

# 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

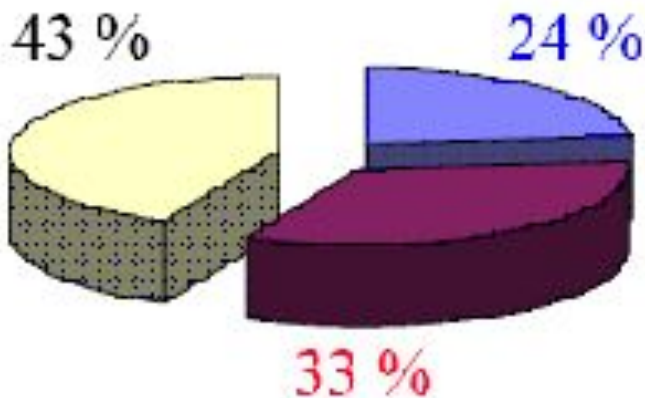
- **Прогнозирование радиационной опасности**

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

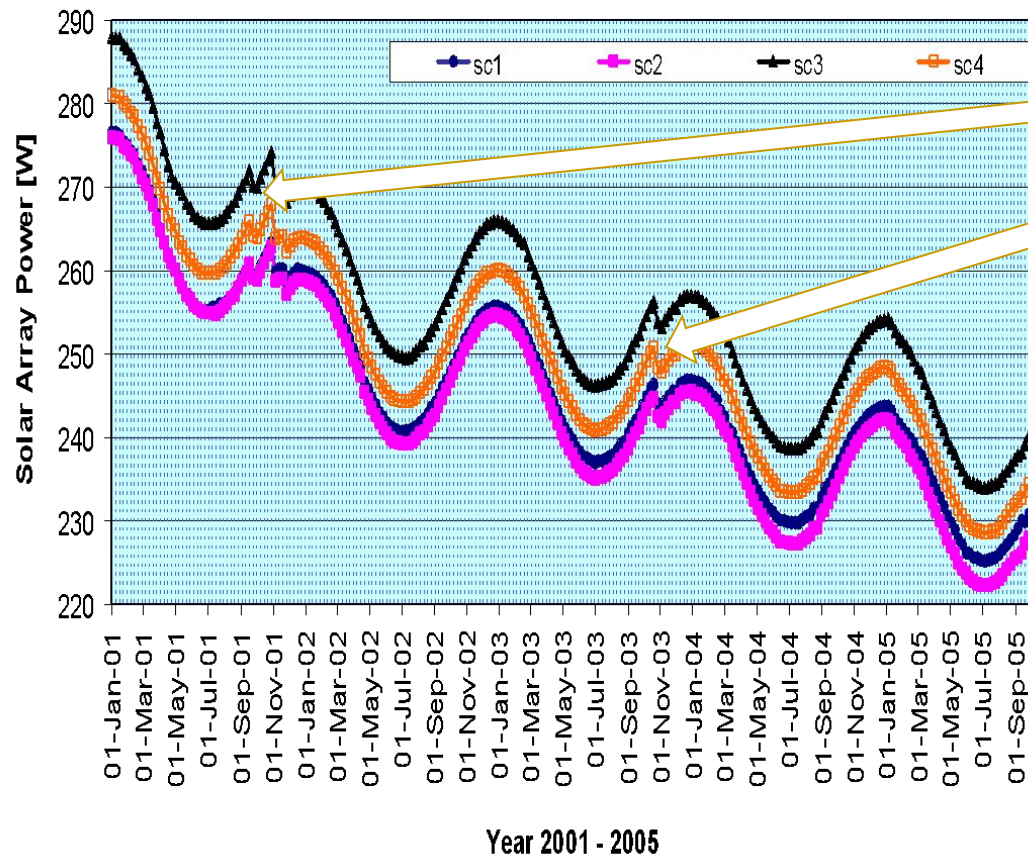
**Корпускулярная радиация**

Низкоэнергичная (<~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)

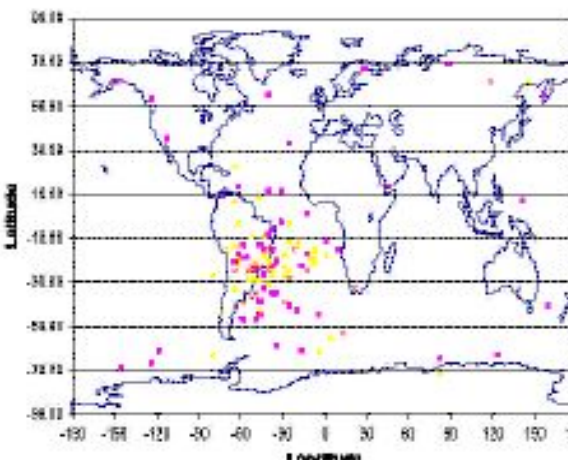
[http://esa-spaceweather.net/spweather/workshops/eswwll/proc/Session4/Presentation\\_KEIL.pps](http://esa-spaceweather.net/spweather/workshops/eswwll/proc/Session4/Presentation_KEIL.pps)

# Аномалии на космических аппаратах

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

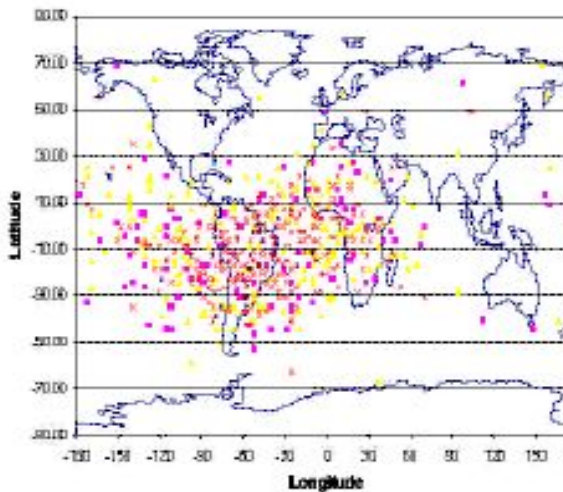
650 до 750 км

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



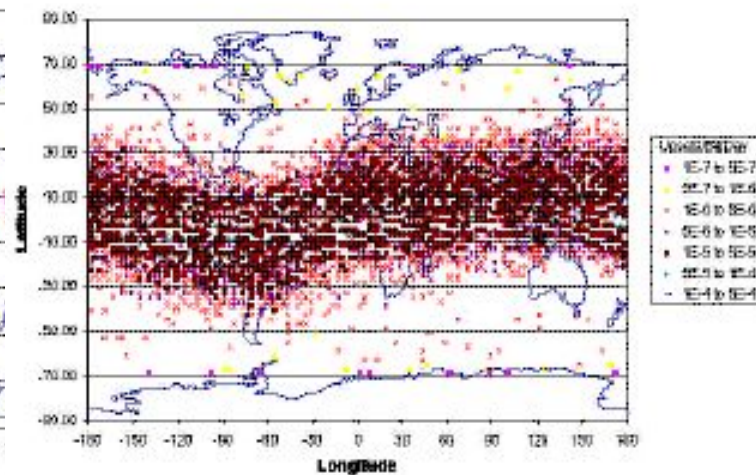
1250 до 1350 км

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/http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/202\\_SSR.pdf](http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/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

Разупорядоченные области

*Релаксационные процессы термостабилизации и электронейтрализации (релаксационный процесс)*

Рекомбинация

Образование объемного заряда

Радиолюминисценция

Генерация тока

Латентные треки

Свободные химические радикалы

Рекомбинация

Уход на стоки (примесные дефекты)

Объединение в комплексы (собственные дефекты)

Образование объемных дефектов (кластеры)



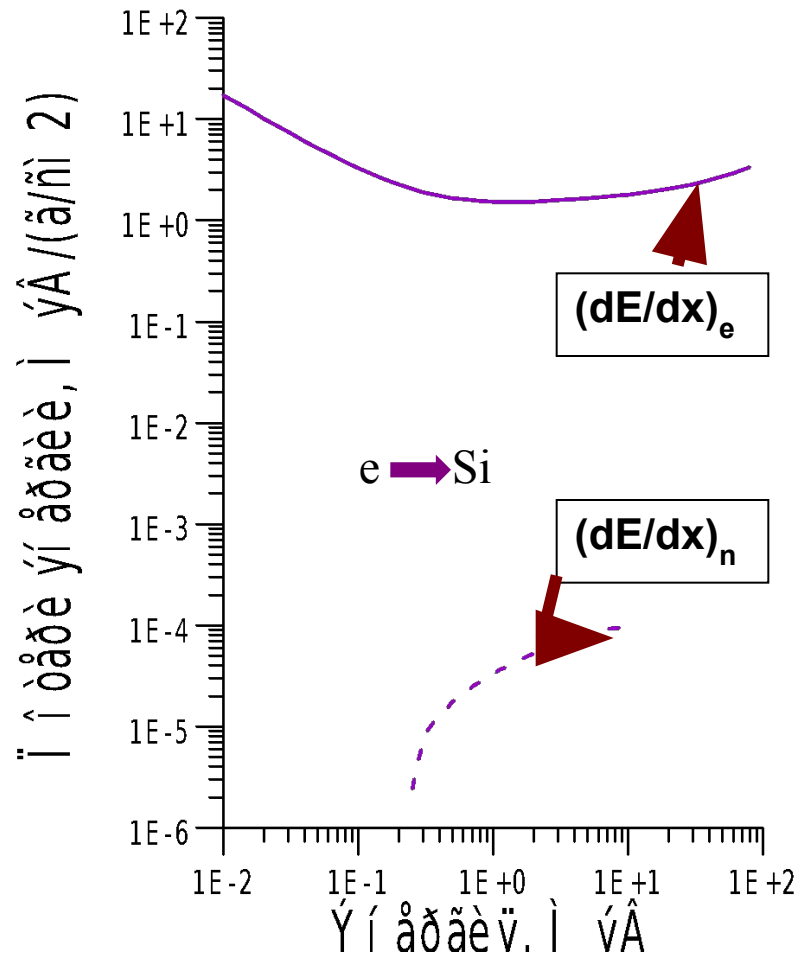
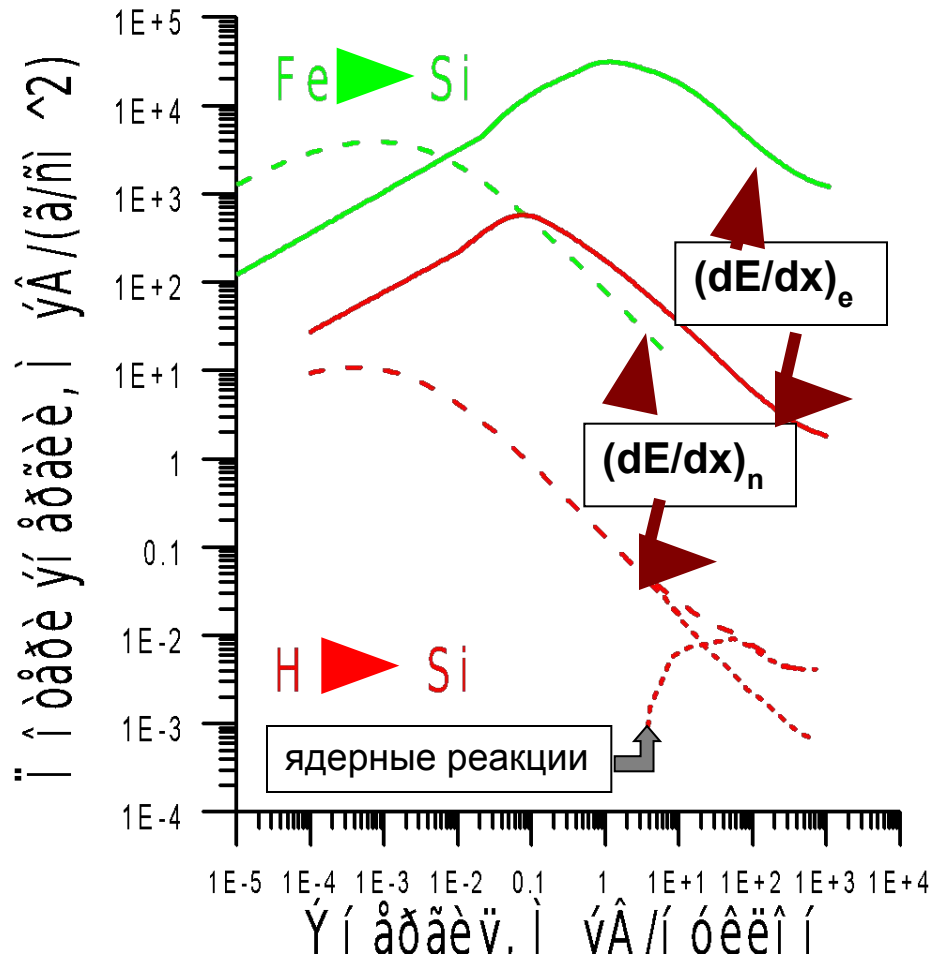
## Радиационные эффекты.

### *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/см<sup>2</sup>)

# 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

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \left[ \text{Дж/килограмм (10Фад)} \right]$$

При воздействии потока заряженных частиц  $\Phi$  [1/см<sup>2</sup>] с энергией  $E_0 = \text{const}$

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

При воздействии потока частиц  $\Phi_i(E)$  1/см<sup>2</sup>МэВ разного типа и разной энергии

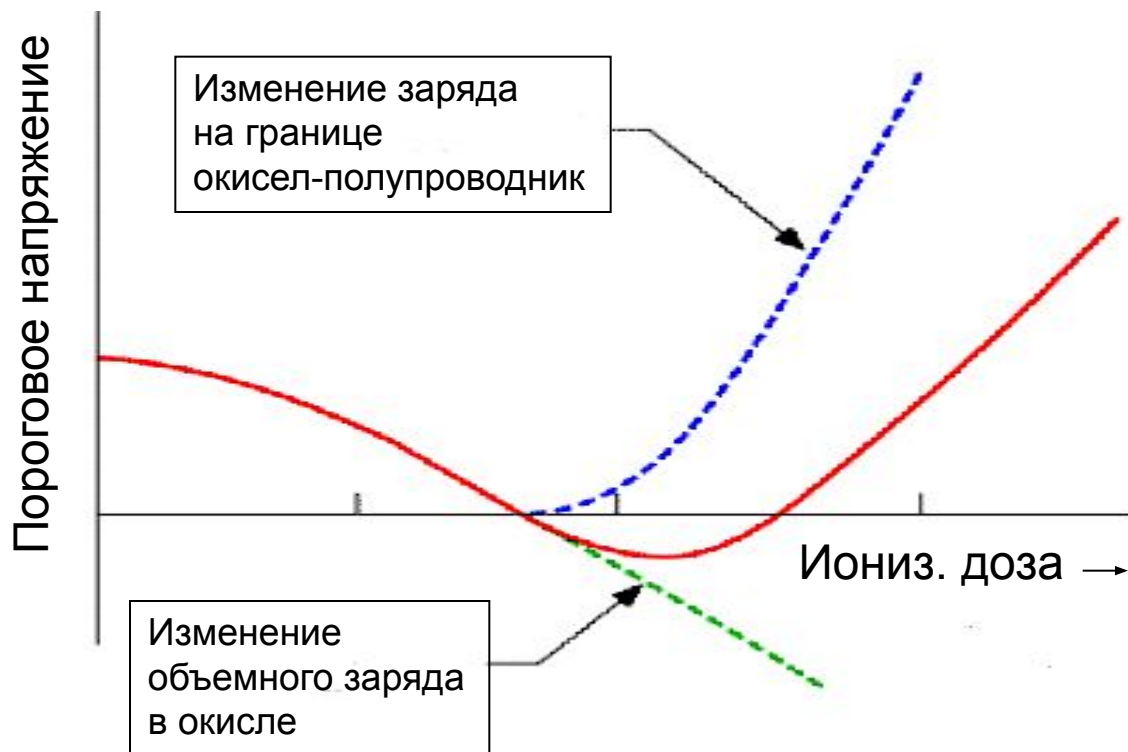
$$D = \sum_i \int \left( \frac{dE}{dx} \Big|_E \right)_i \Phi_i(E) dE = \int L \Phi(L) dL$$

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

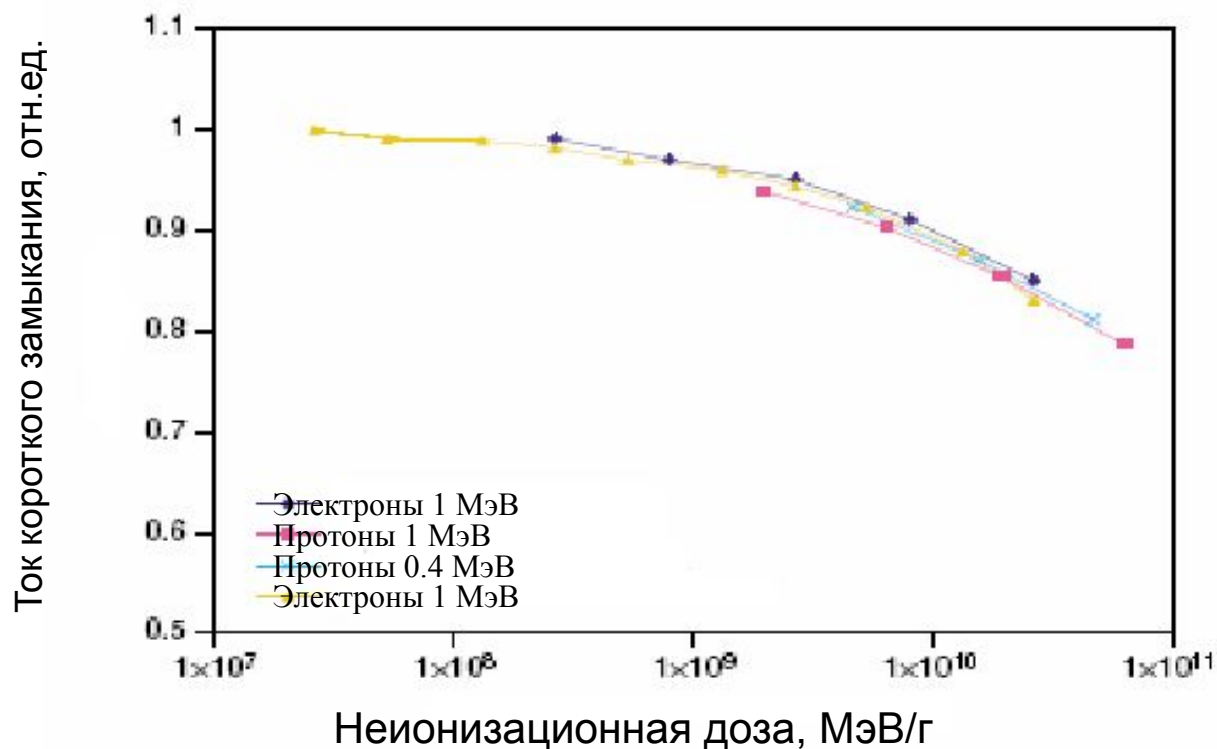
Смещение порога вольт-амперной характеристики в  $n$ -канальном транзисторе металл-окисел-полупроводник



# Радиационные эффекты

## Пример эффекта неионизационной дозы

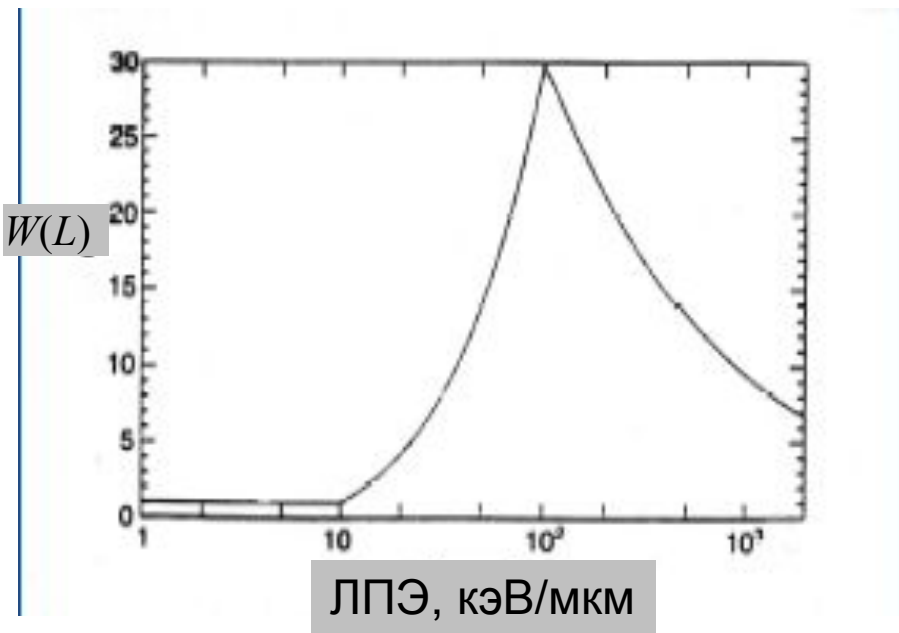
Уменьшение тока короткого замыкания солнечных элементов (*Walters, et.al., 2004*)



# Радиационные эффекты

## Эквивалентная доза

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

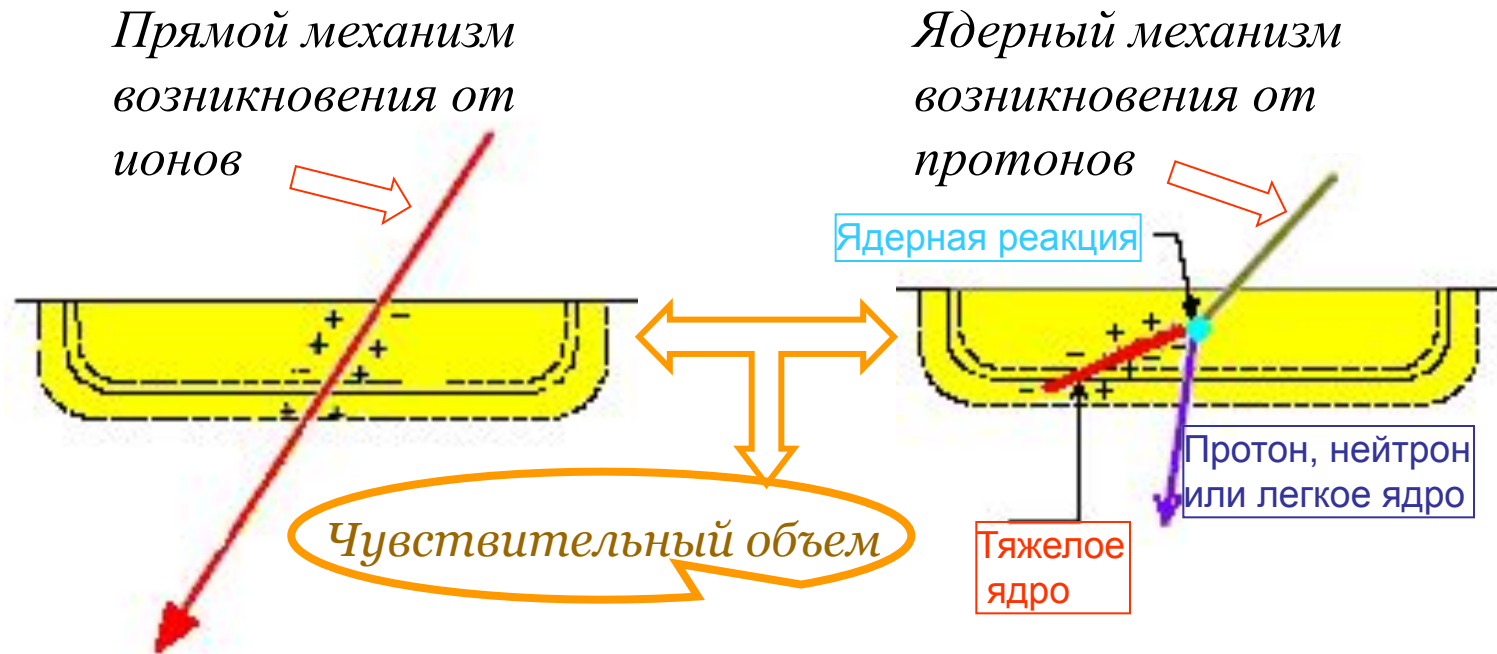


$$H[\text{Зиверт (100 бэр)}] = \int w(L) \cdot L \cdot \Phi(L) dL$$

# Радиационные эффекты

## Одиночные случайные эффекты

**Условие возникновения:** энергия  $\Delta E$ , 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

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

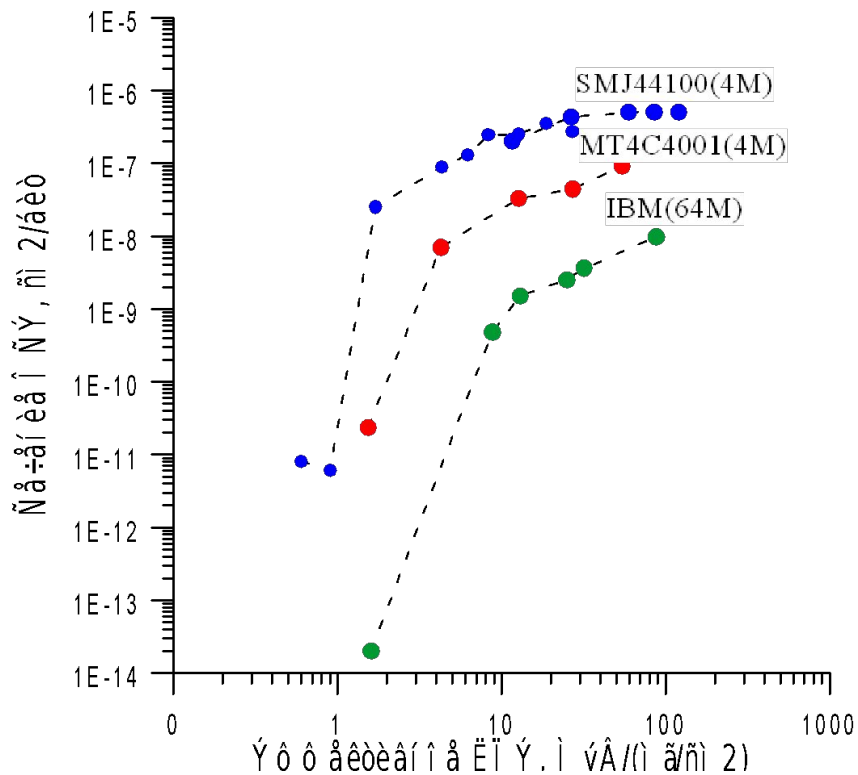
где  $F(L)$ - дифференциальный спектр ЛПЭ плотности потока частиц

# Радиационные эффекты

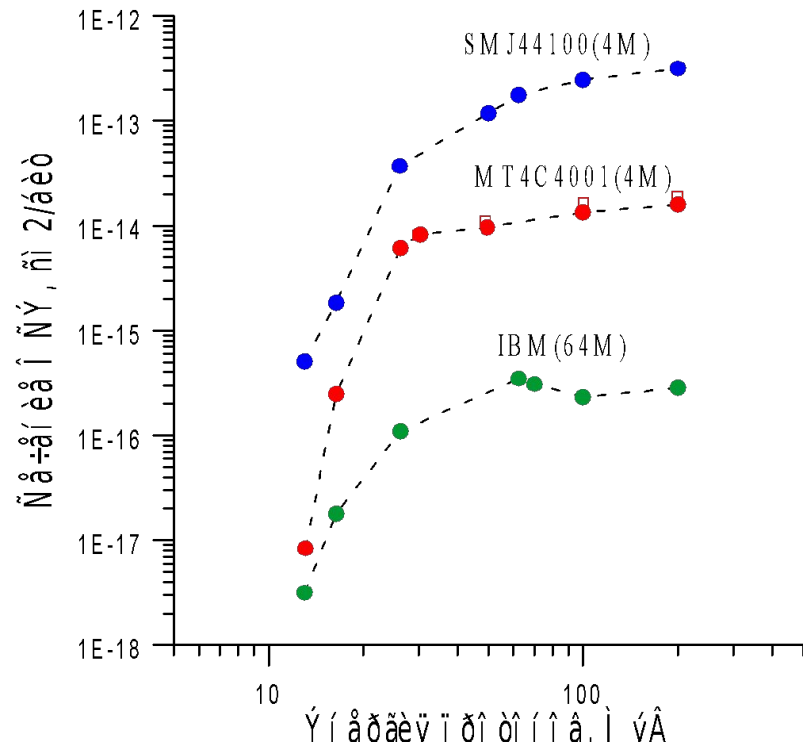
## Одиночные случайные эффекты

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 ;

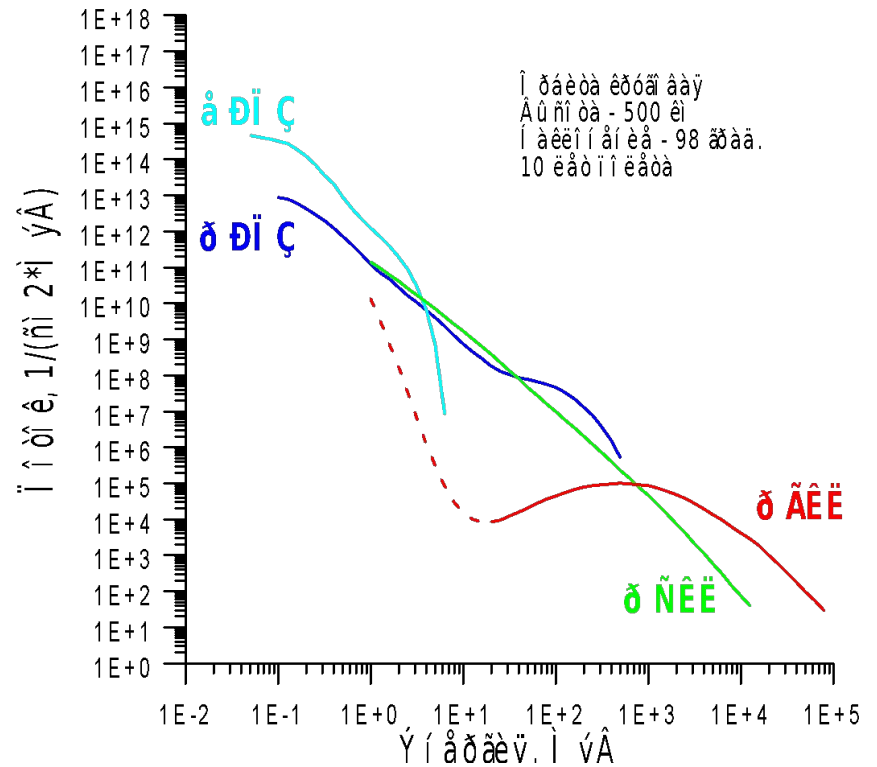
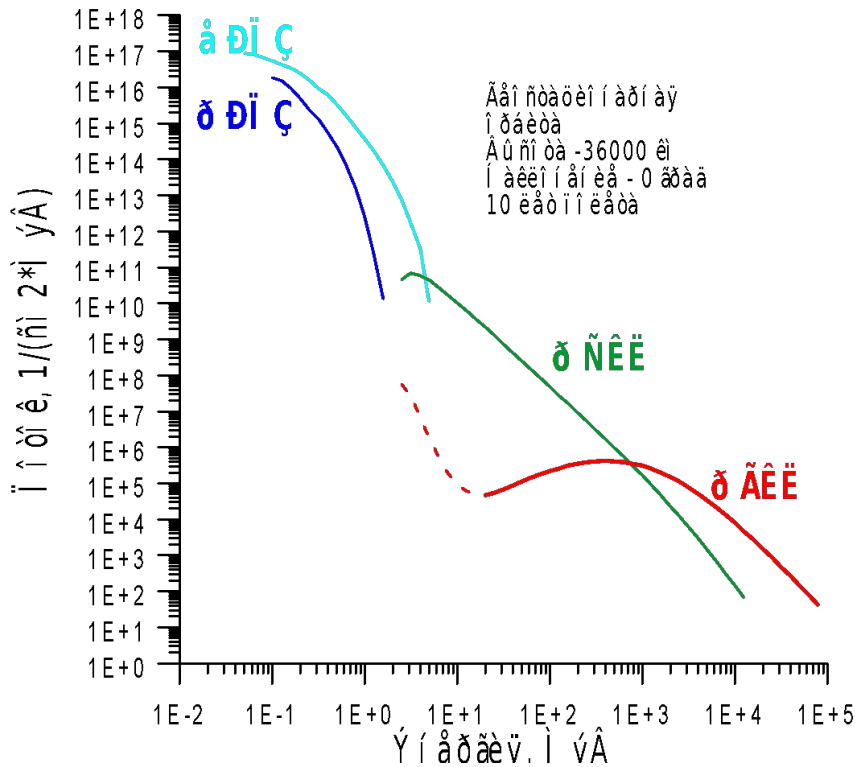
В околоземном космическом пространстве существуют

- **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.

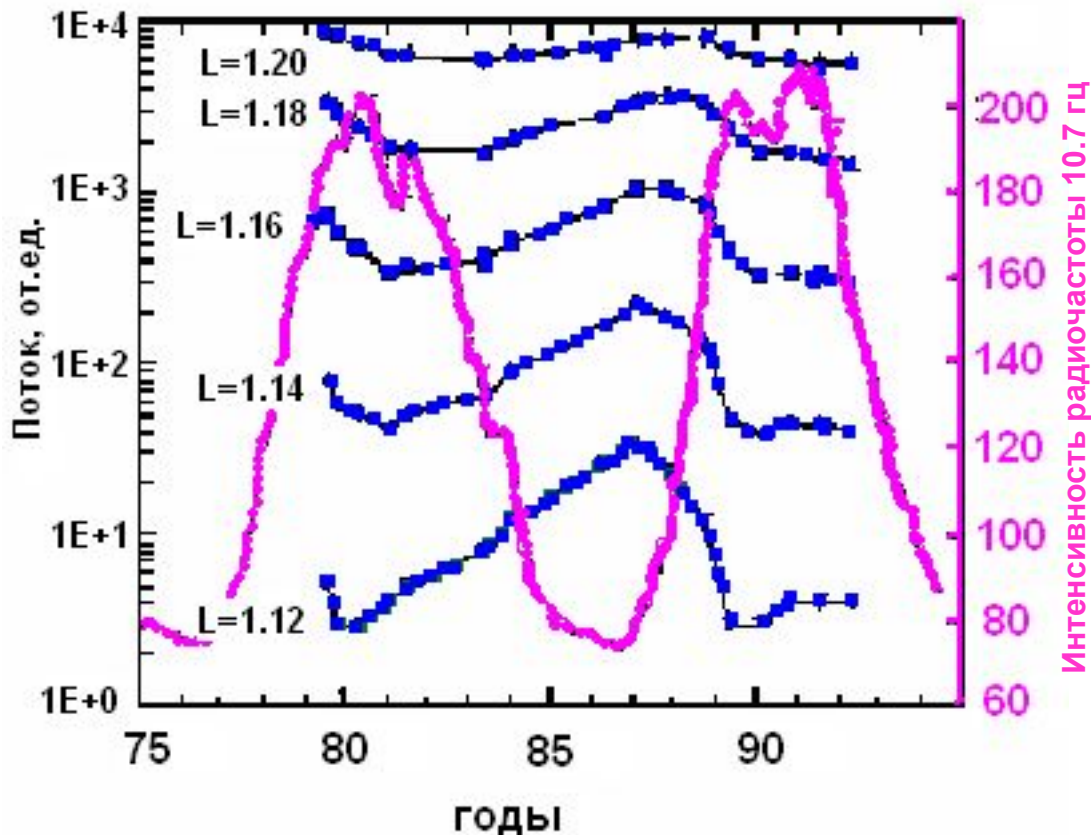
# Факторы космического полета

Пример энергетических спектров частиц на орбитах КА



# Факторы космического полета

## Солнечная активность



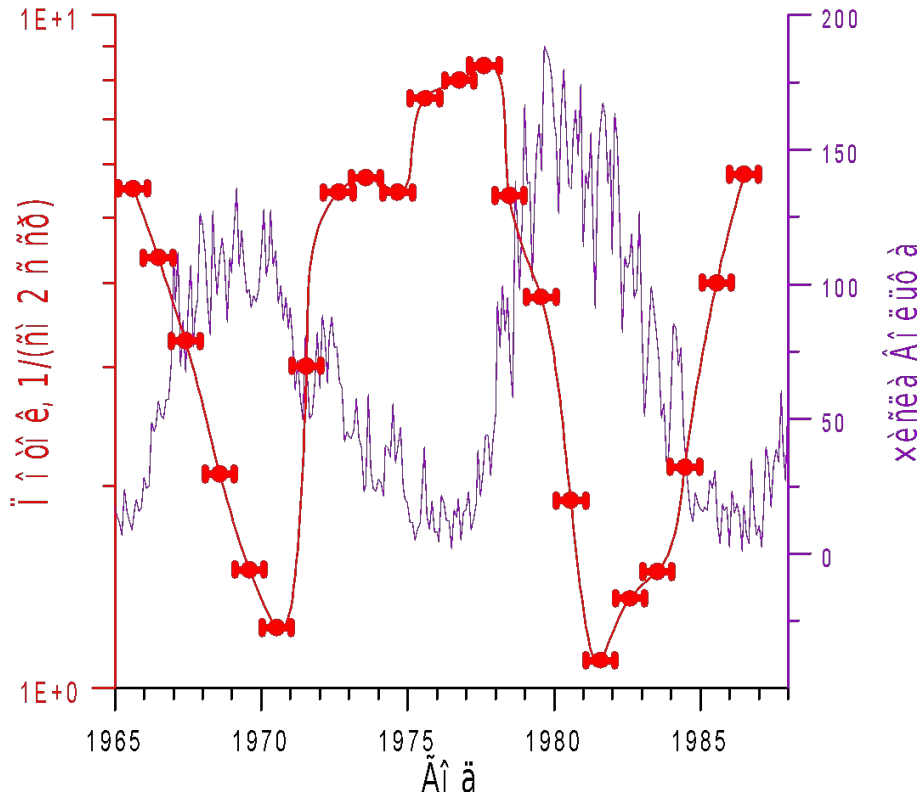
Пример солнечно-циклических вариаций потоков протонов РПЗ с  $E=80-215$  МэВ на разных дрейфовых оболочках L (Huston, S. L., 1996)

[http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/slideshow10/SC\\_NSREC97/img001.gif](http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/slideshow10/SC_NSREC97/img001.gif)



# Факторы космического полета

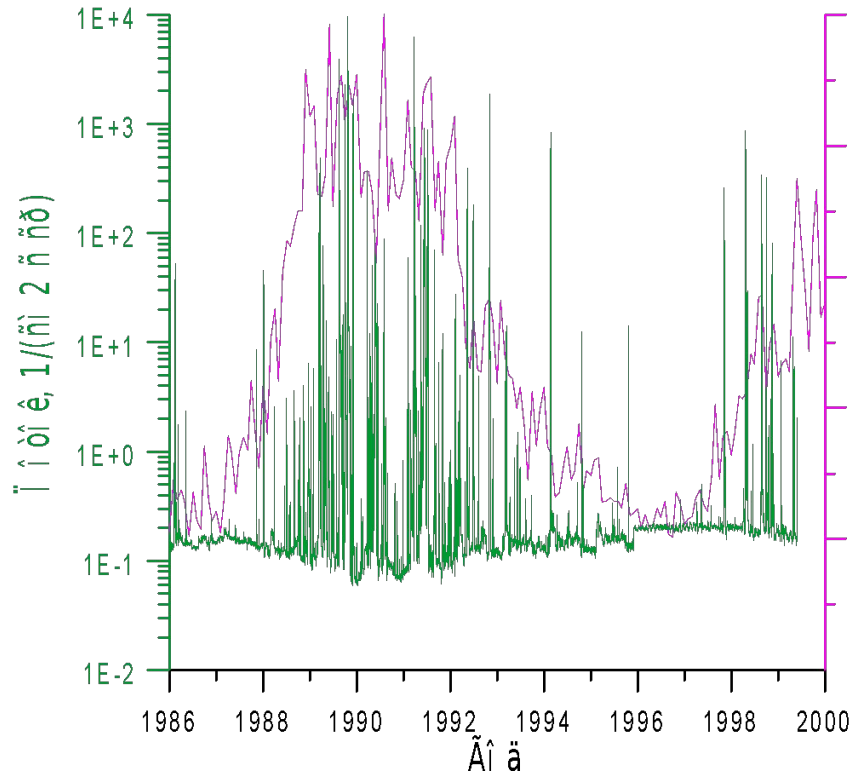
## Солнечная активность



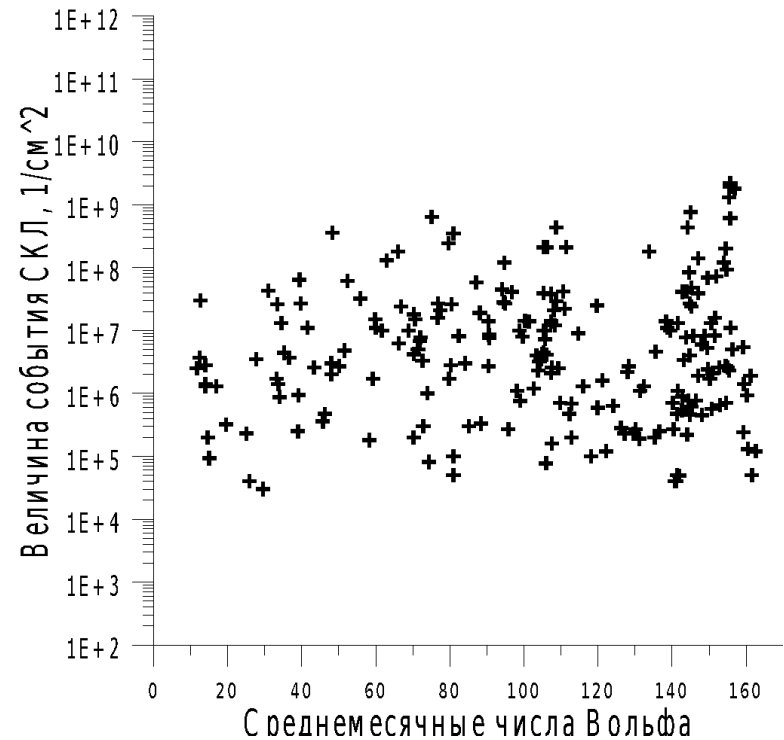
Пример солнечно-циклических вариации потоков ядер гелия ГКЛ с энергией 70-95 МэВ/нуклон и чисел Вольфа в зависимости от календарного времени. Точки – экспериментальные данные спутника IMP-8.

# Факторы космического полета

## Солнечная активность



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

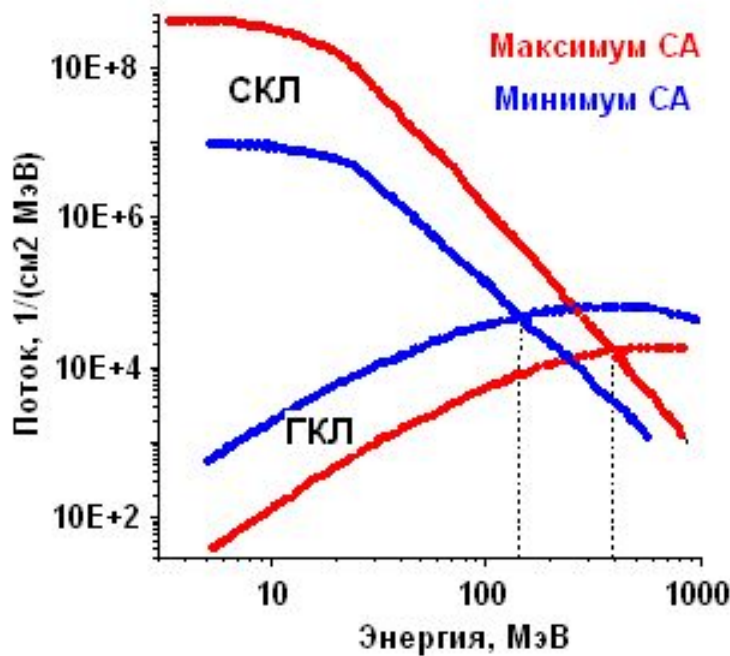


Пиковые потоки протонов СКЛ в зависимости от чисел Вольфа

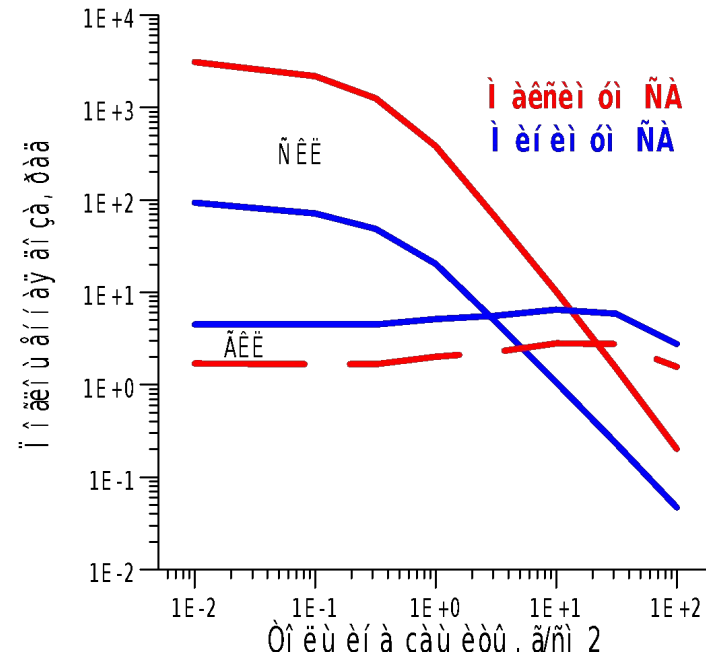
# Факторы космического полета

## Солнечная активность

Сравнение потоков ГКЛ и СКЛ в межпланетном пространстве



а)

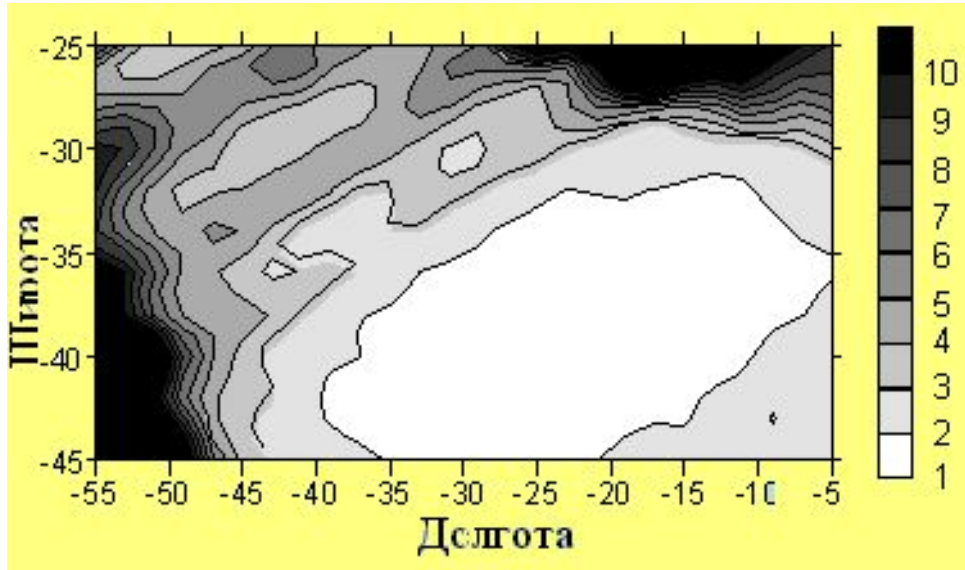


б)

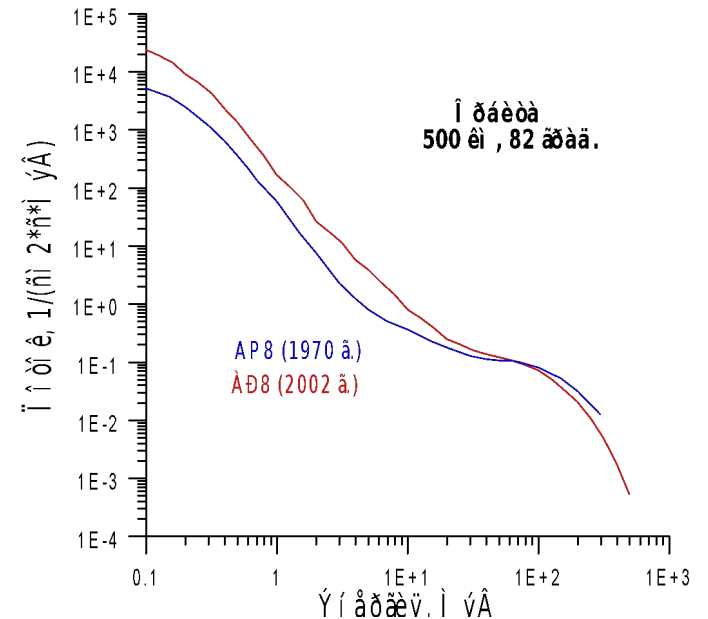
Дифференциальные энергетические спектры протонов (а) и поглощенные дозы (б), полученные по данным спутника IMP8 для периодов минимума ( $W < 40$ ) и максимума ( $W > 145$ ) солнечной активности с 1965 по 1997 г.

# 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  $\rightarrow A_z$   
Заряд частицы  $\rightarrow Q_z$   
Энергия на нуклон  $\rightarrow E$   
Масса протона  $\rightarrow m$

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

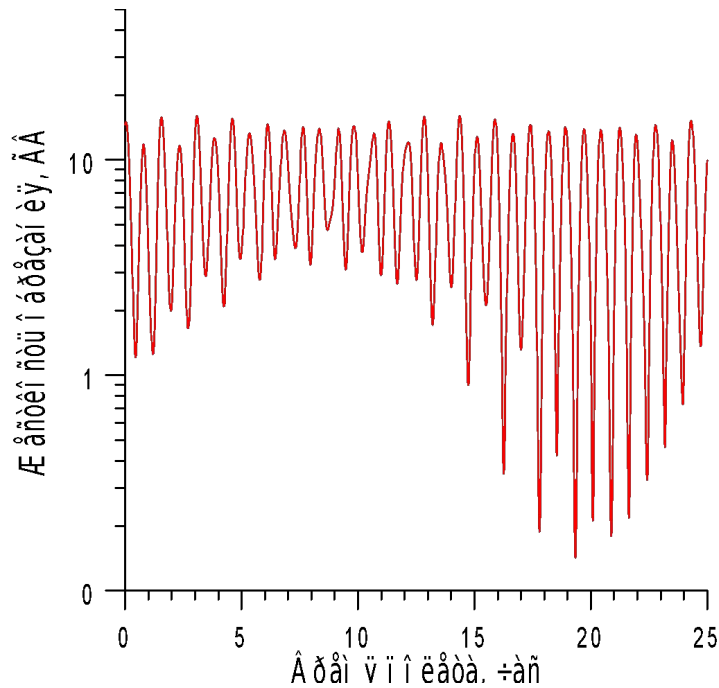
где  $R_c(X)$   $\leftarrow$  Эффективная жесткость обрезания

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

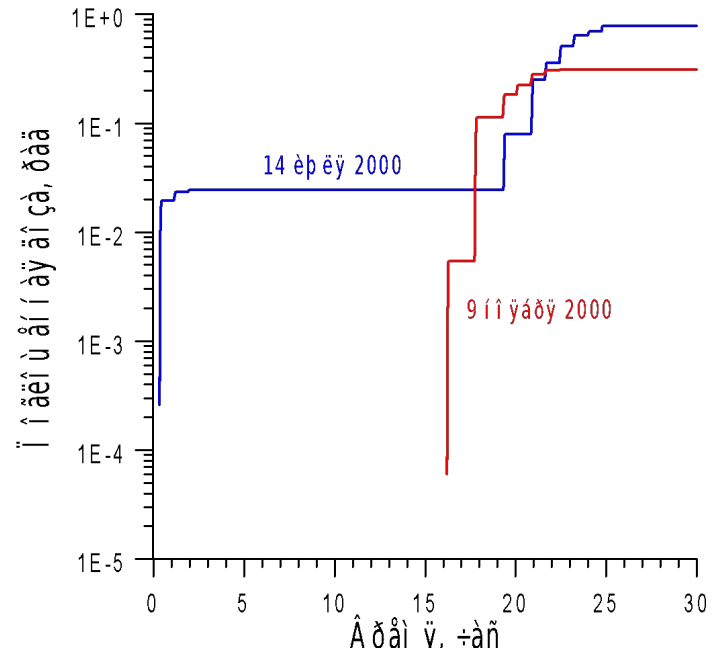
Поток заряженных частиц в межпланетном пространстве  $\rightarrow \Phi_z(E)$

# 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

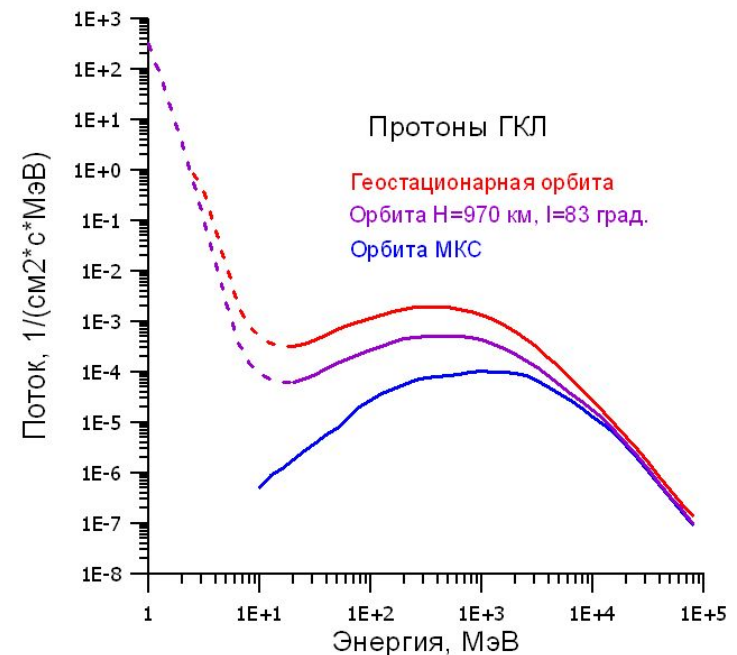
## Функция проникновения частиц на орбиту

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

← время полета

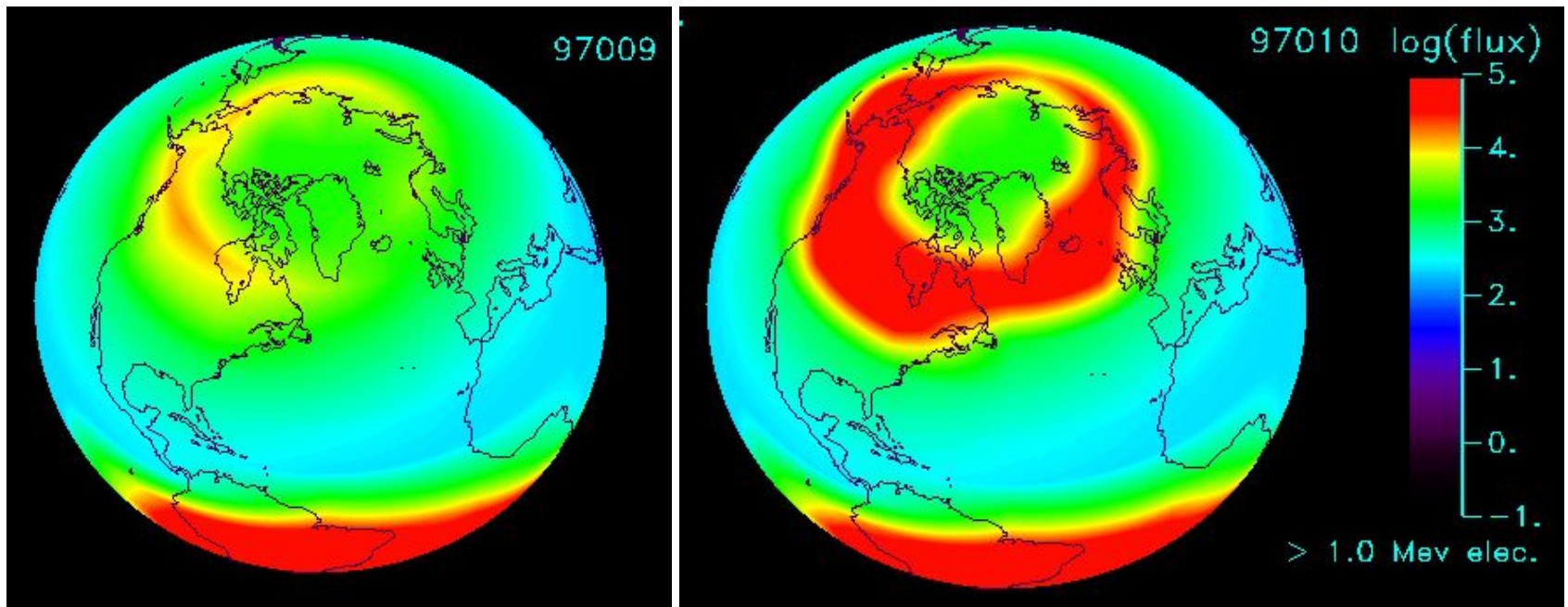
Энергетический спектр потока частиц космических лучей на орбите

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



## Геомагнитная активность

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

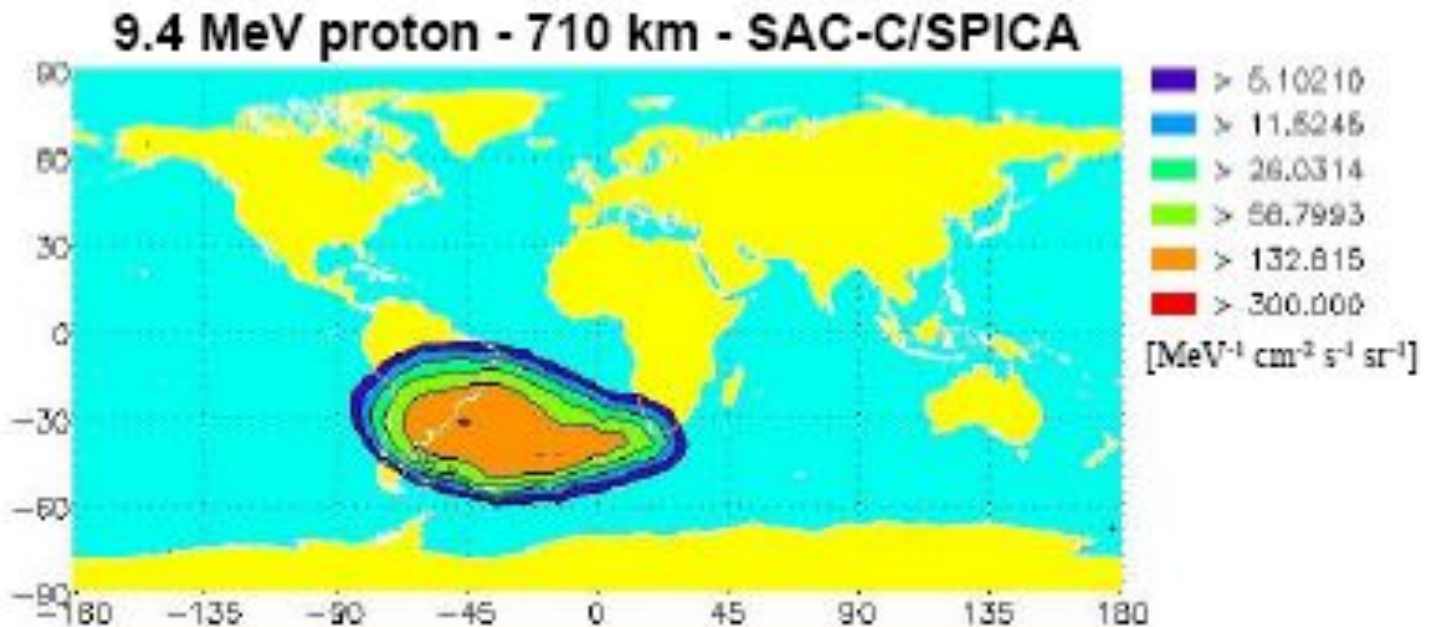


<http://www.haystack.mit.edu/~jcf/jan97/sampex.gif>



# Перемещение космического аппарата в пространстве

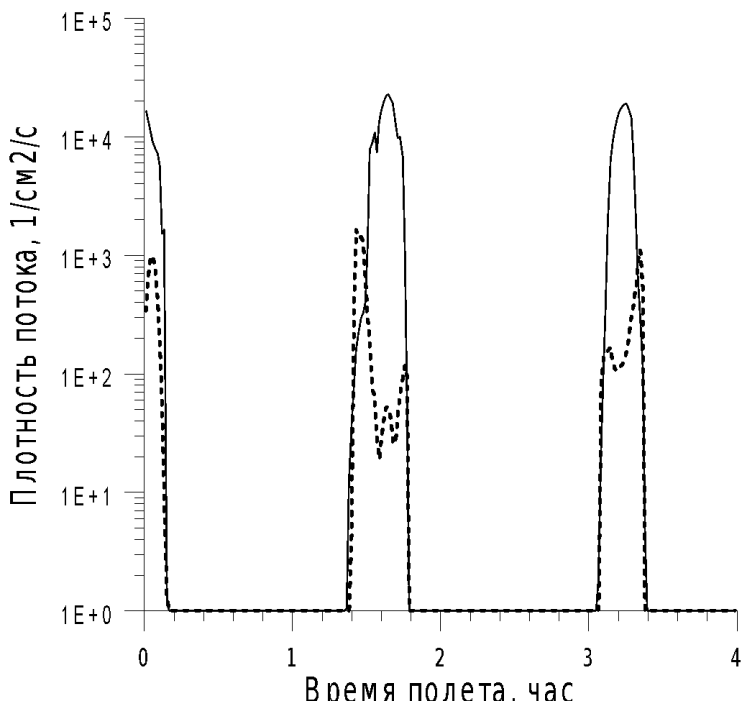
*Пример распределения потоков протонов в околоземном пространстве*



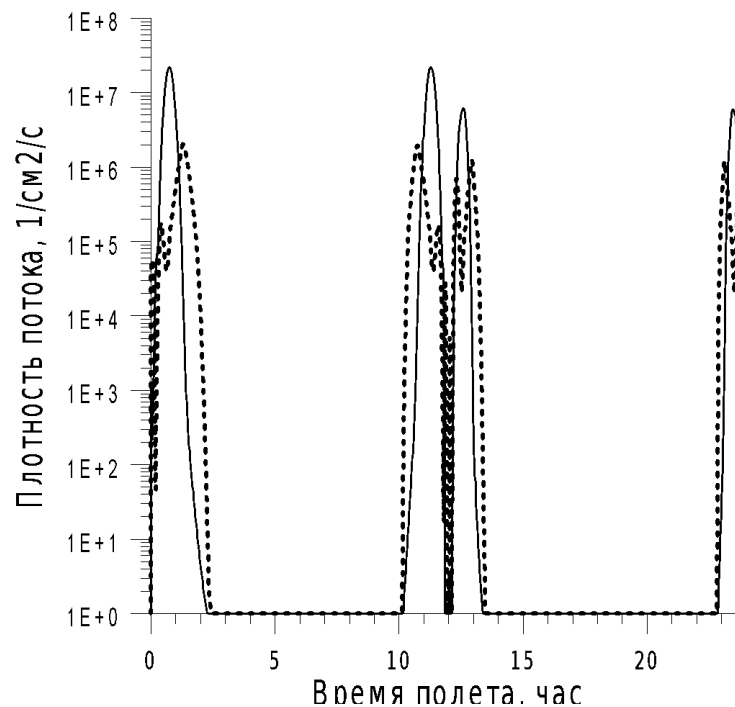
[space-env.esa.int/EMA\\_Events/SPENVIS\\_WS2002/Proceedings/bourdarie.pdf](http://space-env.esa.int/EMA_Events/SPENVIS_WS2002/Proceedings/bourdarie.pdf)

# Перемещение космического аппарата в пространстве

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



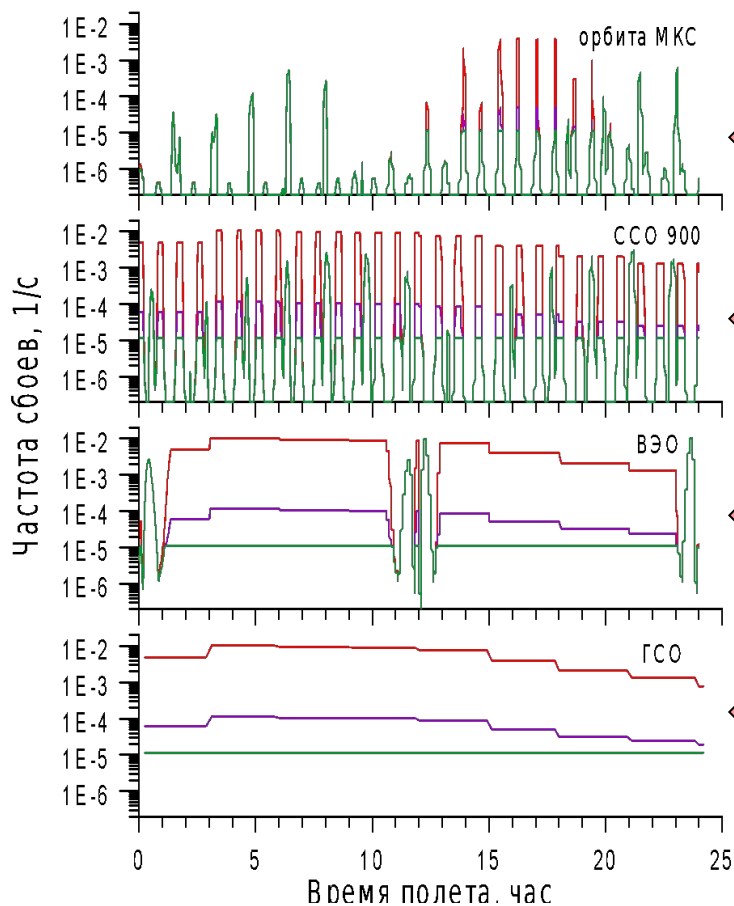
Орбита МКС,  
400-450 км, 51 град.



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*



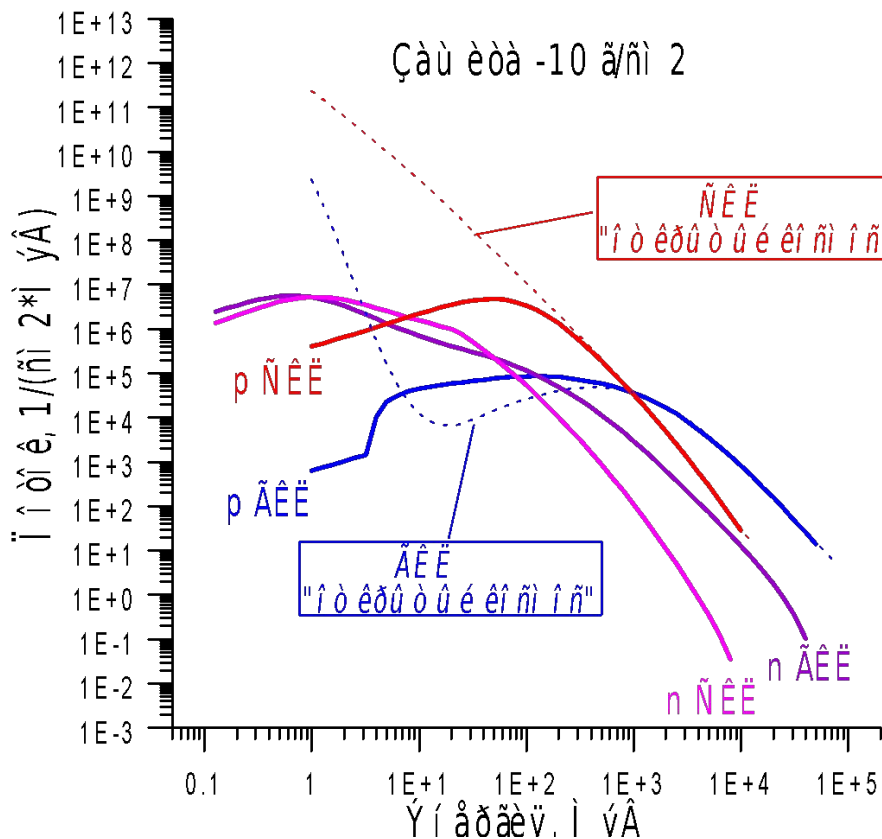
← Орбита международной космической станции  
H = 426 км, I = 51,6 градусов;

← 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.

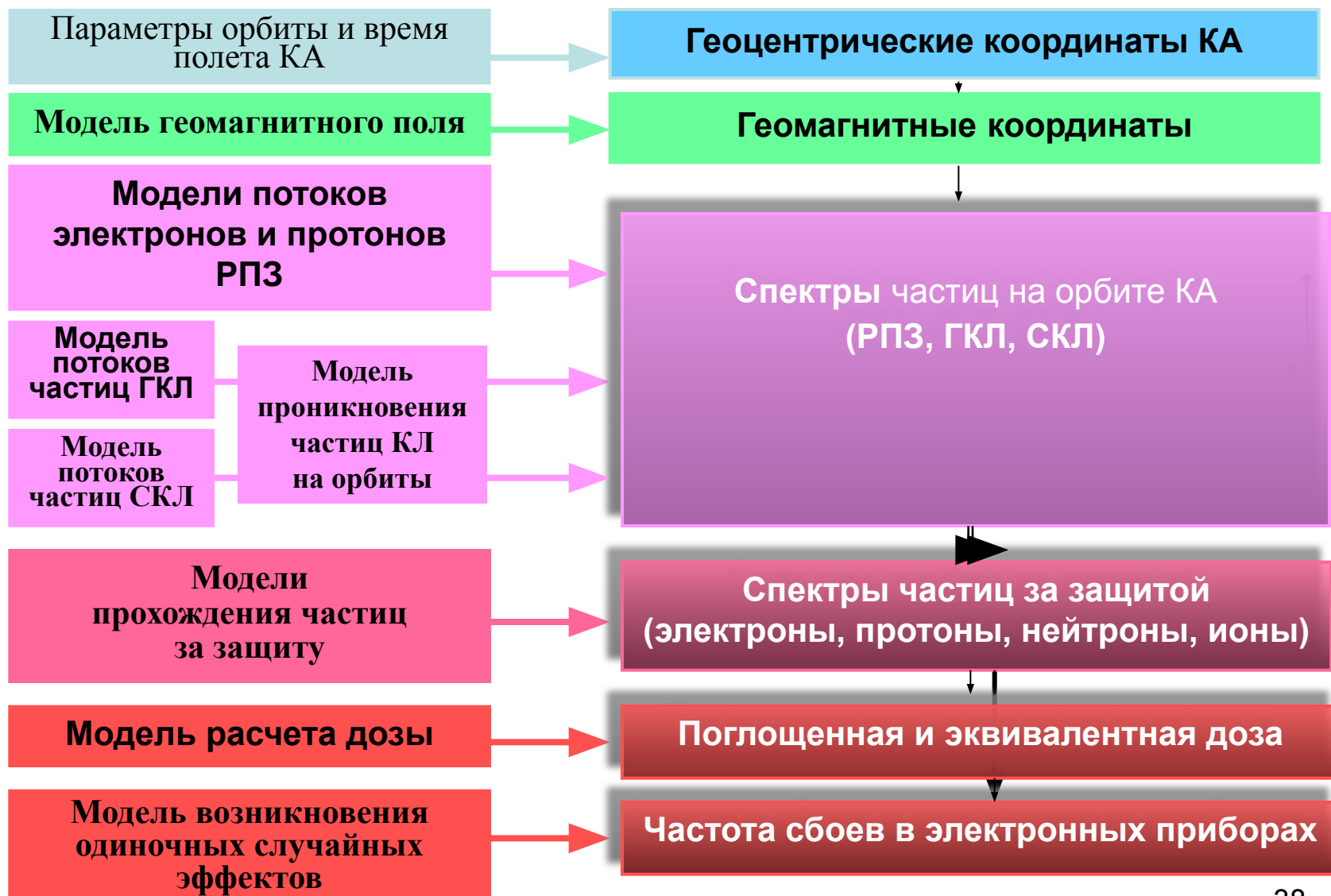
## Выводы

### 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>

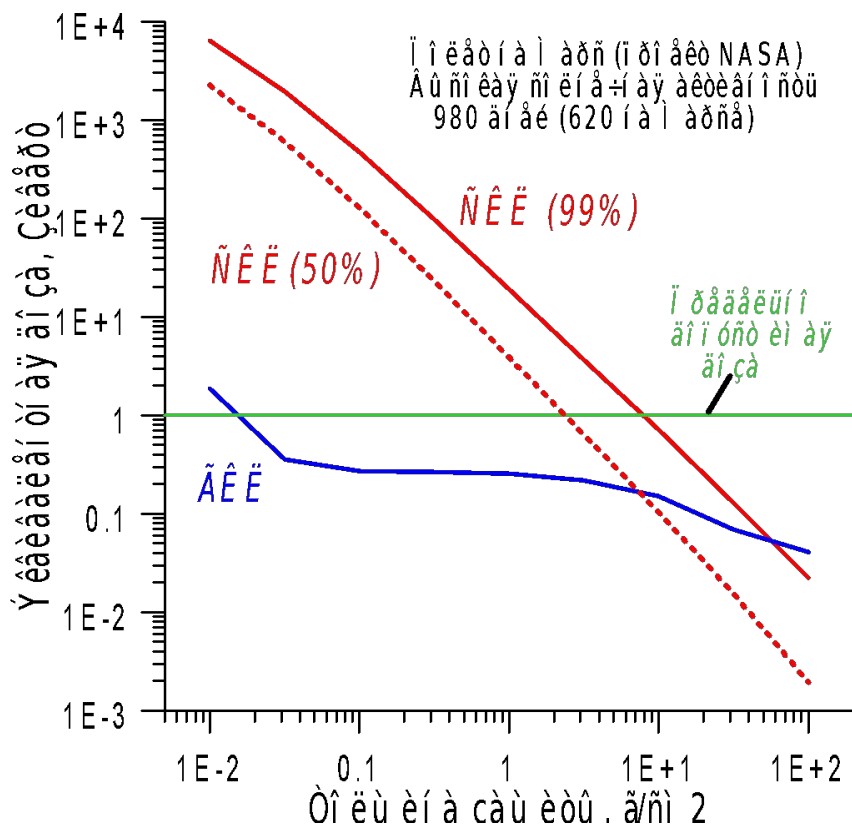
SPENVIS - <http://www.spennis.oma.be/spennis>

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

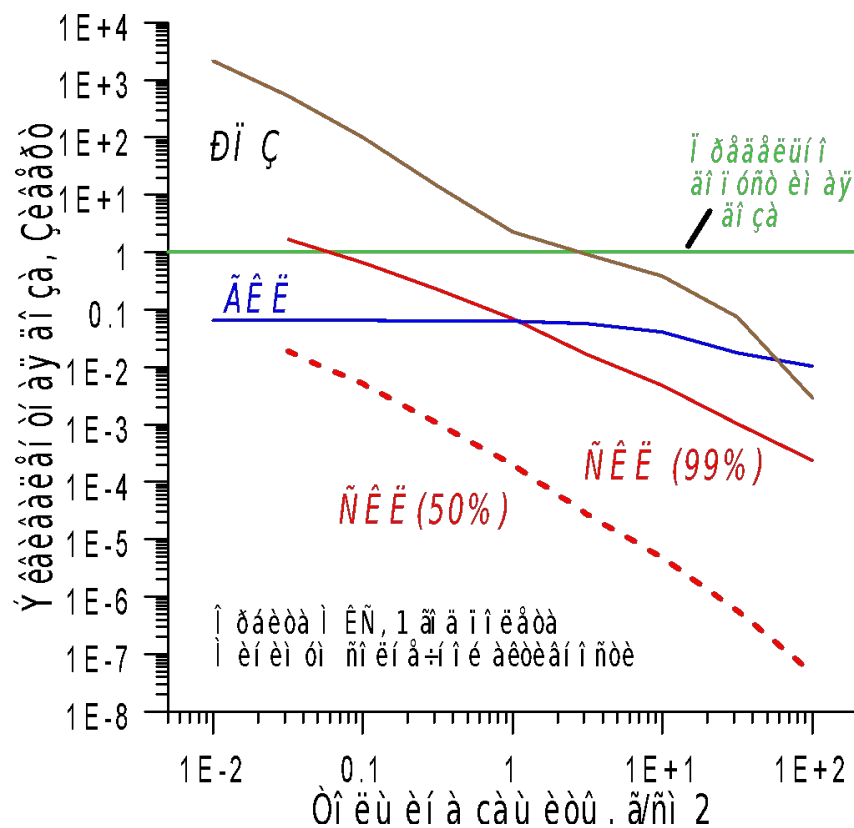
# Прогнозирование радиационной опасности

## Пример расчета эквивалентной дозы

### Полет на Марс



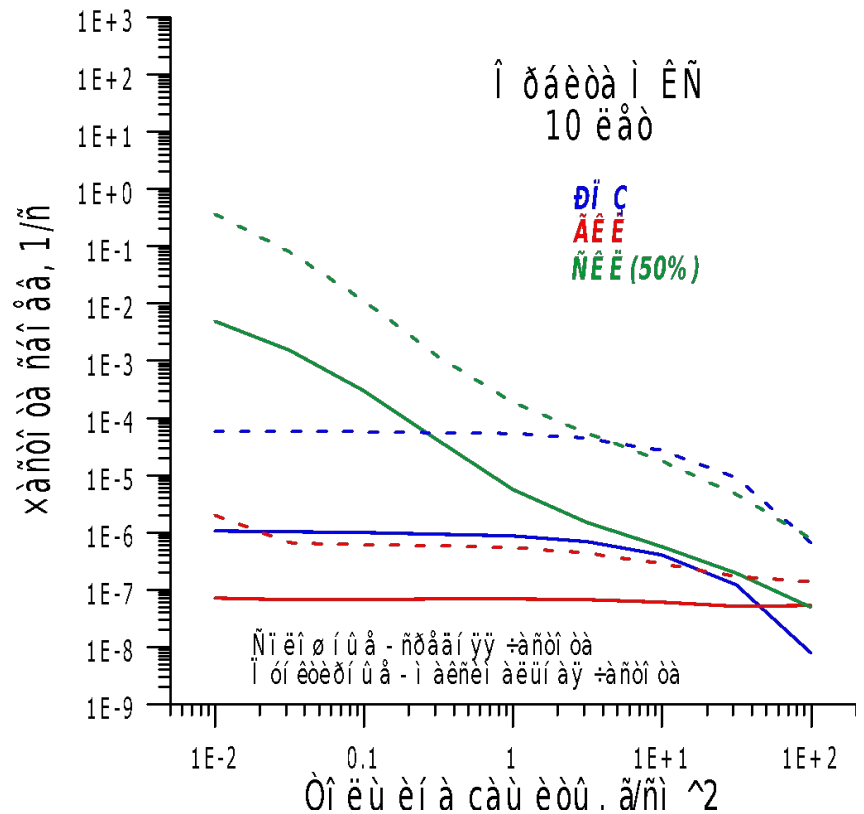
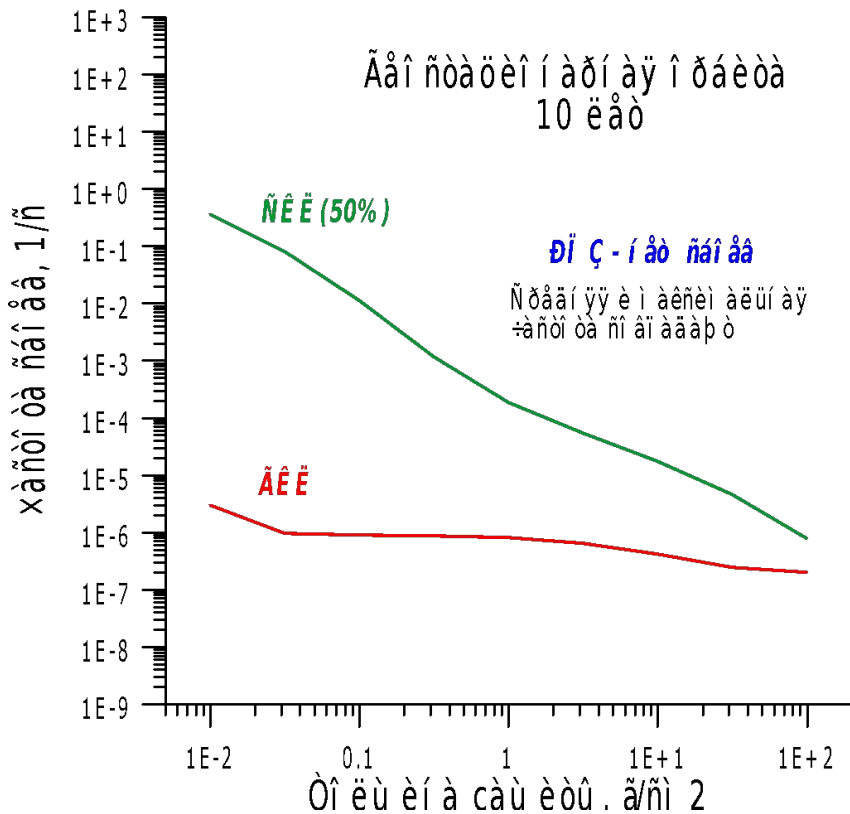
### Орбита МКС





# Прогнозирование радиационной опасности

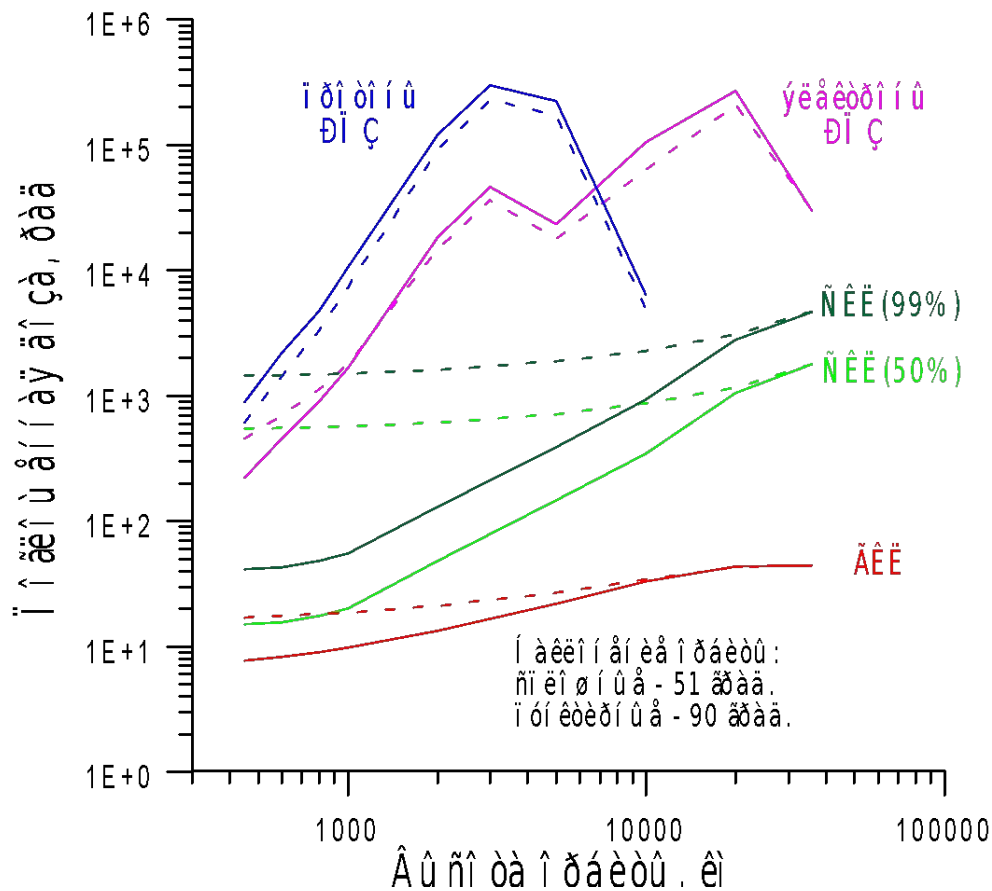
## Пример расчета частоты ОСЭ



Переменяющиеся отказы (сбои) в «типичной» микросхеме памяти

# Прогнозирование радиационной опасности

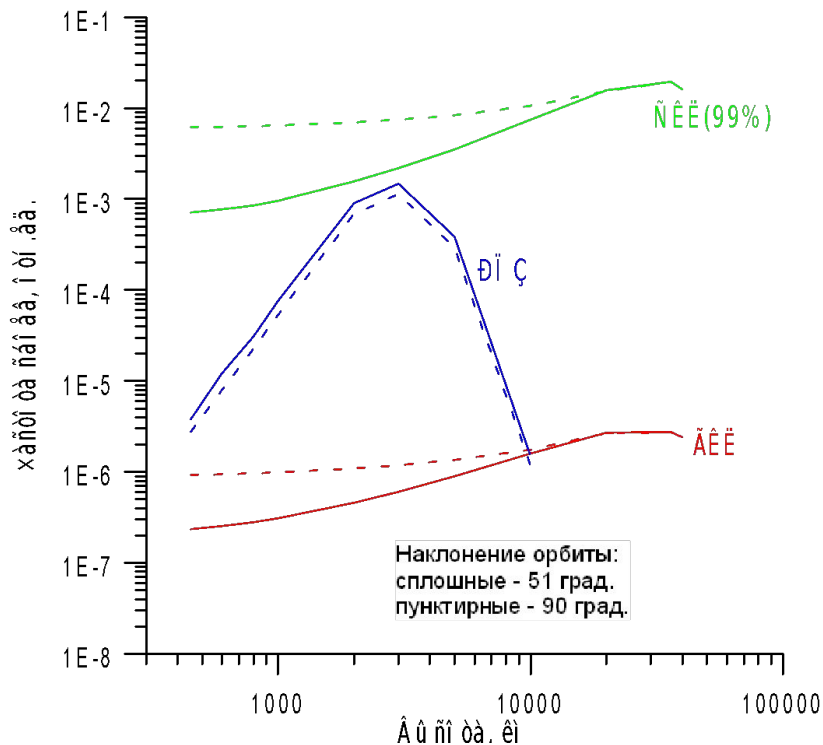
## Пример расчета поглощенной дозы на круговых околоземных орбитах



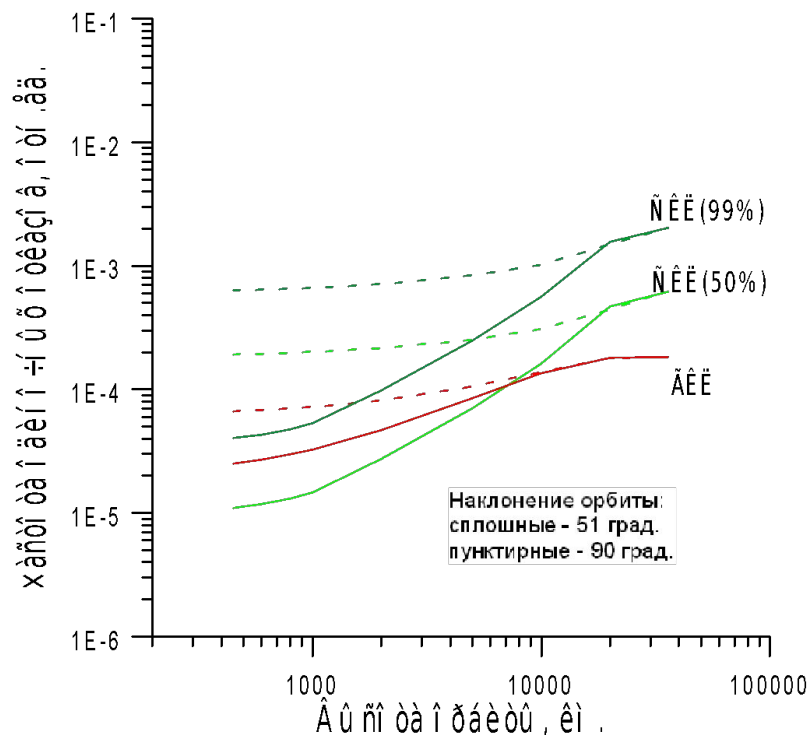
Поглощенная доза (10 лет)  
в зависимости от высоты  
круговой орбиты КА  
(защита 1 г/см<sup>2</sup>)

# 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/см<sup>2</sup>)



Количество одиночных отказов (10 лет) в микросхемах с  $L_c = 20$  МэВ/(мг/см<sup>2</sup>) в зависимости от высоты круговой орбиты КА (защита 1 г/см<sup>2</sup>)

## 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