

Радиационная опасность на околоземных орбитах и межпланетных траекториях космических аппаратов

Н.В.Кузнецов

Обсуждаются представления, которые лежат в основе количественных оценок радиационной опасности, возникающей из-за возможного нарушения работоспособности бортового оборудования и приборов космических аппаратов при воздействии высокоэнергичных ($> \sim 100$ кэВ) заряженных частиц космической радиации.

Демонстрируются возможности расчетных моделей и методов для прогнозирования характеристик радиационной опасности на космических аппаратах в различных условиях его полета.

Содержание

- **Аномалии на космических аппаратах**

Определение. Примеры аномалий. Источники и причина радиационной опасности. Выводы.

- **Радиационные эффекты**

Механизмы возникновения. Линейная передача энергии. Потери энергии частиц. Классификация радиационных эффектов. Эффекты поглощенной дозы. Одиночные случайные эффекты. Выводы.

- **Факторы космического полета**

Происхождение радиационных полей. Солнечная активность. Вековой дрейф магнитного поля Земли. Проникновение космических лучей в магнитосферу. Геомагнитная активность. Движение КА вдоль траектории полета. Перемещение КА на траектории. Конструкция КА (защитные экраны). Выводы

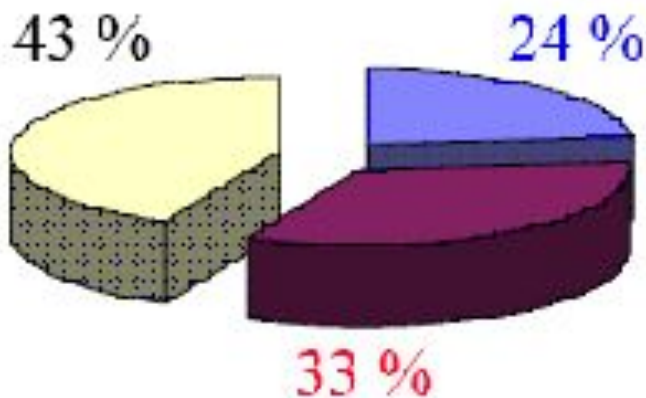
- **Прогнозирование радиационной опасности**

Методика прогнозирования. Примеры. Выводы.

Аномалии на космических аппаратах

Внешние факторы воздействия на космический аппарат

Неизвестные



Вакуум

Невесомость

Колебания температуры

Электромагнитная радиация

Метеориты

Космический мусор,

Вибрация и высокие нагрузки
при старте

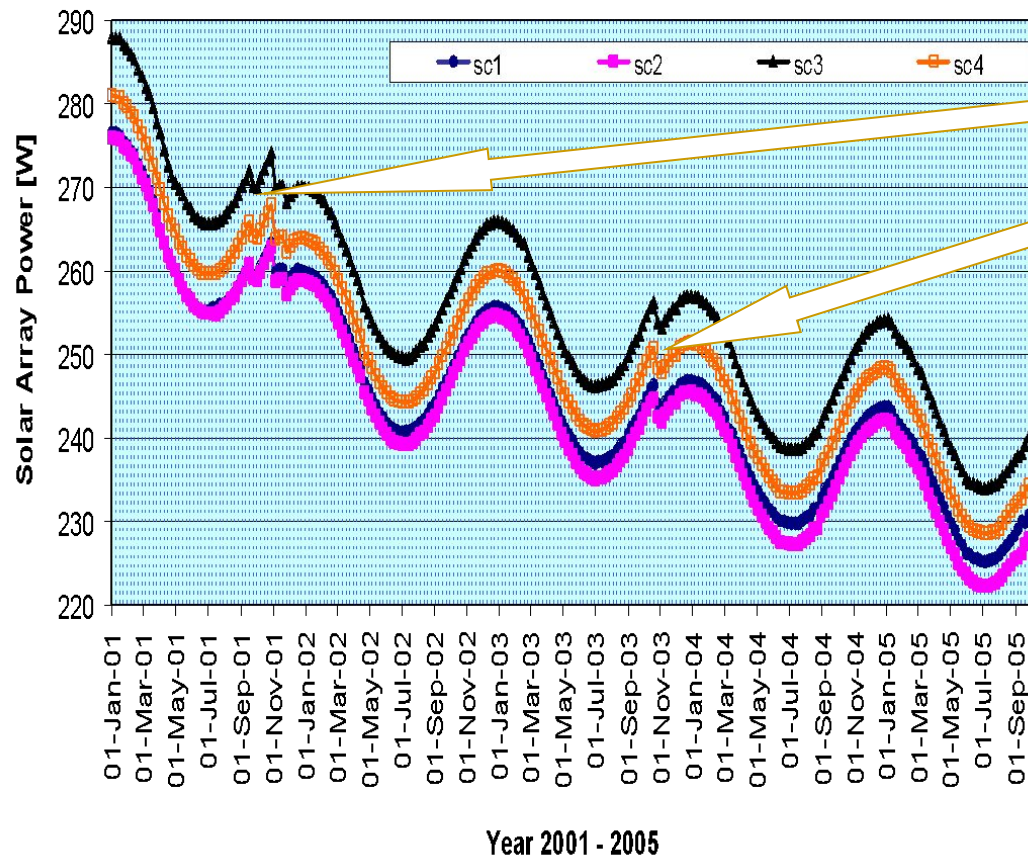
Корпускулярная радиация

Низкоэнергичная ($< \sim 10-100$ кэВ)

Высокоэнергичная (> 100 кэВ)

Аномалии на космических аппаратах

Пример изменения мощности солнечных батарей



Сентябрь 2001

Ноябрь 2003

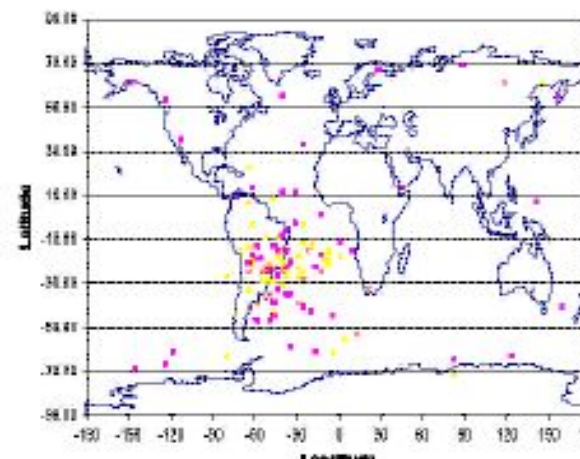
Скачки понижения мощности наблюдают во время больших солнечных событий (R.J. Walters, 2004)

Аномалии на космических аппаратах

Распределение мест возникновения одиночных сбоев на космических аппаратах, находящихся на разной высоте

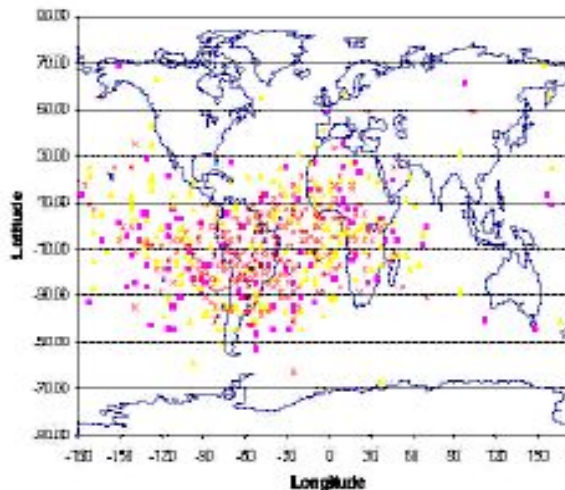
650 до 750 км

CRUX experiment, 1 M SRAM Hitachi, Altitude: 650-750km



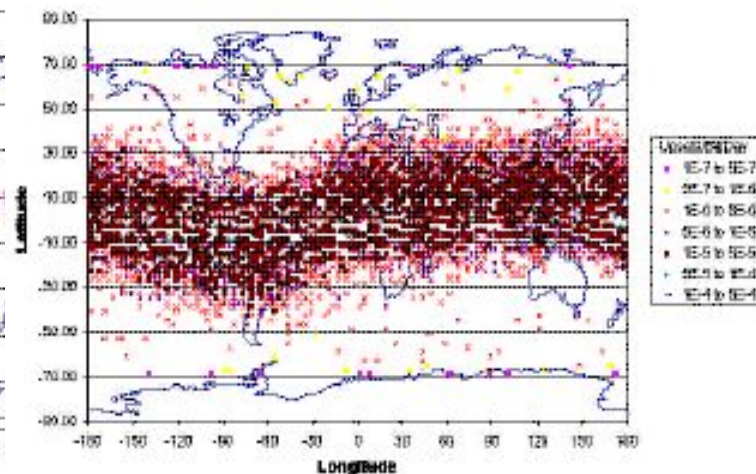
1250 до 1350 км

CRUX experiment, 1 M SRAM Hitachi, Altitude: 1250-1350km



2450 до 2550 км

CRUX experiment, 1 M SRAM Hitachi, Altitude: 2450-2550km



http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/202_SSR.pdf
(Poivey C., et al., 2002)

Аномалии на космических аппаратах

Источники радиационных аномалий на КА

Радиационный
пояс Земли
(РПЗ)
электроны
протоны

Галактические
космические
лучи (ГКЛ)
протоны
ядра

Солнечные
космические
лучи (СКЛ)
протоны
ионы

Вторичное
излучение
 γ -кванты
протоны
нейтроны

**Причина радиационных аномалий - радиационные
эффекты в изделиях космической техники:**

Терморегулирующих покрытиях

Полимерных покрытиях

Оптических покрытиях

Солнечных элементах

Изделиях микро- и оптоэлектроники

Выводы

к разделу «Аномалии на космических аппаратах»

- Высокоэнергичная корпускулярная радиация космического пространства. является одним из важных внешних факторов, который инициирует возникновение аномалий на КА,
- Причиной радиационных аномалий на КА является возникновение радиационных эффектов в изделиях космической техники.

Радиационные эффекты

Механизмы возникновения

Передача кинетической энергии от налетающих частиц веществ (первичный процесс)

Ионизационные эффекты

Неравновесные
электроны и
дырки

Разорванные
атомные связи

Структурные нарушения

Вакансии и
междоузлия

Разупорядочен-
ные области

*Релаксационные процессы термостабилизации и электронейтрализации
(релаксационный процесс)*

Рекомбинация

Образование
объемного заряда

Радио-
люминисценция

Генерация тока

Латентные
треки

Свободные
химические
радикалы

Рекомбинация

Уход на стоки
(примесные
дефекты)

Объединение в
комплексы
(собственные
дефекты)

Образование
объемных
дефектов
(кластеры)

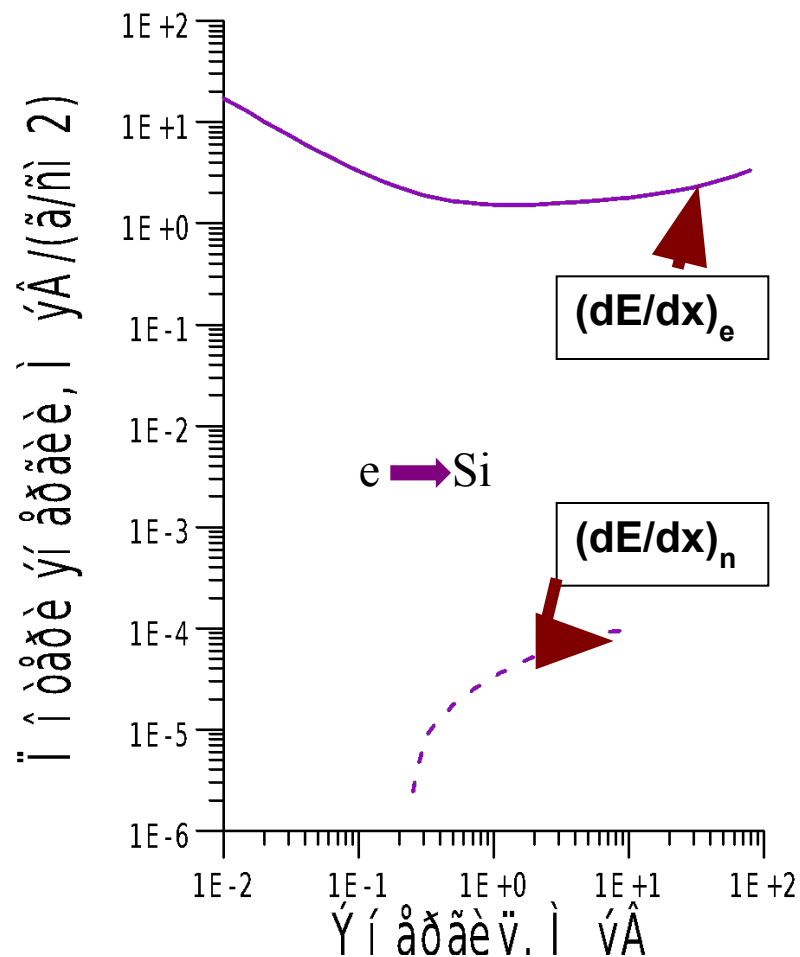
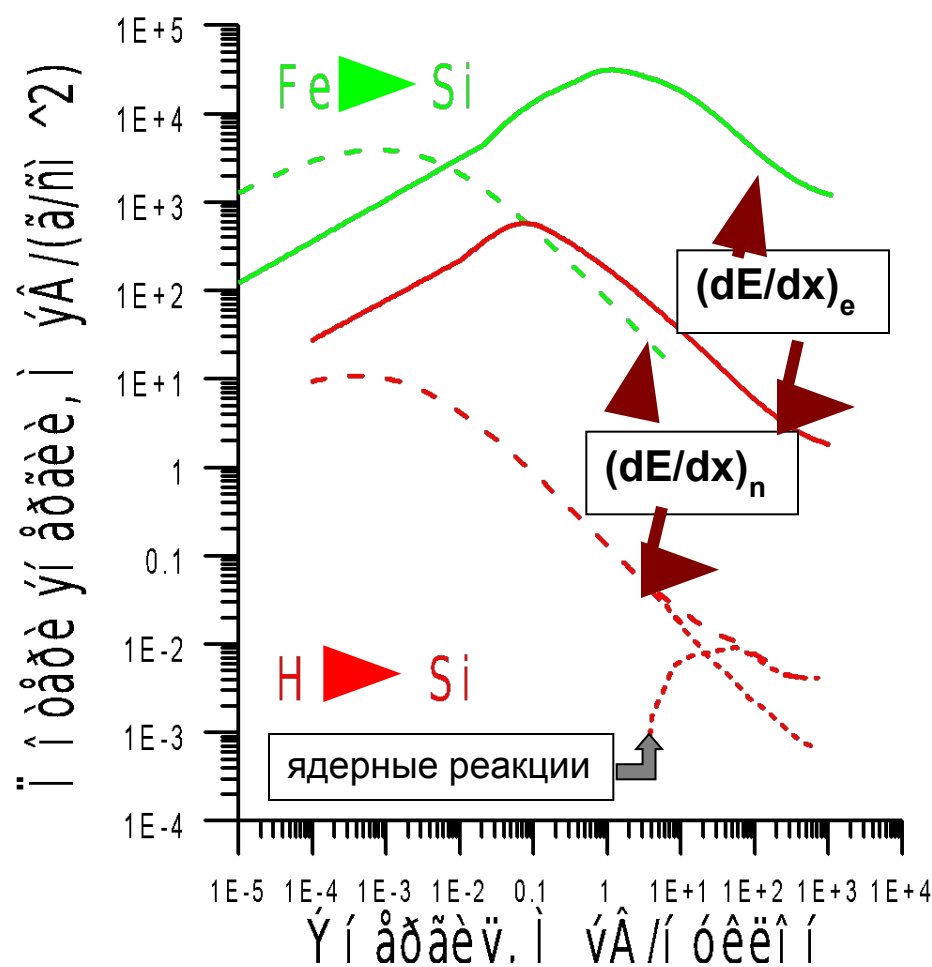
Радиационные эффекты.

Линейная передача энергии (ЛПЭ)

- **ЛПЭ** - основная физическая величина, которая количественно характеризует энергетический вклад одной частицы в образование радиационного эффекта,
- **ЛПЭ, L** - средняя энергия, которую вещество может получить от налетающей заряженной частицы на единице ее пути.
- Единицы измерения **ЛПЭ** - МэВ/см или МэВ/(г/см²)

Радиационные эффекты

Потери энергии заряженных частиц



Радиационные эффекты

Классификация

- *Эффекты поглощенной дозы* проявляются в результате суммирования энергии, которую множество частиц передает чувствительному объему вещества,
- *Случайные одиночные эффекты* возникают при передаче энергии от одной частицы чувствительному объему вещества

Радиационные эффекты

Поглощенная доза

По определению: Поглощенная доза D - энергия, переданная от излучения элементарному объему вещества единичной массы

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} [\text{Дж/кг или Грей (100 рад)}]$$

При воздействии потока заряженных частиц Φ [1/см²] с энергией $E_0 = \text{const}$

$$D = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{E_0} \Phi$$

При воздействии потока частиц $\Phi_i(E)$ 1/см²МэВ разного типа и разной энергии

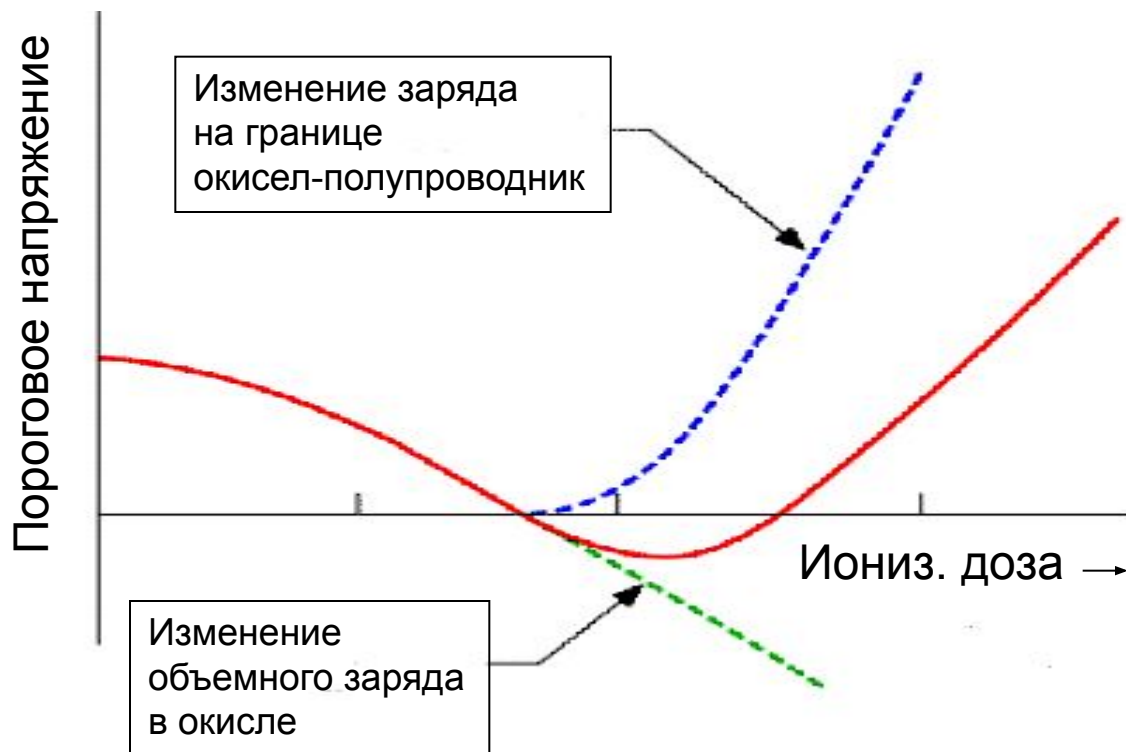
$$D = \sum_i \int \left(\frac{dE}{dx} \Big|_E \right)_i \Phi_i(E) dE = \int L \Phi(L) dL$$

где $\Phi(L) = \sum_i \Phi_i(E) / \frac{d}{dE} \left(\frac{dE}{dx} \right)_E$ - спектр ЛПЭ потока всех частиц

Радиационные эффекты

Пример эффекта ионизационной дозы

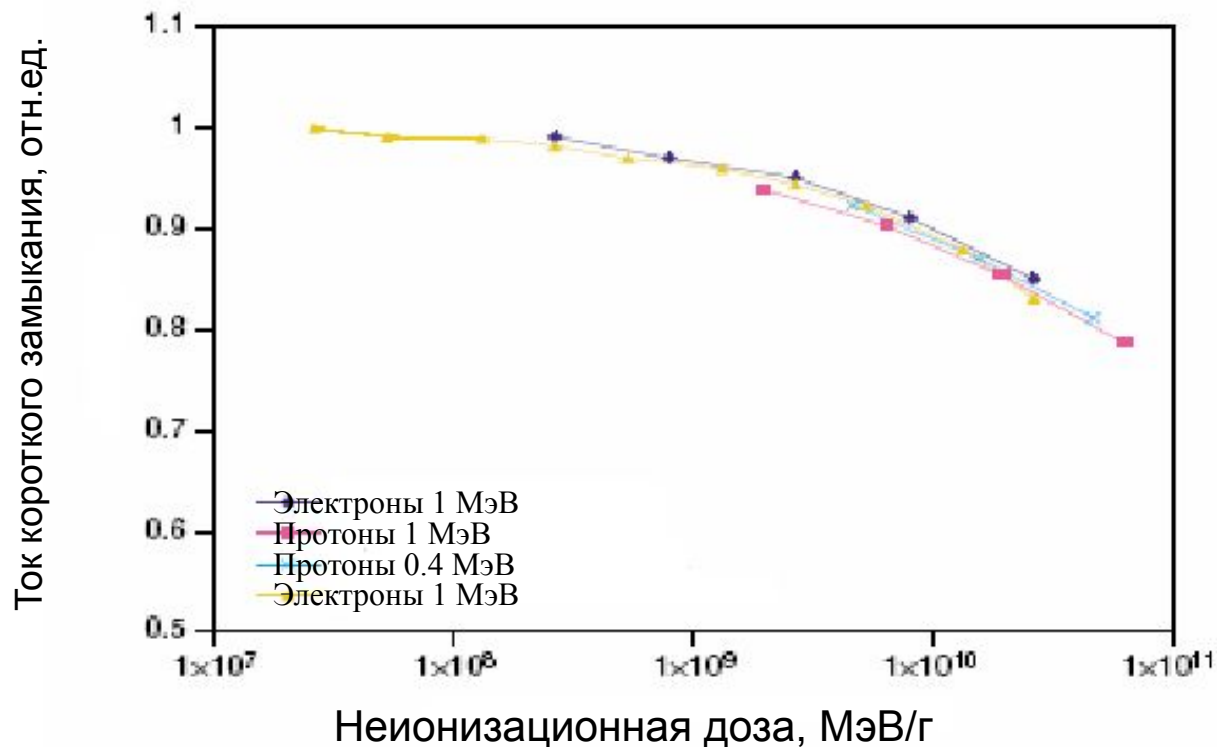
Смещение порога вольт-амперной характеристики в n -канальном транзисторе металл-окисел-полупроводник



Радиационные эффекты

Пример эффекта неионизационной дозы

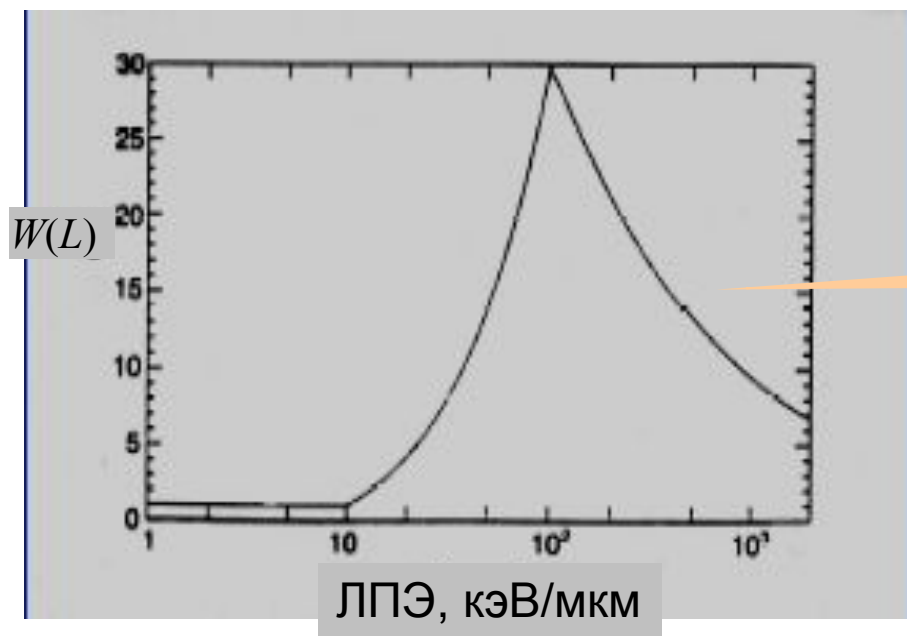
Уменьшение тока короткого замыкания
солнечных элементов (*Walters, et.al., 2004*)



Радиационные эффекты

Эквивалентная доза

Количественной мерой радиационного эффекта в радиобиологии принято использовать величину **эквивалентной дозы**

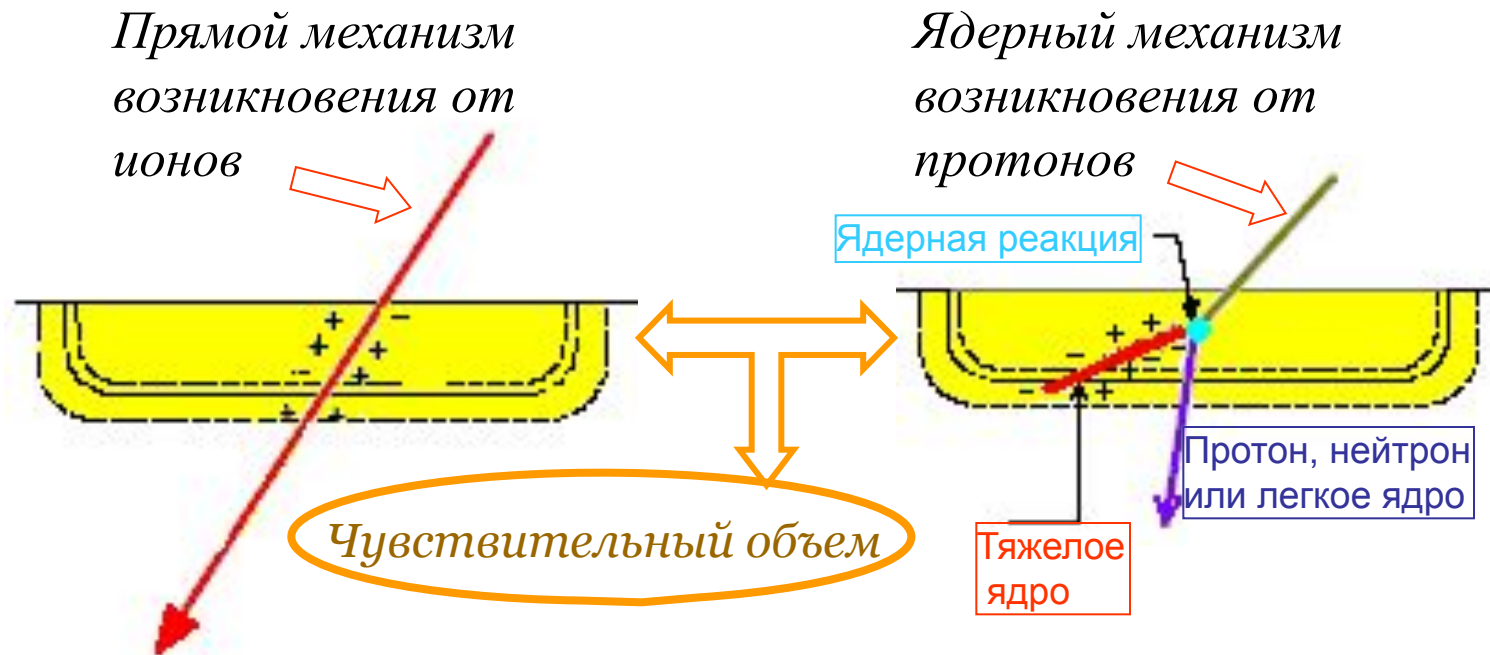


$$H[\text{Зиверт (100 бэр)}] = \int w(L) \cdot L \cdot \Phi(L) dL$$

Радиационные эффекты

Одиночные случайные эффекты

Условие возникновения: энергия ΔE , переданная частицей чувствительному объему, должна быть выше пороговой величины E_c , характеризующей функциональное свойство этого объема.



Радиационные эффекты

Одиночные случайные эффекты

Количественной мерой возникновения ОСЭ при воздействии потока частиц является **частота ОСЭ**

При воздействии плотности потока частиц F ($1/\text{см}^2\text{с}$) с энергией $E_0 = \text{const}$ и углом падения $\theta_0 = \text{const}$

$$\nu = \sigma(E_0, \theta_0) \cdot F$$

При воздействии плотности изотропного потока частиц $F_i(E)$ ($1/\text{см}^2\text{сМэВ}$) разного типа и разной энергии

$$\nu = \sum_i \iiint \sigma_i(E, \Omega) F_i(E) dE d\Omega$$

или используя модельные представления для прямого механизма возникновения ОСЭ

$$\nu = \iiint \sigma_{ion}(L, \Omega) F(L) dE d\Omega$$

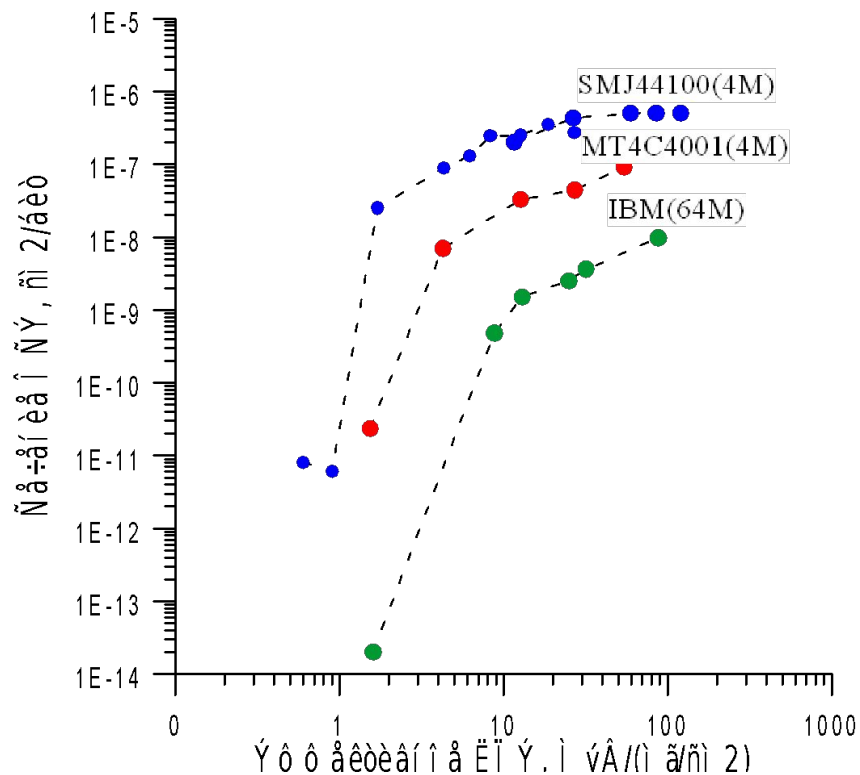
где $F(L)$ - дифференциальный спектр ЛПЭ плотности потока частиц

Радиационные эффекты

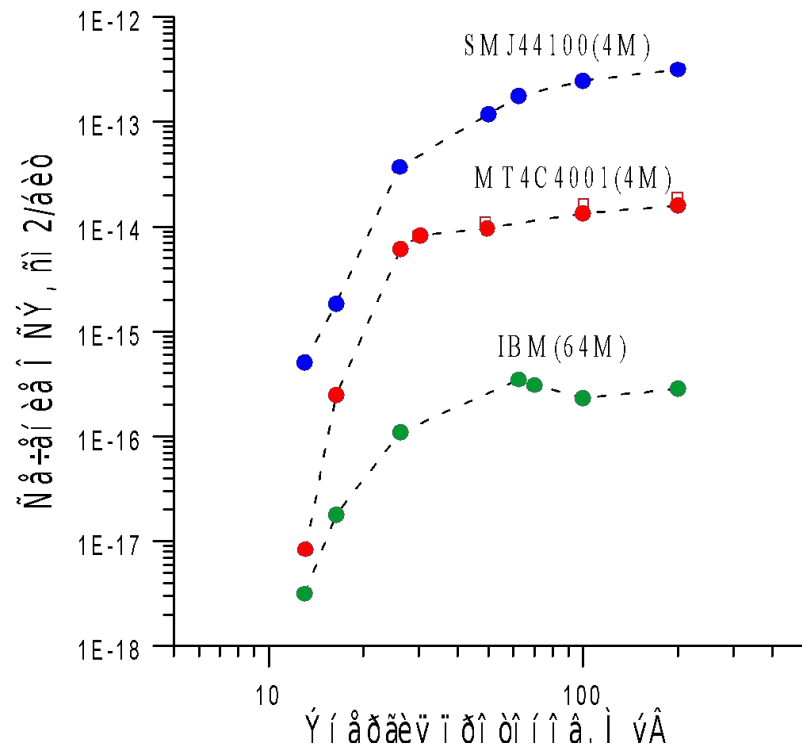
Одиночные случайные эффекты

Примеры сечения ОСЭ у микросхем памяти при нормальном угле падения в зависимости от:

ЛПЭ ионов



энергии протонов



Выводы

к разделу «Радиационные эффекты»

- В настоящее время изучено влияние радиационных эффектов на свойства многих материалов и изделий космической техники.
- Радиационных эффекты в изделиях космической техники подразделяются на эффекты поглощенной дозы (ЭПД) и одиночные случайные эффекты (ОСЭ).
 - Количественной мерой радиационной опасности от ЭПД служит расчетная величина поглощенной дозы (ионизационной и неионизационной).
 - Количественной мерой радиационной опасности от ОСЭ служит расчетная частота одиночных случайных эффектов.

Выводы (продолжение) к разделу «Радиационные эффекты»

- Радиационная опасность для изделий космической техники на борту КА, зависит от:
 - индивидуальных особенностей материала и прибора, которые характеризуются величиной линейной передачи энергии или сечением одиночных случайных эффектов и отражают их радиационную стойкость (чувствительность),
 - воздействующего радиационного окружения, которое характеризуется дифференциальными энергетическими спектрами потока $\Phi(E)$ или плотности потока $F(E)$ частиц и отражают радиационные условия на КА.

Факторы космического полета

Глобальные :

- Происхождение радиационных полей
- Солнечная активность,
- Дрейф магнитного поля Земли
- Экранирующее свойство магнитосферы Земли (для частиц космических лучей)
- Геомагнитные возмущения

Локальные

- Перемещение космического аппарата в пространстве
- Конструкция КА (защитные экраны)
- Анизотропия потоков частиц и тень Земли

Факторы космического полета

Происхождение радиационных полей

В межпланетном пространстве существуют

- **галактические космические лучи (ГКЛ)**, в состав которых входят протоны и ядра химических элементов;
- **солнечные космические лучи (СКЛ)**, в состав которых входят протоны и ионы химических элементов ;

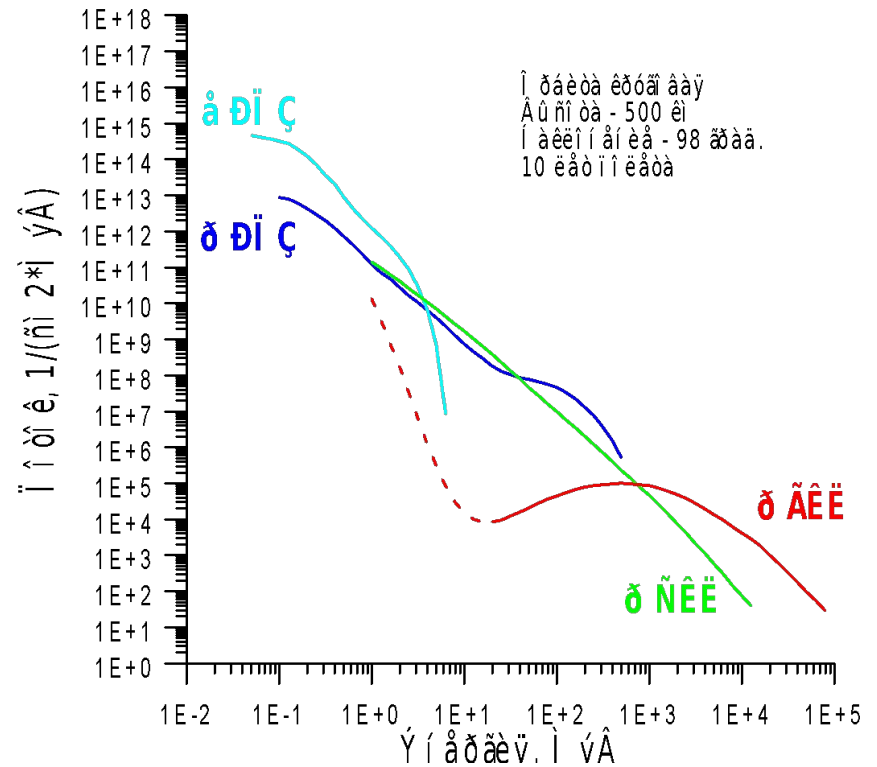
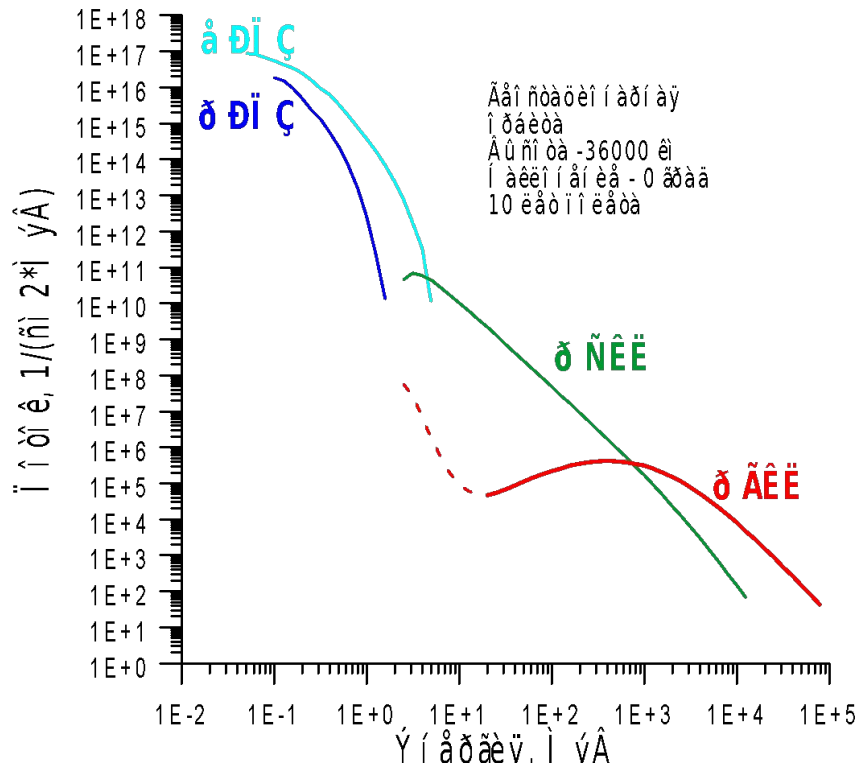
В околоземном космическом пространстве существуют

- **радиационные пояса Земли (РПЗ)**, которые в основном состоят из электронов и протонов, захваченных магнитным полем Земли.

Потоки частиц космических лучей также проникают в магнитосферу Земли.

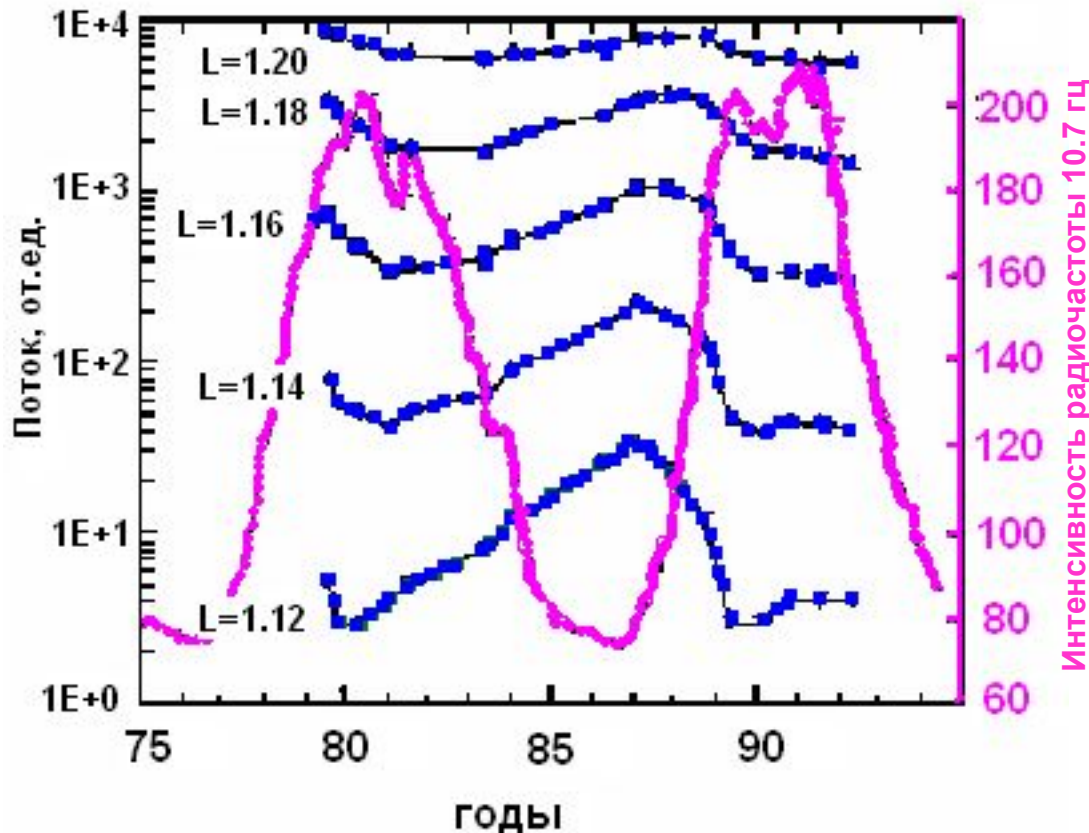
Факторы космического полета

Пример энергетических спектров частиц на орбитах КА



Факторы космического полета

Солнечная активность

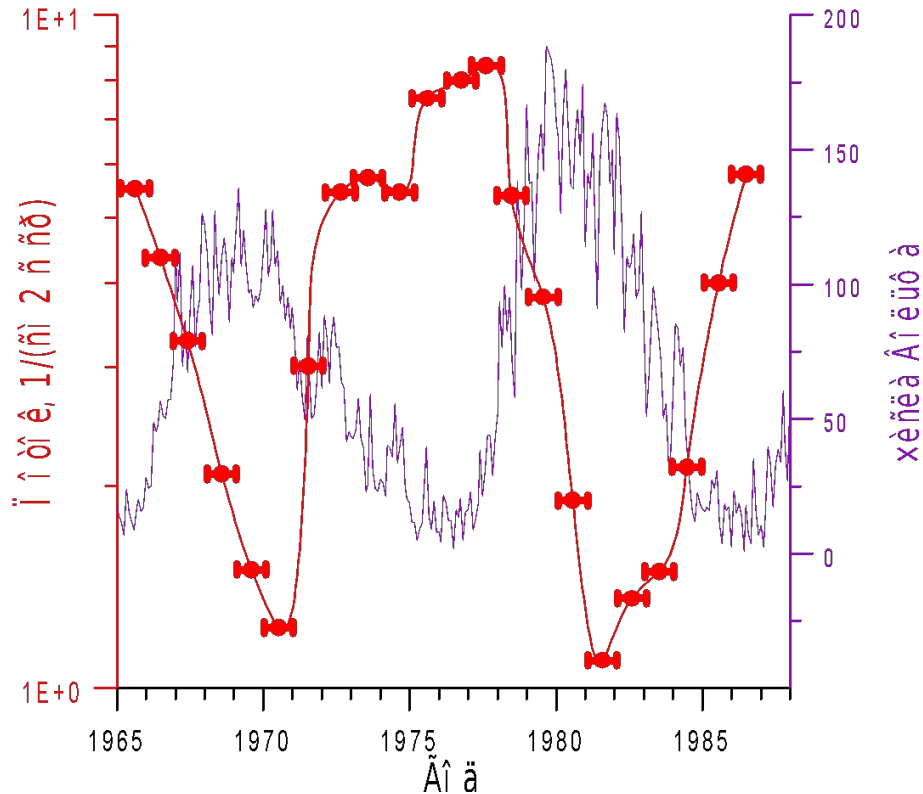


Пример солнечно-циклических вариаций потоков протонов РПЗ с $E=80-215$ МэВ на разных дрейфовых оболочках L (Huston, S. L., 1996)

http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/slideshow10/SC_NSREC97/img001.gif

Факторы космического полета

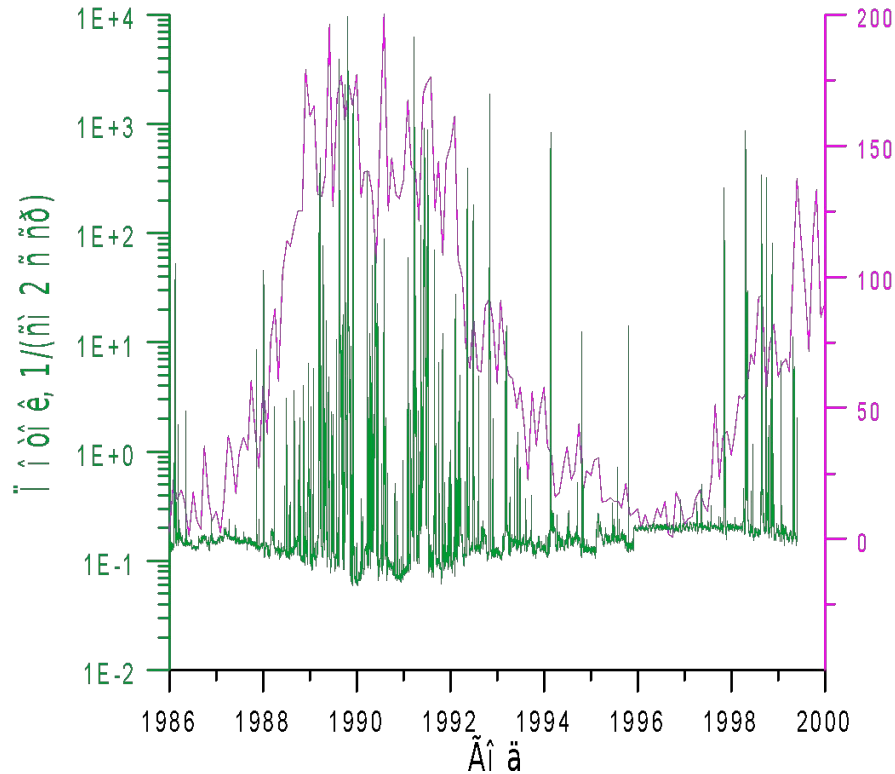
Солнечная активность



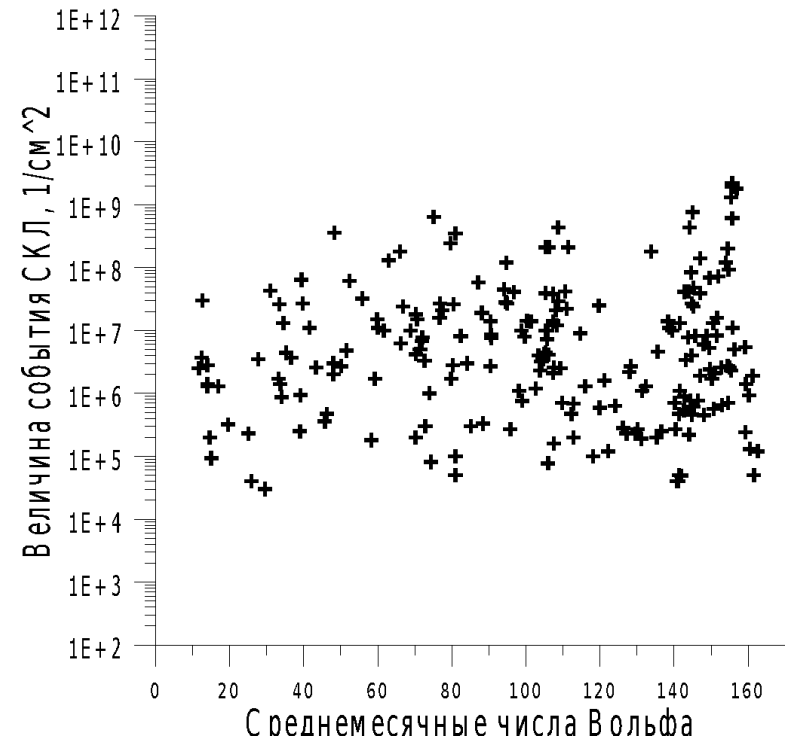
Пример солнечно-циклических вариации потоков ядер гелия ГКЛ с энергией 70-95 МэВ/нуклон и чисел Вольфа в зависимости от календарного времени. Точки – экспериментальные данные спутника IMP-8.

Факторы космического полета

Солнечная активность



Солнечно-циклические вариации потоков протонов СКЛ ($E > 30$ МэВ) и чисел Вольфа в зависимости от календарного времени

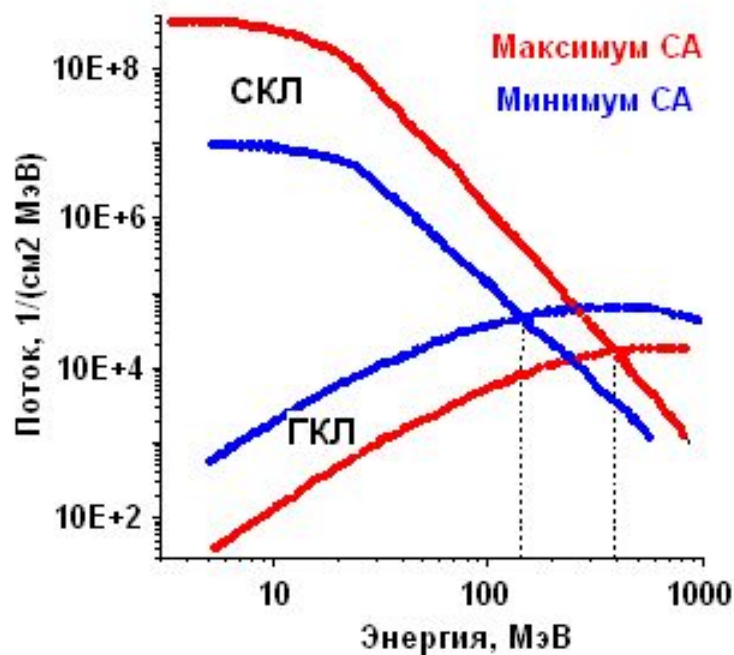


Пиковые потоки протонов СКЛ в зависимости от чисел Вольфа

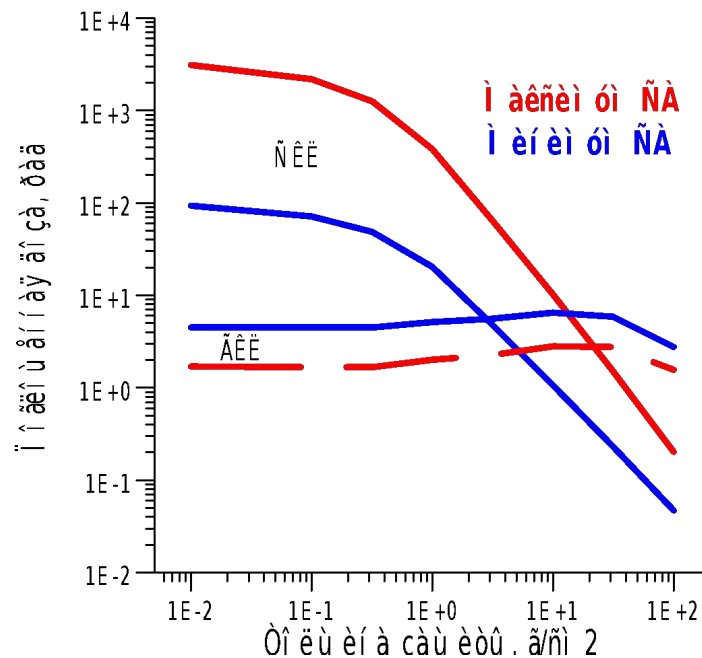
Факторы космического полета

Солнечная активность

Сравнение потоков ГКЛ и СКЛ в межпланетном пространстве



а)

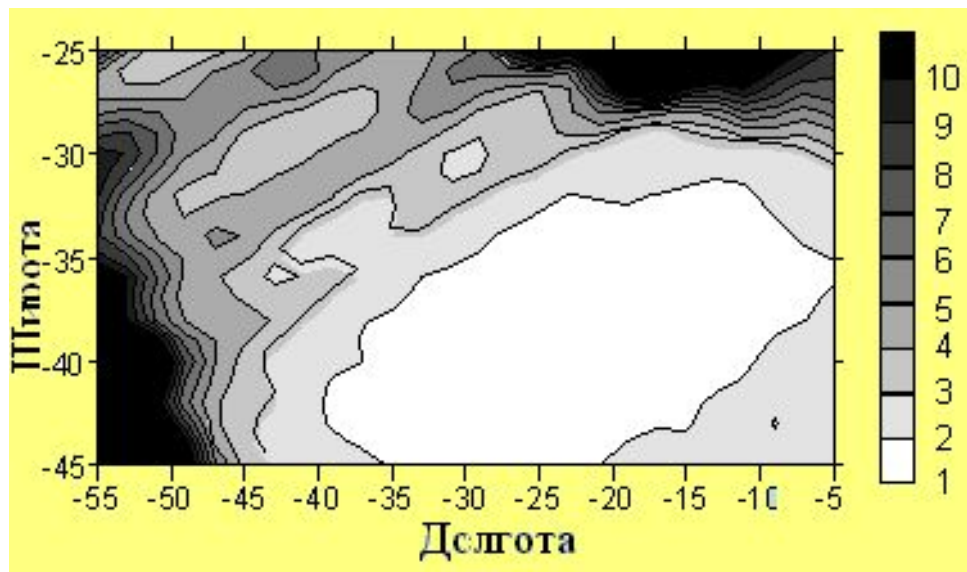


б)

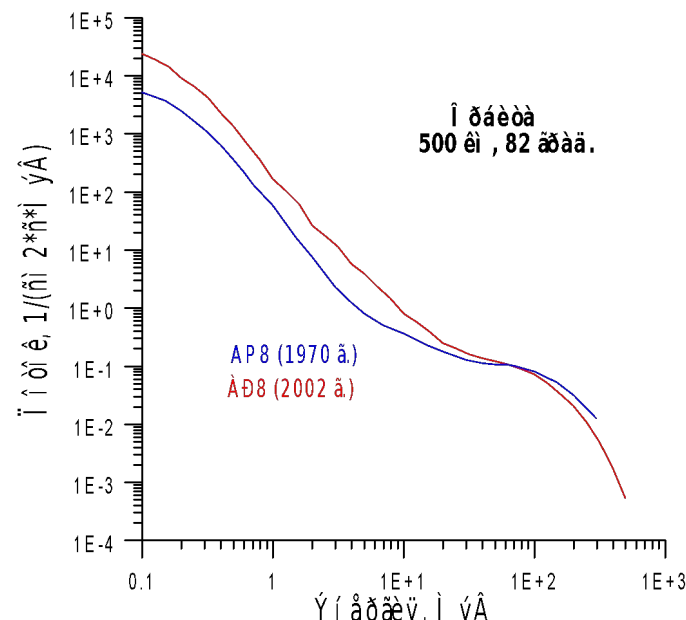
Дифференциальные энергетические спектры протонов (а) и поглощенные дозы (б), полученные по данным спутника IMP8 для периодов минимума ($W < 40$) и максимума ($W > 145$) солнечной активности с 1965 по 1997 г.г.

Факторы космического полета

Вековой дрейф магнитного поля Земли



Отношение потоков протонов с энергией более 40 МэВ, рассчитанное с использованием базы данных модели AP8MAX, для эпохи 1991 и 1970 г.г. над Бразильской аномалией на высоте 500 км. (Энциклопедия, 2000)



Энергетические спектры протонов на круговой орбите с высотой 500 км и наклоном 82 градуса, рассчитанные по модели для эпох 1970 и 2000 г.г.

Проникновение космических лучей в магнитосферу Земли

Функция проникновения частиц в точку

Жесткость заряженной частицы $\Rightarrow R_z(E) = \frac{A_z}{Q_z} \sqrt{E(E + 2mc^2)}$

Массовое число частицы A_z

Заряд частицы Q_z

Энергия на нуклон E

Масса протона m

Функция проникновения в точку X $\Rightarrow \psi(R_z, X) = \begin{cases} 1, & \text{если } R_z(E) \geq R_c(X) \\ 0, & \text{если } R_z(E) < R_c(X) \end{cases}$

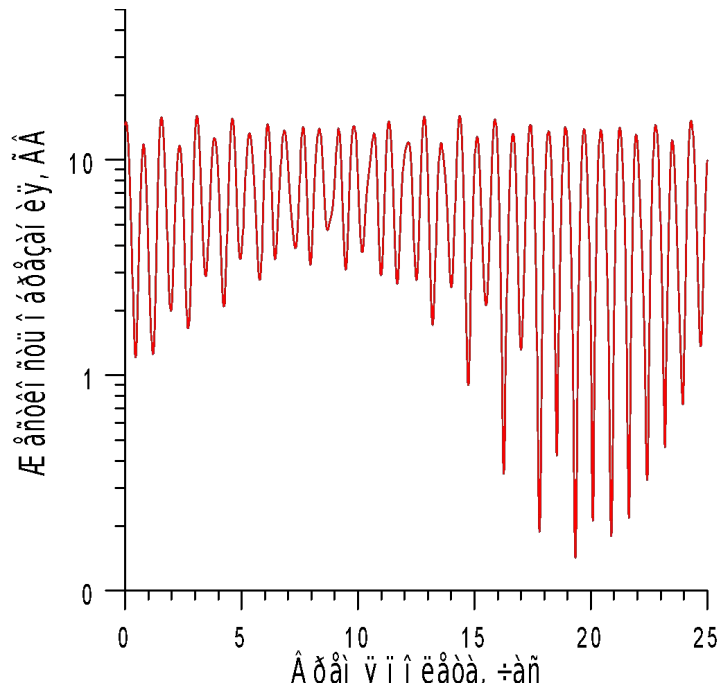
где $R_c(X)$ $\leftarrow$ Эффективная жесткость обрезания

Поток заряженных частиц в магнитосфере в точке X $\Rightarrow \Phi_{z \text{ орб}}(E, \vec{X}) = \psi(R_z(E), \vec{X}) \cdot \Phi_z(E)$

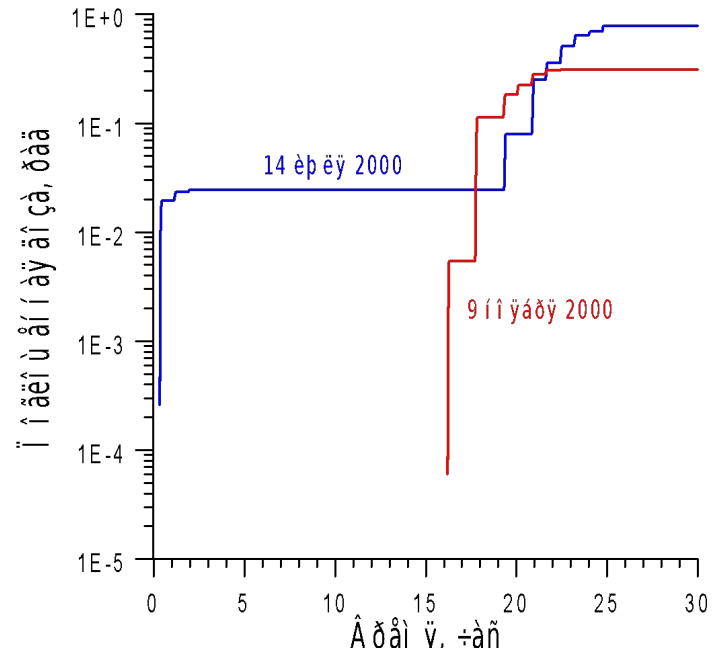
Поток заряженных частиц в межпланетном пространстве $\Phi_z(E)$

Проникновение космических лучей в магнитосферу Земли

Функция проникновения частиц в точку



Эффективная жесткость
геомагнитного обрезания на
орбите станции «Мир»
в зависимости от времени полета



Накопление поглощенной дозы
на станции «Мир» при возникновении
событий СКЛ в июле и ноябре 2000 г.
в зависимости от времени с момента
появления потоков СКЛ вблизи Земли.

Проникновение космических лучей в магнитосферу Земли

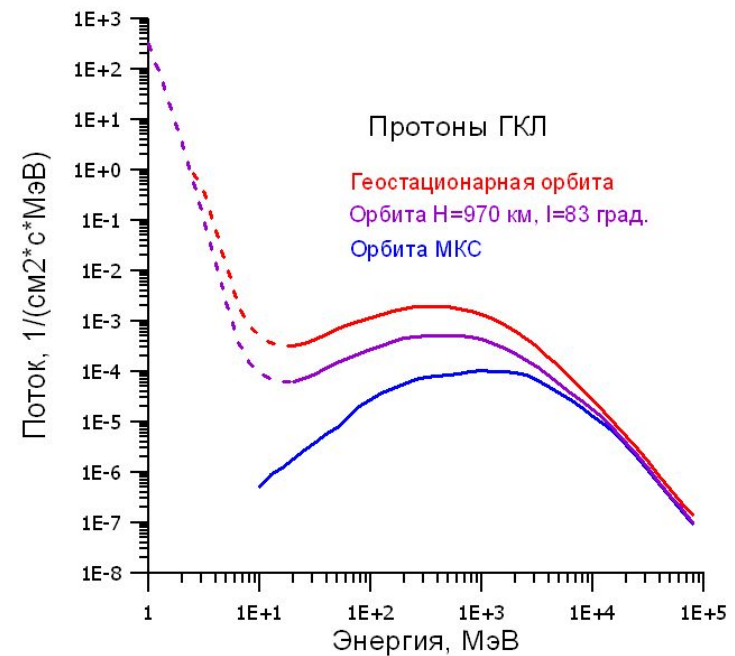
Функция проникновения частиц на орбиту

$$\psi(R_z) = \frac{\int_0^T \psi(R_z, \vec{X}(t)) dt}{T} = \frac{\Delta t \{R_z > R_c(\vec{X}(t))\}}{T}$$

← время полета

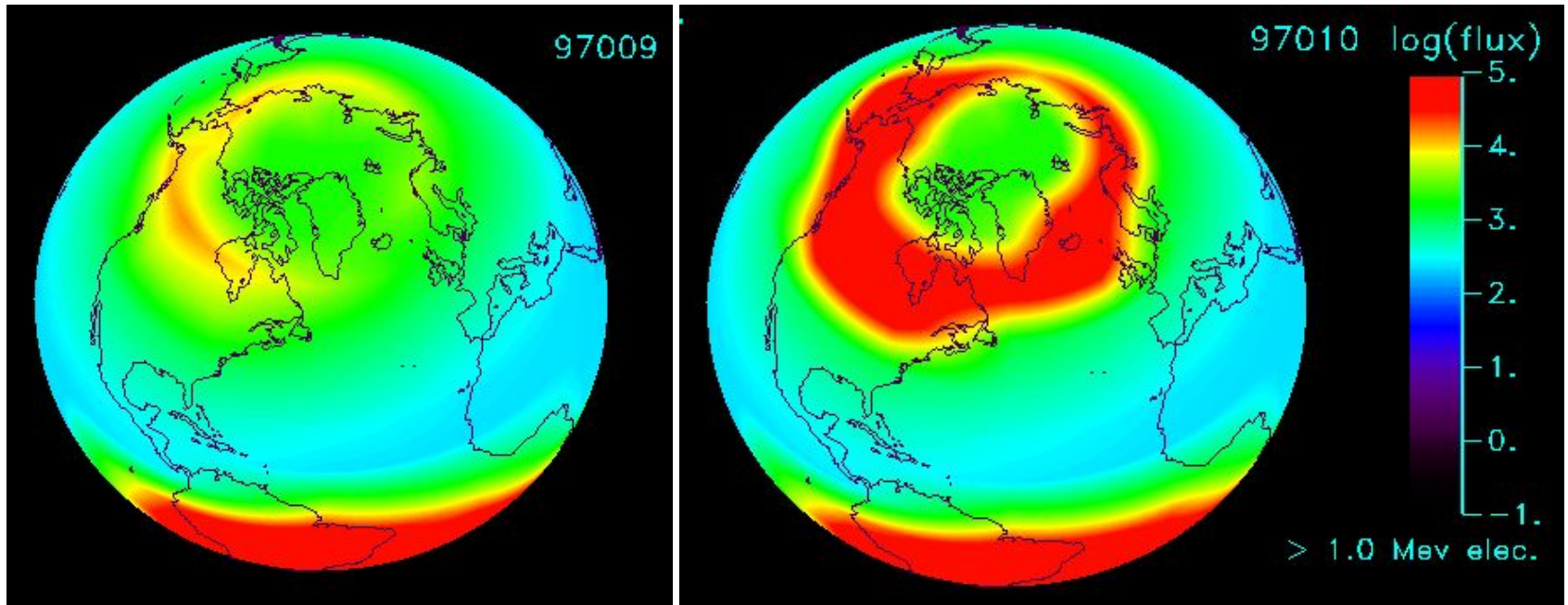
Энергетический спектр потока частиц космических лучей на орбите

$$\Phi_{z \text{ орб}}(E, \vec{X}) = \Psi(R_z(E), \vec{X}) \cdot \Phi_z(E)$$



Геомагнитная активность

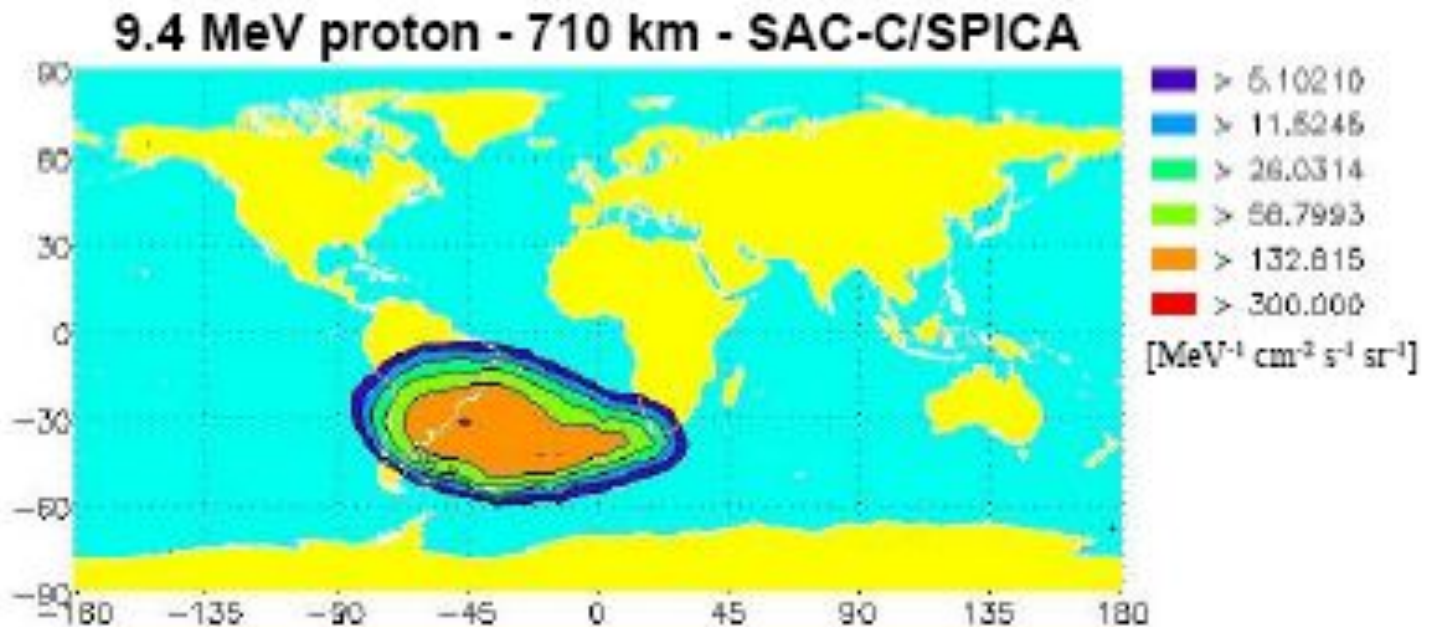
Пример распределения потоков электронов в РПЗ, зарегистрированных на спутнике SAMPEX до и после магнитной бури 9-10 января 1997 г.



<http://www.haystack.mit.edu/~jcf/jan97/sampex.gif>

Перемещение космического аппарата в пространстве

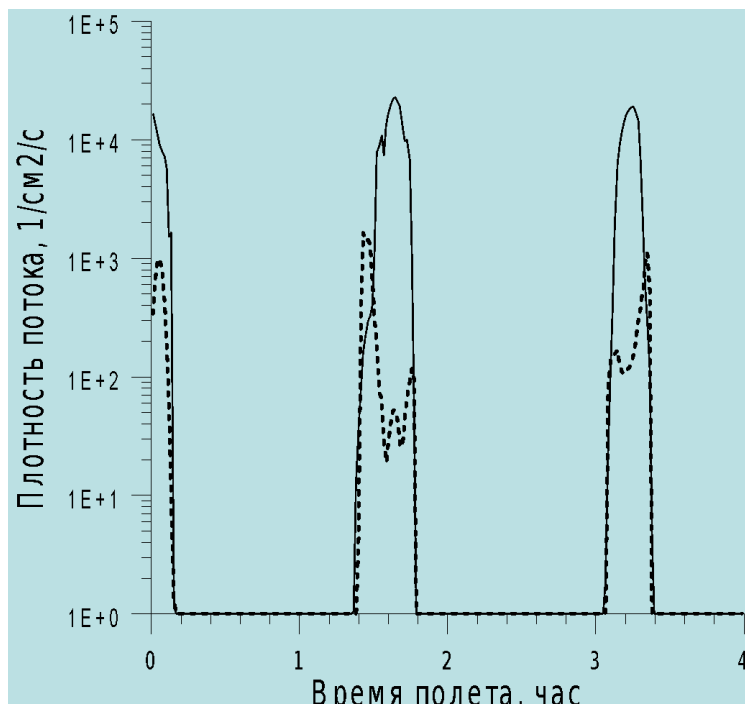
Пример распределения потоков протонов в околоземном пространстве



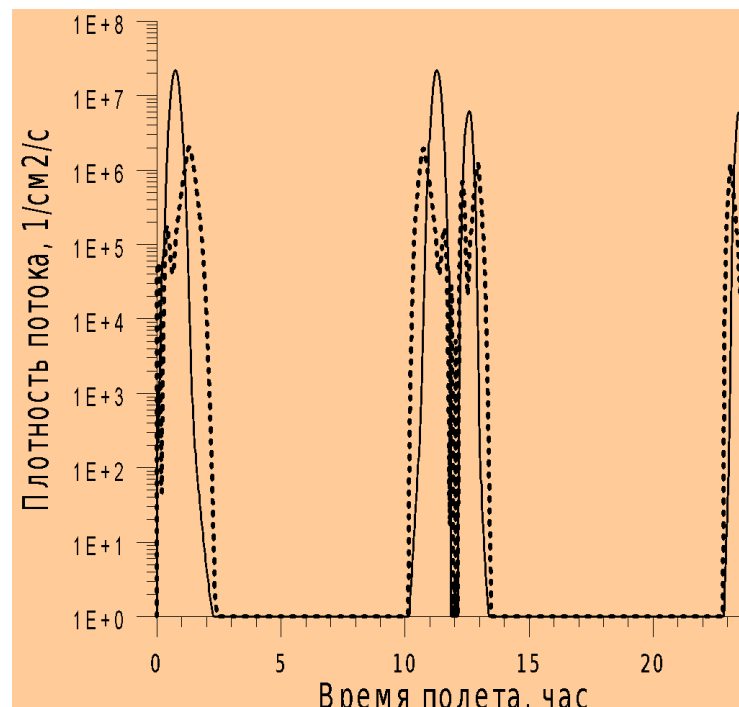
space-env.esa.int/EMA_Events/SPENVIS_WS2002/Proceedings/bourdarie.pdf

Перемещение космического аппарата в пространстве

Примеры расчетных зависимостей потоков протонов (сплошные кривые) и электронов (пунктирные кривые) РПЗ на орбитах КА от времени полета



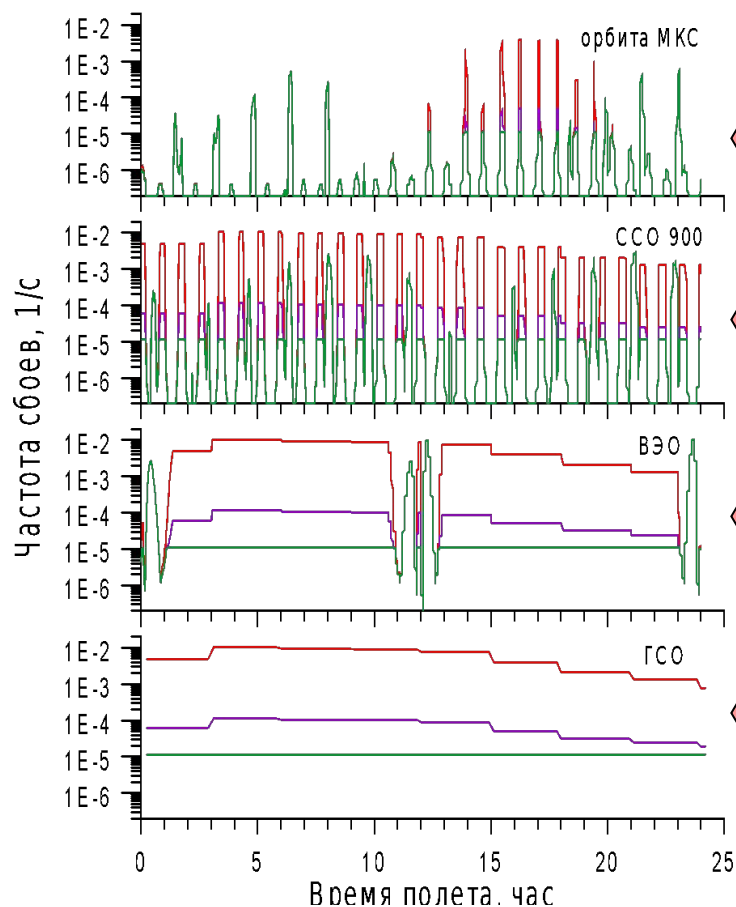
Орбита МКС,
400-450 км, 51 град.



Высокоэллиптическая орбита
500-40000 км, 63 град.

Перемещение космического аппарата в пространстве

Примеры изменения частоты сбоев в микросхеме памяти (объем 16М) в зависимости от времени полета КА



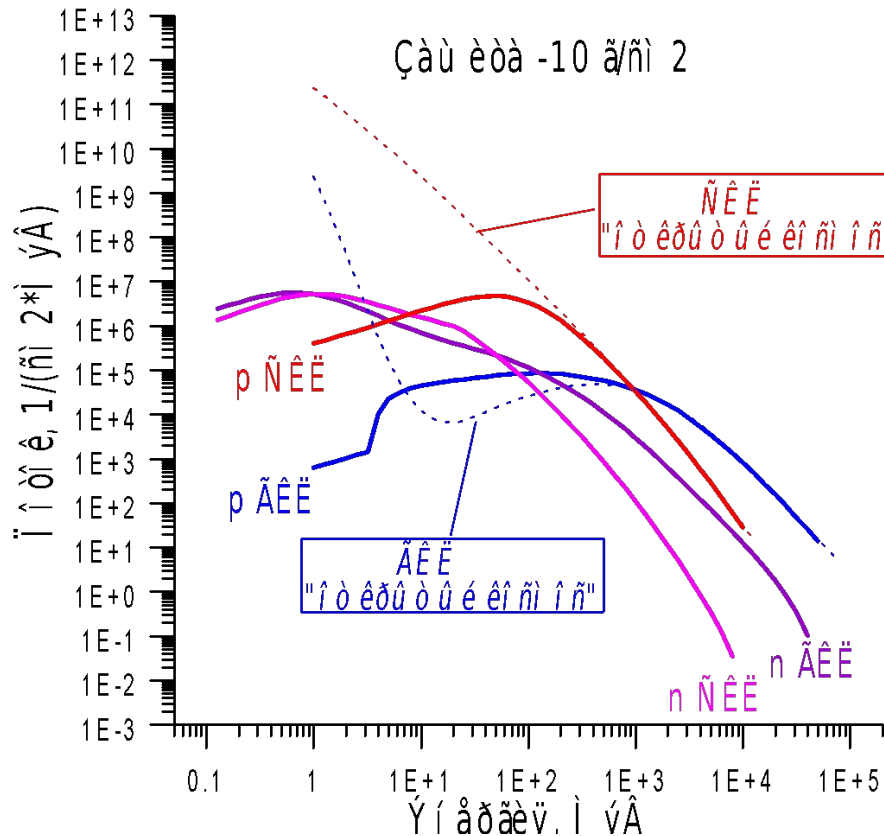
Орбита международной космической станции
 $H = 426$ км, $I = 51,6$ градусов;

Солнечносинхронная орбита
 $H = 900$ км, $I = 97$ градусов;

Высокоэллиптическая орбита
 $H = 500-40000$ км, $I = 63$ градуса;

Геостационарная орбита
 $H = 36000$ км, $I = 0$ градусов

Конструкция КА (защитные экраны)



Энергетические спектры протонов и вторичных нейтронов, возникающие за защитой при воздействии протонов ГКЛ и СКЛ.

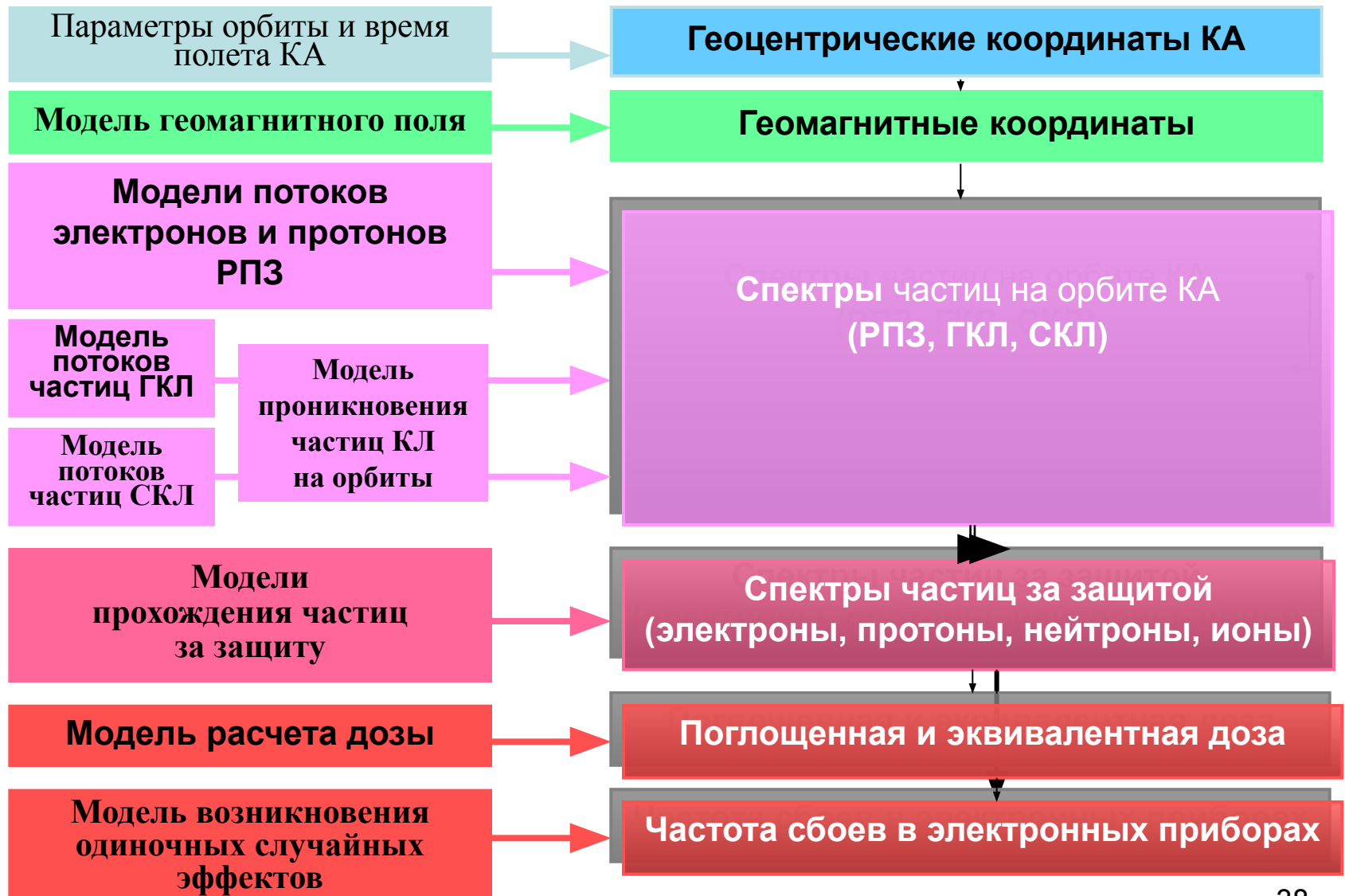
Выводы

к главе «Факторы космического полета»

- В околоземном космическом пространстве существуют высокоэнергичные потоки частиц РПЗ, ГКЛ и СКЛ, которые необходимо учитывать при прогнозировании радиационной опасности на КА.
- Разработанные модели устанавливают энергетические спектры сглаженных (усредненных за несколько месяцев) потоков частиц с учетом влияния солнечной активности и позволяют прогнозировать вариации этих потоков, связанные с изменением положения КА в пространстве.
- Существующие ядерно-физические данные позволяют рассчитывать характеристики радиационной опасности для материалов и приборов, расположенных за защитными экранами внутри КА.

Прогнозирование радиационной опасности

Схема компьютерного пакета программ



Прогнозирование радиационной опасности

Модели радиационного окружения в интерактивных информационных системах

Радиационное поле	Модель
Радиационный пояс Земли (протоны)	AP8-MIN; AP8-MAX
Радиационный пояс Земли (электроны)	AE8-MIN; AE8-MAX
Галактические космические лучи (протоны и ядра)	CREME96; Badhwar&O'Neill
Солнечные космические лучи (протоны)	JPL92
Солнечные космические лучи (ионы)	CREME96;

Информационные системы:

CREME96 - <http://creme96.nrl.navy.mil>

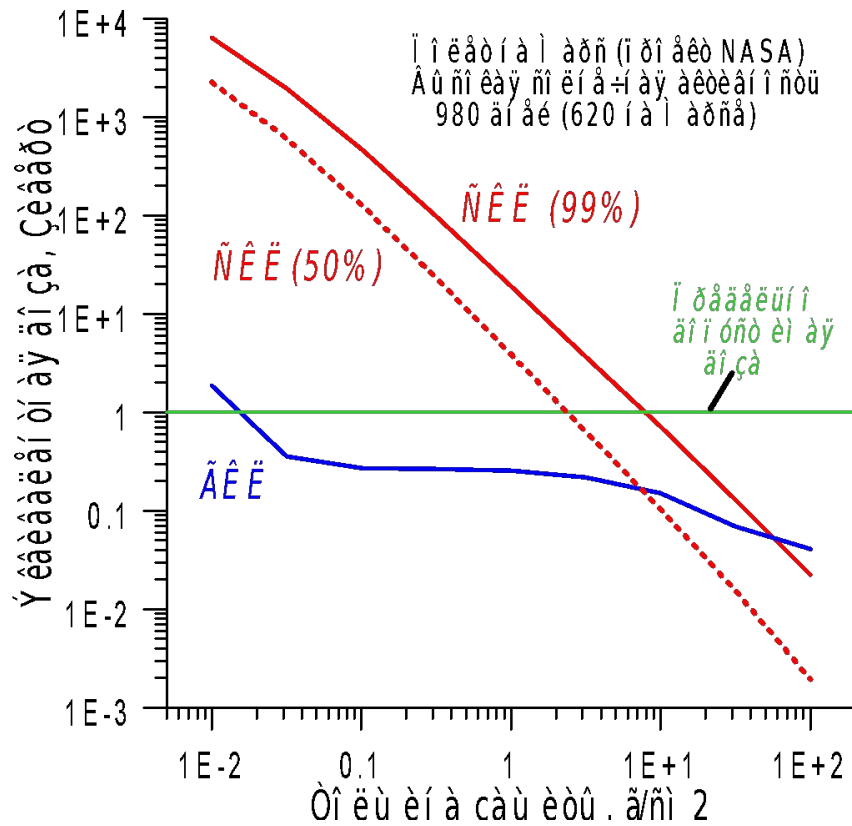
SPENVIS - <http://www.spenvis.oma.be/spenvis>

SIREST - <http://www.sirest.larc.nas.gov>

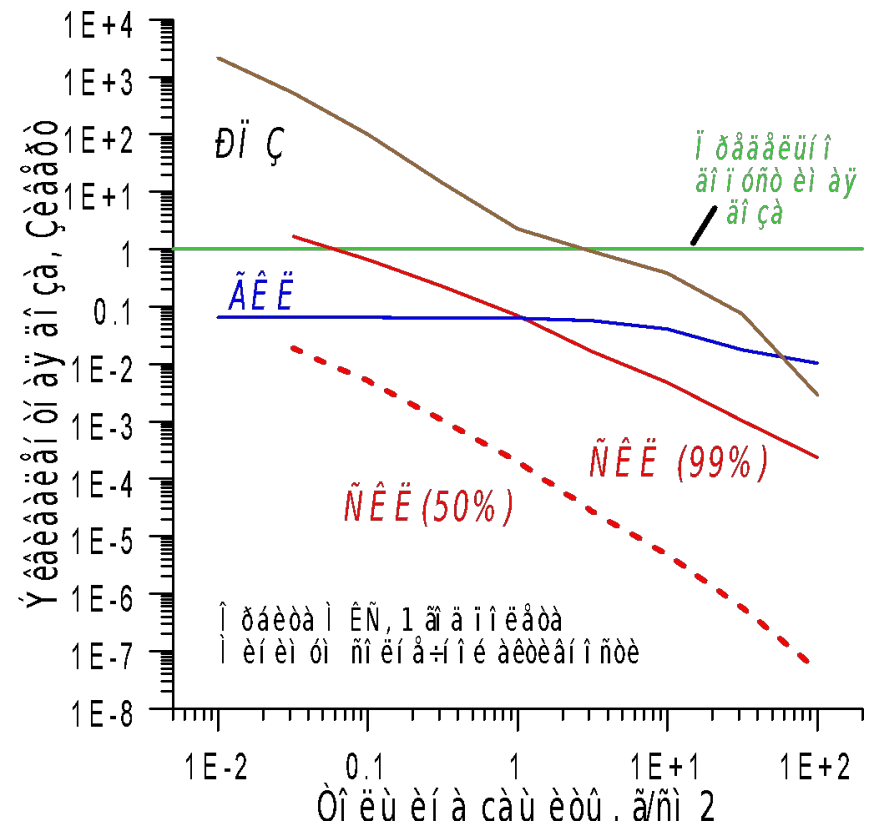
Прогнозирование радиационной опасности

Пример расчета эквивалентной дозы

Полет на Марс

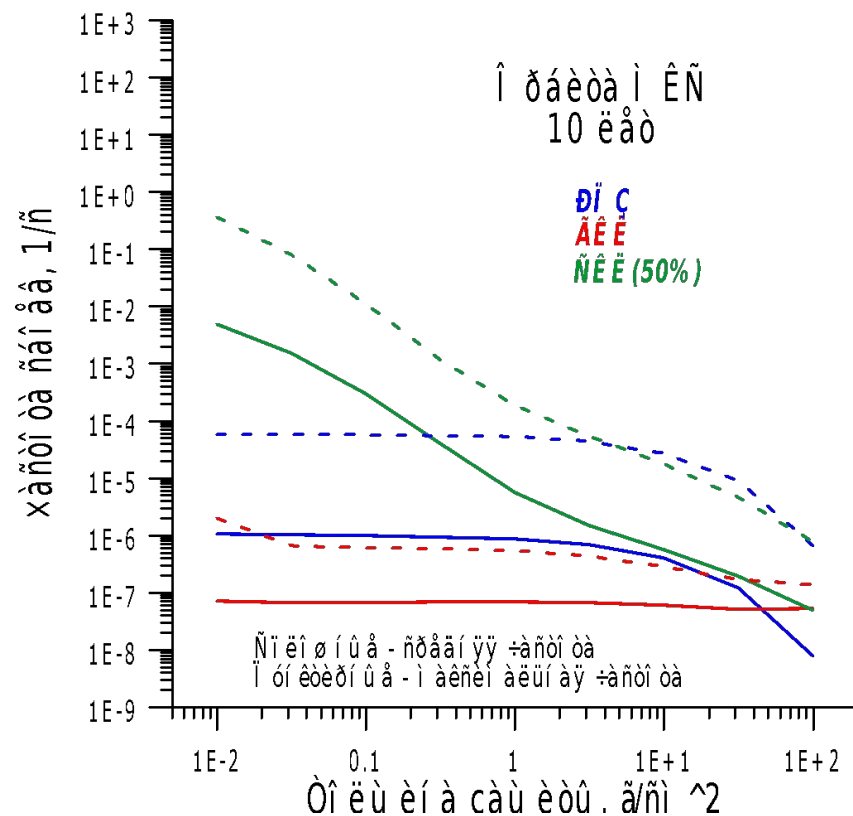
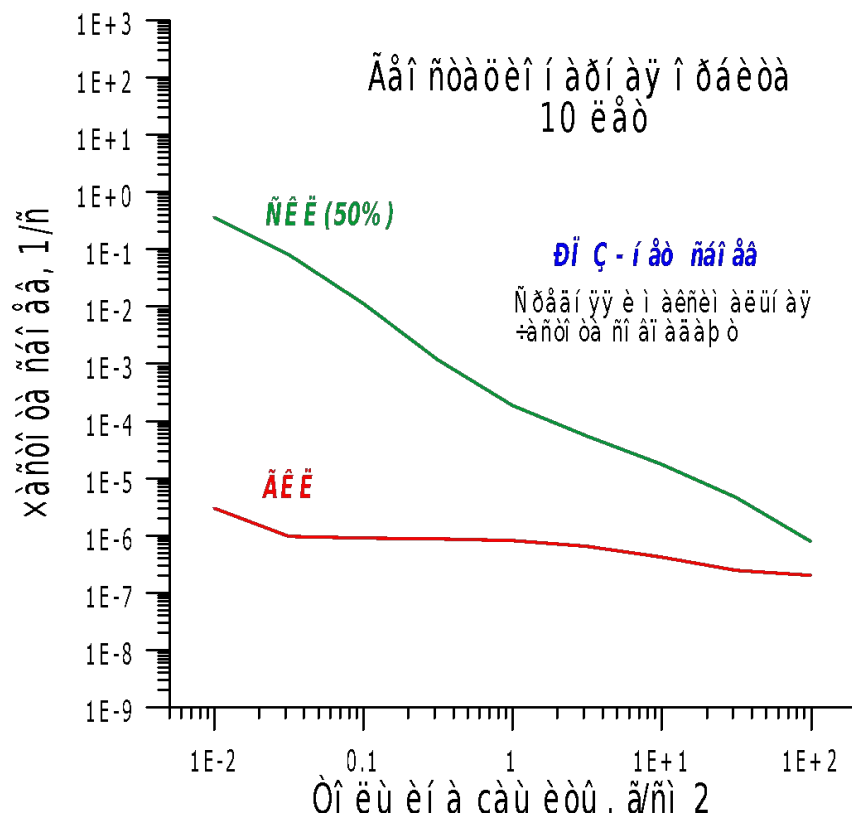


Орбита МКС



Прогнозирование радиационной опасности

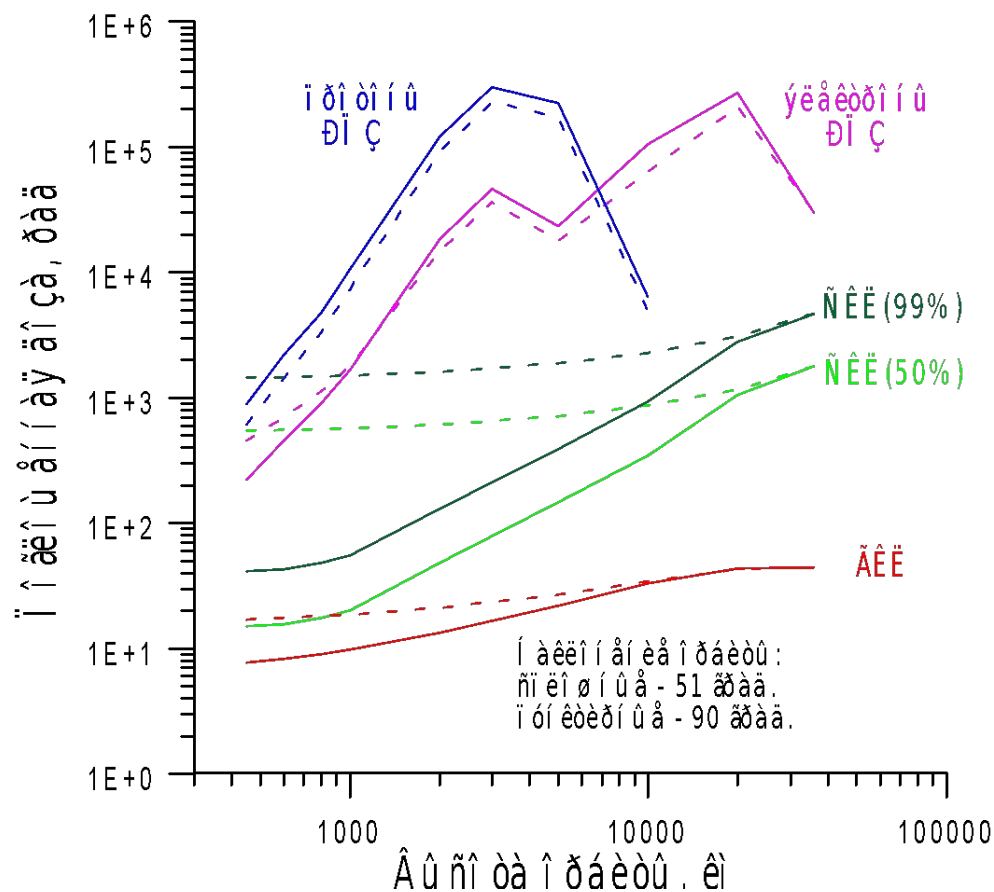
Пример расчета частоты ОСЭ



Перебегающие отказы (сбои) в «типичной» микросхеме памяти

Прогнозирование радиационной опасности

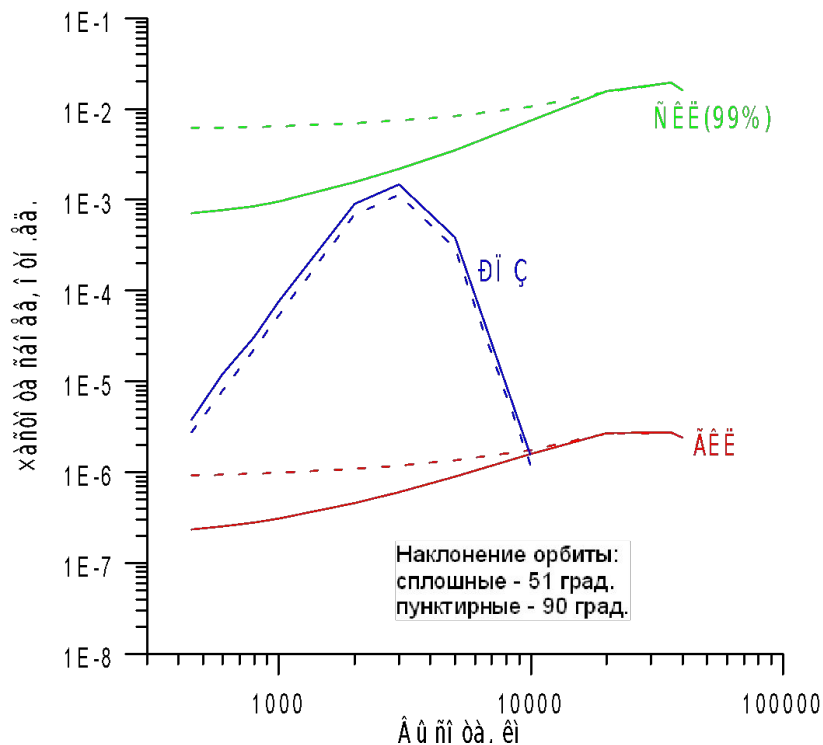
Пример расчета поглощенной дозы на круговых околоземных орбитах



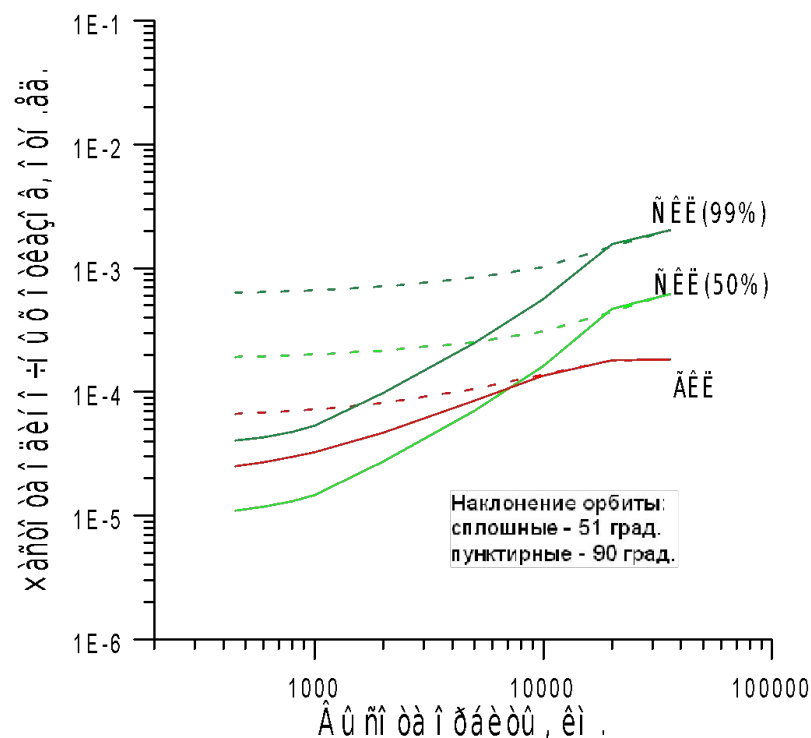
Поглощенная доза (10 лет)
в зависимости от высоты
круговой орбиты КА
(защита 1 г/см²)

Прогнозирование радиационной опасности

Пример расчета частоты (количества) одиночных случайных эффектов на круговых околоземных орбитах



Частота одиночных сбоев в микросхемах памяти в зависимости от высоты круговой орбиты КА (защита 1 г/см²)



Количество одиночных отказов (10 лет) в микросхемах с $L_c = 20$ МэВ/(мг/см²) в зависимости от высоты круговой орбиты КА (защита 1 г/см²)

Выводы

к разделу «Прогнозирование радиационной опасности»

- Существующие интегрированные пакеты программ, разработанные с использованием моделей потоков частиц радиационного окружения и моделей радиационных эффектов, позволяют оперативно и с необходимой полнотой обеспечить количественную оценку радиационной опасности, ожидаемую на борту КА на заданной орбите и в заданный период времени.

Литература