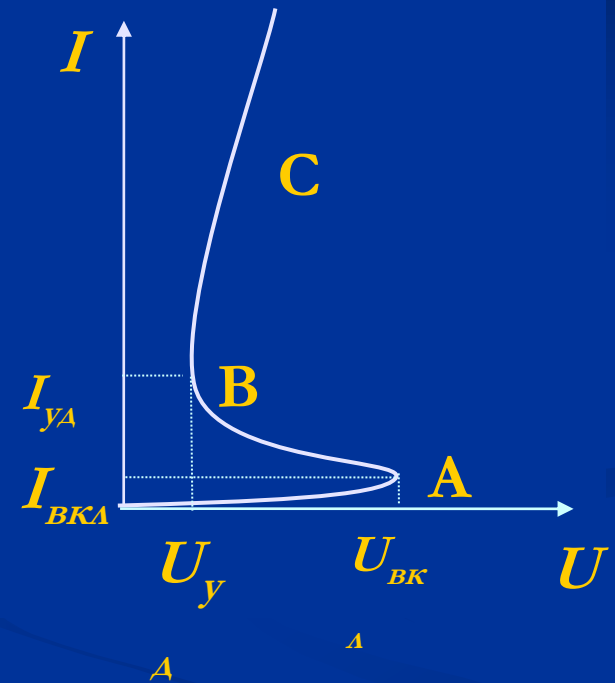
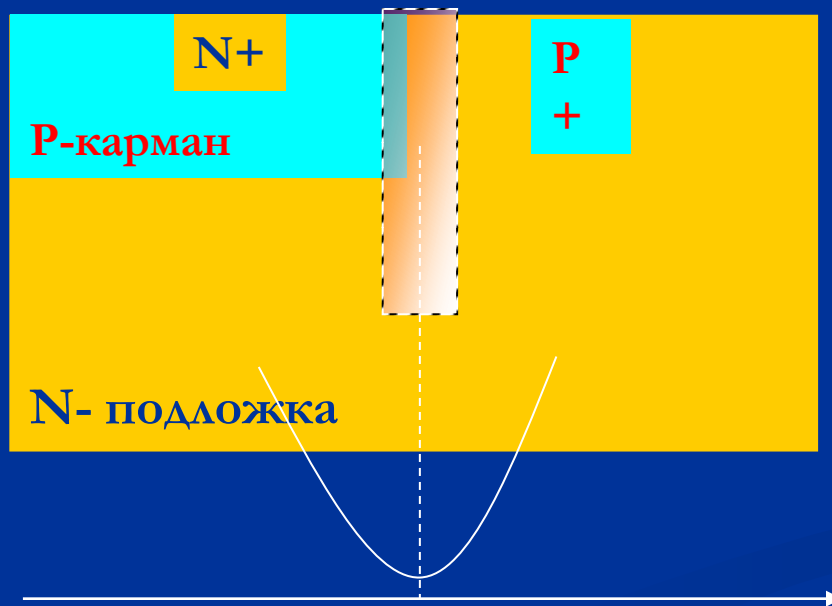
ЭФУ: все вышеперечисленное.

Общие вопросы: сбои и отказы?

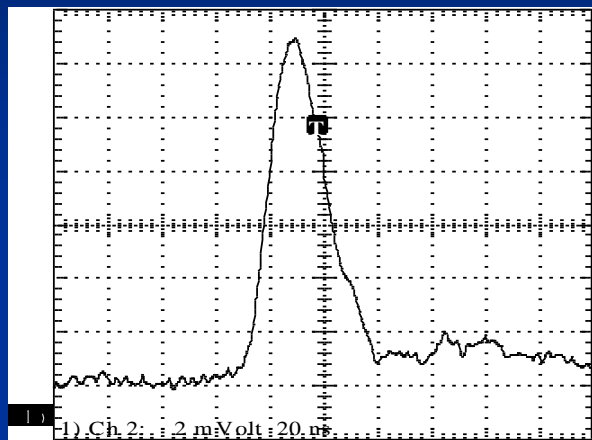
Тип эффекта	Эффект	Обозначение	Описание
<i>Катастрофический</i>	Вторичный пробой	SEB	вторичный пробой p-n перехода, приводящий к его разрушению
	«Прокол» диэлектрика	SEGR	пробой подзатворного диэлектрика вдоль трека ядерной частицы
	Одиночное повреждение бита	SEDU	«залипание» пикселя или бита в одно устойчивое состояние
<i>Функциональный</i>	Тиристорный эффект	SEL	включение паразитной четырехслойной p-n-p-n структуры, приводящее к резкому увеличению тока в цепи питания
	Одиночное функциональное прерывание	SEFI	инверсия логического состояния ячейки памяти или триггера управления, приводящая к нарушению хода выполнения программы
<i>Остаточный</i>	Одиночный сбой	SEU	инверсия логического состояния ячейки памяти или триггера
	Множественные сбои	MBU	инверсия логического состояния нескольких соседних ячеек памяти или триггеров
<i>Кратковременный</i>	«Иголка»	DSET	кратковременный импульс на выходе элемента цифровой ИС
		ASET	кратковременный импульс на выходе элемента аналоговой ИС

Тиристорный эффект (ТЭ)

ТЭ (эффект защелкивания) проявляется через потерю работоспособности в основном КМОП ИС и резкое увеличение тока потребления по цепи питания.

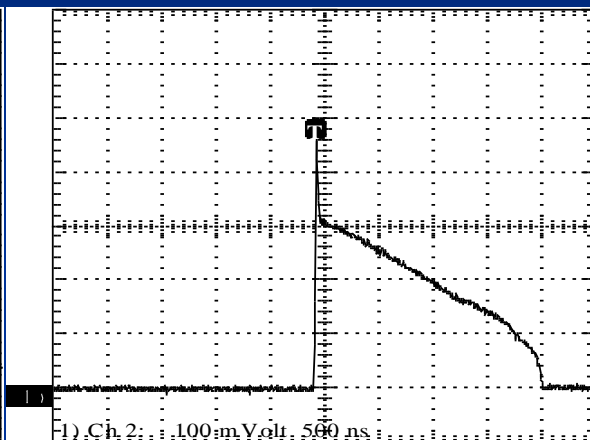


Осциллограммы развития ТЭ



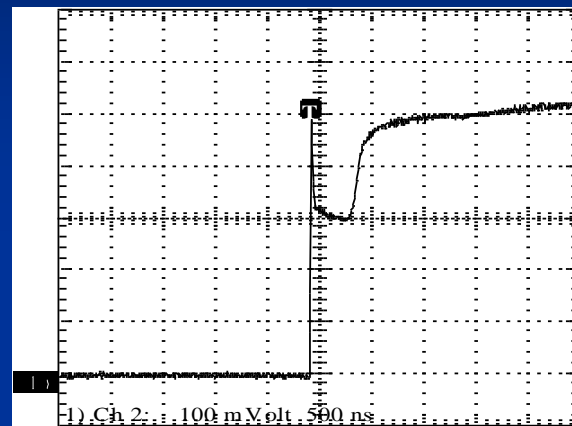
20 нс

Линейная область



500 нс

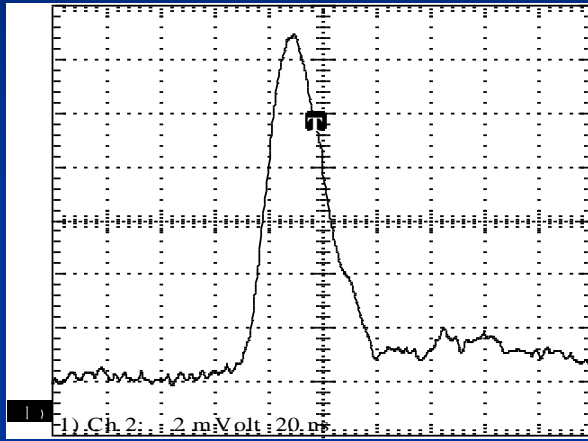
Предпороговая область



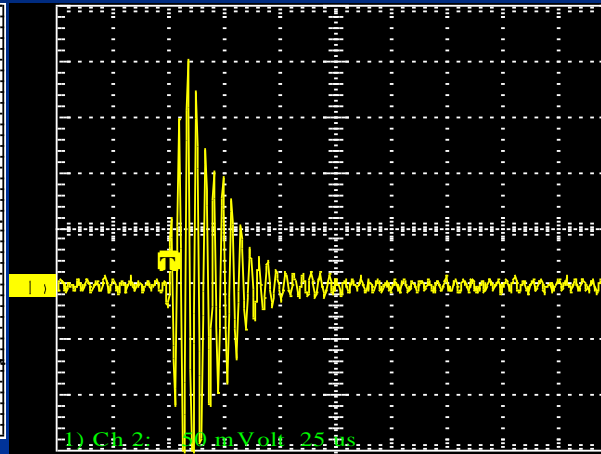
500 нс

Развитие ТЭ

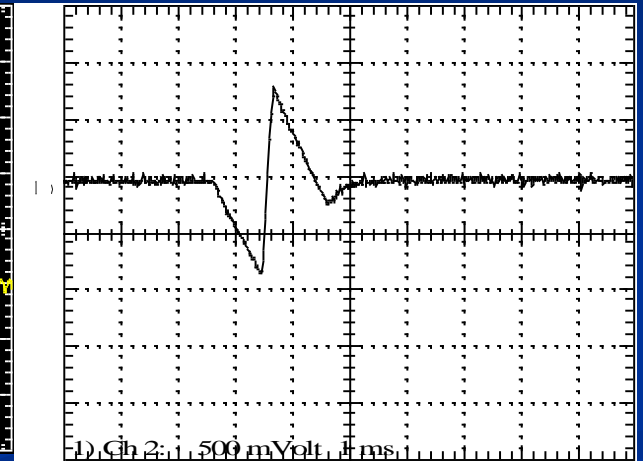
«Иголки» типовые сигналы



**ЦИС: 2 мВ 20 нс
(альфа-частица)**



**Операционный
усилитель в поле
протонов: 50 мВ,
25 нс**



ВИП: 500 мВ 1 мс

Связь эффектов и типов ЭКБ

Одиночный сбой	регистры, триггера, ОЗУ, ДОЗУ, ПЛИС, внутренние регистровые структуры БИС (ЦАП, АЦП, флэш память, микроконтроллеры, микропроцессоры и т.п.)
«Иголка»	аналоговые и цифровые ИС, оптроны, вторичные источники питания, ЦАП и т.п.
Тиристорный эффект	КМОП ИС с проектными нормами менее 0.5 мкм (протоны) менее 1.5 мкм (ТЗЧ)
«Прокол»	Флэш-память с проектными нормами менее 0.18 мкм и мощные МОП транзисторы с пробивными напряжениями более 30 В
Вторичный пробой	МОП и биполярные (паразитные) транзисторы с рабочими напряжениями более 30 В
Микро-дозовый отказ	СОЗУ, ДОЗУ, микропроцессоры, ПЛИС и флэш память с проектными нормами менее 0.25 мкм
Одиночное стирание	Флэш память с проектными нормами менее 0.25 мкм
«Спайки»	ПЗС-матрицы, матрицы на активных КМОП сенсорах

Параметры чувствительности

Пороговые значения ЛПЭ

Сечение насыщения

Экспертная оценка, если знаем:

функциональное назначение ИС;

быстродействие;

разрядность;

площадь кристалла;

общие сведения о технологии;

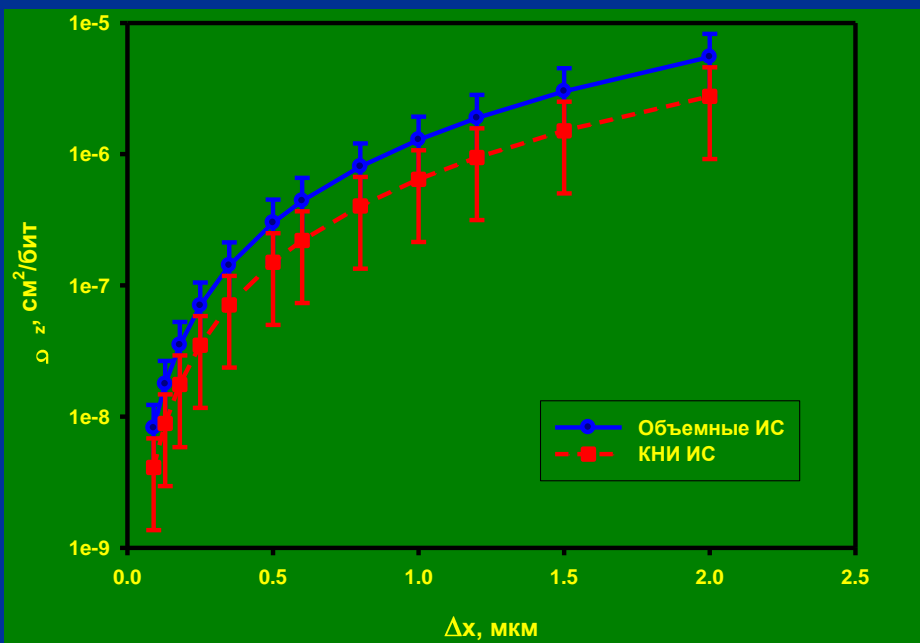
сведения об функциональных блоках и их параметрах;

проектные нормы;

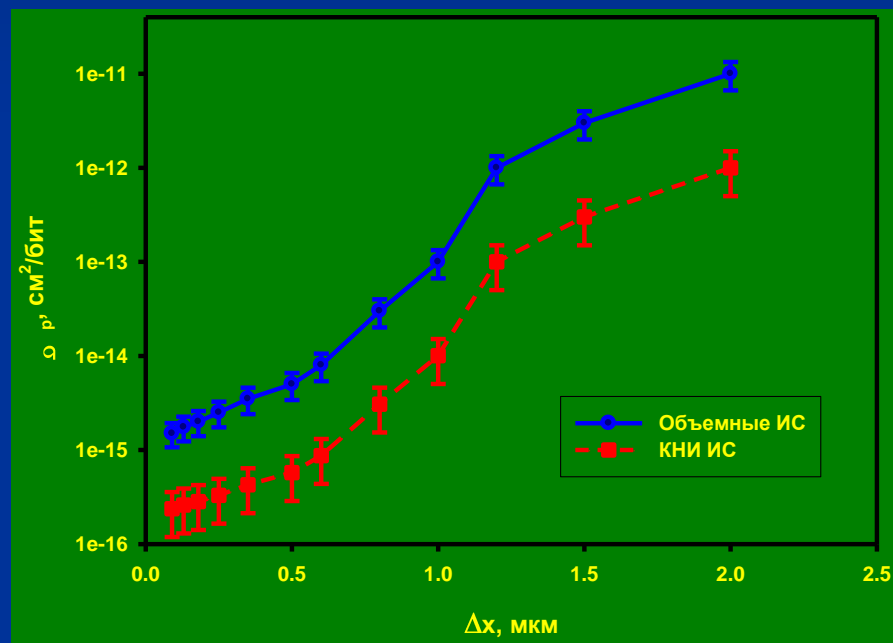
технологические параметры (типовые структуры);

результаты электрического моделирования внутренних структур...

Типовые зависимости сечений насыщения по эффектам ОС от технологии

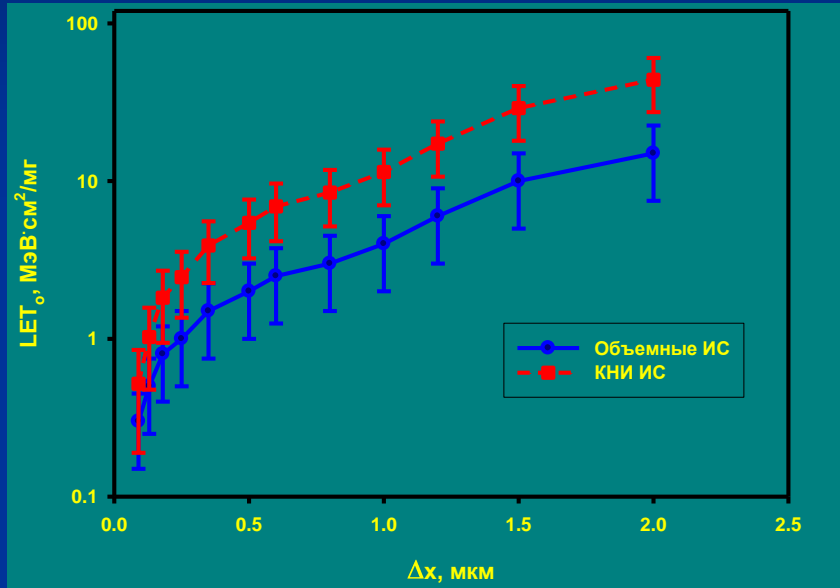


ТЗЧ

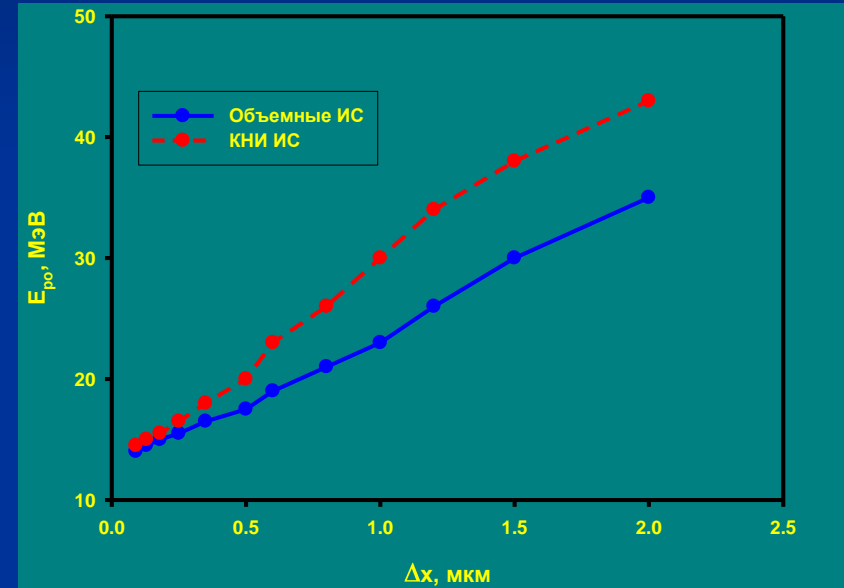


Протоны

Типовые зависимости порогов по эффектам ОС от технологии



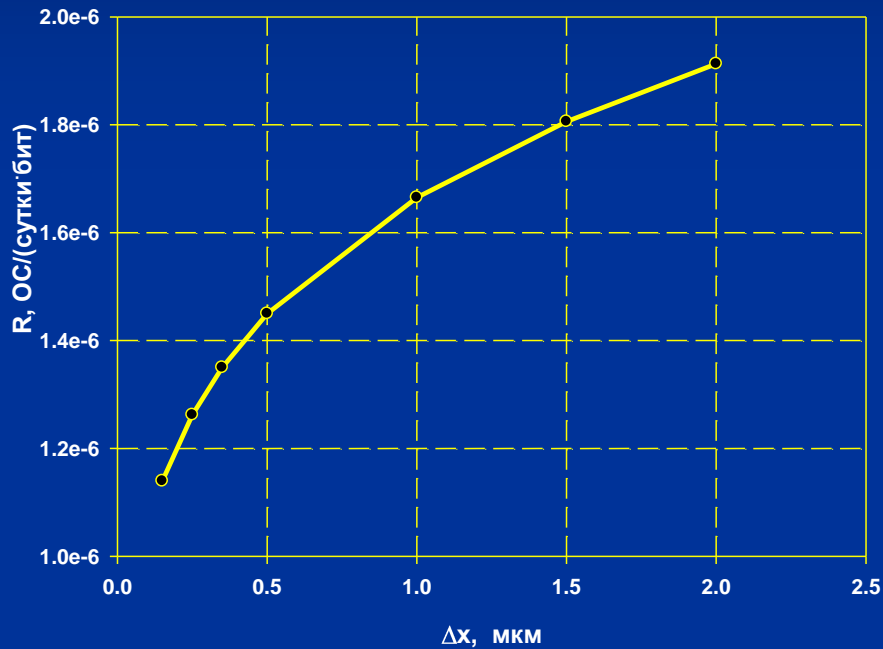
ТЗЧ



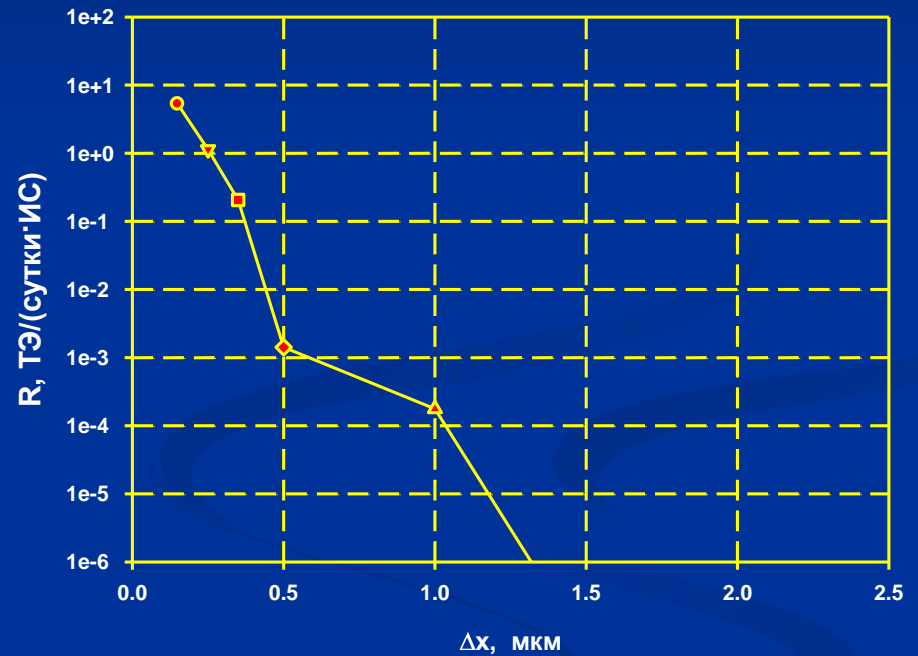
Протоны

Пороги и сечения падают по мере уменьшения проектных норм, но частота эффектов растет

Увеличение чувствительности к эффектам от ОЗЧ в СБИС: влияние проектных норм

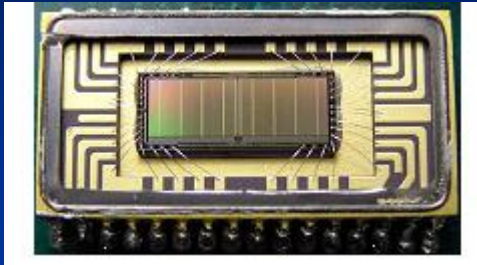


Частота ОС на 1 бит

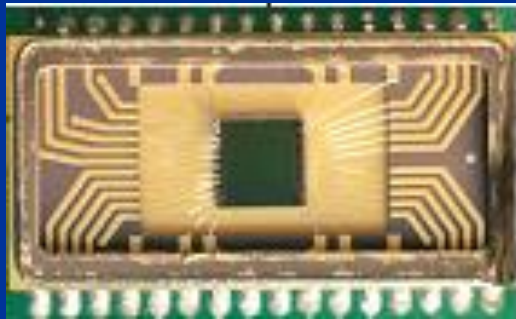


Частота ТЭ на ИС

Пример- влияние площади кристалла



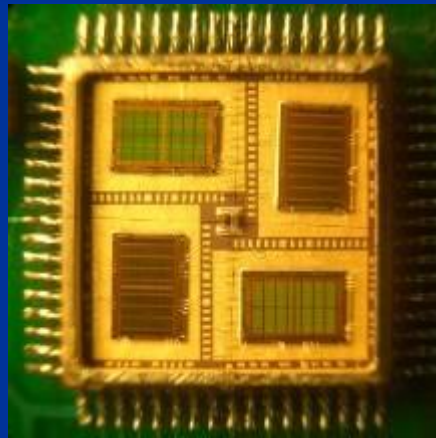
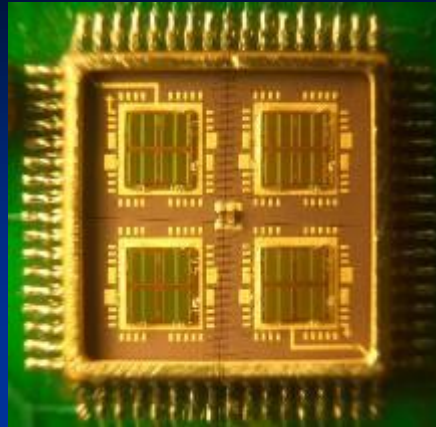
MT5C1008DCJ-15



MT5C1008DCJ-20L

AS8S512K32Q-35/Q

Изменение порога ТЭ в несколько раз



Уменьшение емкости

$$C \sim k_a \cdot \Delta x^2 + k_p \cdot \Delta x$$

Увеличение усилительных характеристик паразитных структур

$$\beta \sim k_b / \Delta x^2$$

Порог по ОС слабо падает (больше определяется U_{cc})

Порог по ТЭ резко падает

Площадь кристалла ИС при той же емкости связана с проектными нормами и/или технологическими операциями, уменьшающие чувствительность

Обеспечение требований

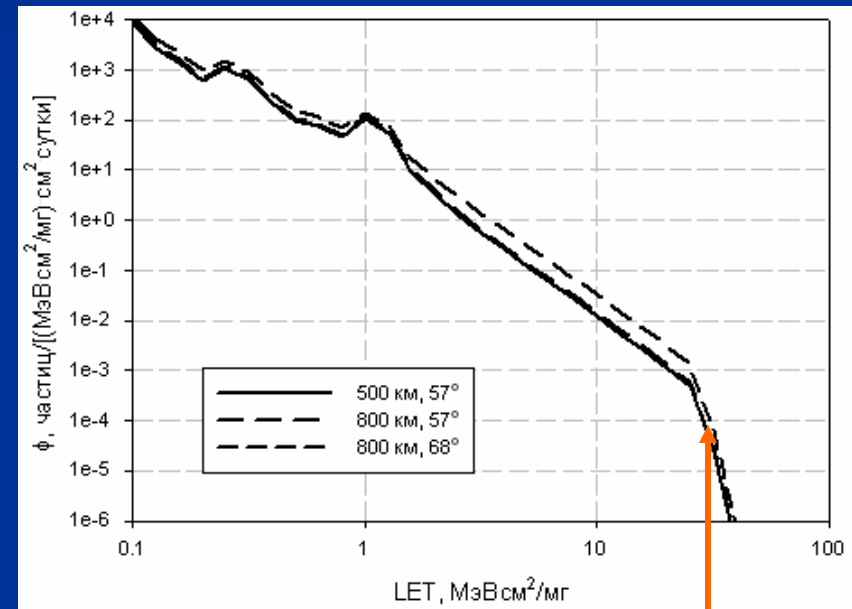
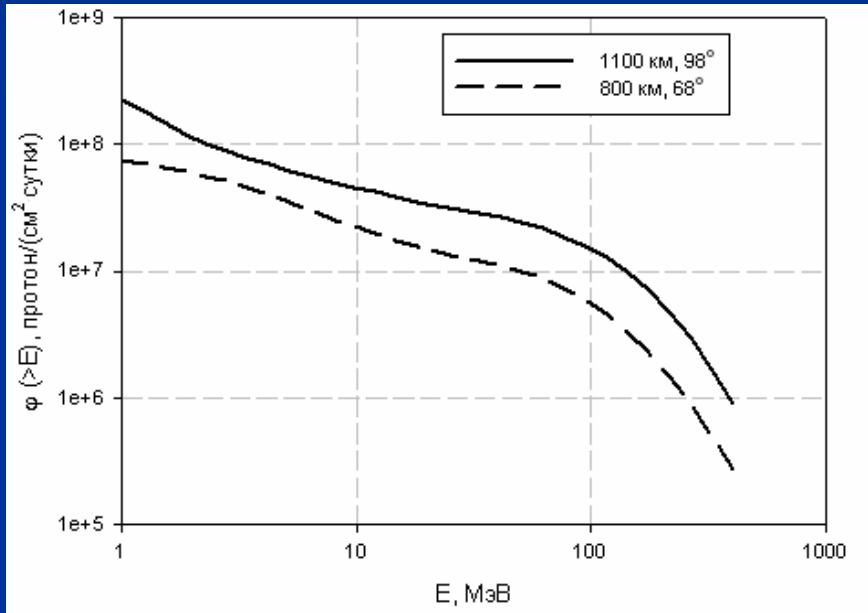
- - требований фактически нет;
- - предложения – показатели стойкости в виде допустимых средних и максимальных частот сбоя и вероятностей отказов для типовых орбит (спектров ВЭП и ТЗЧ)

В ТЗ на разработку сейчас:

- по сбоям фактически ничего не задается;
- вероятность отказа фактически переведена в требование обеспечить отсутствие катастрофических отказов до заданных пороговых значений линейных потерь энергии (типовые значения $40...60 \text{ МэВ см}^2/\text{мг}$)

Как обеспечить требования?

Шаг 1. Оценка радиационных условий ВЭП ЕРПЗ, ГКА и СКЛ – оценка спектров



Протоны ЕРПЗ –
интегральные спектры

ГКА –
дифференциальные
ЛШЭ спектры ТЗЧ

~40 МэВ·см²/мг

Шаг 2. Оценка параметров чувствительности

Параметры чувствительности:

- $\sigma_{нас}$ сечение насыщения для ТЗЧ и ВЭП;
- LET_o , (E_{po}) пороговые значения ЛПЭ (энергии)
(более правильно зависимости)

Определение по результатам испытаний на моделирующих и имитирующих установках – **долго и дорого**

Выбор метода испытаний

ДОЗА

Факторы:

Условия электронного равновесия

Интенсивность воздействия

Коэффициент первичной рекомбинации (протон-гамма)

RAD-РАК корпуса (электроны – кобальт)

Корпусированные изделия (рентген)

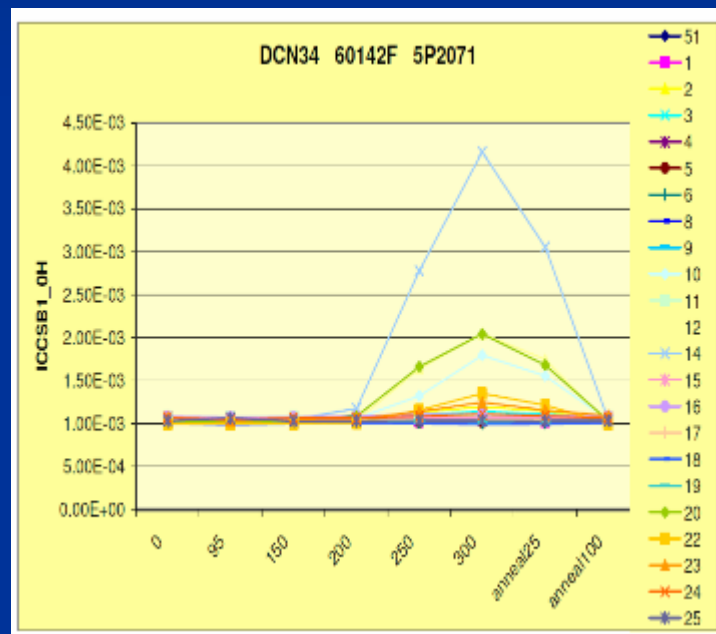
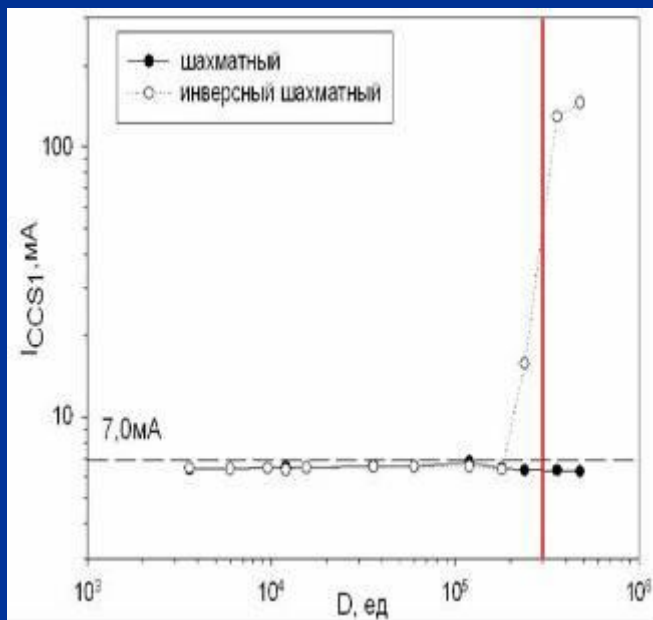
Динамический режим и точностные характеристики (МУ)

Нужен компромисс – РАЗУМНОЕ применение всех
возможных существующих методов

ЕДИНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД

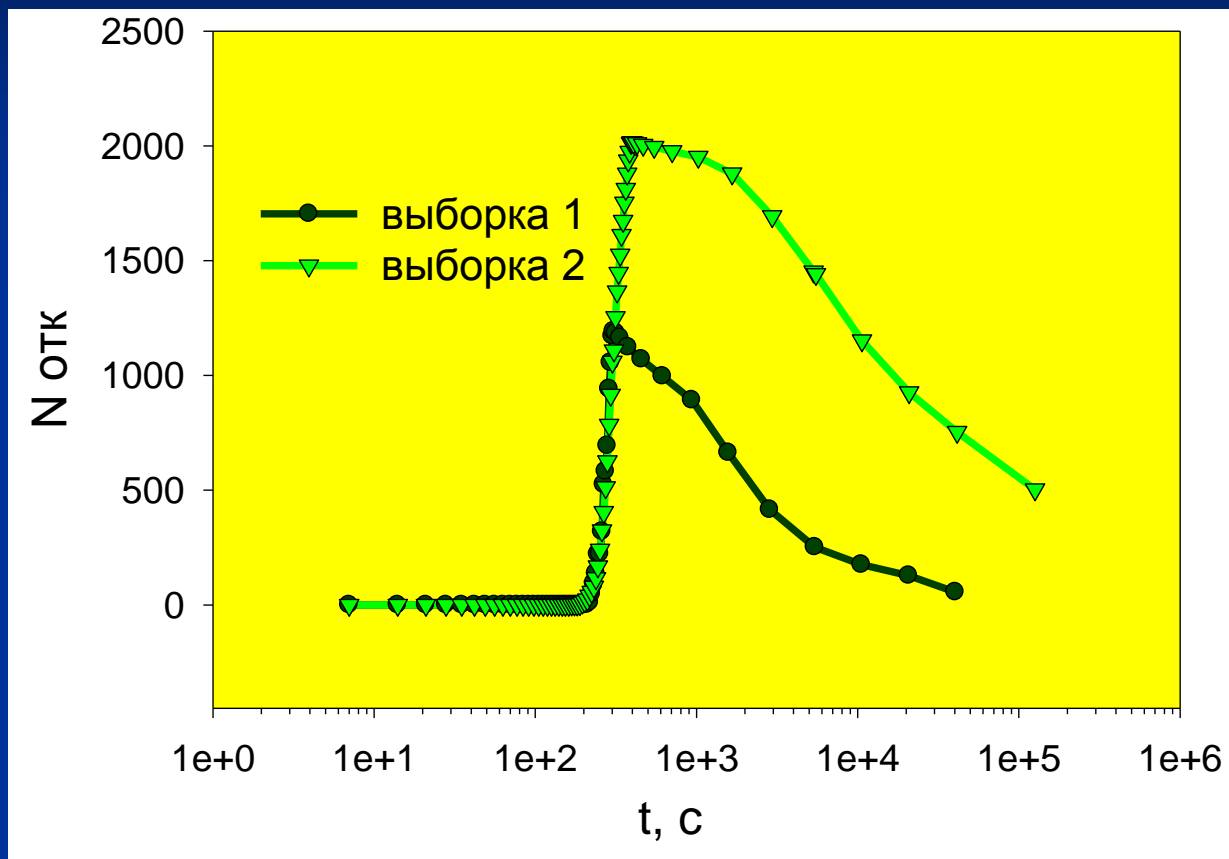
Сопоставление методик и результатов дозовых испытаний СБИС

В большинстве случаев - корреляция. Несовпадение результатов объясняется различием выбранных критериальных параметров и методик их контроля



МКМ ОЗУ 16М АТ68166FT-YS18SR. Дозовые зависимости статического тока потребления I_{CCS1} по результатам ОАО «ЭНПО СПЭЛС»: порог отказа в 1.5 раза ниже, по сравнению с данными изготовителя - вследствие более жестких методик тестирования.

Облучение-релаксация



Испытания ТЗЧ – оценка параметров чувствительности

- **Моделирующие установки**

 - Ускорители ионов

 - Ускорители протонов

 - Имитирующие установки**

 - Лазерные имитаторы со сфокусированным излучением

 - Изотопные установки на основе источников альфа- и спонтанного излучений

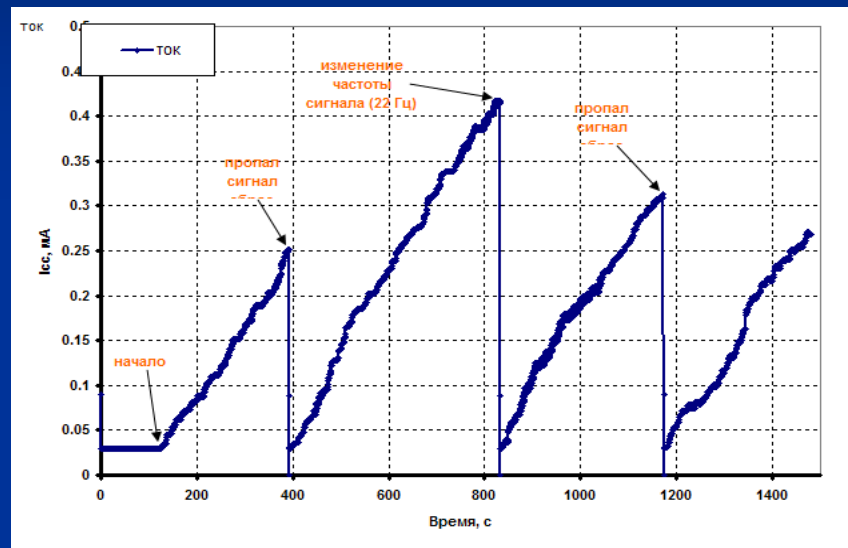
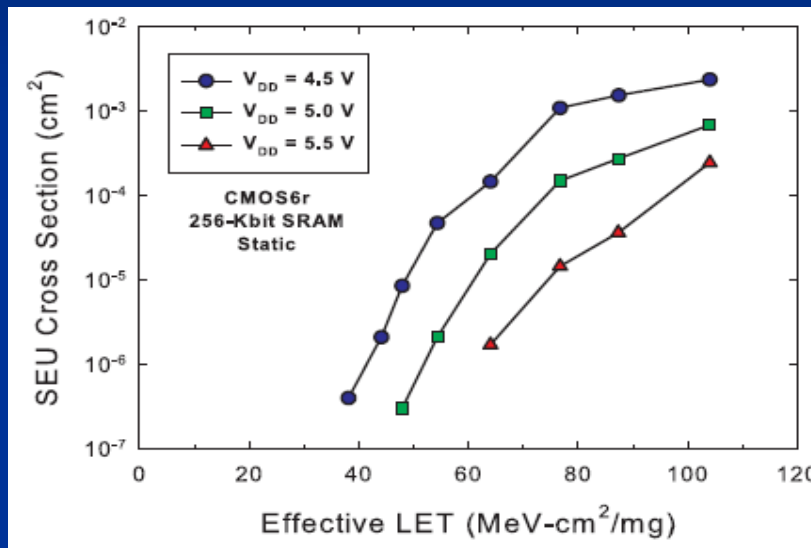
Факторы: Время, деньги, достоверность, что необходимо получить (одну точку на соответствие порогу эффекта или определить параметры чувствительности)

Параметры-критерии (Сбои)

- Одиночные сбои в цифровых ИС
 - тесты запись/хранение/считывание (ОЗУ)
 - тесты проверка функционирования (ПЛИС, МК, МП)
- Функциональные сбои
 - тесты проверка функционирования
 - «зависание» ИС в процессе испытаний
- «Иголки»
 - регистрация выходных сигналов

Проблема – статистика и полнота покрытия, влияние режима

Параметры критерии



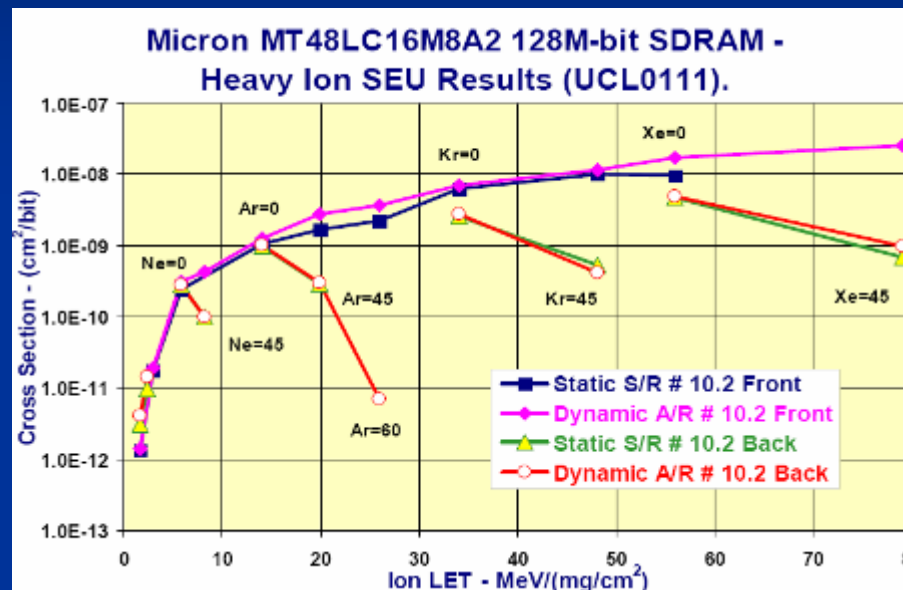
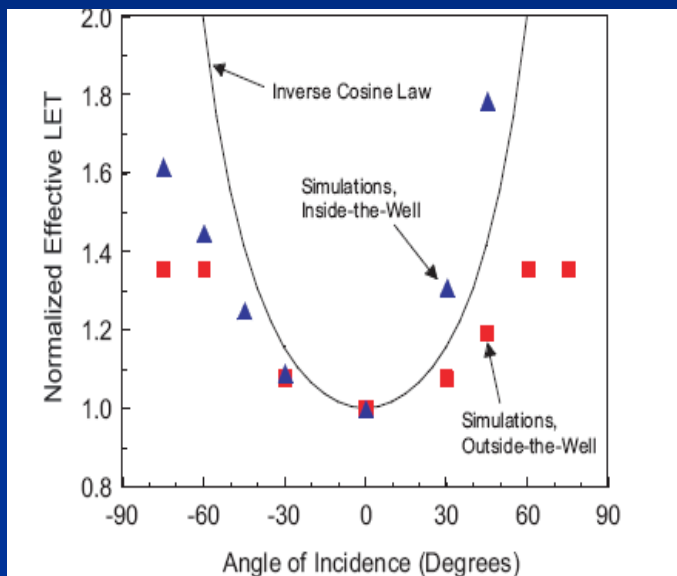
Влияние напряжения питания на ОС в ОЗУ

Для ТЭ зависимость обратная!!

Сбои в ячейках памяти конфигурационного ЗУ ПЛИС приводят к возрастанию тока потребления: 1 сбой около 2 мА (отличить от ТЭ)

Закон обратного косинуса

В современных СБИС не всегда работает модель «тонкой» области



Эффективное значение ЛПЭ в зависимости от угла падения ТЗЧ

Изменение сечений ОС от эффективного значения ЛПЭ динамика/статика слабо в ОЗУ

Проблема суммарной дозы на ускорителях ионов – флюенс 10^7 ион/см² соответствует дозам 10...100 крад

Выбор метода испытаний

Толщина пассивирующих окислов до 10 мкм – ограничения на пробеги ядерных частиц

(Cf-252 - ???)

Наличие многослойной металлизации – ограничения возможностей применения **сфокусированного лазерного воздействия**

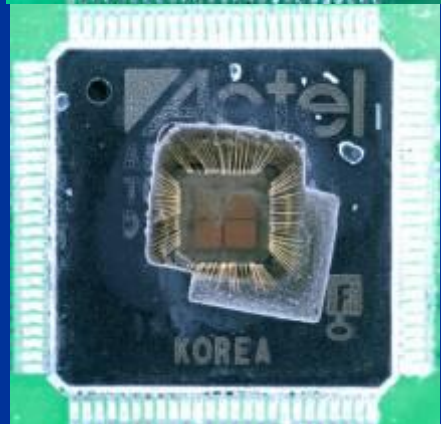
Наличие тяжелых металлов – помимо ионов надо делать оценку и на протоны (**появления вторичных ионов Ti, Cu, W и др**);

Проблема корпусов ВГА для ускорителей ионов.

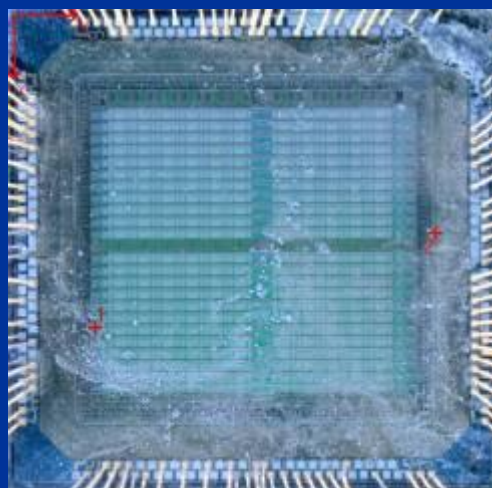
Нужен компромисс – **РАЗУМНОЕ** применение всех возможных существующих методов

Подготовка к испытаниям

Необходимо обеспечить **ПРЯМОЙ** доступ к кристаллу на ускорителях ионов, изотопных источниках и лазерных установках



← Подготовленные образцы Заказчиком →

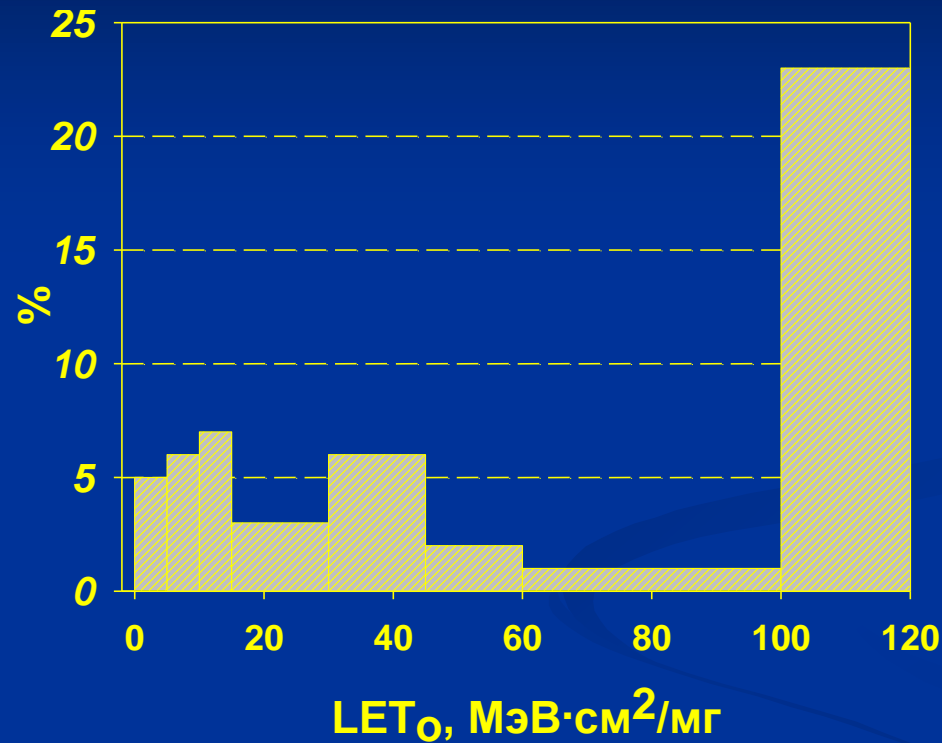


Образцы с указанием чувствительных областей

Некоторые заблуждения

- Оценку стойкости к ТЗЧ и ВЭП можно сделать по результатам испытаний на импульсных МУ (нет такой корреляции);
- Радиационно-стойкие ИС по импульсу будут стойкими к ВЭП и ТЗЧ (не всегда, особенно для «симметричных» решений);
- ИС ИП стандарта MIL имеют более высокую стойкость к ТЗЧ и ВЭП по сравнению с коммерческими ИС (фактически этой связи нет, хотя вектор правильный);
- Обеспечить требуемую стойкость можно за счет применения локальной радиационной защиты (нереально);
- Можно полностью доверять имеющимся данным по ИС ИП (не всегда, зависит от методики испытаний)
- Защитить ИС от ТЭ можно простым отключением питания у нее (фактически не работает в РЭА)

Распределение испытанных микросхем по уровням стойкости к ОЗЧ:



ПЛИС (FPGA) – с очень высокой частотой будут «зависать»

Пороги тиристорных эффектов
До 1/3 ИС имеют пороги менее 15
МэВ·см²/мг (протоны)

Ускорители протонов

ПИЯФ – 1 ГэВ

ИТЭФ – 150...1000 МэВ (импульс)

Достоинства

- Работа в нормальных условиях;
- Работа в диапазоне температур;
- Работа с несколькими образцами;
- Не влияет конструктив;
- Коллимированный пучок.

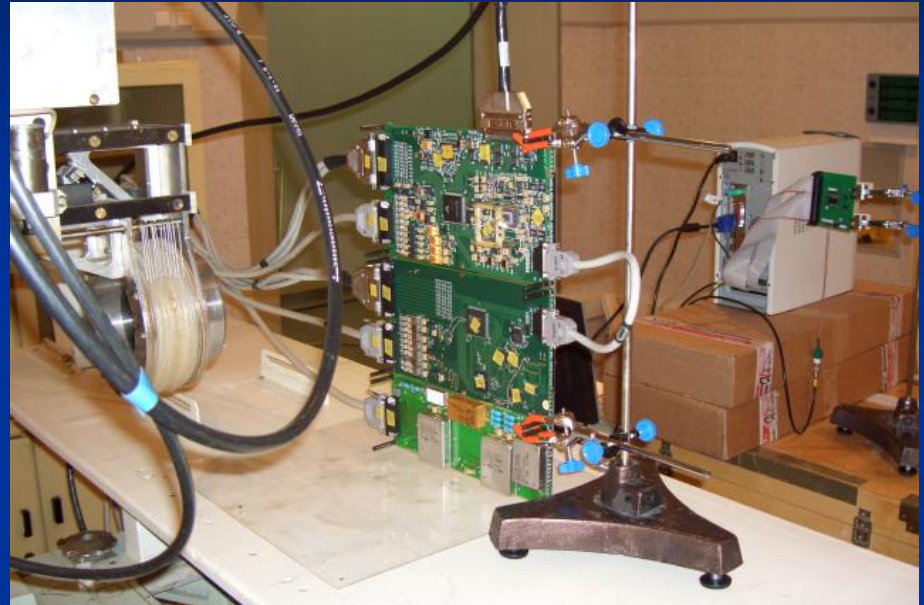
Недостатки:

Ограничение по ЛПЭ (<14);

Нет возможности работать в диапазоне энергий;

ГРАФИК РАБОТЫ

Если есть отказы на испытаниях – ИС лучше не использовать (до 20...30% от общего количества испытываемых ИС)



Ускорители ионов

ОИЯИ – 2...90 МэВ·см²/мг

ИТЭФ – 5...25 МэВ·см²/мг ???

Достоинства

- Работа в диапазоне ЛПЭ;
- Работа с несколькими образцами

Недостатки:

Ограничение по пробегам

Вакуум

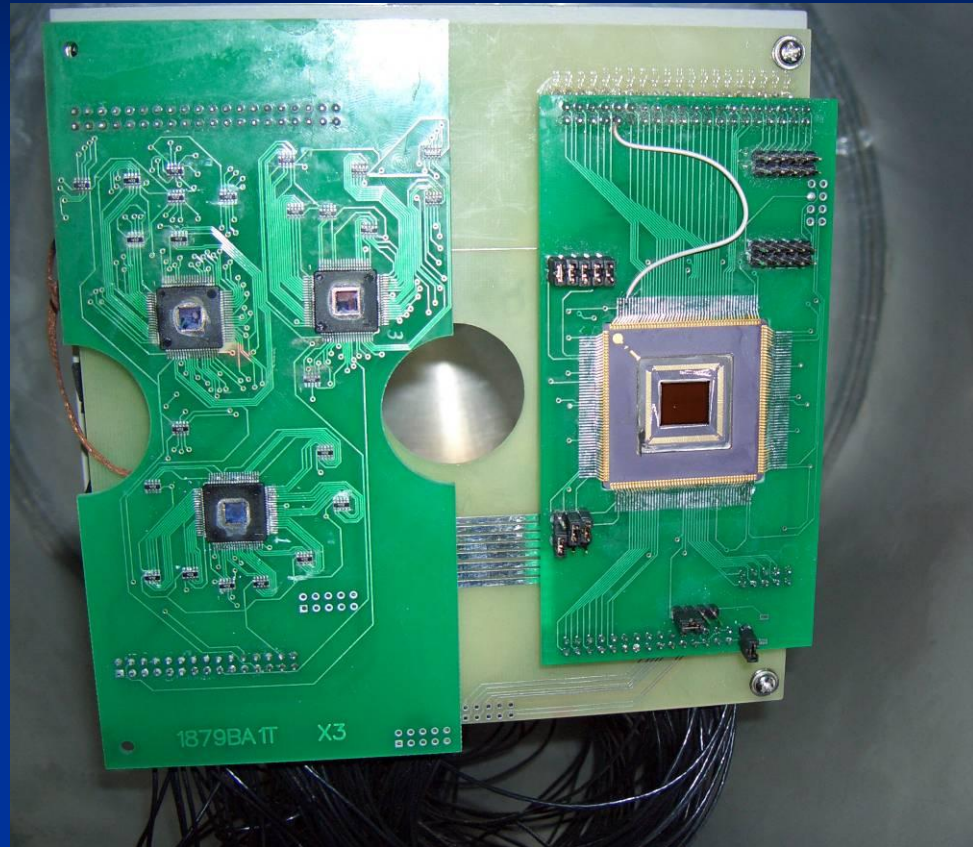
Декапсуляция (компаунд)

Испытания в диапазоне температур

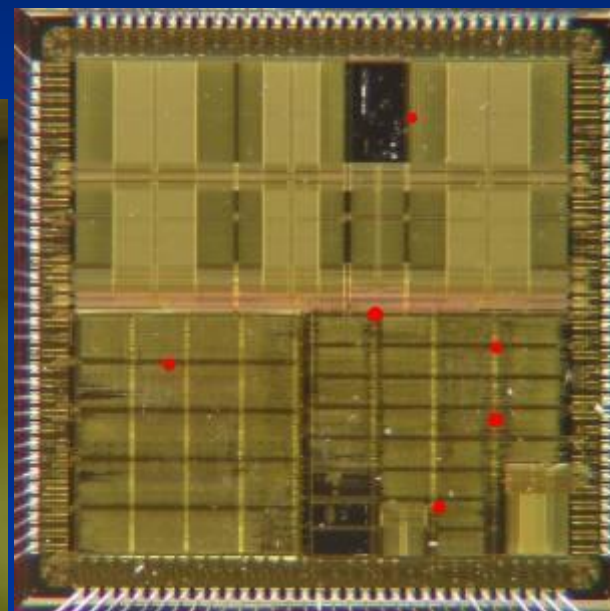
Интенсивность

Влияние накопленной дозы

ГРАФИК РАБОТЫ



Лазерный имитатор «РАДОН-9Ф»



Кристалл СБИС
1890BM1 с
отмеченными
областями
чувствительности к
тиристорному
эффекту от ОЯЧ

Лазерные имитаторы

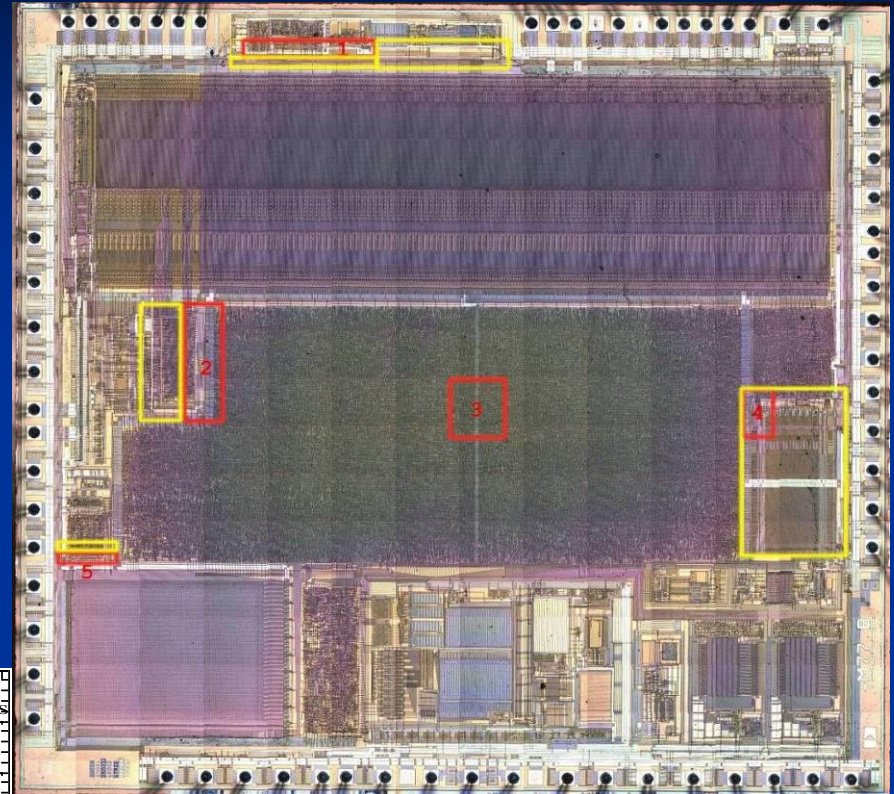
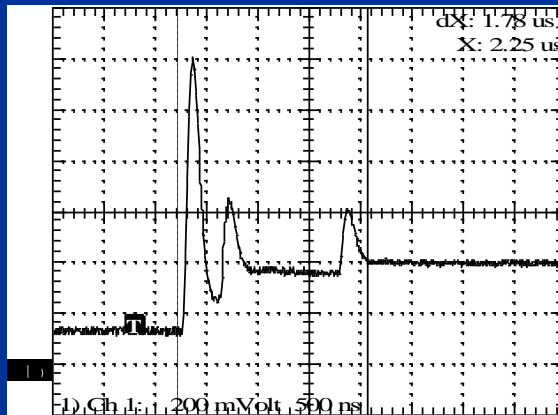
Достоинства

- Любая энергетика;
- Целенаправленное воздействие;
- Облучение с тыльной стороны
- Сохранность информации после ТЭ
- Измерение ВАХов и переходных процессов развития эффектов

Недостатки:

- Декапсуляция (компаунд);
- Пересчет к ЛПЭ;
- Нет возможности испытывать по эффектам SEGR, SED

Развитие ТЭ в
IDT79RC64V474



Локализация областей
возникновения
катастрофических отказов в
МК ADUC841BS62-5

Отличия в результатах

Лазер-ионы

Влияние защитных покрытий,
пример IDT71256

Пересчет ЛПЭ через косинус,
пример, K6R4008C1C-J115

Изменение режима, пример
BU-61580G3-200

Влияние температуры (вакуум),
пример LPC2114FDB64

Лазер-протоны

Косвенные методы пересчета

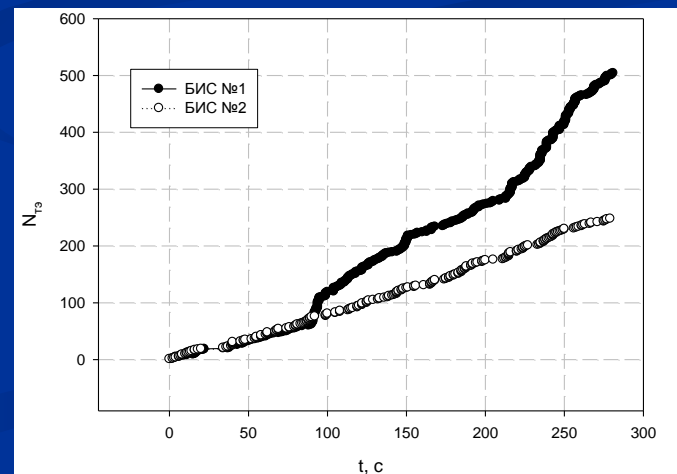
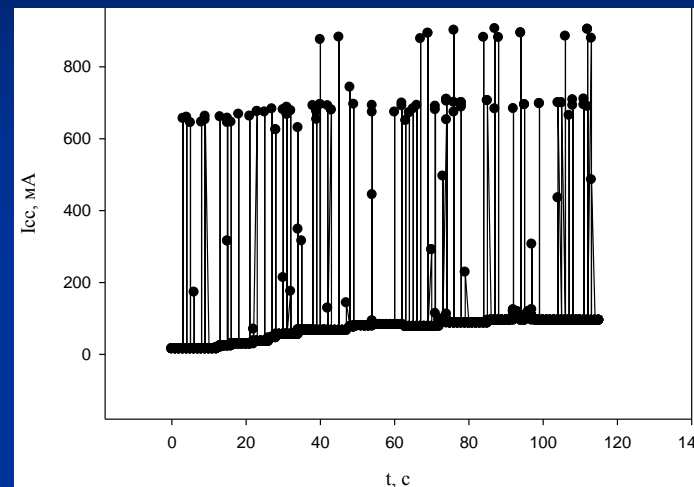
Влияние тяжелых металлов в
конструкции ИС

Ионы-протоны

Влияние тяжелых металлов в
конструкции ИС

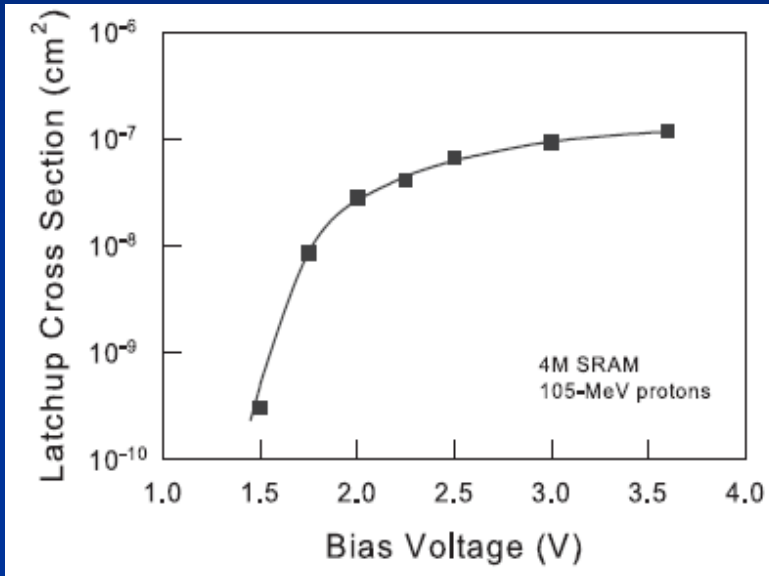
Ограниченные пробеги ионов

BU-61580G3-200

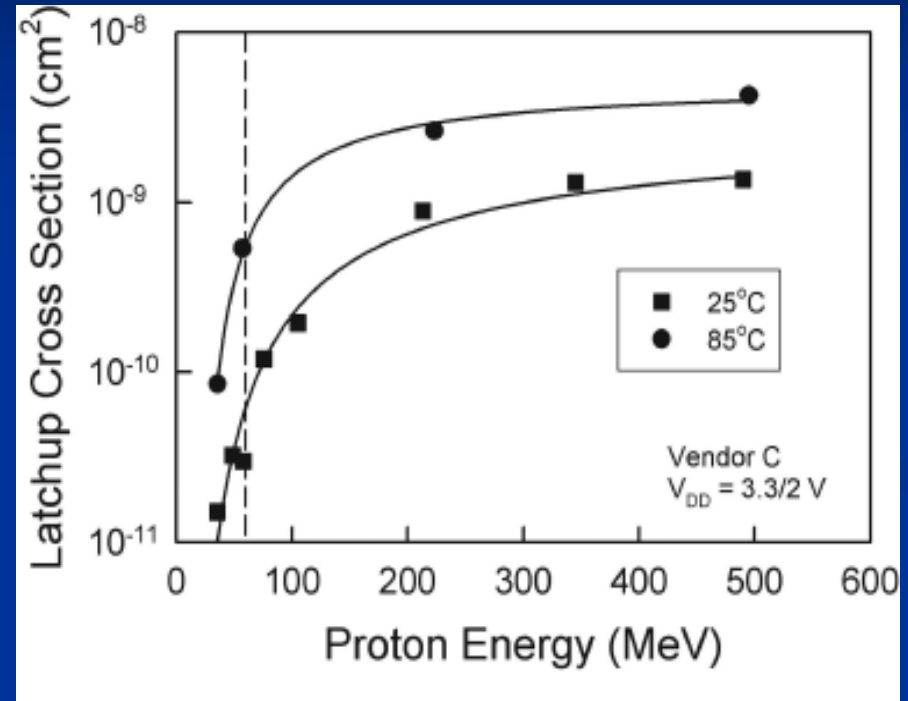


LPC2114FDB64

Влияние режима и температуры



Изменение сечения ТЭ
от напряжения питания

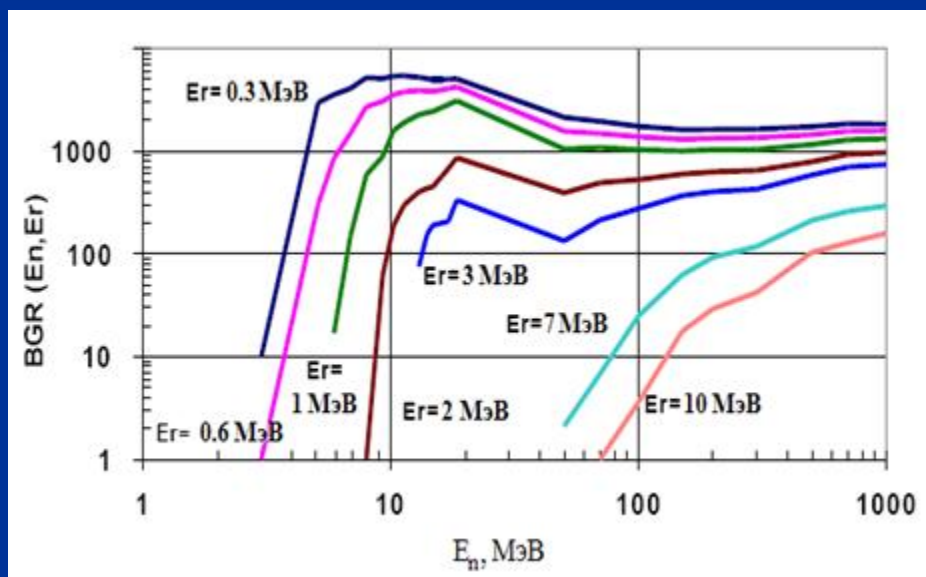


Изменение сечения ТЭ при разных
температурах

1890ВМЗ – протоны ТЭ -/+ 20°C/65°C

Проблема нейтронов

Локальные радиационные эффекты возможны от нейтронов со спектром деления и 14 МэВ



ИС	14 МэВ
1635РУ1Т	0
1620РУ2	0
1890ВМ1	~10
1890ВМ2	~50
1645РУ1	~300

Испытания на фактор 7И1

Достоверность результатов испытаний

- СБИС и прецизионные ИС определяют уровни радиационной стойкости РЭА КА, в конечном счете САС КА
- Необходимо проводить радиационные испытания всей критичной ЭКБ (не имеющей документированного запаса по радиационной стойкости), привлекая для этого квалифицированные испытательные центры
- Достоверность результатов испытаний определяется обоснованным заданием режимов и условий работы ЭКБ при облучении, выбором информативных критериальных параметров и методик их контроля в процессе испытаний
- Справочные и литературные данные по радиационной стойкости ЭКБ можно использовать только для предварительной экспертной оценки.
- Не допускается бездоказательно распространять результаты испытаний одних типов («типовых представителей») на другие типы или на другие закупочные партии данного типа

Заключение

- Неопределенность в уровнях из-за влияния конструктива и задания требований
- Низкая интенсивность (доза)
- Уменьшение топологических норм проектирования увеличивает чувствительность ИС к локальным радиационным эффектам