

Базовые механизмы формирования радиационных
Эффектов в ППП, ИС и РЭА

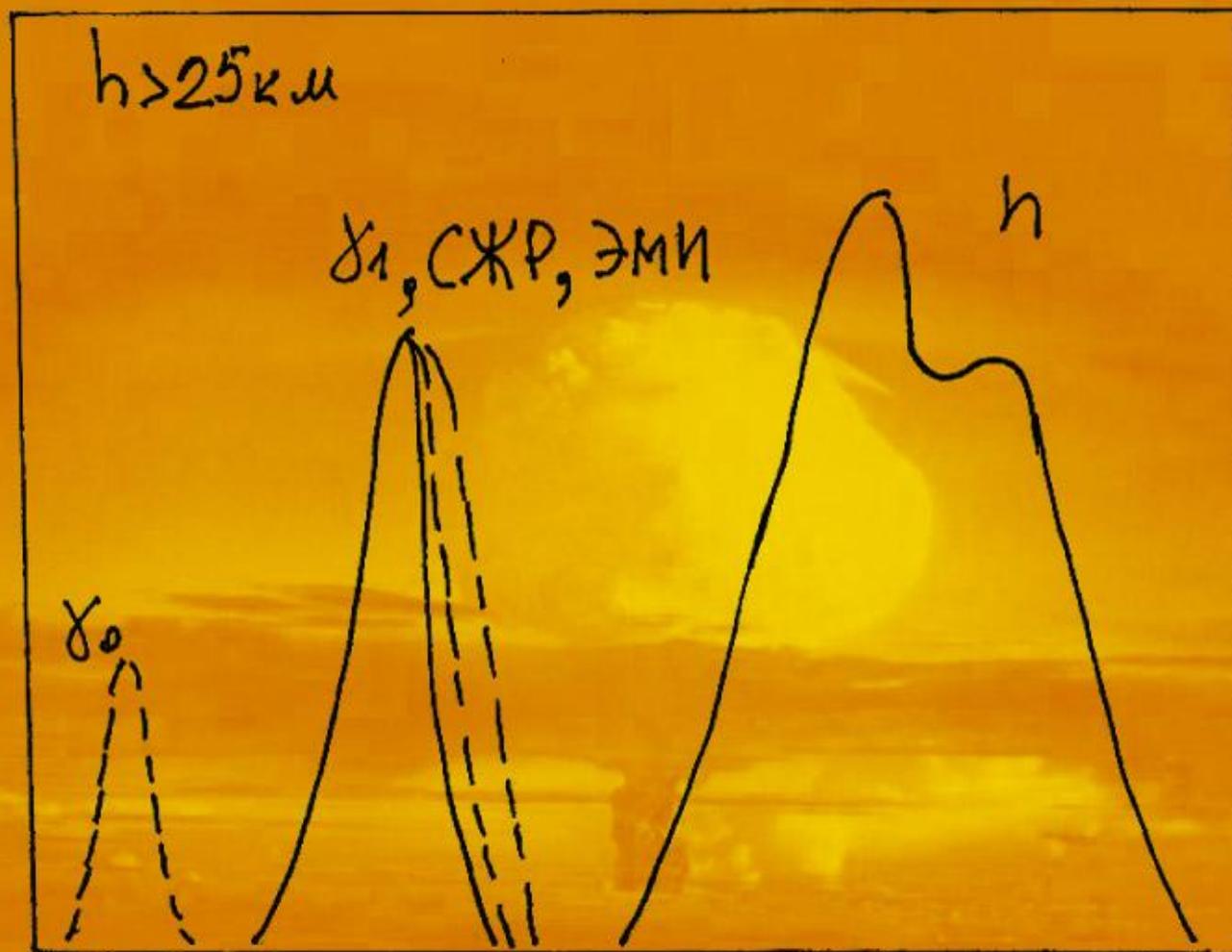
Бутин В.И.

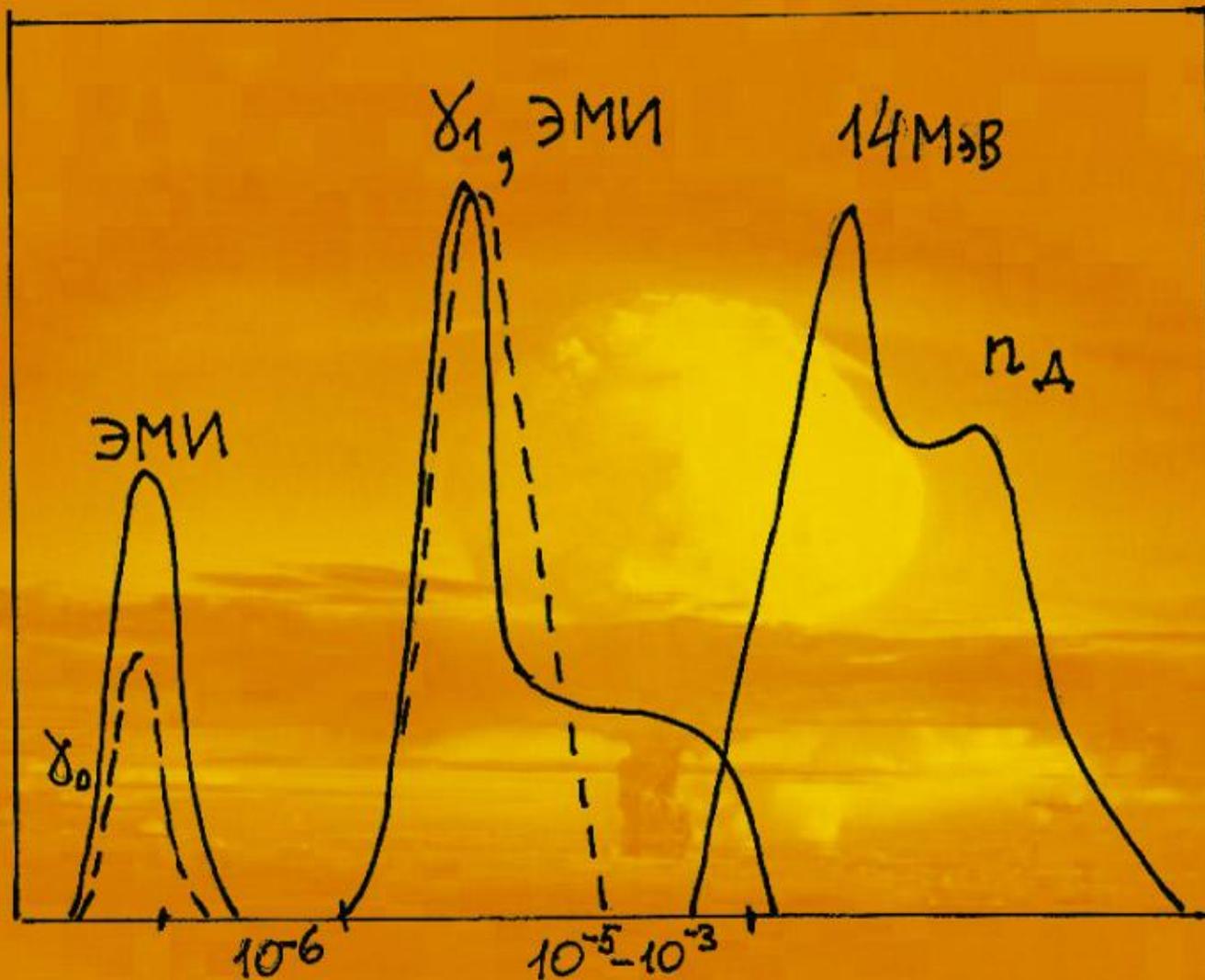
**Ионизирующие излучения
ядерного взрыва (ЯВ),
Космического пространства (КП),
ядерных энергетических установок (ЯЭУ)
и аварий на АЭС (ЛОСА)**

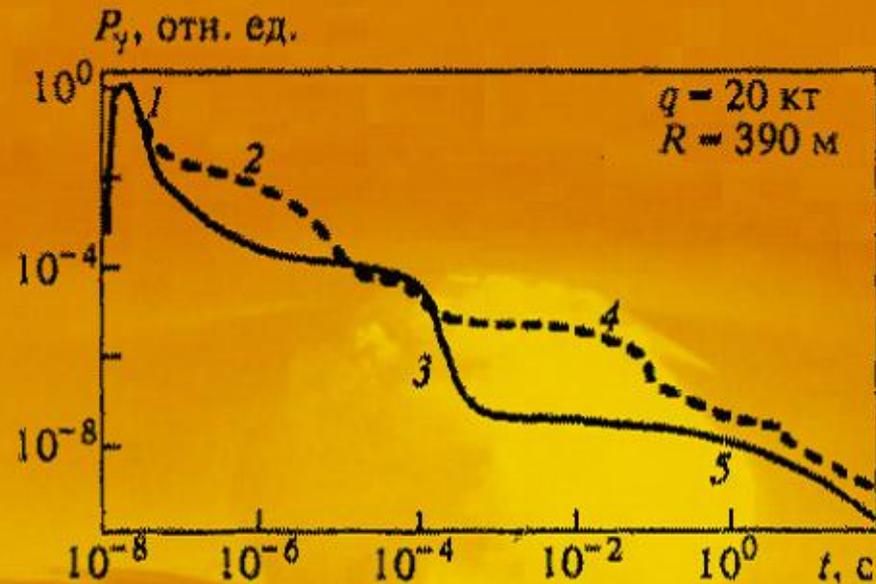
Состав и особенности ИИ, воздействующих на ИЭТ и РЭА

Состав радиационных факторов:

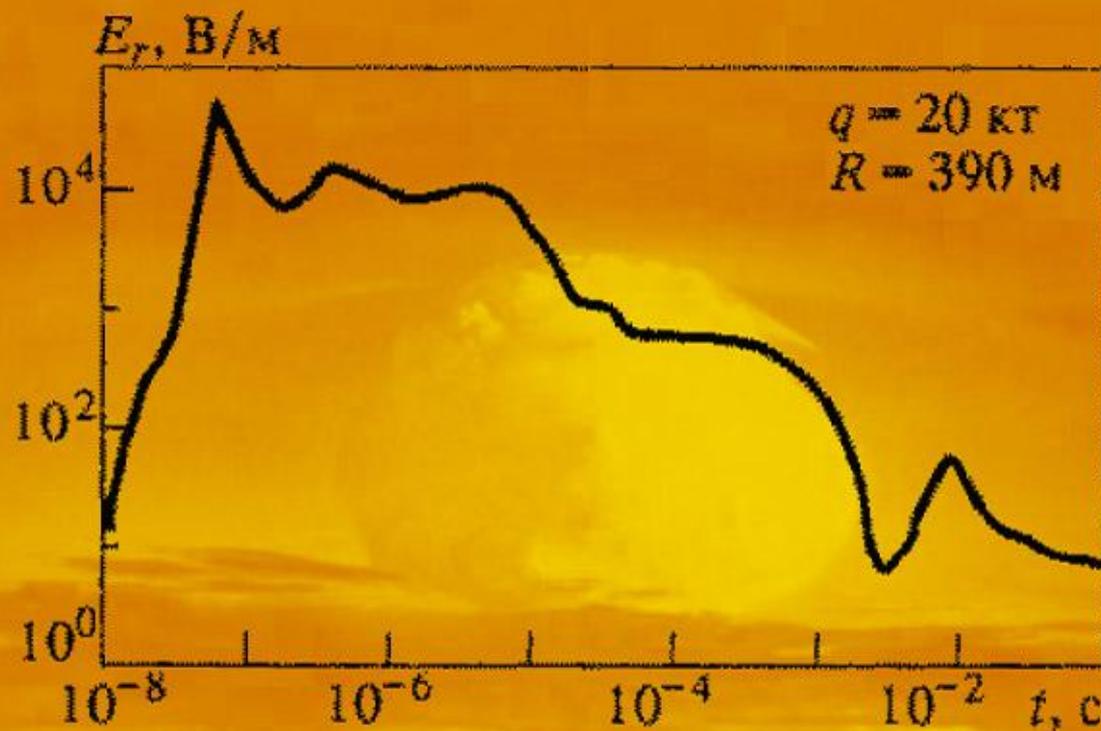
- излучения, создаваемые ядерным взрывом (ИИ ЯВ),
- излучения ядерных силовых и энергетических установок (ИИ ЯЭУ),
- излучения, существующие в космическом пространстве (ИИ КП).



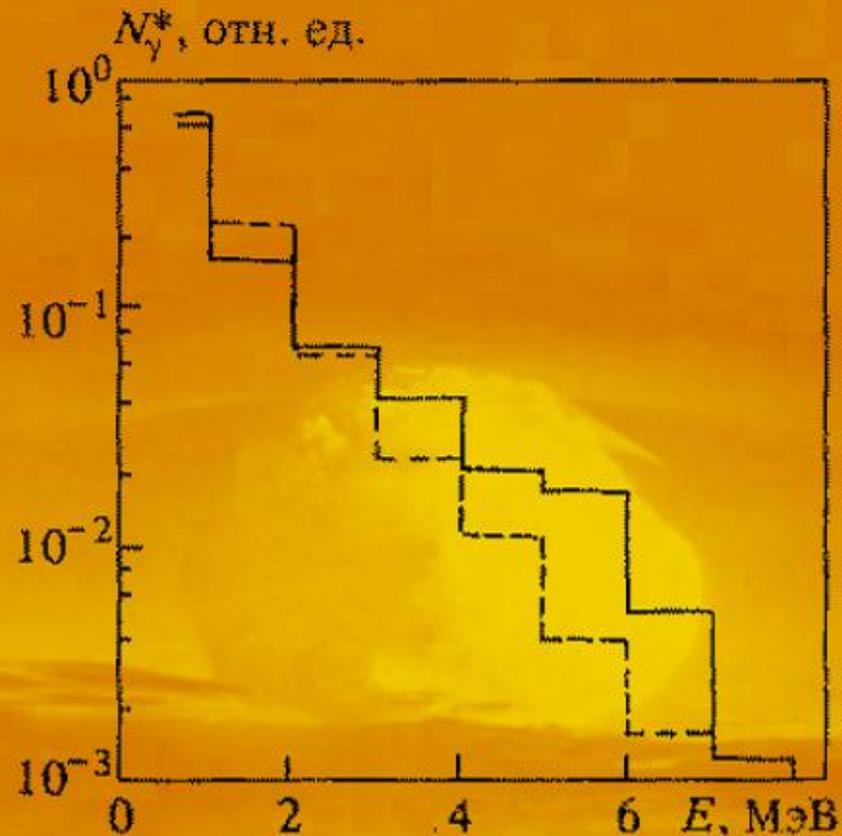




Временная форма гамма-излучения высотного (сплошная линия) и наземного (штриховая линия) атомного взрыва : 1 — мгновенный компонент; 2 — гамма-излучение, рождаемое в актах неупругого рассеяния нейтронов; 3 — изомерное излучение; 4 — излучение, рождаемое в актах захвата нейтронов; 5 — осколочное излучение



Временная форма радиального компонента ЭМИ наземного атомного взрыва



Нормализованный энергетический спектр гамма-квантов, выходящих из конструкции ядерного взрывного устройства: сплошная линия — мгновенное гамма-излучение плутониевого заряда ; штриховая — гамма-излучение деления плутония

Энергетическое распределение быстрых нейтронов, выходящих с поверхности термоядерного взрывного устройства

E_n , МэВ	Доля, %
12,2—14,2	14,9
10,0—12,2	5,3
8,18—10,0	2,9
6,36—8,18	3,3
4,06—6,36	6,6
2,35—4,06	11,0
1,11—2,35	18,0
0,111—1,11	38,0

Удельный выход мгновенных нейтронов и гамма-излучения

Тип устройства	Гамма-излучение, квант/кт	Нейтроны, нейтрон/кт	
	$E_\gamma > 0,1 \text{ МэВ}$	Полный поток	$E_n > 0,1 \text{ МэВ}$
Атомное Термоядерное	$(2-10) \cdot 10^{22}$ $\sim 6 \cdot 10^{22}$	$(1-3) \cdot 10^{23}$ $(1,5-2) \cdot 10^{23}$	$(0,8-1) \cdot 10^{23}$ $\sim 1 \cdot 10^{23}$

Диапазон изменения основных параметров ИИ ЯВ:

- флюенс нейтронов

10^{11} - 10^{15} нейтр.см⁻²;

- доза гамма-квантов 10 - 10^5 Р;

- рентгеновское излучение

$1,0$ – 10^4 кал.см⁻².

Время прихода нейтронов зависит от расстояния и энергии нейтронов:

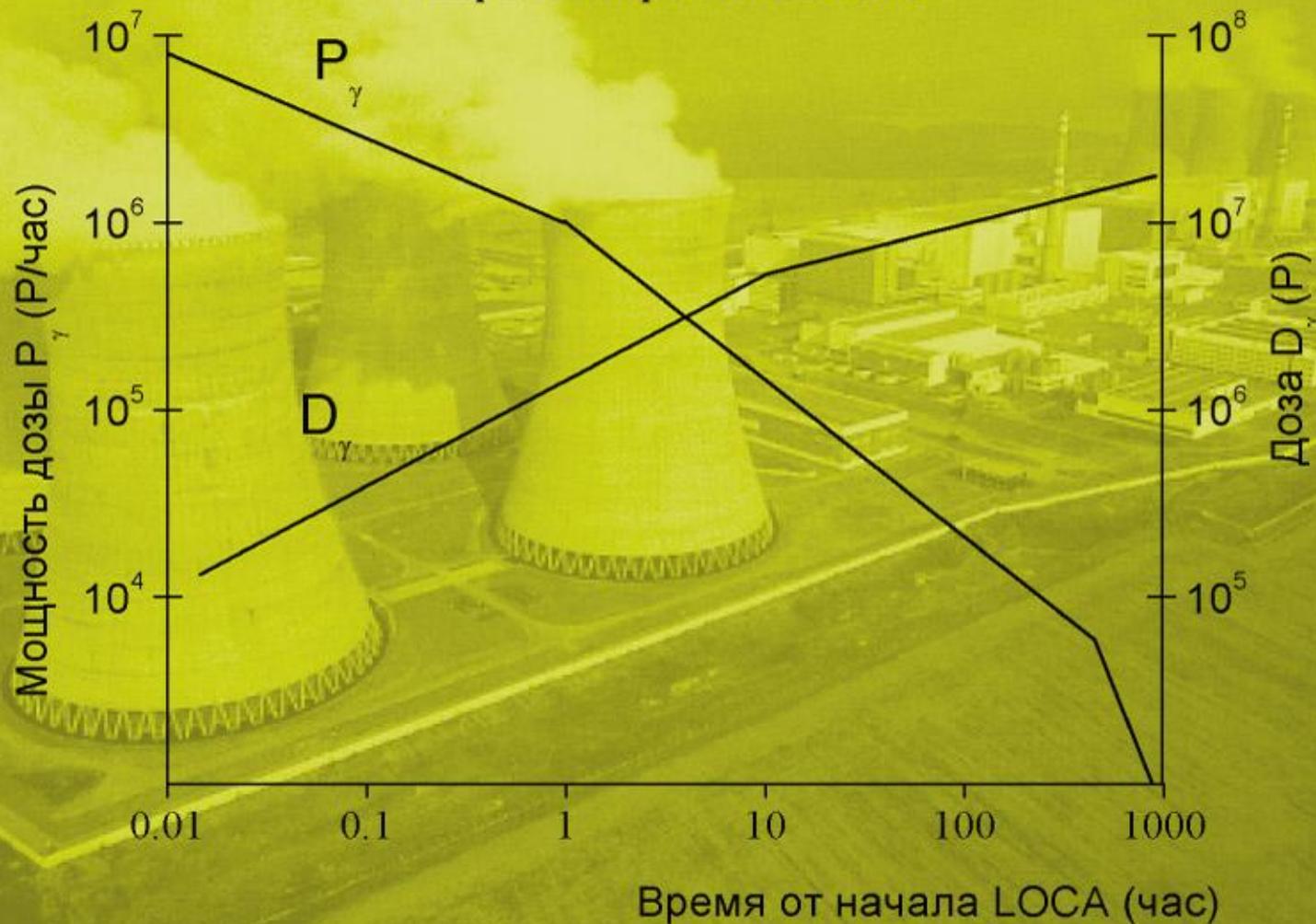
$$t = \frac{7,2 * 10^{-5} L}{\sqrt{E_n}}, \text{ с}$$

где L – расстояние между центром ЯВ и облучаемым объектом, км;

E_n – энергия нейтронов, МэВ.

Смешанное поле излучений ЯЭУ состоит из мгновенных нейтронов деления с энергией от 0,025 эВ до 1-2 МэВ, запаздывающих нейтронов со средней энергией 0,5 МэВ, мгновенных гамма-квантов с энергией 0,5-6,5 МэВ, гамма-квантов продуктов деления от 0,1 до 1-2 МэВ и захватных гамма-квантов с максимальной энергией до 10 МэВ

LOCA – loss-of-coolant accident
Авария с потерей теплоносителя



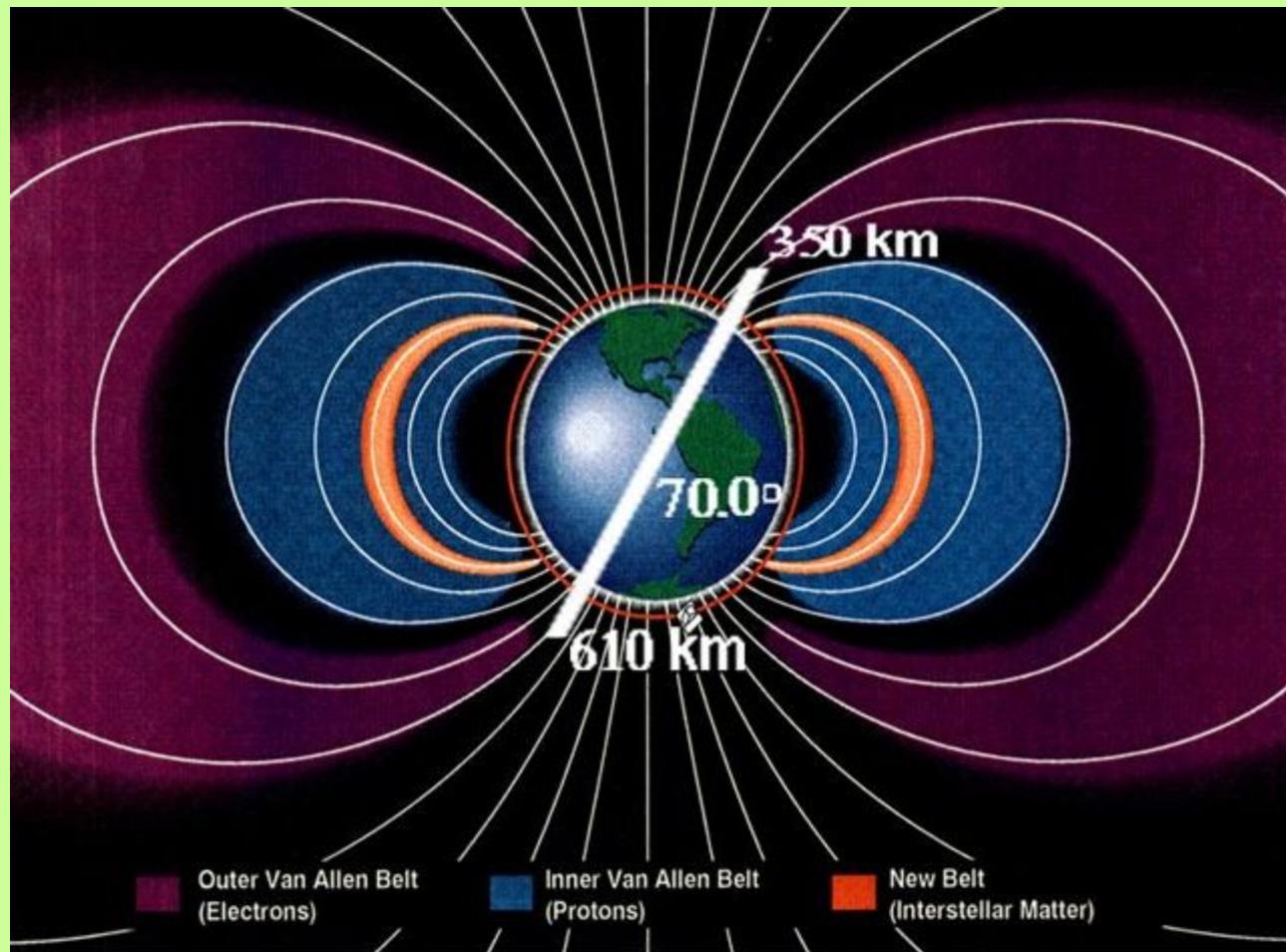
Излучения	Нормальная работа	Авария
Гамма*		
рад (Si)	$10^3 - 10^8$	$2 \cdot 10^4$
рад (Si)/час	$10^{-3} - 10^2$	10^6
Нейтроны**		
н/см ²	$10^9 - 10^{14}$	—
н/(см ² · с)	$10^0 - 10^5$	—
Электроны/протоны		
рад (Si)	—	$2 \cdot 10^8$
Температура		
°С	—	260
Влажность		
% RH при 20 °С	10-100	100

* Гамма-доза: 10^8 между первичной и вторичной защитой;
 10^6 за вторичной защитой.

** Энергия нейтронного излучения за вторичной защитой 100 кэВ.
 Количество повреждений от нейтронов 100 кэВ меньше в 10-20 раз
 чем от нейтронов 1 МэВ

ИИ КП:

- естественные радиационные пояса Земли (ЕРПЗ)
- искусственные радиационные пояса Земли (ИРПЗ),
- галактические космические лучи (ГКИ),
- солнечные космические лучи (СКИ).



Для обеспечения создания КА с длительным сроком активного существования на орбитах эксплуатации необходимо предъявлять при создании новой радиационно-стойкой элементной компонентной базы (ЭКБ) следующие требования:

- - по стойкости к дозе протонного и электронного излучения космического пространства - полная поглощенная доза не менее 100 крад;**
- - по стойкости к отказам при воздействии протонов и тяжелых заряженных частиц**
- - порог ЛПЭ отказа не менее 60 МэВ см²/мг;**
- - по стойкости к сбоям при воздействии протонов и тяжелых заряженных частиц – порог ЛПЭ сбой не менее 36 МэВ см²/мг.**

Таблица 1

Вид корпускулярного излучения	Состав	Энергия частиц, МэВ	Плотность потока, $m^{-2} c^{-1}$		Вклад в полную дозу	
			ГСО	ВЭО	ГСО	ВЭО
Радиационные пояса Земли	Протоны	1-30 > 30	$3 \cdot 10^8$ 0	$6 \cdot 10^9$ $7 \cdot 10^6$	~ 60%	~ 90%
	Электроны	0,1-1,0 > 1,0	$1 \cdot 10^{11}$ $1 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{11}$ $1 \cdot 10^9$		
Солнечные космические лучи	Протоны	$18 \cdot 10^4$ $1 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^6$ -	- $10^7 \cdot 10^8$	~40%	~10%
Галактические космические лучи	Протоны	$10^2 \cdot 10^{15}$ (для всех групп ядер)	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	Менее 1%	Менее 1%
	Ядра гелия		$3 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$		
	Более тяжелые ядра		$1,2 \cdot 10^1$	$1,2 \cdot 10^1$		

Основные факторы космического пространства, оказывающие радиационное воздействие на материалы и радиоэлектронную аппаратуру КА

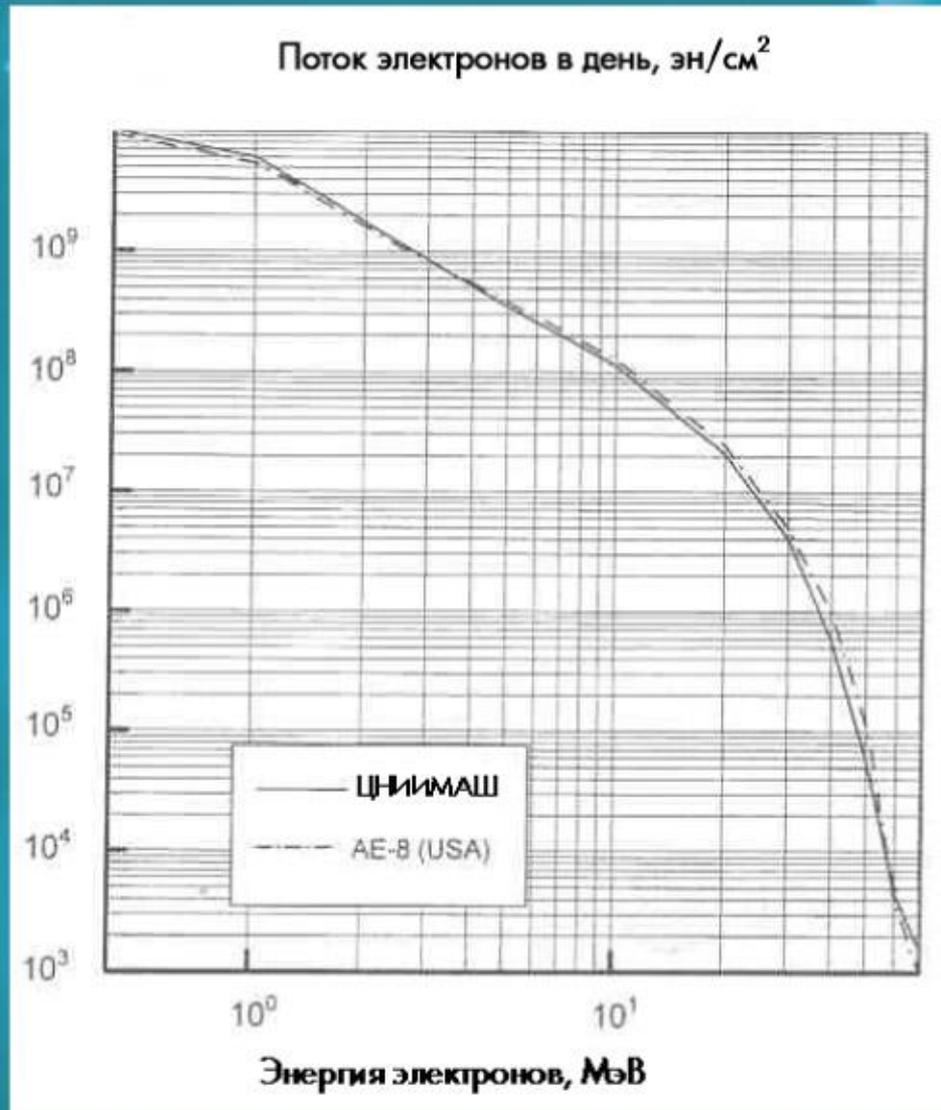
- - потоки электронов и протонов радиационных поясов Земли;
- - потоки протонов, солнечных космических лучей и галактических тяжелых заряженных частиц.

Эффекты радиационного воздействия

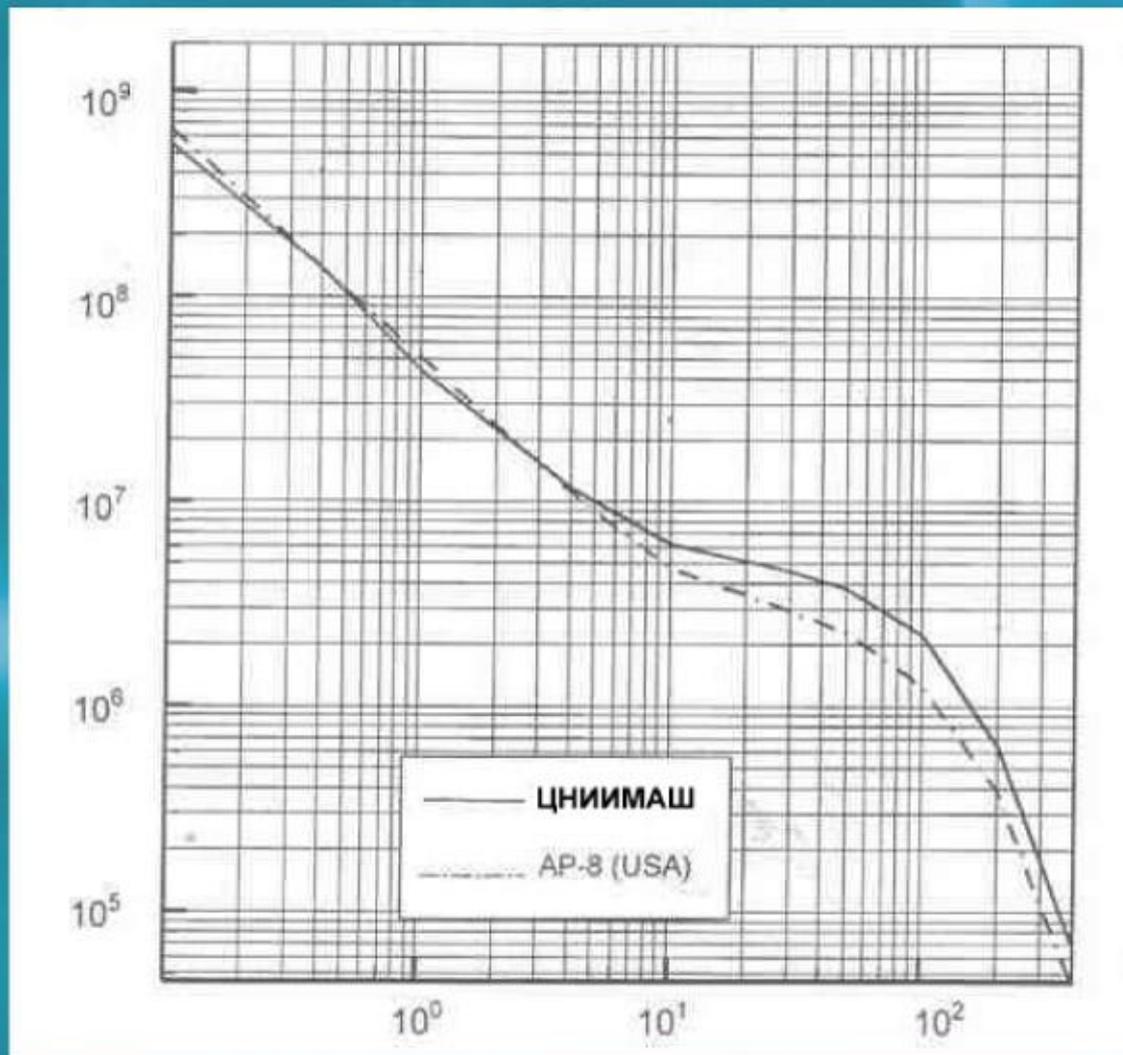
- - накопление ионизационных эффектов и структурных повреждений в материалах и ЭКБ;
- - сбои и отказы ЭКБ при воздействии протонов и ТЗЧ.

Требования стойкости, прочности и устойчивости аппаратуры систем КА определяются интегральными эффектами в материалах элементов под воздействием гамма-нейтронного излучения ЯЭУ.

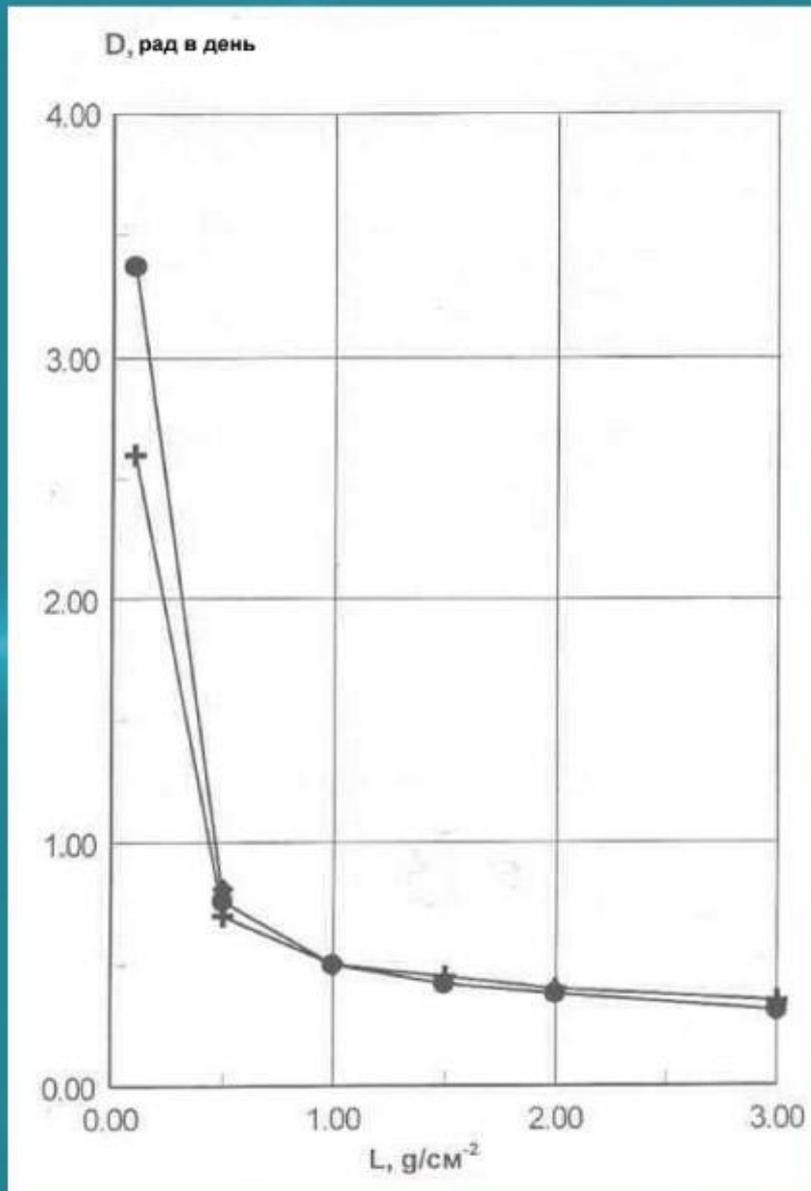
Кратковременные сбои и обратимые отказы могут наблюдаться в аппаратуре вследствие проявления ионизационных эффектов в полупроводниковых приборах под воздействием ИИ КП. При этом определяющими являются дифференциальные характеристики излучения – плотность энерговыделения в чувствительных объемах полупроводников.



Спектр электронов на круговой орбите ($H=500$ км, $j=600$)



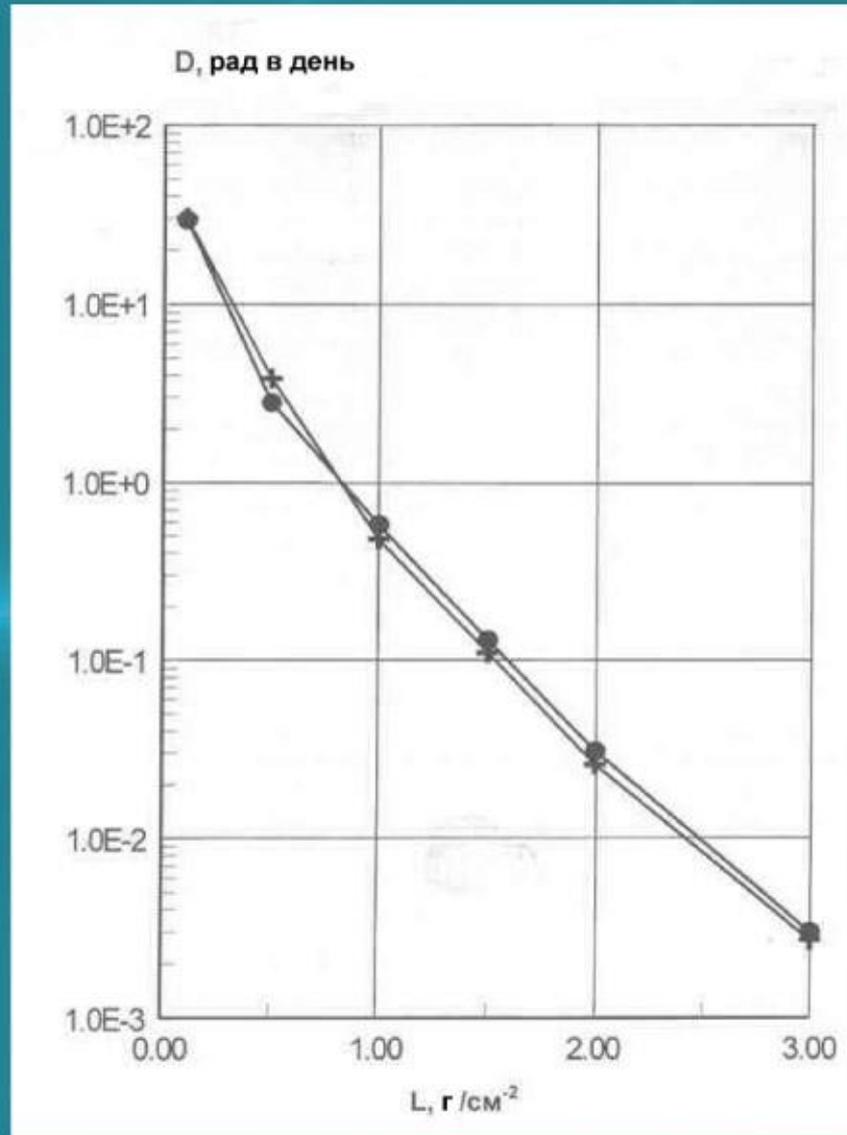
Спектр протонов на круговой орбите ($H=500$ км, $j=60^\circ$)



Проникающие характеристики электронов в случае сферической защиты различной толщины L на круговой орбите ($H=500$ км, $j=60^\circ$)

+ - ЦНИИМАШ

• - AE-8 (USA)



Проникающие характеристики протонов в случае сферической защиты различной толщины L на круговой орбите ($H=500$ км, $j=60^\circ$)

- + - ЦНИИМАШ
- - AE-8 (USA)

