



# МИР электроники

А.И. Чумаков

Радиационные эффекты  
в интегральных схемах

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2024

**УДК 621.38**  
**ББК 32.85**  
**Ч90**

**Рецензенты:**

*д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, зам. директора ИПМ им. М.В. Келдыша РАН  
по научной работе Марков М.Б.*

*д.ф.-м.н., профессор, начальник лаборатории Курчатовского комплекса теоретической  
и экспериментальной физики, НИЦ «Курчатовский институт» Титаренко Ю.Е.*

**Ч90 Чумаков А.И.**

**Радиационные эффекты в интегральных схемах**

**М.: ТЕХНОСФЕРА, 2024. – 384 с.: ил. ISBN 978-5-94836-707-1**

В монографии описываются основные радиационные эффекты в полупроводниковых приборах и интегральных схемах при воздействии радиационных факторов естественного и искусственного происхождения. Кратко приведены сведения по источникам ионизирующего излучения, физике взаимодействия ионизирующего излучения с веществом и современным технологиям изготовления интегральных схем. Разобраны основные доминирующие радиационные эффекты (структурные повреждения, объемные ионизационные, поверхностные и одиночные) в элементах интегральных схем. Рассмотрены основные механизмы радиационных отказов и сбоев интегральных схем.

Для специалистов, разрабатывающих интегральные схемы и электронную аппаратуру. Книга также может быть полезна аспирантам и студентам вузов.

**УДК 621.38**  
**ББК 32.85**

© Чумаков А.И., 2024

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2024

**ISBN 978-5-94836-707-1**

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	6
<b>Глава 1. Радиационные условия . . . . .</b>	<b>9</b>
1.1. Внешние воздействующие факторы . . . . .	9
1.2. Состав ионизирующего излучения . . . . .	12
1.3. Величины и единицы ионизирующих излучений . . . . .	15
1.4. Основные соотношения между величинами ионизирующих излучений . . . . .	19
<b>Глава 2. Источники ионизирующего излучения естественного происхождения . . . . .</b>	<b>21</b>
2.1. Радиационные факторы космического пространства . . . . .	21
2.1.1. Радиационные пояса Земли . . . . .	23
2.1.2. Солнечные космические лучи . . . . .	28
2.1.3. Галактические космические лучи . . . . .	32
2.1.4. Вторичное излучение . . . . .	35
2.2. Естественный радиационный фон . . . . .	36
2.3. Естественная радиоактивность материалов . . . . .	38
<b>Глава 3. Источники ионизирующего излучения искусственного происхождения . . . . .</b>	<b>41</b>
3.1. Радиационные факторы ядерного взрыва . . . . .	41
3.2. Искусственные радиационные пояса Земли . . . . .	46
3.3. Ядерно-энергетические установки . . . . .	47
<b>Глава 4. Основные механизмы взаимодействия ионизирующих частиц с веществом . . . . .</b>	<b>49</b>
4.1. Ионизационные потери ядерных частиц . . . . .	49
4.1.1. Ионы и протоны . . . . .	49
4.1.2. Электроны . . . . .	55
4.1.3. Рентгеновское и гамма-излучения . . . . .	59
4.1.4. Оптическое излучение . . . . .	64
4.2. Дефектообразование . . . . .	67
4.3. Ядерные реакции . . . . .	71
4.4. Радиационно-индуцированный разогрев . . . . .	75
4.5. Поглощенная доза . . . . .	78
<b>Глава 5. Элементы интегральных схем . . . . .</b>	<b>81</b>
5.1. Современные тенденции развития ИС . . . . .	81
5.2. Биполярная технология . . . . .	88
5.3. КМОП-технология . . . . .	96
5.4. Особенности элементов современных ИС . . . . .	99
<b>Глава 6. Доминирующие радиационные эффекты . . . . .</b>	<b>105</b>
6.1. Энергетический подход . . . . .	105
6.2. Структурные повреждения . . . . .	109
6.3. Объемные равновесные ионизационные эффекты . . . . .	114
6.4. Поверхностные равновесные ионизационные эффекты . . . . .	117

6.5. Неравновесные радиационные эффекты . . . . .	123
6.6. Термомеханические эффекты . . . . .	126
<b>Глава 7. Структурные повреждения . . . . .</b>	<b>127</b>
7.1. Дegrадации характеристик элементов биполярных схем . . . . .	127
7.2. Оценка деградации характеристик МОП-транзисторов . . . . .	135
7.3. Оценка деградации характеристик диодных элементов . . . . .	136
7.4. Дegrадация характеристик оптоэлектронных приборов . . . . .	139
7.5. Дegrадация характеристик ИС . . . . .	142
7.6. Микродозиметрические эффекты в ИС. . . . .	148
<b>Глава 8. Объемные ионизационные эффекты в полупроводниковых структурах . . . . .</b>	<b>157</b>
8.1. Основные уравнения . . . . .	157
8.2. Однородная полупроводниковая структура . . . . .	161
8.3. Формирование ионизационного тока . . . . .	163
8.4. Формирование ионизационной реакции . . . . .	168
8.5. Асимптотическая модель. . . . .	170
8.6. Влияние условий эксплуатации. . . . .	180
8.7. Ионизационная реакция в условиях сильной ионизации. . . . .	183
<b>Глава 9. Объемные ионизационные эффекты в ИС . . . . .</b>	<b>190</b>
9.1. Схемотехнические модели. . . . .	190
9.2. Эффект «просадки» питания. . . . .	195
9.3. Тиристорный эффект . . . . .	200
9.4. Переходные ионизационные эффекты в ИС . . . . .	205
<b>Глава 10. Поверхностные радиационные эффекты в элементах ИС . . . . .</b>	<b>209</b>
10.1. МОП-структуры . . . . .	209
10.2. Биполярные транзисторы . . . . .	223
10.3. Влияние интенсивности облучения . . . . .	227
10.3.1. Низкоинтенсивное излучение . . . . .	229
10.3.2. Среднеинтенсивное излучение. . . . .	235
10.3.3. Высокая интенсивность. . . . .	237
10.4. Особенности проявления поверхностных радиационных эффектов в ИС . . . . .	239
<b>Глава 11. Ионизационная реакция от отдельной ядерной частицы . . . . .</b>	<b>244</b>
11.1. Одиночные радиационные эффекты . . . . .	244
11.2. Механизмы энерговыделения в чувствительном микрообъеме . . . . .	249
11.3. Диффузионно-дрейфовые механизмы собирания заряда с трека заряженной частицы . . . . .	251
11.4. Диффузионные процессы собирания заряда с трека ТЗЧ . . . . .	254
11.5. Генерация неравновесного заряда вторичными частицами . . . . .	262
<b>Глава 12. Одиночные радиационные эффекты. . . . .</b>	<b>272</b>
12.1. Одиночные сбои . . . . .	272
12.2. Импульсы помех . . . . .	283
12.3. Многократные сбои. . . . .	287

12.4. Одиночные тиристорные эффекты . . . . .	290
12.5. Эффекты лавинного умножения . . . . .	295
12.6. Пробой диэлектрика . . . . .	298
12.7. Микродозовые эффекты . . . . .	303
<b>Глава 13. Оценка показателей стойкости к эффектам от отдельных ядерных частиц . . . . .</b>	<b>306</b>
13.1. Оценка показателей при воздействии тяжелых заряженных частиц . . . . .	306
13.1.1. Модель тонкой области . . . . .	307
13.1.2. Модель прямоугольного параллелепипеда . . . . .	307
13.1.3. Диффузионная модель . . . . .	311
13.1.4. Эффекты пробоев . . . . .	314
13.2. Оценка показателей при воздействии протонного излучения . . . . .	315
13.3. Особенности оценки частоты ОРЭ при нейтронном воздействии . . . . .	322
13.4. Оценка соответствия заданным требованиям . . . . .	328
<b>Глава 14. Типовые уровни радиационной стойкости ИС. . . . .</b>	<b>331</b>
14.1. Классификация ИС по уровням стойкости . . . . .	331
14.2. Типовые уровни стойкости . . . . .	336
Заключение . . . . .	342
Литература . . . . .	344
Список сокращений . . . . .	359
Условные обозначения . . . . .	361
Приложение 1. Полезная информация . . . . .	373
Приложение 2. Цветные иллюстрации . . . . .	376

# ВВЕДЕНИЕ

Современные изделия микроэлектроники находят широкое распространение в различных сферах деятельности: от применения в простейшей бытовой технике до систем искусственного интеллекта. Сегодня невозможно представить себе жизнь без персональных компьютеров, различных гаджетов, систем космической навигации т.п.

Среди многочисленных факторов, влияющих на функционирование электронной аппаратуры при ее эксплуатации, особое значение имеет воздействие полей ионизирующих излучений искусственного и естественного происхождения. Даже на поверхности Земли имеют место функциональные сбои кардиостимуляторов, автомобильной электроники и суперкомпьютеров, вызванные фоновым радиационным излучением. Увеличение сроков активного существования, переход на открытые платформы космических аппаратов усилили актуальность задачи оценки и прогнозирования уровней отказов электронных элементов и узлов к радиационным воздействиям космического пространства. Из-за влияния атмосферных нейтронов имеют место сбои и отказы авионики, а естественная альфа-радиоактивность материалов вызывает сбои даже в нормальных условиях эксплуатации.

Проблема обострилась еще и тем, что в электронной аппаратуре, в первую очередь специального назначения, широко используются функционально сложные изделия, для которых практически невозможно провести весь цикл работ по обеспечению требований по радиационной стойкости. Проектирование электронных систем с использованием современных изделий электронной компонентной базы (ЭКБ), появление новых радиационных эффектов, постоянное совершенствование технологии изготовления ИС привело к невозможности производства относительно полной номенклатуры радиационно стойких изделий. Это обусловлено тем, что разработка ИС с повышенными показателями качества, в соответствии с действующими стандартами, требует значительных средств и ресурсов. Стоимость радиационно стойких изделий на два-три порядка выше, чем аналогичные изделия промышленного назначения. Необходимо отметить также «провал» в этой проблематике в РФ, который произошел с начала 90-х годов прошлого столетия. Фактически многие подразделения у разработчиков элементной базы и электронной аппаратуры, занимающихся проектированием и испытанием радиационно стойких изделий, были ликвидированы.

На современном этапе методы моделирования и оценки радиационной стойкости ИС должны учитывать следующие тенденции:

- рост качества технологии изготовления интегральных схем, которое потенциально не ухудшает показатели радиационной стойкости активных элементов ИС, но приводит к существенному влиянию паразитных структур;
- появление новых элементов ИС и увеличение их плотности размещения на кремниевом кристалле, для которых ограничены классические мето-

ды схемотехнического моделирования из-за влияния интегральных эффектов и паразитных структур;

- усиление роли микродозиметрических и одиночных радиационных эффектов, для которых неприменимы классические модели, ориентированные на использование усредненных характеристик полей ионизирующего излучения.

В настоящее время достигнутый уровень разрешения технологии интегральных схем составляет около 2 нм. Использование пониженного напряжения или мощности потребления означает, что требуются меньший заряд, необходимый для запоминания информации, и реализуются более низкие изменения пороговых напряжений, приводящих к параметрическим отказам. Однако при этом имеет место и положительная тенденция в связи с совершенствованием технологических операций (за счет уменьшения толщин структур, снижения уровня дефектности исходных материалов, повышения уровней легирования и т.п.), вследствие чего происходит снижение чувствительности характеристик ИС к радиационным эффектам.

Вопросам изучения радиационных эффектов в полупроводниковых приборах и ИС посвящено достаточно много публикаций и монографий. Наиболее полно результаты научно-технических исследований представлены на ежегодных российской конференции «Стойкость», международных конференциях IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC) и RADECS.

Однако следует отметить, что российские издания по этой проблеме в основном не в полной мере отражают современное состояние проблемы, к тому же они затрагивают только часть ее, в основном связанную с факторами космического пространства. Зарубежные монографии или обзоры труднодоступны российским специалистам. Поэтому назрела необходимость публикации издания, в котором нашли бы отражение все основные накопленные по этой тематике знания, начиная с фундаментальных основ физики радиационных эффектов в ИС и проявления их в изделиях микроэлектроники с учетом последних технологических достижений. При этом автору хотелось уделить внимание как фундаментальным основам физики радиационных эффектов в ИС, так и непосредственному анализу особенностей проявления радиационных эффектов в ИС. Понимая невозможность полноценного решения поставленной задачи, пришлось пожертвовать материалами, которые можно найти в других доступных публикациях или имеюшими чисто прикладной характер.

Большинство представленных оригинальных результатов получено специалистами экспериментального научно-производственного объединения «Специализированные электронные системы» (ЭНПО СПЭЛС) и НИЯУ МИФИ, в том числе Бобровским Д.В., Борузиной А.Б., Егоровым А.Н., Калашниковым О.А., Кессаринским Л.Н., Маврицким О.Б., Петровым А.Г., Печенкиным А.А., Скоробогатовым П.К., Савченковым Д.В., Смолиным А.А., Согояном А.В., Швецовым-Шиловским И.И., Яненко А.В. и другими, за что им автор очень признателен. В представленной работе нашли отражение также результаты исследований специалистов из других организаций, в том числе Беляковым В.В., Герасимовым В.Ф., Емельяновым В.В., Ереминым Н.В., Зинченко В.Ф., Кузнецовым В.Н., Першенковым В.С., Потапенко А.И., Тапоро К.И., Тверским М.Г., Улимовым В.Н., Хаустовым В.В. и рядом других.

Автор считает своим приятным долгом также выразить признательность Артамонову А.С., Бойченко Д.В., Громову Д.В., Демидову А.С., Никифорову А.Ю., Полунину В.А., Помазану Ю.В., Тельцу В.А., Улановой А.В., Шаховскому В.В. и другим за обсуждение актуальных научно-технических проблем.

За время работы мне посчастливилось познакомиться с основоположниками этой тематики в РФ: с Ухиным Н.А., Агаханяном Т.М., Ладыгиным Е.А., Чепиженко А.З., Малининым В.Г., Гориним Б.Г., Вавиловым В.А. и другими, которые в значительной мере помогли в моем становлении как специалиста.

Автор признателен членам своей семьи: супруге Татьяне и сыновьям Константину и Иннокентию, которые помогали в работе.

Хочется выразить благодарность сотрудникам ЦЭПЭ НИЯУ МИФИ, АО «ЭНПО СПЭЛС» за помощь материалами при подготовке рукописи к изданию.

Особо хотелось поблагодарить рецензентов Маркова Михаила Борисовича и Титаренко Юрия Ефимовича, которые нашли время ознакомиться с рукописью и дать ряд ценных замечаний.

Ваши отзывы, предложения и замечания по содержанию книги и по существу затронутых в ней проблем просим направлять по адресу: 115409, Москва, Каширское ш., 31, НИЯУ МИФИ, ЦЭПЭ.



# ГЛАВА I

## РАДИАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ

### 1.1. Внешние воздействующие факторы

Интегральные схемы (ИС) и полупроводниковые приборы (ППП) в составе радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) могут функционировать в различных условиях эксплуатации, в том числе в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов (ВВФ) [1]. Все ВВФ делятся на классы ГОСТ 21964 [2] (рис. 1.1). Для большинства изделий микроэлектроники основными внешними воздействующими факторами являются климатические и механические. Электромагнитные, биологические, термические, радиационные и факторы специальных сред рассматриваются для специализированных изделий, среди которых важное место занимают радиационные воздействия.



Рис. 1.1. Классы внешних воздействующих факторов

В общем случае конкретных видов ВВФ существует достаточно много. Проанализируем их на примере факторов космического пространства (ФКП) исходя из современных представлений о существующих факторах космического пространства (КП) [3-5], способных повреждать электронную аппаратуру космических аппаратов (КА). В табл. 1.1 на примере средств оптико-электронных систем представлены основные ФКП и их характеристики.

Ионизирующее излучение (ИИ) состоит из потока первичных заряженных ядерных частиц (электроны, протоны и тяжелые заряженные частицы), а также вторичных ядерных частиц — продуктов ядерных превращений, связанных с первичными частицами. Основные эффекты воздействия ИИ на электронную аппаратуру обусловлены ионизационными и ядерными потерями энергии первичных и вторичных частиц в чувствительных объемах элементов интегральных схем.

Таблица 1.1. Основные эффекты, возникающие в бортовых электронных устройствах при воздействии ФКП [3—5]

№	Факторы космического пространства	Особенности влияния ФКП на элементы и технические устройства КА	Характеристики ФКП и сопутствующих эффектов, требующих учета
1	Ионизирующие излучения: — естественные радиационные пояса Земли; — искусственные радиационные пояса Земли; — галактические и солнечные космические лучи (радиация)	Деградация параметров ИС, отказы и сбои в работе изделий микроэлектроники; изменение прозрачности оптических сред (радиационное окрашивание и растрескивание оптических стекол), световые помехи в оптико-электронной аппаратуре вследствие радиolumинесценции и воздействия ядер космических излучений в оптических деталях; пробой и растрескивание изолирующих материалов вследствие электризации диэлектриков; уменьшение мощности источников питания из-за деградации параметров солнечных батарей	Флюенсы потоков ионизирующих излучений, их энергетические спектры, зарядовое состояние и пространственно-временные распределения потоков заряженных частиц
2	Космическая плазма (плазма)	Сбои и отказы радиоэлектронной аппаратуры вследствие паразитных наводок и пробоев; загрязнение элементов оптических устройств из-за распыления материалов; ухудшение свойств терморегулирующих покрытий из-за растрескивания и частичного испарения их материала; паразитные высокочастотные наводки	Параметры плазмы на различных орбитах полета КА. Параметры электризации КА: — предельный потенциал; — частота разрядов; — спектры электромагнитных и оптических помех; — параметры первичной и вторичной фотоэмиссии
3	Тепловое излучение Солнца, планет и космического пространства (температура)	Изменение оптических свойств оптических покрытий различного назначения (оптических фильтров, клеев и т.п.); изменения характеристик электрорадиоизделий вследствие влияния температурных эффектов	Характеристики тепловых потоков на солнечной стороне и в тени КА на орбитах полета; диапазон и градиенты изменения температур
4	Невесомость	Отсутствие конвекционного теплообмена; отсутствие механических нагрузок под действием силы тяжести; экранирование поля зрения оптических устройств частицами, элементами конструкций, «плавающими» в невесомости	Температурные поля, их градиенты над различными поверхностями в вакууме

Таблица 1.1. (Окончание)

№	Факторы космического пространства	Особенности влияния ФКП на элементы и технические устройства КА	Характеристики ФКП и сопутствующих эффектов, требующих учета
5	Собственная внешняя атмосфера (атмосфера)	Загрязнение внешних покрытий и оптических поверхностей; теневые помехи оптико-электронным устройствам	Характеристики ионно-газопылевой атмосферы КА (состав и плотность частиц, их пространственно-временные распределения и зарядовое состояние)
6	Микрометеориты (объекты)	Эрозия поверхности, нарушение механических характеристик корпусов, необратимые отказы элементов солнечных батарей	Потоки микрометеоритов, масса и скорость налетающих микрометеоритов
7	Космический вакуум (атмосфера)	Ухудшение характеристик теплоотвода в негерметизированных отсеках; «холодная» сварка металлических поверхностей контактов в механизмах привода	Давление и концентрация газовых частиц; эффективная температура
8	Замкнутый объем	Отсутствие потенциала «земли»; сигналы электрических помех из-за поверхностных токов	Амплитудно-временные характеристики сигналов электромагнитных помех
9	Геомагнитное поле (геомагнетизм)	Изменение электромагнитных полей внутри КА; сбои и отказы радиоэлектронной аппаратуры вследствие паразитных наводок и пробоев	Характеристики магнитного поля, изменение характеристик во время магнитных бурь

Влияние ИИ совместно с космической плазмой проявляется через электризацию диэлектрических защитных и термоизолирующих покрытий. По мере достижения критического заряда происходит внутренний локальный электростатический пробой, который может привести к непосредственному отказу или сбою прибора. Возможен также косвенный эффект через действие электромагнитного поля, возникающего при пробое.

Неравномерный разогрев конструкций КА за счет солнечного излучения, а также при попадании в зону тени от других объектов приводит к значительным циклическим изменениям температуры внешней поверхности КА. В результате возникают температурные градиенты, которые могут приводить к термомеханическим напряжениям и возникновению термоэдс.

Из-за действия невесомости ухудшается тепловой режим работы электронной аппаратуры, так как отсутствует конвекционный съём тепла с нее. Поэтому возможен разогрев аппаратуры за счет внутренней рассеиваемой мощности.

Действие микрометеоритов приводит к механическим повреждениям внешней поверхности приборов. Наиболее существенно этому воздействию подвержены солнечные батареи.

Отсутствие привычной шины земли приводит к тому, что общий потенциал колеблется, а протекание поверхностных токов по поверхности КА может служить дополнительным источником возникновения сигналов помех.

Анализ табл. 1.1 показывает, что эксплуатационные условия электронной аппаратуры КА в условиях КП определяются большим числом факторов, имеющих различную физическую природу. Детальный анализ влияния этого комплекса на работоспособность КА в условиях открытого космоса позволяет выделить ряд независимых факторов, а остальные рассматривать с точки зрения радиационного и теплового воздействия. Справедливость этого вывода подтверждена наличием тесной корреляционной связи между отдельными факторами. Так, например, невесомостью обусловлено отсутствие конвекции при теплообмене, а наличие вокруг КА собственной внешней атмосферы приводит к изменению вакуума, что, в свою очередь, влияет на теплообмен в открытом космическом пространстве.

## 1.2. Состав ионизирующего излучения

В общем виде радиационные факторы можно разделить на две большие группы по их происхождению — естественного или искусственного происхождения. К первой группе относится ионизирующее излучение, источниками которого являются различные природные явления, например космическое излучение. К искусственным источникам радиации относится излучение, которое возникает за счет деятельности человека, например ионизирующее излучение ядерных энергетических установок.

Ионизирующее излучение, или радиация, создается различными типами ядерных частиц. К важнейшим из них относятся: нейтроны, протоны, ионы, электроны, гамма-кванты и фотоны, характеристики взаимодействия которых в значительной степени зависят от энергии ядерных частиц. Как правило, в ядерной физике энергию определяют величиной эВ, которая соответствует значению, полученному ядерной частицей с зарядом по абсолютной величине равному заряду одного электрона при приложенном напряжении равном 1 В. 1 эВ равен  $2,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.

Кратко рассмотрим физические особенности каждой ионизирующей частицы. По типам ядерных частиц их можно разделить на заряженные: протоны, ионы и электроны и нейтральные (косвенно ионизирующие): нейтроны, гамма-кванты и фотоны.

### Нейтрон

Нейтрон в свободном состоянии представляет собой нейтральную ядерную частицу с массой покоя около  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг (940 МэВ). В свободном состоянии

нейтрон радиоактивен и распадается на протон, электрон и нейтрино. Период полураспада чуть более 10 мин. Для нейтрона, как элементарной ядерной частицы, характерно проявление волновых свойств.

Очень часто нейтроны квалифицируют по спектру — функции, описывающей распределение нейтронов по энергии. Как правило, выделяют несколько областей спектра энергии нейтронов:

- релятивистские нейтроны, с энергией более  $10^{10}$  эВ;
- быстрые нейтроны, с энергией больше 0,1 МэВ (иногда больше 1 МэВ);
- медленные нейтроны — общее название нейтронов с энергией менее 100 кэВ;
- тепловые нейтроны с энергией около 0,025 эВ.

Скорость нейтрона  $v_n$  зависит от его энергии и может быть определена из соотношения:

$$v_n \approx 14 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{E_n}, \text{ м/с}, \quad (1.1)$$

где  $E_n$  — энергия нейтрона в эВ.

### Гамма-кванты

Гамма-излучение ( $\gamma$ -кванты) — вид электромагнитного излучения с чрезвычайно маленькой длиной волны —  $< 5 \times 10^{-3}$  нм — и вследствие этого ярко выраженными корпускулярными свойствами. Энергии квантов гамма-излучения лежат в диапазоне  $10^5$ — $10^9$  эВ. На шкале электромагнитных волн оно граничит с рентгеновским излучением, занимая диапазон более высоких частот (рис. 1.2). Гамма-излучение испускается при переходах между возбужденными состояниями ядер элементов. Образуются при радиоактивных превращениях атомных ядер и при ядерных реакциях. Гамма-излучение образуется также за счет радиационных потерь заряженных частиц с энергией более нескольких сотен кэВ, хотя по природе возникновения в данном случае можно говорить о тормозном излучении.

f, МГц	1	$10^2$	$10^4$	$10^6$	$10^8$	$10^{10}$	$10^{12}$	$10^{14}$	$10^{16}$
$\lambda$	300 м	3 м	3 см	300 мкм	3 мкм	30 нм	0.3 нм	3 пм	0.03 пм
Радиоволны		Инфракрасное излучение			Видимое излучение	Ультрафиолетовое излучение		Рентгеновское излучение	Гамма-излучение

Рис. 1.2. Шкала электромагнитных волн

В состоянии покоя масса гамма-кванта равна нулю. Скорость распространения гамма-кванта равна скорости света. Поэтому, если имеется источник гамма-нейтронного излучения, испускающий одновременно гамма-квант и 1 МэВ нейтрон, то уже на расстоянии  $R$  в метрах временной сдвиг между ними будет равен:

$$\Delta t \approx r/v_n. \quad (1.2)$$

Другими словами, даже на расстоянии 1 м временной сдвиг между одновременно испущенными гамма-квантом и 1 МэВ нейтроном будет составлять величину чуть более 70 нс.

### Рентгеновское излучение

Область энергий от 1 до 100 кэВ относят к рентгеновскому излучению. Источниками рентгеновского излучения являются рентгеновские трубки, Солнце, излучение возбужденных атомов и т.п. Спектр рентгеновского излучения может быть непрерывным или линейчатым. Линейчатый спектр (характеристическое излучение) возникает при возбуждении атомов при переходе электронов с одной внутренней орбиты на другую. Эти спектры строго соответствуют энергетической структуре электронных оболочек атома, и по ним может производиться идентификация химических элементов.

Непрерывный спектр формируется как за счет торможения ядерных частиц в веществе (тормозное излучение), так и в результате сильного разогрева материала (излучательный спектр, или спектр абсолютно черного тела).

### Фотонное излучение

Фотонное излучение — вид электромагнитного излучения с относительно большой длиной волны  $\sim 1$  мкм. У фотонов проявляются как волновые, так и корпускулярные свойства. Энергии фотонов лежат в диапазоне  $10^{-3}$ — $10^3$  эВ. На шкале электромагнитных волн оно граничит с рентгеновским излучением, занимая диапазон более низких частот.

В общем случае для фотонного излучения различают три области излучения: инфракрасное с длиной волны более 760 нм, видимое оптическое излучение (диапазон длин волн 400...760 нм) и ультрафиолетовое излучение с длиной волны менее 400 нм.

### Электроны

Электрон является самой легкой заряженной частицей. Ее заряд составляет  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, а масса покоя  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг (0,51 МэВ). Заряд электрона служит единицей измерения электрического заряда других элементарных частиц. Из электронов состоят электронные оболочки атомов всех веществ. Движение электронов определяет многие электрические явления, такие как электрический ток в металлах и вакууме.

В ряде случаев к электронам относят как собственно электроны, так и позитроны (например, рассматривая их как общее электрон-позитронное поле, получаемое из решения уравнения Дирака).

Иногда выделяют в отдельную группу электронное излучение, получаемое в результате радиоактивного распада вещества, — бета-излучение. Бета-частица ( $\beta$ -частица) — это электрон, испускаемый в результате бета-распада ряда радиоактивных материалов. Типовые значения энергии бета-частиц лежат в диапазоне чуть ниже 1 МэВ.

Находясь в периодическом потенциале кристалла, электрон рассматривается как квазичастица, эффективная масса которой может значительно отличаться от массы покоя электрона.

### Протоны

Протон — положительно заряженная частица, входящая вместе с нейтроном в состав ядра атома. Из-за их общности с нейтроном их называют нуклонами. Протон имеет положительный заряд по величине, равной заряду электрона, а масса протона равна  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг. Протон в химическом смысле является ядром атома водорода без электрона. В природе протоны присутствуют в составе космических лучей.

### Ионы

Атомы химических элементов с частично или полной удаленной электронной оболочкой. Масса иона определяется суммарным количеством протонов и нейтронов, входящих в состав ядра атома. Заряд иона определяется количеством потерянных электронов. В общем случае заряд иона зависит от его энергии. Чем выше его энергия, тем больше «обдирается» его электронная оболочка и, тем самым, выше его заряд.

Иногда выделяют в отдельную группу альфа-излучение, получаемое в результате радиоактивного распада вещества. Альфа-частица ( $\alpha$ -частица) — это ион гелия, испускаемый в результате альфа-распада ряда радиоактивных материалов. Типовые значения энергии альфа-частиц лежат в диапазоне около 5 МэВ.

Существуют другие типы ядерных частиц (мюоны, нейтрино и т.п.), которые потенциально могут также воздействовать на ИС. Но в силу их относительно малой распространенности они рассматриваться в дальнейшем не будут.

## 1.3. Величины и единицы ионизирующих излучений

Радиационные поля характеризуются несколькими параметрами, к важнейшим из которых относятся [6]:

*Энергия* ионизирующих частиц  $E$  обычно выражается в электронвольтах (эВ). 1 эВ равен  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж =  $1,6 \cdot 10^{-12}$  эрг.

*Поток* ионизирующих частиц  $F$  — отношение числа ионизирующих частиц  $dN$ , прошедших через данную поверхность за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу:

$$F = dN/dt, [1/c]. \quad (1.3)$$

Этот параметр относительно редко используется на практике.

*Флюенс* (интегральный поток) ионизирующих частиц  $\Phi$  — отношение числа ионизирующих частиц  $dN$ , проникающих в элементарную сферу, к площади  $dS$  центрального сечения этой сферы:

$$\Phi = dN/dS, [\text{частиц}/\text{см}^2]. \quad (1.4)$$

Данное определение справедливо к любому потоку частиц ионизирующего излучения, в том числе и изотропному. На практике часто имеет место однонаправленный поток. В этом случае флюенс можно определить как отношение числа частиц, падающих перпендикулярно на поверхность, к площади этой поверхности. Другими словами, под флюенсом понимают однонаправленный интегральный поток, умноженный на косинус угла падения частиц по отношению к нормальному падению этих частиц, на поверхность кристалла.

*Плотность* потока ионизирующих частиц  $\varphi$  — отношение потока ионизирующих частиц  $dF$ , проникающих в элементарную сферу, к площади  $dS$  центрального сечения этой сферы:

$$\varphi = dF/dS = d\Phi/dt, [\text{частиц}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})]. \quad (1.5)$$

Энергетическая плотность потока ионизирующих частиц  $\varphi_e(E)$  — отношение плотности потока ионизирующих частиц  $\varphi$  с энергией от  $E$  до  $E + dE$  к энергетическому интервалу  $dE$ :

$$\varphi_e(E) = d\varphi/dE = d^2F/(dS \cdot dE), \text{ [частиц}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ})]. \quad (1.6)$$

Очень часто эту величину называют дифференциальным энергетическим спектром плотности потока ионизирующих частиц. Если взять определенный интеграл по энергии от энергетической плотности потока ионизирующих частиц, то получим интегральный энергетический спектр плотности потока ионизирующих частиц:

$$\Phi(> E) = \int_E^{\infty} \varphi(E) \cdot dE, \text{ [частиц}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})]. \quad (1.7)$$

Данная характеристика определяет плотность потока частиц ионизирующего излучения, имеющих энергию, большую, чем  $E$ .

Энергетическо-угловая плотность потока ионизирующих частиц  $\varphi(E, \Omega)$  — отношение плотности потока ионизирующих частиц  $\varphi$  с энергией от  $E$  до  $E + dE$ , распространяющихся в пределах телесного угла  $d\Omega$ , ориентированного в направлении  $\Omega$  к энергетическому интервалу  $dE$  и этому телесному углу:

$$\varphi(E, \Omega) = d^2\varphi/(dS \cdot d\Omega), \text{ [частиц}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МэВ} \cdot \text{стерадиан})]. \quad (1.8)$$

При оценках радиационных эффектов от воздействия нейтронов наиболее широко используется такой параметр, как флюенс. С другой стороны, при описании полей излучения космического пространства наиболее распространенными являются энергетическая плотность потока ионизирующих частиц или интегральный энергетический поток.

Помимо этих единиц необходимо также ввести величины и единицы, характеризующие взаимодействие ИИ с веществом. Приведем определения некоторых из них.

Сечение взаимодействия ионизирующих частиц (парциальное сечение взаимодействия)  $\sigma_i$  — отношение числа определенного типа ( $i$ -го) взаимодействий  $N_i$  ионизирующих частиц и частиц-мишеней в элементарном объеме при переносе  $\Phi$  ионизирующих частиц к числу частиц-мишеней  $N$  в этом объеме и к этому флюенсу:

$$\sigma_i = \frac{N_i}{\Phi \cdot N}, \text{ [см}^2 = 10^{24} \text{ барн)].} \quad (1.9)$$

Полное сечение взаимодействия ионизирующих частиц (полное сечение взаимодействия)  $\sigma$  — сумма всех сечений взаимодействия  $\sigma_i$  ионизирующих частиц данного вида, соответствующих различным реакциям или процессам:

$$\sigma = \sum_i \sigma_i. \quad (1.10)$$

Макроскопическое сечение взаимодействия ионизирующих частиц (макроскопическое сечение взаимодействия)  $\Sigma_i$  — произведение сечения взаимодействия  $\sigma_i$  на концентрацию частиц-мишеней (атомов)  $N_0$  в веществе:

$$\Sigma_i = \sigma_i N_0, \text{ [1/см].} \quad (1.11)$$



*Линейный коэффициент ослабления*  $\mu$  — отношение  $dN/N$  косвенно ионизирующих частиц, испытавших взаимодействие при прохождении элементарного пути  $dl$  в веществе, к длине этого пути:

$$\mu = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dl}, [1/\text{см}]. \quad (1.12)$$

Под косвенно ионизирующими частицами понимаются частицы, у которых отсутствуют заряд (фотоны, нейтроны, гамма-кванты и т.п.).

*Массовый коэффициент ослабления*  $\mu_m$  — отношение линейного коэффициента ослабления  $\mu$  к плотности вещества  $\rho$ , через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\mu = \frac{1}{\rho \cdot N} \cdot \frac{dN}{dl}, [\text{см}^2/\text{г}]. \quad (1.13)$$

*Линейный коэффициент передачи энергии*  $\mu_{tr}$  — отношение доли энергии  $dw/w$  косвенно ионизирующего излучения (исключая энергию покоя), которая преобразуется в кинетическую энергию заряженных частиц при прохождении элементарного пути  $dl$  в веществе, к длине этого пути:

$$\mu_{tr} = \frac{1}{w} \cdot \frac{dw}{dl}, [1/\text{см}]. \quad (1.14)$$

*Массовый коэффициент передачи энергии*  $\mu_{tr,m}$  — отношение линейного коэффициента передачи энергии  $\mu_{tr}$  к плотности вещества  $\rho$ , через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\mu_{tr} = \frac{\mu_{tr}}{\rho}, [\text{см}^2/\text{г}]. \quad (1.15)$$

*Линейный коэффициент поглощения энергии*  $\mu_{en}$  — произведение линейного коэффициента передачи энергии на разность между единицей и долей энергии вторичных заряженных частиц  $g$ , переходящих в тормозное излучение в данном веществе:

$$\mu_{en} = \mu_{tr} \cdot (1 - g), [1/\text{см}]. \quad (1.16)$$

*Массовый коэффициент энергии*  $\mu_e$  — отношение линейного коэффициента поглощения энергии  $\mu_{en}$  к плотности вещества  $\rho$ , через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\mu_{tr} = \frac{\mu_{en}}{\rho}, [\text{см}^2/\text{г}]. \quad (1.17)$$

*Средний линейный пробег заряженной ионизирующей частицы*  $R_o$  — среднее значение модуля вектора между началом и концом пробега заряженной ионизирующей частицы в веществе.

*Средний массовый пробег заряженной ионизирующей частицы*  $R_{om}$  — произведение среднего линейного пробега  $R_o$  заряженной ионизирующей частицы в данном веществе на плотность этого вещества:

$$R_{om} = R_o \cdot \rho, [\text{г}/\text{см}^2]. \quad (1.18)$$

*Линейная плотность ионизации*  $G_i$  — отношение числа  $dN$  ионов одного знака, образованных заряженной ионизирующей частицей на элементарном пути  $dl$ , к этому пути:

$$G_i = dN/dl, [1/\text{см}]. \quad (1.19)$$

*Линейная тормозная способность вещества*  $S_x$  — отношение энергии  $dE$ , теряемой заряженной ионизирующей частицей при прохождении элементарного пути  $dl$  в веществе, к длине этого пути:

$$S_x = dE/dl, [\text{МэВ}/\text{мкм}]. \quad (1.20)$$

*Массовая тормозная способность вещества*  $S_{xm}$  — отношение линейной тормозной способности  $S_x$  вещества к плотности  $\rho$  вещества:

$$S_{xm} = S_x/\rho, [\text{МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}]. \quad (1.21)$$

*Линейная передача (потери) энергии* (ЛПЭ)  $L_\Delta$  — отношение энергии  $dE_\Delta$ , переданной веществу заряженной частицей вследствие столкновений на элементарном пути, к длине  $dl$  этого пути:

$$L_\Delta = dE_\Delta/dl, [\text{МэВ}/\text{мкм}]. \quad (1.22)$$

В данной работе мы будем использовать величину ЛПЭ, приведенную к массе вещества:

$$L_z = L_\Delta/\rho, [\text{МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}]. \quad (1.23)$$

*Поглощенная доза ионизирующего излучения* (доза излучения)  $D$  — отношение средней энергии  $dw$ , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе  $dm$  вещества в этом объеме:

$$D = dw/dm, [\text{Грей}=100 \text{ рад}]. \quad (1.24)$$

*Грей* равен поглощенной дозе ИИ, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ИИ, равная 1 Дж, а *рад* определяется величиной поглощенной дозы, при которой веществу массой 1 г передается энергия ИИ, равная 100 эрг.

*Мощность поглощенной дозы ИИ* (мощность поглощенной дозы)  $P$  — отношение приращения поглощенной дозы  $D$  за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$P = dD/dt, [\text{Грей}/\text{с} = 100 \text{ рад}/\text{с}]. \quad (1.25)$$

*Керма*  $K$  — отношение суммы начальных кинетических энергий  $dE_k$  всех заряженных ионизирующих частиц, образовавшихся под действием косвенно ИИ в элементарном объеме вещества, к массе  $dm$  вещества в этом объеме:

$$K = dE_k/dm, [\text{Грей} = 100 \text{ рад}]. \quad (1.26)$$

Важно подчеркнуть разницу между кермой и поглощенной дозой. В равновесном случае, когда перенос энергии происходит из смежных материалов, равных между собой, керма и поглощенная доза также равны. В микрообъемах или на границах раздела двух материалов это условие может не выполняться. Так ионизирующая частица, образовавшаяся в объеме, может его покинуть так, что основные потери энергии будут вне этого объема.

В радиационной физике полупроводниковых приборов очень часто вводят понятие *i-кермы* ( $K_i$ ) и *d-кермы* ( $K_d$ ), которые относятся, соответственно, к значениям кермы, затрачиваемым на ионизацию и структурные повреждения. В последнем случае используется также величина энергии, затрачиваемая на неионизационные потери NIEL (non ionizing energy losses).

*Экспозиционная доза фотонного излучения (экспозиционная доза)  $D_x$*  — отношение суммарного заряда  $dQ$  всех ионов одного знака, создаваемых в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой  $dm$ , полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном объеме:

$$D_x = dQ/dm, [P(\text{рентген}) = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}]. \quad (1.27)$$

*Мощность экспозиционной дозы фотонного излучения (мощность экспозиционной дозы)  $P_x$*  — отношение приращения экспозиционной дозы  $D_x$  за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени:

$$P_x = dD_x/dt, [P/c]. \quad (1.28)$$

Существует связь между поглощенной и экспозиционной дозой. Она определяется различиями в коэффициентах поглощения и передачи энергии в воздухе и в анализируемом веществе. Соотношения между этими величинами при определении поглощенной дозы в кремнии приведены в приложении.

*Активность радионуклида в источнике (образце)  $A$*  — отношение числа спонтанных переходов  $dN$  из определенного ядерно-энергетического состояния радионуклида, происходящих в источнике (образце) за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу времени:

$$A = dN/dt, [1/c = \text{Бк (Беккерель)}]. \quad (1.29)$$

*Постоянная радиоактивного распада радионуклида  $\lambda_a$*  — отношение доли ядер  $dN/N$  радионуклида, распадающихся за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу времени:

$$\lambda_a = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt}, [1/c]. \quad (1.30)$$

*Период полураспада радионуклида  $T_{1/2}$*  — время, в течение которого число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в 2 раза.

## 1.4. Основные соотношения между величинами ионизирующих излучений

Представленные выше величины не являются независимыми и между некоторыми из них существуют взаимосвязи. Проиллюстрируем это на наиболее важных примерах.

Например, при известной активности радионуклида в приближении точечного источника плотность потока ионизирующих частиц будет определяться через соотношение:

$$\varphi = \frac{A}{4\pi r^2}, \quad (1.31)$$

где  $r$  — расстояние от источника до объекта.

По определению при воздействии ионизирующих заряженных частиц определяется поглощенная доза через соотношение (1.24). В свою очередь, потери каждой отдельной ядерной частицы выражаются через ЛПЭ (1.23). Оцен-

ка общей потерянной энергии выражается через флюенс. Таким образом, можно записать:

$$D = \frac{dw_1 \cdot n}{dm} = \frac{L_\Delta \cdot dl \cdot \Phi \cdot A}{\rho \cdot dl \cdot A} = L_z \cdot \Phi, \tag{1.32}$$

где  $n$  — количество падающих частиц на объект площадью  $A$ ,  $dw_1$  — потери энергии от одной заряженной частицы.

Таким образом, несложно заметить, что суммарная доза в равновесном случае не зависит от формы объекта, а определяется только ЛПЭ и флюенсом заряженных частиц.

Пробег частицы также зависит от ЛПЭ. Если пренебречь отклонением траектории заряженной частицы от прямой линии, то величина среднего пробега оценивается из соотношения:

$$R_o = - \int_0^{E_0} \frac{dE}{L_\Delta}, \tag{1.33}$$

где  $E_0$  — начальная энергия ядерной частицы.

Несколько иначе производится расчет величины суммарной поглощенной дозы при воздействии косвенно ионизирующих частиц. Например, при воздействии узкого рентгеновского пучка в материале на глубине  $x_d$  мощность поглощенной дозы оценивается из соотношения:

$$P_x = k_x \int E_x \cdot \mu_{en}(E_x) \varphi_x(E_x) \cdot \exp(-\mu_m \cdot x_d) dE_x, \tag{1.34}$$

где  $\varphi_{x1}(E)$  — дифференциальный спектр рентгеновского излучения, падающего на преграду массовой толщиной  $x_d$ ;  $\mu_l$  и  $\mu_e$  — массовые коэффициенты ослабления и поглощения энергии квантов;  $k_x$  — коэффициент пропорциональности. В случае если энергия фотонов  $E_x$  выражена в МэВ, величина  $k_x = 1,6 \cdot 10^{-8}$  рад/част.

Еще раз следует подчеркнуть разницу между поглощенной дозой и кермой. Если при воздействии косвенно ионизирующего излучения имеют место заметные различия в коэффициентах поглощения энергии, то за счет переноса энергии вторичными электронами на границе раздела будут иметь место различия в значениях поглощенной дозы от своих равновесных значений (рис. 1.3).

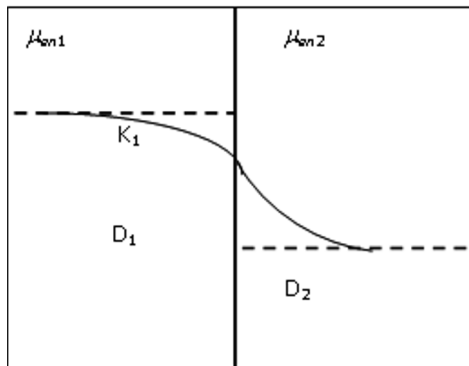


Рис. 1.3. Изменения кермы и поглощенной дозы на границе раздела двух материалов с разными значениями коэффициентов поглощения энергии

## ГЛАВА 2

# ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Существующие источники ионизирующего излучения (ИИ) можно разделить на две большие группы. К первой группе относятся источники ИИ естественного происхождения, а ко второй — искусственного происхождения. Наиболее значимым источником ИИ естественного происхождения являются радиационные факторы космического пространства. К ним также следует отнести естественную радиоактивность материалов и фоновое излучение у поверхности Земли.

Источниками ИИ искусственного происхождения являются радиационные факторы ядерного взрыва, фоновое радиационное излучение на ядерных энергетических и электрофизических установках, ряд приборов медицинского назначения и т.п.

### 2.1. Радиационные факторы космического пространства

В настоящее время одним из наиболее актуальных вопросов при разработке космических аппаратов (КА) является обеспечение их длительных сроков активного существования. Эта задача не может быть реализована без решения вопросов, связанных с обеспечением радиационной стойкости электронной аппаратуры КА. Повышение ее актуальности обусловлено следующими основными причинами:

- отказом от гермоконтейнеров, размещение блоков радиоэлектронной аппаратуры на открытой платформе КА приводит к увеличению радиационных нагрузок на электронную компонентную базу (ЭКБ) за счет снижения защитных характеристик конструкционных материалов КА;
- увеличением сроков активного существования приводит к соответствующему увеличению уровней радиационных дозовых нагрузений;
- широким применением функционально сложных изделий микроэлектроники индустриальной системы качества (без требований по радиационной стойкости);
- появление новых механизмов отказов и сбоев электронной аппаратуры КА, обусловленных радиационными эффектами от воздействия отдельных высокоэнергетичных ядерных частиц (ОЯЧ) космического пространства (КП).

Анализ возможных причин нештатного поведения из-за воздействия ВВФ выявил, что значительная доля объясняется влиянием радиационных факторов КП (рис. 2.1, приложение 2) [7]. Доля возникающих сбоев и отказов из-за действия радиации достигает почти 50%.

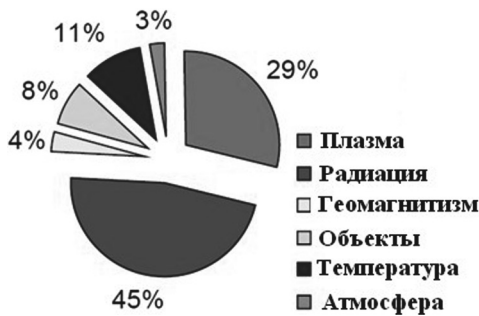


Рис. 2.1. Аномалии в поведении КА, обусловленные воздействием ВВФ КП [7] (приложение 2)

Одним из первых примеров потери КА из-за воздействия проникающей радиации является космический аппарат Telestar, запущенный 10 июля 1962 г. сразу же после проведения испытания ядерного оружия (9 июля). Образовавшийся искусственный радиационный пояс Земли привел к существенному увеличению потоков электронов, почти на два порядка. Уже 24 ноября часть электронной аппаратуры КА начала функционировать неверно. Окончательно спутник потерял свою работоспособ-

ность в феврале 1963 г. При этом уровень радиационной стойкости электронной аппаратуры, определенной по результатам испытаний, составлял 0,6—2 Мрад. Этот образовавшийся искусственный радиационный пояс Земли явился причиной потери семи КА.

Но даже при относительно спокойной радиационной обстановке имеют место сбои и отказы. Ярким примером является схема КМОП оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) NEC 64 К, которая широко использовалась в электронных узлах КА. В этой схеме наблюдалось в среднем 2,4 одиночных сбоя и 0,76 тиристорных эффектов за неделю [8]. В качестве одной из основных причин потеря КА «Фобос-Грунта» также считается воздействие радиации. Эффекты частичной потери работоспособности аппаратов за счет воздействия космической радиации наблюдались во многих отечественных и зарубежных КА, например в DSCS-II, DSP, Intelsat III, Intersat IV, «Стерх», Feng Yun I и других [9]. При этом значительная доля отказов и сбоев имела место при нахождении КА в районе южно-бразильской аномалии.

Резкое увеличение потоков ядерных частиц в момент мощной солнечной вспышки увеличивает вероятность отказов и сбоев в электронной аппаратуре КА. Так, в момент солнечной вспышки, имевшей место 20 января 1994 года, произошли функциональные отказы электронной системы стабилизации канадского спутника связи Anik E-1 [9].

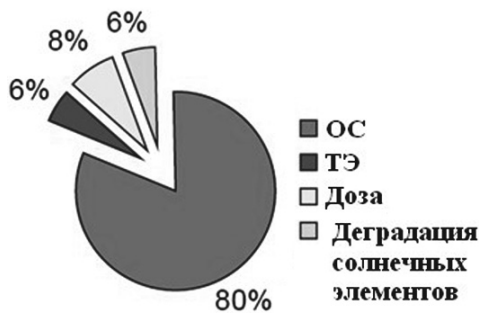


Рис. 2.2. Причины отказов и сбоев РЭА КА от воздействия ИИ КП [7] (приложение 2)

В качестве примера на рис. 2.2 (приложение 2) представлено распределение по отказам и сбоям в электронной аппаратуре КА, обусловленное различными радиационными эффектами [7]. Как видно, в настоящее время доминирующее место занимают одиночные радиационные эффекты (ОРЭ) в ИС из-за воздействия отдельных ядерных частиц (ОЯЧ), а именно одиночные сбои (ОС) и тиристорные эффекты (ТЭ).

Роль тех или иных отказов в большой степени зависит от орбиты КА. Например, для геостационарной орбиты основную дозу формируют электроны, в то же время вероятность возникновения эффектов при воздействии ОЯЧ на средних орбитах значительно увеличивается при нахождении КА в зоне южно-атлантической аномалии и/или при возникновении мощных солнечных вспышек.

Традиционно радиационные источники КП анализируют применительно к воздействию:

- электронов и протонов естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ);
- протонов и тяжелых заряженных частиц галактических космических лучей (ГКЛ);
- протонов и тяжелых заряженных частиц солнечных космических лучей (СКЛ).

### 2.1.1. Радиационные пояса Земли

Оценке радиационной обстановки в околоземном пространстве уделялось значительное внимание уже с первых лет освоения космического пространства. Существующие модели построены на базе различных наборов данных, полученных с нескольких десятков спутников; тем самым обеспечивается широкий пространственно-временной охват [10—17]. Вследствие того что все области радиационного окружения непрерывно изменяются, никакая из существующих моделей не является полностью всеохватывающей. Наиболее успешные версии отражают эти изменения вместе с совершенствованием процесса измерения частиц и техники обработки полученных данных.

Модели, как правило, строятся при следующих предположениях:

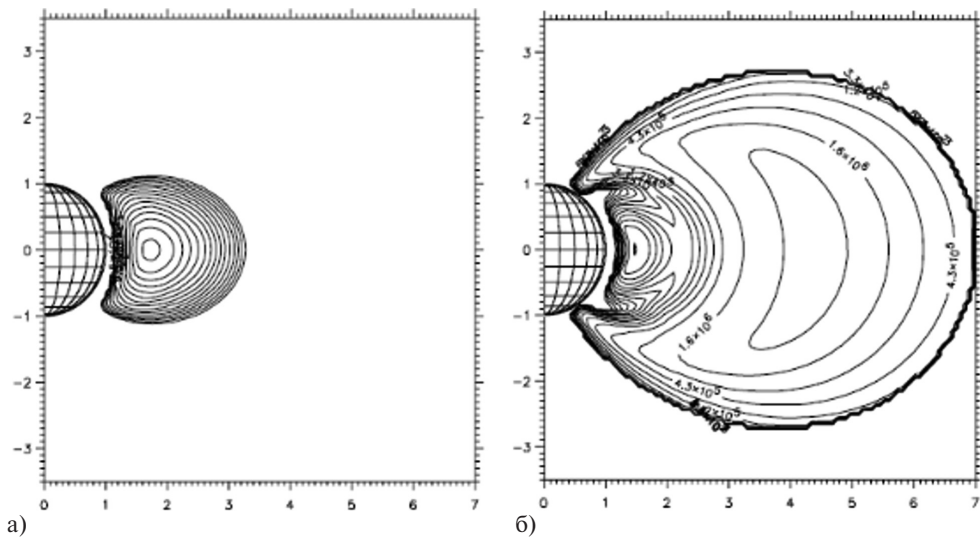
- потоки частиц представляются как всенаправленные (изотропные);
- орбитальная интеграция представляется для различных высот и углов наклона;
- данные по пространственному распределению заряженных частиц представляются обычно в  $L$ ,  $B$ -координатах ( $L$ -радиус Земли,  $B$  — напряженность магнитного поля);
- интегральный энергетический спектр плотности потока  $\Phi(> E)$  представляет собой общий поток ( $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ) при всех энергиях, выше указанной пороговой энергии;
- дифференциальный энергетический спектр плотности потока  $\phi(E)$ , представляет собой скорость изменения потока от энергии для определенного уровня энергии ( $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{МэВ}^{-1}$ );
- модели соответствуют конкретным промежуткам времени и поэтому относятся конкретно к условиям солнечного минимума или солнечного максимума.

В настоящее время для описания распределения электронов и протонов в околоземном космическом пространстве наиболее часто применяются модели АЕ-8 и АР-8 и их модификации [13]. В настоящее время общепризнанными являются модели радиационных поясов Земли АЕ-8 (АЕ-8min, АЕ-8max)

и AP-8 (AP-8min AP-8max), которые описывают распределения электронов и протонов для минимума и максимума солнечной активности. В России также действуют эти модели, а также ряд усовершенствованных моделей, в частности, описанных в монографии «Модель космоса» [10].

Новые модели NASA AE-9 и AP-9 [18, 19] включают результаты последних натуральных исследований радиационной обстановки, рассматривают широкий диапазон энергий, включая горячую плазму и очень энергичные протоны, учитывают неопределенность в прогнозировании обстановки, вводят вероятности плотностей потоков электронов и протонов и наихудшие случаи для различных условий эксплуатации, включают больше информации об энергии, времени и местоположении захваченных энергетических частиц и плазмы и т.п.

Условное графическое обозначение радиационных поясов Земли для протонов (рис. 2.3,а) и электронов (рис. 2.3,б) приведено ниже [20]. Протонная компонента имеет относительно несложное распределение с максимальным значением интенсивности для 10 МэВ протонов на расстоянии  $L = 1,7$ . Электронный пояс является более сложным с двумя максимумами для внутреннего и внешнего радиационных поясов. Первый находится в пределах  $L = 1,4...2,8$ , а второй имеет максимум при  $L = 5$  и распространяется от  $L = 2,8$  до  $L = 10$ ,



**Рис. 2.3.** Условное обозначение протонного (а) и электронного (б) поясов ЕРПЗ в зависимости от расстояния в единицах радиуса Земли

Оценки радиационных полей на орбитах могут быть проведены с помощью специализированного программного обеспечения типа КОСРАД [11, 17, 21], OMERE [22], SPENVIS [23] или подобных. На рис. 2.4 и рис. 2.5 в качестве примера представлены результаты моделирования радиационной обстановки радиационных поясов Земли (интегральные спектры электронов и протонов) при следующих параметрах орбиты КА: круговая орбита с высотой, равной 500 км и наклоном равным  $97,5^\circ$ . Расчеты осуществлялись с помощью модифицированных моделей AP-8 и AE-8 при условии максимума



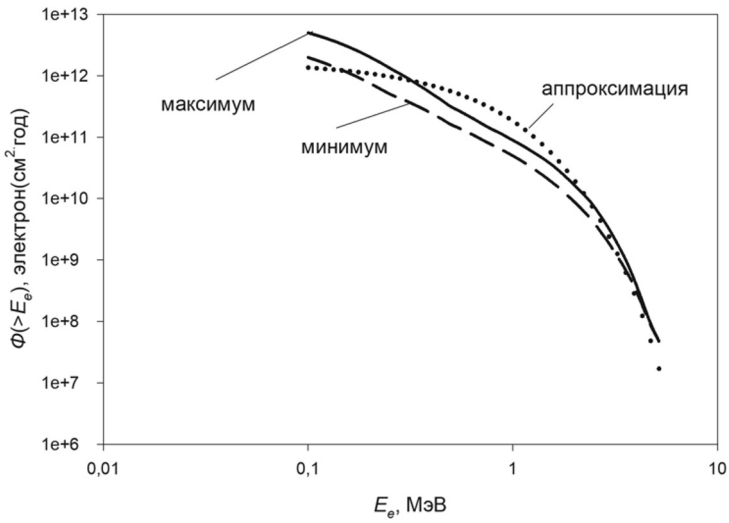


Рис. 2.4. Суммарная интегральная плотность потока электронов за год вне КА с параметрами орбиты: высота 500 км и наклонение  $97.5^\circ$

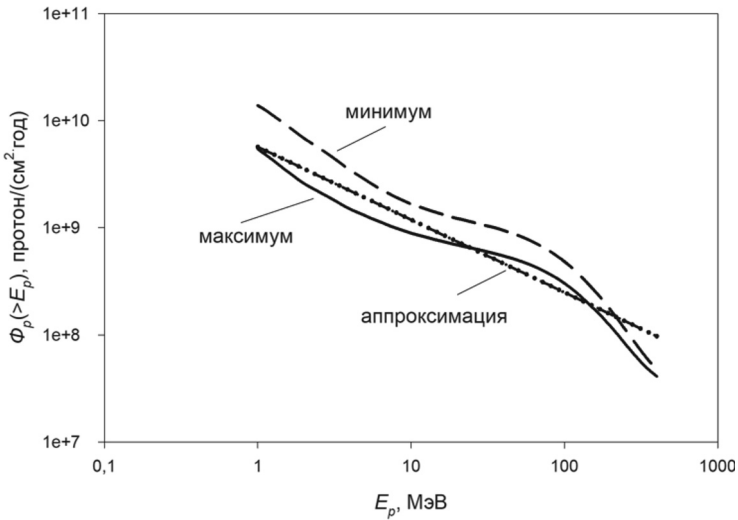


Рис. 2.5. Суммарная интегральная плотность потока протонов за год вне КА с параметрами орбиты: высота 500 км и наклонение  $97.5^\circ$

(AP-8max и AE-8max) и минимума (AP-8min и AE-8min) солнечной активности за период, равный 1 году.

На этих же рисунках представлены результаты, полученные с помощью приближенных соотношений:

— для электронов:

$$\Phi_e(> E_e) = 1,4 \cdot 10^{12} \cdot \exp(-E_e/0,45), \text{ электрон}/(\text{см}^2 \cdot \text{год}); \quad (2.1)$$

— для протонов:

$$\Phi_p(> E_p) = 5,7 \cdot 10^9 \cdot E_p^{-0,68}, \text{ протон}/(\text{см}^2 \cdot \text{год}), \quad (2.2)$$

где  $\Phi_e(> E_e)$  — интегральная плотность потока электронов с энергией выше  $E_e$  МэВ;  $\Phi_p(> E_p)$  — интегральная плотность потока протонов с энергией выше  $E_p$  МэВ.

Для сравнения на рис. 2.6 и 2.7 представлены усредненные интегральные суточные флюенсы электронов и протонов на круговых орбитах высотой 705 км [11] с наклоном около 97 градусов. Нетрудно заметить, что между представленными зависимостями наблюдается хорошее соответствие с учетом различия во временных параметрах. Немного заниженные уровни флюенсов (в 1,5 раза) для орбиты 500 км объясняются влиянием магнитосферы Земли.

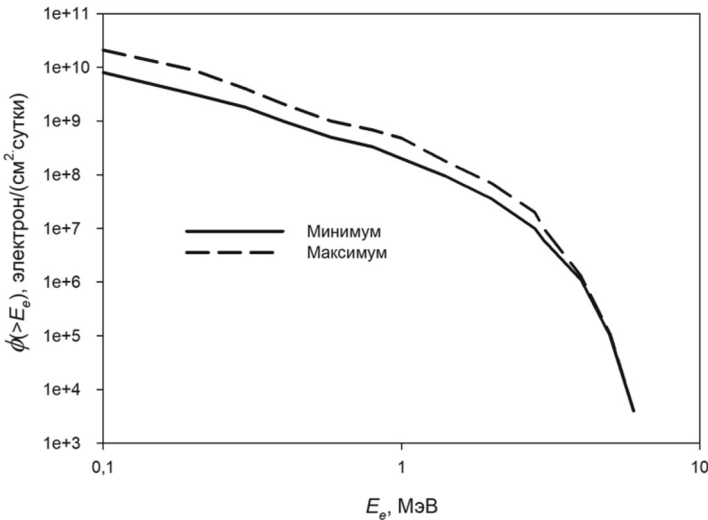


Рис. 2.6. Суммарная интегральная плотность потока электронов за сутки вне КА с параметрами орбиты: высота 705 км и наклонение 96° [13]

Вклад протонной компоненты ЕРПЗ очень сильно зависит от высоты орбиты, достигая своих максимальных уровней на высотах порядка несколько тысяч километров (рис. 2.8). На этом рисунке представлены зависимости энергетических плотностей потоков с энергией протонов, равной 10 МэВ и 30 МэВ, за сферической защитой, равной 1 г/см<sup>2</sup>, усредненные за 10 лет для круговых орбит при наклонении, равном 60°. На этом же рисунке для сравнения представлена аналогичная зависимость для 1 МэВ электронов. Здесь и в дальнейшем, если не указано отдельно, оценки радиационной обстановки проводились с помощью программы КОСРАД [10,11].

Из представленных результатов следует резкое уменьшение вклада протонного излучения при высотах более 10 тысяч километров. Поэтому радиационная обстановка на геостационарной орбите определяется электронами ЕРПЗ, протонами и ионами галактических и солнечных космических лучей (рис. 2.9). Протоны ГКЛ дают также несущественный вклад в суммарную поглощенную

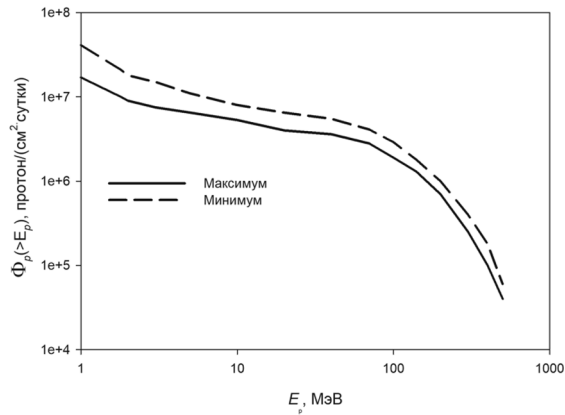


Рис. 2.7. Суммарная интегральная плотность потока протонов за сутки вне КА с параметрами орбиты: высота 705 км и наклонение 96° [13]

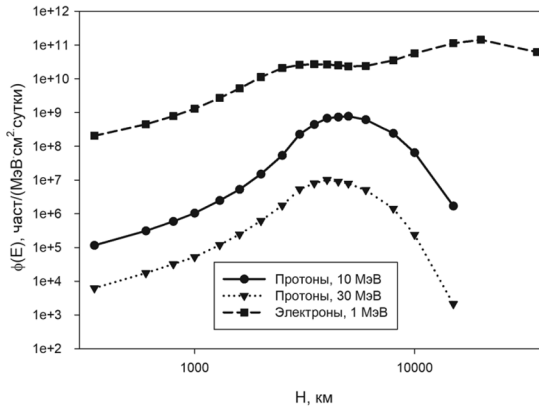


Рис. 2.8. Средние энергетические плотности потока протонов и электронов в зависимости от высоты для круговой орбиты с наклонением 60°

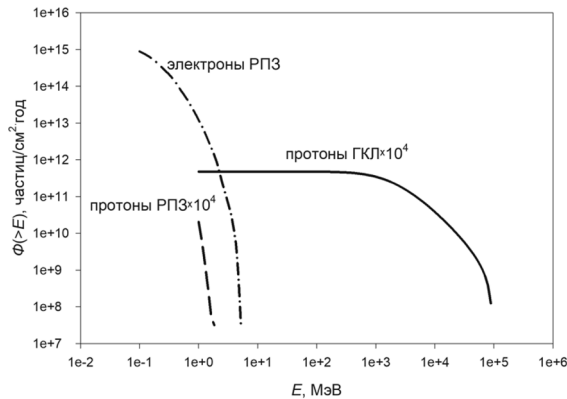


Рис. 2.9. Интегральные потоки электронов и протонов РПЗ и ГКЛ на геостационарной орбите за 1 год (протонный поток увеличен на 4 порядка)

дозу (не более 2 рад/год). Основной вклад в величины суммарной поглощенной дозы ИИ дают электроны ЕРПЗ и протоны СКЛ, роль которых будет проанализирована ниже.

### 2.1.2. Солнечные космические лучи

Ощутимый вклад для некоторых орбит КА в суммарную поглощенную дозу ИИ могут давать потоки протонов солнечных космических лучей, которые в общем случае сложно прогнозировать. Это связано с тем, что возникновение солнечных вспышек носит случайный характер, и, вследствие этого, такие характеристики СКЛ, как потоки заряженных частиц и их энергетические спектры, сильно варьируются от вспышки к вспышке. Потоки СКЛ появляются эпизодически, а их максимальная интенсивность может достигать величин, превосходящих на многие порядки потоки ГКЛ. Однако их энергетика чуть ниже.

В большинстве вспышек максимальная энергия ускоренных частиц не превышает 10 МэВ/нуклон. Такие вспышки происходят довольно часто, в годы высокой солнечной активности — 1 раз в неделю. Реже — раз в месяц, бывают вспышки, в которых частицы ускоряются до 100 МэВ/нуклон. В еще более редких событиях, раз в год, частицы получают энергию до 1 ГэВ/нуклон. Особенно мощные события, возникающие 2...4 раза за 11-летний цикл солнечной активности, характеризуются очень большими потоками ускоренных частиц, максимальные энергии которых достигают 10 ГэВ/нуклон и выше. В результате солнечных вспышек происходит, как правило, выброс высокоэнергичных солнечных частиц, состоящих преимущественно из протонов с небольшим содержанием  $\alpha$ -частиц (5...10%) и более тяжелых ядер.

Условно солнечные события разбиваются на четыре (или пять) класса. Вероятность возникновения события каждого класса вычисляется по полуэмпирической модели. Критерием принадлежности является средняя величина флюенса протонов за вспышку с энергией  $E_p > 10$  МэВ, которая для каждого класса солнечного события составляет:

- >  $8,6 \cdot 10^6$  — среднее событие (M),
- >  $1,3 \cdot 10^8$  — большое событие (L),
- >  $2,0 \cdot 10^9$  — очень большое событие (VL),
- >  $1,8 \cdot 10^{10}$  — экстремально большое событие (EL).

В ряде случаев критерий выбирается исходя из потока протонов с энергией выше 30 МэВ:

- >  $10^5$  протон/см<sup>2</sup> — малое событие (S);
- >  $10^6$  протон/см<sup>2</sup> — среднее событие (M);
- >  $10^7$  протон/см<sup>2</sup> — большое событие (L);
- >  $10^8$  протон/см<sup>2</sup> — очень большое событие (VL);
- >  $10^9$  протон/см<sup>2</sup> — экстремально большое событие (EL).

Анализ нескольких солнечных циклов позволил провести следующую классификацию наблюдаемых событий (табл. 2.1) [24].

Энергетический спектр СКЛ формируется под действием ускоряющих сил и потерь энергии в области ускорения, и его характер сильно зависит от дли-

Таблица 2.1. Количество солнечных вспышек за три солнечных цикла [24]

Группа	Цикл 20	Цикл 21	Цикл 22
EL	1	0	8
VL	5	9	5
L	23	18	21
M	14	24	24
S	1	0	20
Итого	44	5291	78

тельности ускорения, механизма ускорения и возможности выхода частиц из области ускорения в межпланетное пространство. Энергетический спектр СКЛ сильно варьирует от события к событию и изменяется в течение каждого данного события, отражая особенности генерации и распространения частиц на Солнце, выхода в межпланетное пространство и распространения в нем (рис. 2.10) [25]. В силу того что эти события имеют вероятностный характер, их и описывают на вероятностном языке. Например, вероятность появления события типа EL на порядок ниже, чем события типа VL.

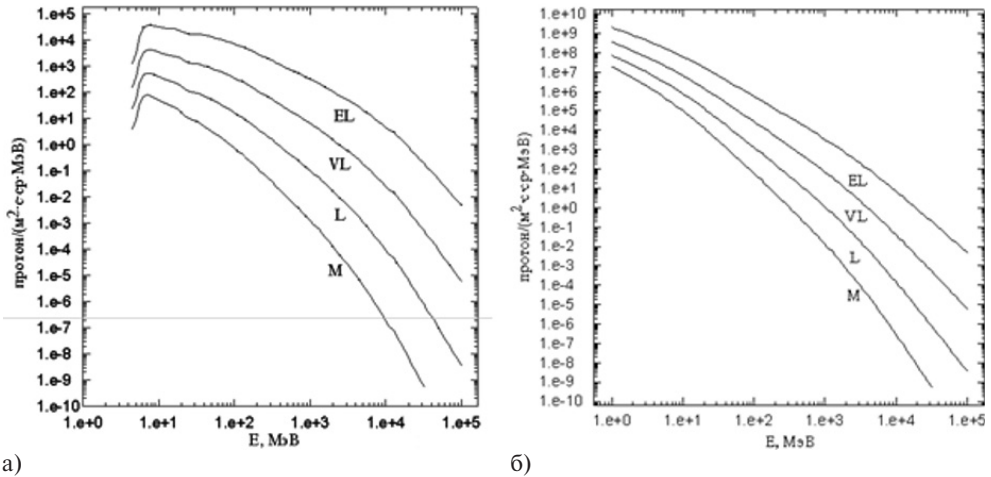


Рис. 2.10. Дифференциальные энергетические спектры протонов СКЛ: а) спектр на орбите  $H_{min} = 263$  км,  $H_{max} = 193$  км,  $\theta = 51^\circ$ ; б) спектр вне магнитосферы Земли [24]

В целом точность прогноза по СКЛ невелика. В зависимости от задаваемых условий однотипные характеристики СКЛ могут отличаться на несколько порядков, что затрудняет прогнозирование радиационной стойкости ИС.

На рис. 2.11 представлены расчетные интегральные потоки протонов солнечных вспышек при разных исходных данных для геостационарной орбиты. Оценки проводились по модели, разработанной в НИИЯФ МГУ Ныммиком Р.А. [10, 25], при двух вероятностях возникновения событий:  $P = 0,5$

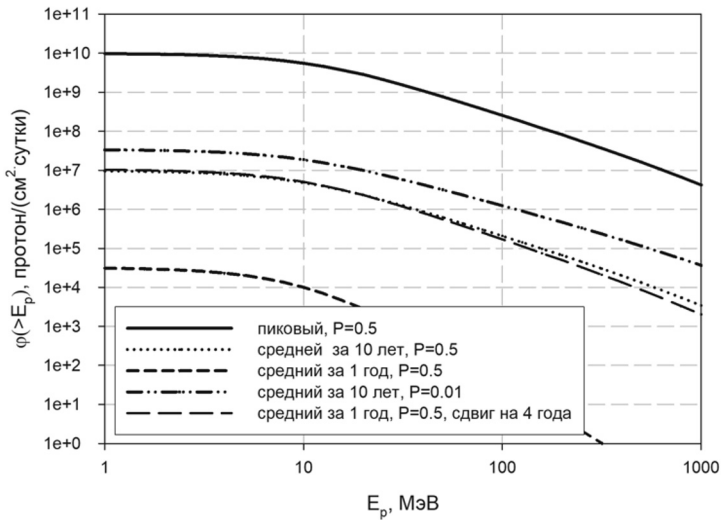


Рис. 2.11. Интегральные плотности потоков СКЛ протонов на геостационарной орбите при разных условиях их оценки

и  $P = 0,01$  и продолжительностях миссий 10 лет и 1 год. Очевидно, что чем меньше вероятность события, тем большие запасы по уровням воздействия должны закладываться (учет маловероятных очень мощных солнечных вспышек). При этом в силу случайности возникновения солнечных вспышек суммарная доза за несколько лет не является произведением годовой дозы на количество лет. Она может быть и больше (если год был спокойным) или меньше, если будет иметь место большая солнечная активность. Очевидно, что максимальная плотность потока будет иметь место, если проводится оценка пикового значения.

Следует обратить внимание, что в соответствии с представленной моделью основной флюенс набирается в течение одного года, когда происходит максимальная солнечная вспышка. Поэтому имеются столь значительные различия в средних плотностях потоков протонов СКЛ, оцениваемых для различных годов солнечной активности. Как видно, различия достигают более двух порядков (кривые для средних плотностей потоков без сдвига и со сдвигом 4 года от начала нового солнечного цикла).

Представленные результаты относились к оценкам потока протонов СКЛ за пределами магнитосферы Земли. Магнитосфера существенно экранирует протонный поток для низких орбит и при малых углах наклона. На рис. 2.12 представлены оценки для пиковых значений интегральных спектров протонной компоненты СКЛ для различных круговых орбит. Нетрудно заметить уменьшение интенсивности протонов СКЛ более чем на порядок для средних орбит. При еще дальнейшем снижении высоты орбиты будет также наблюдаться спад в характеристиках воздействия СКЛ.

Помимо протонов в состав СКЛ входят ионы различных химических элементов. В общем случае они не дают существенного вклада в величину суммарной поглощенной дозы. Однако в ИС повышенной степени интеграции

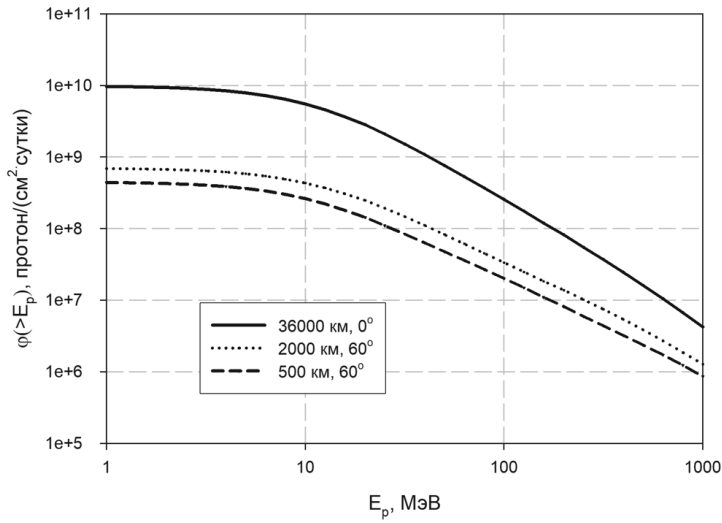


Рис. 2.12. Интегральные плотности пиковых потоков СКЛ протонов для различных орбит

возникают сбои и отказы за счет эффектов от отдельных ядерных частиц. При оценке этих эффектов необходимо иметь интегральные энергетические спектры протонов и спектры линейных потерь энергии (ЛПЭ) для ионов (рис. 2.13).

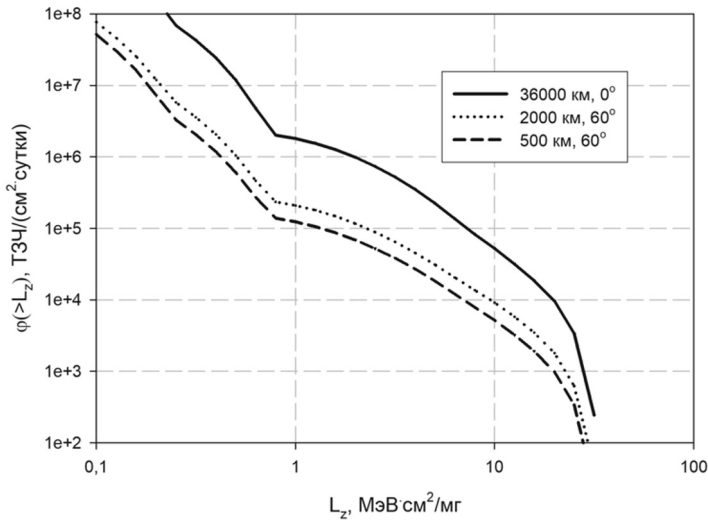


Рис. 2.13. Пиковые интегральные плотности потоков ионов СКЛ для различных орбит

### 2.1.3. Галактические космические лучи

Галактические космические лучи (ГКЛ) не дают заметного вклада в суммарную поглощенную дозу (менее нескольких рад(Si) за год). Однако они являются причиной возникновения в ИС эффектов от отдельных ядерных частиц. Состав ГКЛ изучен довольно подробно, и сейчас известны не только потоки групп ядер в различных диапазонах энергий, но и относительное процентное содержание отдельных ядер. Ядерная компонента ГКЛ разбивается на 5 групп: протоны,  $\alpha$ -частицы, L-группа (легкие ионы с атомными номерами  $Z = 3...5$ ), M-группа (средние ионы  $Z = 6...9$ ) и H-группа (тяжелые ионы  $Z > 10$ ) [10, 11]. Интенсивность различных групп ядер в области релятивистских энергий изучена достаточно хорошо. Изменение интенсивности ГКЛ с фазой солнечного цикла называют 11-летней вариацией космических лучей. Величина ее для разных энергий различна. Так, например, для  $E \sim 100$  МэВ она достигает 20...30%, в то время как для  $E > 2$  ГэВ ее величина не превышает 1...3%.

На рис. 2.14 представлены спектры протонов ГКЛ и СКЛ для круговой орбиты с высотой 650 км и наклоном  $60^\circ$  геостационарной орбиты. Нетрудно заметить, что влиянием ГКЛ протонов можно пренебречь.

В отличие от протонов влиянием ТЗЧ ГКЛ пренебречь нельзя. Эти ионы могут давать определяющий вклад в частоту возникновения одиночных радиационных эффектов (ОРЭ). На рис. 2.15 представлены дифференциальные флюенсы ТЗЧ ГКЛ за 10 лет для разных орбит: геостационарная орбита (ГЕО), круговые орбиты с наклоном  $60^\circ$  и высотой 360 км и 1000 км и эллиптическая орбита с апогеем 36000 км и перигеем 360 км и наклоном также  $60^\circ$ .

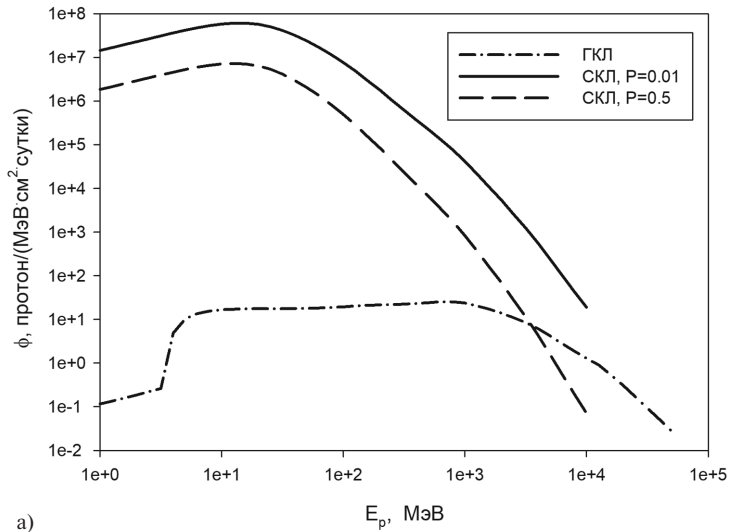
Сравнение представленных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- фактический уровень воздействия ТЗЧ на относительно низких орбитах падает до порядка величины, что связано с влиянием магнитного поля и атмосферы Земли;
- для высокоэллиптических и геостационарных орбит уровни практически совпадают.

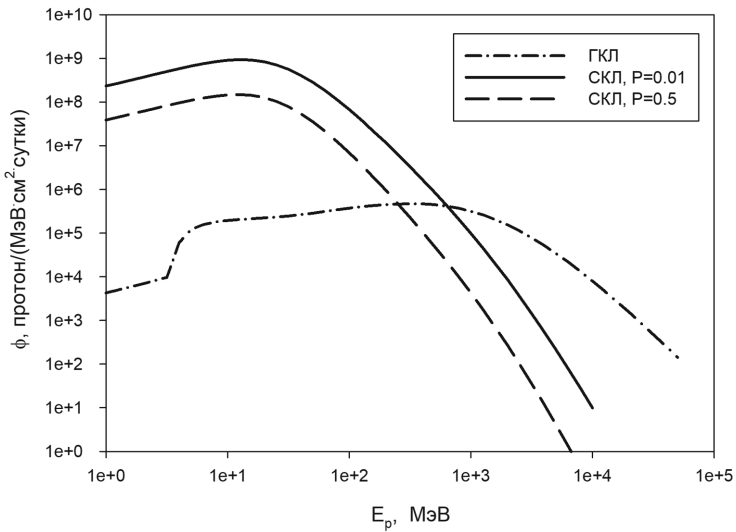
В целом для большинства орбит различия в характере изменений между ЛПЭ-спектрами не существенны. Только для орбит с малыми углами наклона и низкими высотами необходимо учитывать экранирование потока протонов и ТЗЧ магнитосферой Земли. Из представленных результатов следует, что для практически важных случаев (ЛПЭ больше  $1$  МэВ·мг/см<sup>2</sup>) спектры различаются между собой не более, чем в 3...5 раз. Поэтому для многих приложений эти различия можно считать незначительными и пользоваться данными, полученными для геостационарной орбиты как наиболее консервативный случай.

Из-за высоких энергий галактических частиц происходит слабое влияние защитных слоев на характеристики поля излучения ТЗЧ. Действительно, даже при конструктивной защите  $10$  г/см<sup>2</sup> в среднем флюенсы ТЗЧ во всем диапазоне ЛПЭ уменьшаются на величину около порядка (рис. 2.16).





а)



б)

**Рис. 2.14.** Энергетические плотности потоков протонов ГКЛ и СКЛ круговой орбиты с высотой 650 км и наклоном  $60^\circ$  (а) и геостационарной орбиты (б)

Совершенно по-другому происходит трансформация спектров ЛПЭ для ТЗЧ СКЛ. При прочих равных условиях ослабление у них происходит на несколько порядков сильнее (рис. 2.17).

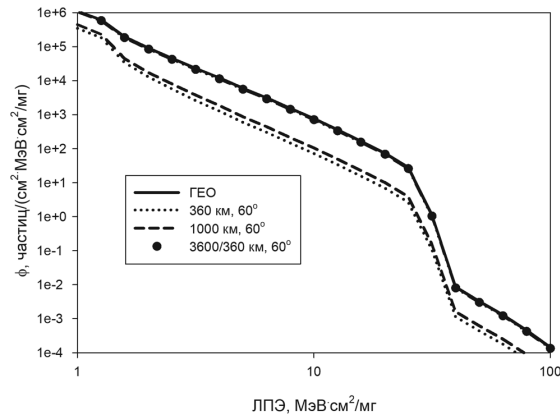


Рис. 2.15. Дифференциальные флюенсы ТЗЧ ГКЛ за 10 лет для разных орбит

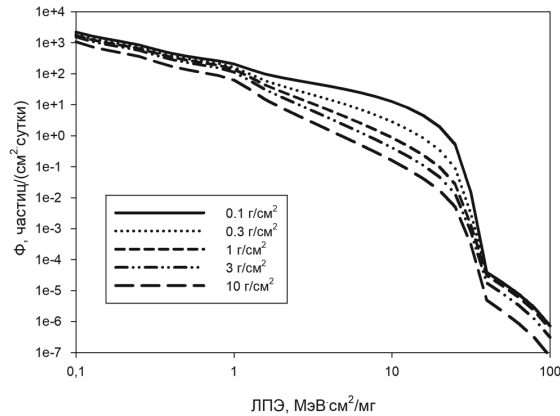


Рис. 2.16. Интегральный ЛПЭ-спектр для ионов ГКЛ на геостационарной орбите за сферической защитой разной толщины

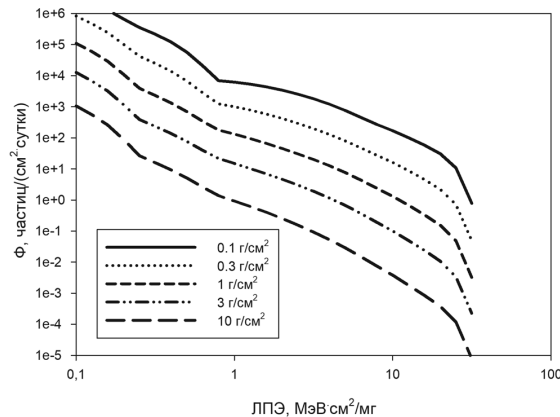


Рис. 2.17. Интегральный ЛПЭ-спектр для ионов СКЛ на геостационарной орбите за сферической защитой разной толщины

### 2.1.4. Вторичное излучение

Вторичное ионизирующее излучение формируется из первичного в результате взаимодействия последнего с конструкционными материалами КА и/или с окружающей атмосферой. Основными являются три компонента фонового излучения — гамма-кванты, мезоны и нейтроны.

Гамма-кванты (тормозное рентгеновское излучение) образуются в первую очередь из-за радиационных потерь электронов в конструкционных материалах КА. Спектр и интенсивность тормозного излучения зависят от энергии и интенсивности внешнего электронного излучения, а также от параметров материала, в котором происходит торможение электронов. Например, при нормальном падении электронов с энергией порядка 1 МэВ за материалом из алюминия формируется рентгеновское излучение с интенсивностью порядка  $(1...5) \cdot 10^{-12}$  рад(Si)·см<sup>2</sup>/электрон. Таким образом, для этого случая вклад тормозного излучения за защитой будет составлять десятые доли процента от величины суммарной дозы внешнего электронного излучения. Более подробные оценки характеристик тормозного излучения будут сделаны в главе 4.

В соответствии с физическими законами выход тормозного излучения будет тем выше, чем больший атомный номер имеет материал защиты. Поэтому, с одной стороны, материалы с большими атомными номерами более эффективно ослабляют первичное радиационное излучение, а с другой — после полного торможения за этой преградой будут формироваться более высокие уровни тормозного излучения. Данный вывод подтверждают расчетные значения дозы от электронного излучения на геостационарной орбите за преградами из алюминия и свинца (рис. 2.18) [3]. Практически до полного поглощения первичного электронного излучения (до 2 г/см<sup>2</sup>) свинцовая защита оказывается

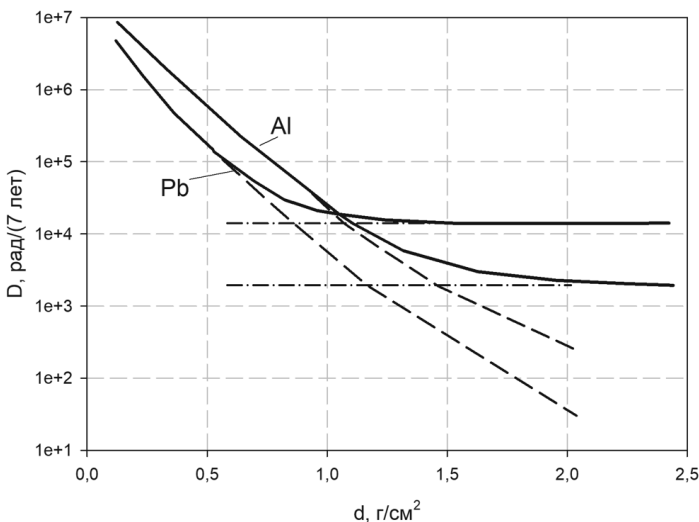


Рис. 2.18. Формирование дозы на геостационарной орбите за преградами, выполненными из алюминия и свинца [3]

более эффективной. При больших значениях массовой толщины уровни радиационного нагружения за счет тормозного излучения для преграды из свинца становятся заметно более высокими.

## 2.2. Естественный радиационный фон

К источникам фонового радиационного излучения, приводящим к сбоям и отказам, относятся те воздействия, которые способны создавать локальное энерговыделение в районе долей и единиц МэВ в чувствительных микрообъемах с размерами порядка 1...100 мкм<sup>3</sup> [3—5, 26, 27].

Фоновое ионизирующее излучение формируется вторичными ядерными частицами, которые образуются как из первичных частиц космического излучения (протонов,  $\alpha$ -частиц, тяжелых ядер, возможно, фотонов и электронов), так и из вторичных частиц (вторичных протонов, вторичных нейтронов высоких энергий,  $\pi$ - и  $\mu$ -мезонов, фотонов и др.) [27, 28]. На рис. 2.19 [28] (приложение 2) схематически изображено образование нейтронов (n) и мезонов ( $\mu$  и  $\pi$ ) средних энергий (менее 10 МэВ) при взаимодействии первичных частиц с ядрами воздуха. Наряду с нейтронами умеренных энергий при ядерных расщеплениях появляются приблизительно в равном количестве протоны (p) таких же энергий. Наиболее тяжелыми ядерными частицами являются нейтроны, которые способны вызывать сбои и отказы в СБИС (рис. 2.20) [27]. Влияние вторичного нейтронного излучения проявляется в основном в верхних слоях атмосферы. Вместе с тем нейтронный фон присутствует и на уровне моря. Сбои могут также возникнуть из-за воздействия  $\pi$ -мезонов,

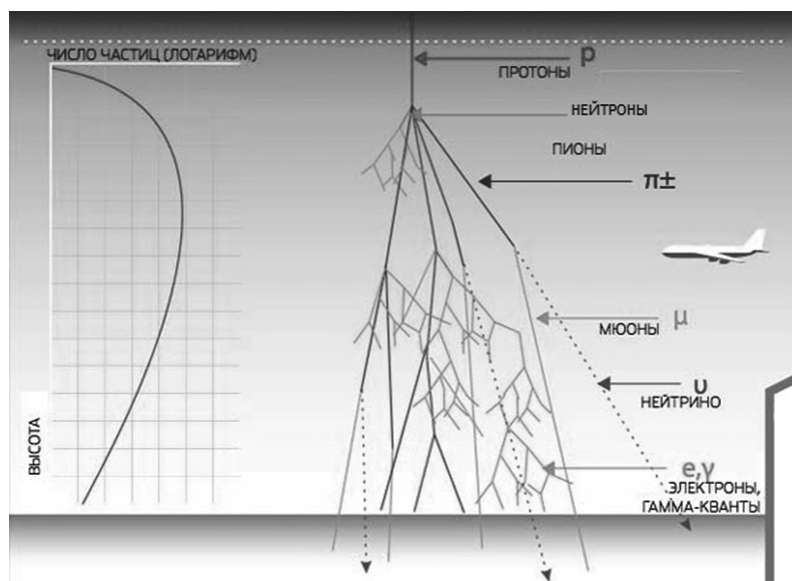


Рис. 2.19. Формирование фонового излучения у поверхности Земли [28] (приложение 2)

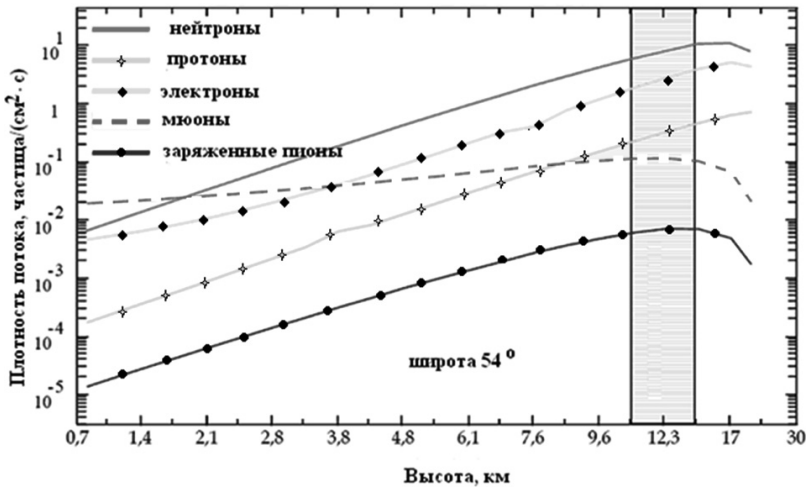


Рис. 2.20. Типовые уровни фонового радиационного излучения у поверхности Земли

Поскольку нуклонная компонента поглощается в атмосфере значительно сильнее, чем жесткая компонента, относительный вклад образования нейтронов умеренных энергий под действием  $\mu$ -мезонов неодинаков на различных высотах над уровнем моря.

Первичная частица космического излучения при взаимодействии с ядрами воздуха может передать нейтрону значительную часть своей энергии. Во всяком случае, экспериментально установлено [29], что в атмосфере имеются нейтроны с энергией во много сотен МэВ. Замедляясь в атмосфере вследствие упругих и неупругих столкновений, нейтроны могут в конце концов достигнуть тепловых энергий. Таким образом, в атмосфере имеются нейтроны всевозможных энергий — от тепловых (порядка 0,025 эВ) до энергий первичных космических частиц. Для того чтобы охарактеризовать энергетический спектр нейтронов в атмосфере, нужно указать плотность или поток нейтронов в выбранном интервале энергий в зависимости от их энергии.

На рис. 2.21 показаны энергетические спектры нейтронов  $\varphi(E_n)$  в атмосфере на различной высоте над уровнем моря (интенсивности нейтронов и их энергии приведены в логарифмической шкале). Из этих спектров видно, что максимум плотности потока нейтронов наблюдается приблизительно при энергии нейтронов 0,1 эВ, т.е. при энергии, близкой к тепловой. Оценка интегральных потоков нейтронов показывает, что в равновесной области атмосферы поток нейтронов с энергией до 1 эВ примерно на порядок меньше, чем нейтронов с энергией от 1 эВ до десятков МэВ.

Дифференциальный спектр интенсивности нейтронов в атмосфере изменяется от изотропного до пропорционального  $\cos\theta_n^2$  при изменении энергии от нескольких МэВ до 1 ГэВ. В интервале от 1 МэВ до 10 ГэВ спектр интенсивности нейтронного излучения с достаточной степенью точности аппроксимируется выражением [29]:

$$d\varphi_n/dE_n = k \cdot E_n^{-a-b} \lg E_n, \text{ [нейтрон/(см}^2\text{·сек·МэВ)}]; \quad (2.3)$$

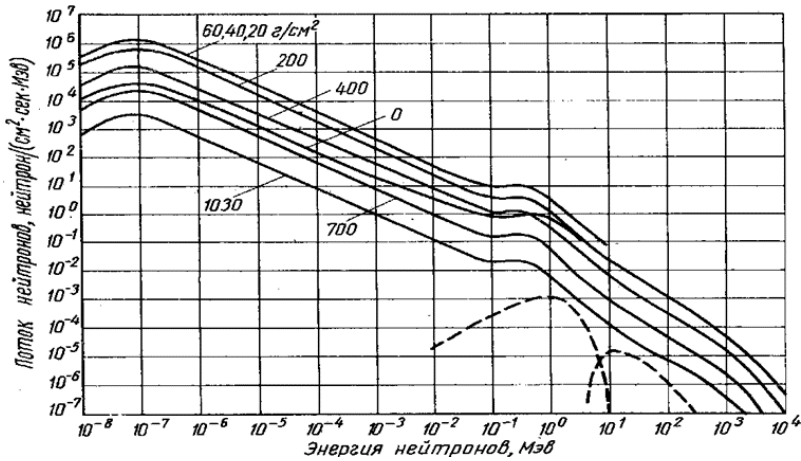


Рис. 2.21. Дифференциальные энергетические спектры нейтронов на различных высотах в атмосфере на геомагнитной широте  $44^\circ$  [29]: верхняя пунктирная линия — спектр нейтронов испарения, нижняя — спектр нейтронов, образующихся в прямых процессах

или

$$d\phi_n/dE_n = 0,3459 E_n^{-0,9219} \exp[-0,01522 (\ln E_n)^2], \quad (2.4)$$

где  $k = 4,8 \cdot 10^{-3}$ ;  $a = 1,0$ ;  $b = 0,17$ .

Изменение плотности распространения нейтронов с высотой связано с зависимостью энергии космических лучей от глубины их проникновения в атмосферу. Обнаружено, что максимум плотности потока нейтронов находится на высоте  $\sim 15$  км и его значение экспоненциально уменьшается с характеристической длиной [30]. Поэтому это излучение необходимо учитывать в первую очередь при оценке уровней сбоев и отказов электронной аппаратуры авиационной техники.

### 2.3. Естественная радиоактивность материалов

Естественная альфа-радиоактивность конструкционных материалов возникает в первую очередь в результате спонтанного деления трансурановых материалов или радиоактивного распада ряда материалов. Следует отметить, что значительная часть существующих альфа-источников получается искусственным путем. К наиболее распространенным источникам естественного происхождения относятся торий, уран, радий и радон (табл. 2.2). Но радий является газом, и он не в состоянии входить в состав конструкционных материалов. Но он может попасть в подкорпусное пространство на этапе герметизации СБИС. Его влияние проявляется также в бескорпусных СБИС и при проведении экспериментальных исследований по определению характеристик фонового излучения. Радиоактивные ряды начального распада нескольких трансурановых элементов представлены на рис. 2.22.