



Здравствуйте!

Ионизирующие излучения, источники, нормирование, защита.



План лекции

1. Биологическое действие ионизирующей радиации. Характеристика основных видов излучения (альфа, бета, гамма, рентгеновского) (№104).
2. Источники ионизирующего излучения: естественные и искусственные (№105).
3. Нормы радиационной безопасности. Категории облучаемых лиц. Дозиметрический контроль (№106).
4. Радиационная безопасность и методы по ее обеспечению (№107).

Ионизирующие излучения - это любые излучения, которые создаются при радиоактивном распаде, ядерных превращениях, торможении ядерных частиц в веществе и способны прямо или косвенно вызывать ионизацию среды - образование заряженных атомов или молекул - ионов.



Ионизирующие излучения

корпускулярные

электромагнитные

альфа-,
бета-частицы,
нейтроны,
протоны (ядра
водорода),
дейтроны (ядра
тяжелого
водорода -
дейтерия)

?

Электромагнитный спектр включает в себя две основные зоны: ионизирующее и неионизирующее излучение, которые, в свою очередь, подразделяются на отдельные виды излучения (см. табл.).

Неионизирующие
излучения

Ионизирующие
излучения

Название ЭМП	Название ЭМИ		Диапазон частот	Диапазон длин волн
Статические	—		0	—
Радиочастотные	Крайне низкие	КНЧ	3...30 Гц	100...10 Мм
	Сверхнизкие	СНЧ	30...300 Гц	10...1 Мм
	Инфранизкие	ИНЧ	0,3...3 кГц	1000...100 км
	Очень низкие	ОНЧ	3...30 кГц	100...10 км
	Низкие	НЧ	30...300 кГц	10...1 км
	Средние	СЧ	0,3...3 МГц	1...0,1 км
	Высокие	ВЧ	3...30 МГц	100...10 м
	Очень высокие	ОВЧ	30...300 МГц	10...1 м
	Ультравысокие	УВЧ	0,3...3 ГГц	1...0,1 м
	Сверхвысокие	СВЧ	3...30 ГГц	10...1 см
	Крайне высокие	КВЧ	30...300 ГГц	10...1 мм
Оптические	Инфракрасные		3...3,75 × 10 ¹⁴ Гц	100...0,8 мкм
	Видимые		3,75 · 10 ¹⁴ ... 7,5 · 10 ¹⁴ Гц	0,8...0,4 мкм
	Ультрафиолетовые		7,5 · 10 ¹⁴ Гц... 3 · 10 ¹⁶ Гц	400...1 нм
Ионизирующие	Рентгеновское излучение		3 · 10 ¹⁶ ... 5 · 10 ¹⁸ Гц	1000...6 пм
	Гамма-излучение		> 5 · 10 ¹⁸ Гц	<...6 пм

Ионизирующие излучения

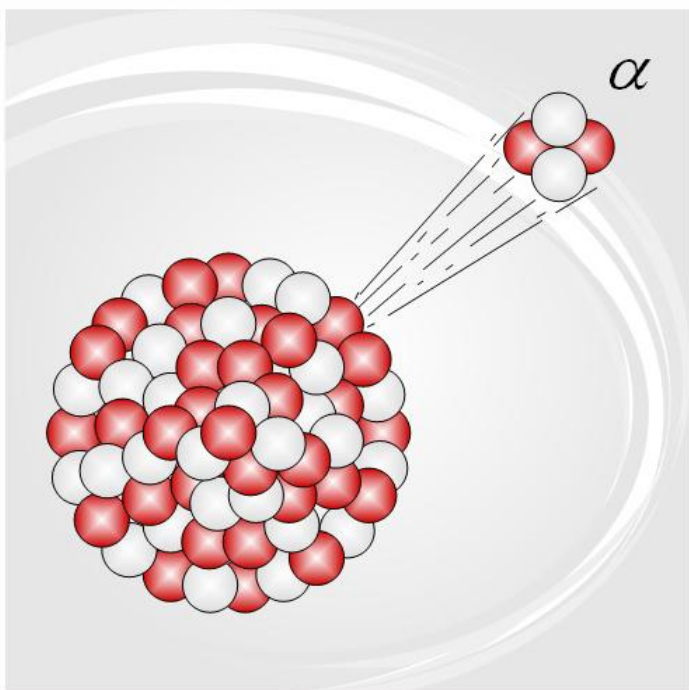
корпускулярные

альфа-,
бета-частицы,
нейтроны,
протоны (ядра
водорода),
дейтроны (ядра
тяжелого
водорода -
дейтерия)

электромагнитные

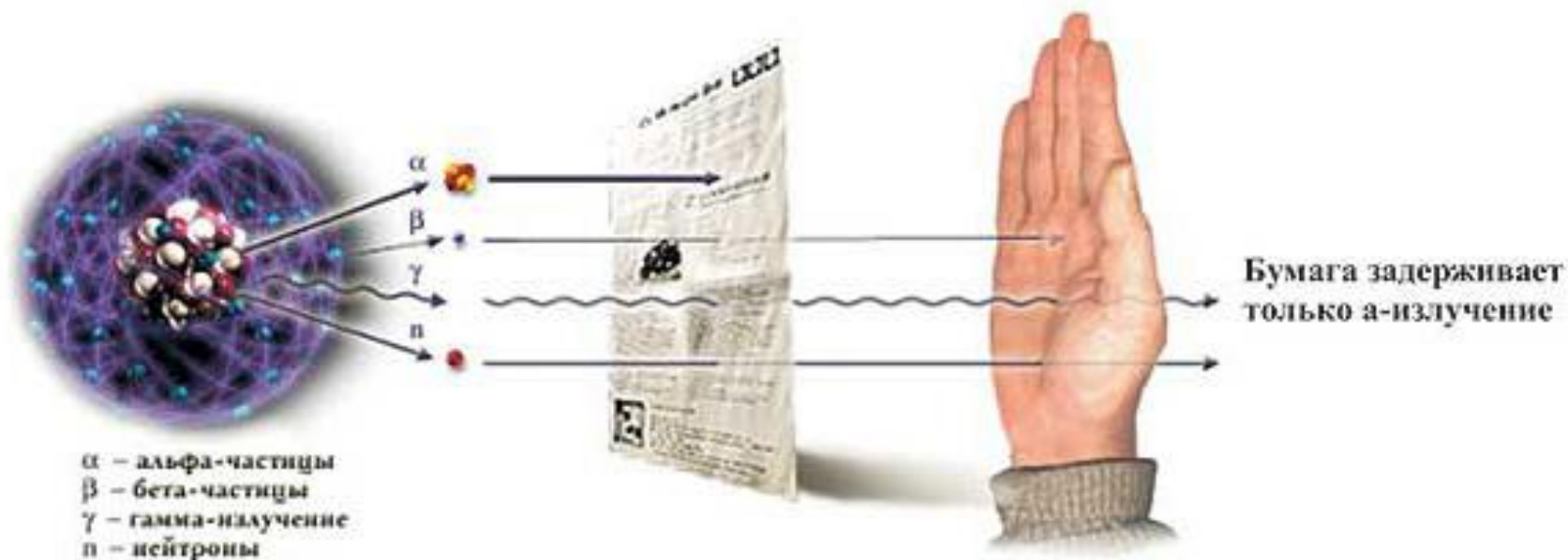
гамма –излучение,
рентгеновское
излучение

		Способность (малая, средняя, большая)		ИИ поглощается экранами из
		ионизирующая	проникающая	
<i>Альфа-излучение</i>				
<i>Бета-излучение</i>				
<i>Гамма-излучение</i>				



Альфа - частицы - представляет собой поток ядер гелия, состоящих из двух протонов и двух нейтронов, испускаемых веществом при радиоактивном распаде или при ядерных реакциях. Они обладают большой ионизирующей и малой проникающей способностью и двигаются со скоростью 20000 км/с.

Для защиты от альфа-излучения достаточно слой воздуха в несколько сантиметров, т.е. небольшое удаление от источника. Применяют также тонкую фольгу, лист бумаги, экраны из плексигласа и стекла, толщиной в несколько миллиметров.

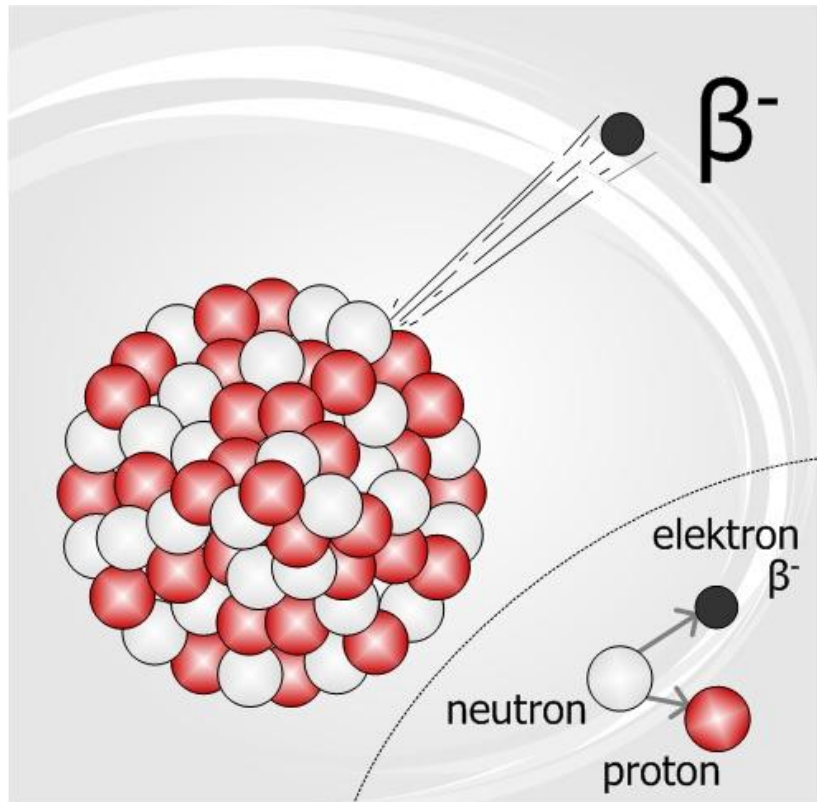


от альфа-излучения — лист бумаги, резиновые перчатки или 8-9 см воздуха



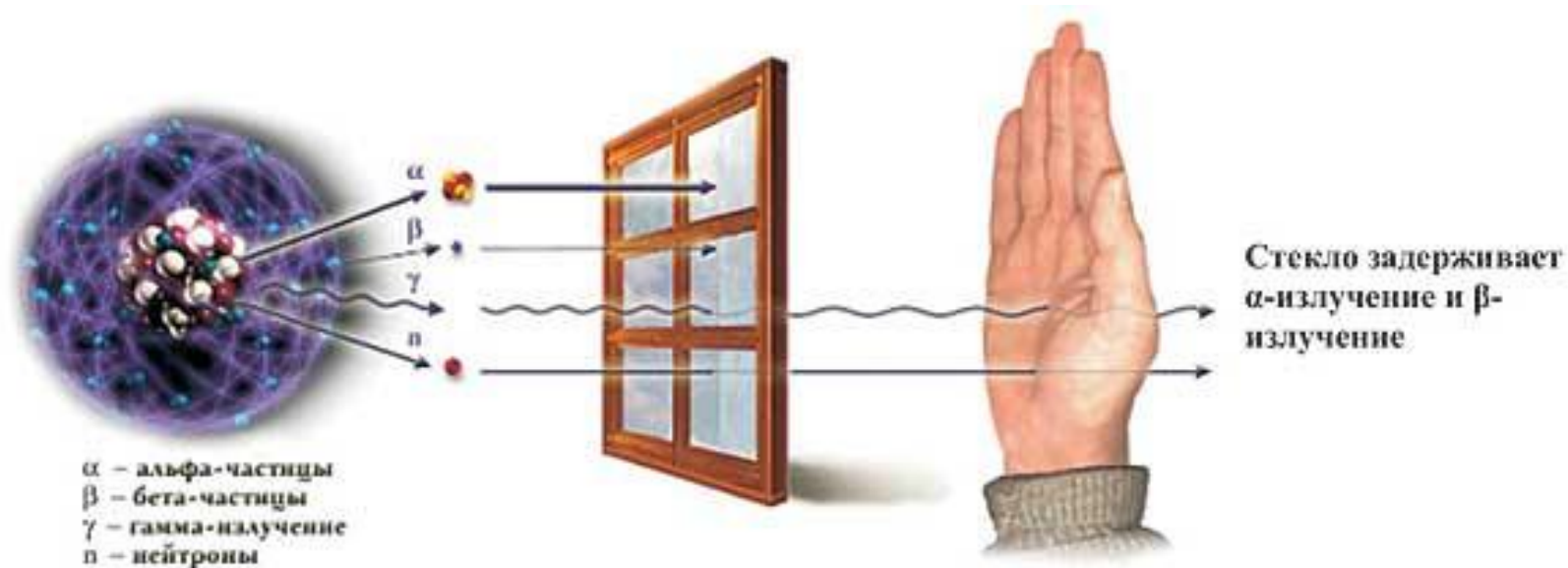
Плексиглас - оргстекло

		Способность (малая, средняя, большая)		ИИ поглощается экранами из
		ионизирующая	проникающая	
<i>Альфа-излучение</i>	поток ядер гелия, состоящих из двух протонов и двух нейтронов, испускаемых веществом при радиоактивном распаде или при ядерных реакциях.	большая	малая	бумага, фольга, стекло, плексигласс, толщиной несколько миллиметров
<i>Бета-излучение</i>				
<i>Гамма-излучение</i>				



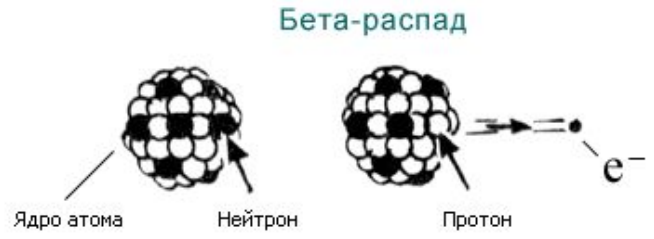
Бета - частицы - электроны или позитроны, вылетающие из ядра при радиоактивном распаде со скоростью, близкой к скорости света (250000...270000 км/с). Бета-частицы имеют проникающую способность в сотни раз большую, чем альфа-частицы, так как обладают значительно меньшей массой и при одинаковой с альфа-частицами энергии меньшим зарядом. Ионизирующая способность бета-частиц значительно меньше (примерно на два порядка), чем у альфа-частиц¹³

Для защиты от бета-излучения изготавливают из материалов с малой атомной массой (например, алюминия), которые дают наименьшее тормозное излучение.



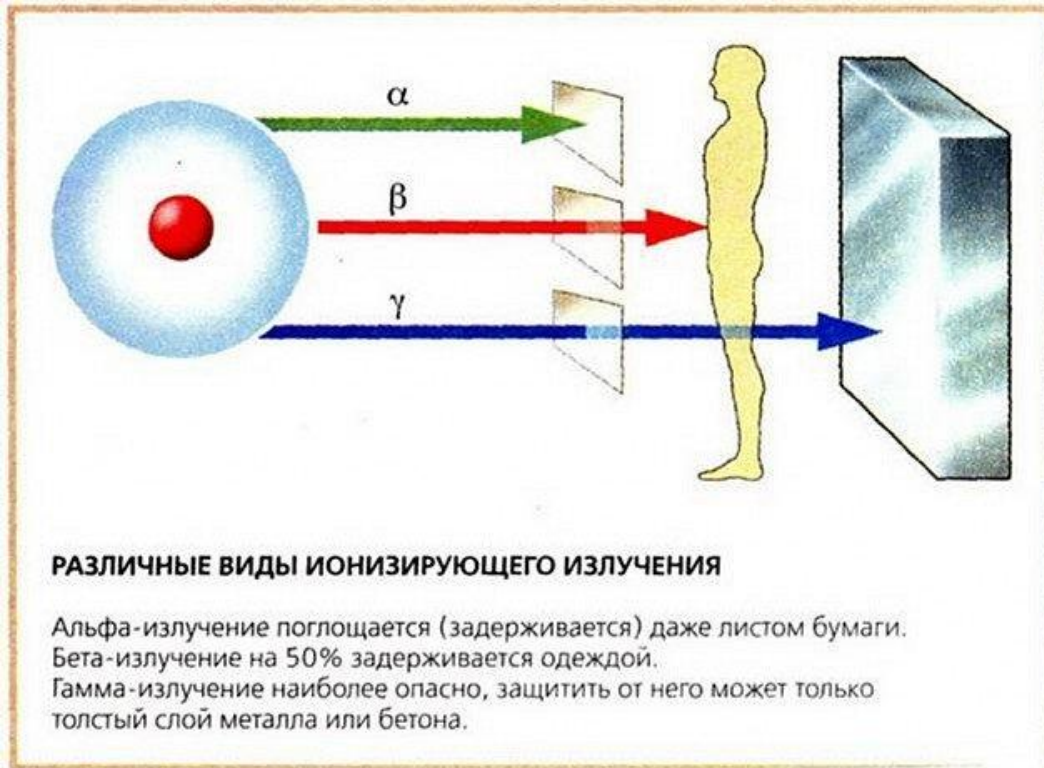
от бета-излучения — плексиглас, тонкий слой алюминия, стекло;

		Способность (малая, средняя, большая)		ИИ поглощается экранами из
		ионизирующая	проникающая	
<i>Альфа-излучение</i>	поток ядер гелия, состоящих из двух протонов и двух нейтронов, испускаемых веществом при радиоактивном распаде или при ядерных реакциях.	большая	малая	бумага, фольга, стекло, плексиглас, толщиной несколько миллиметров
<i>Бета-излучение</i>	электроны или позитроны, вылетающие из ядра при радиоактивном распаде со скоростью, близкой к скорости света	малая	большая	плексиглас, тонкий слой алюминия, стекло;
<i>Гамма-излучение</i>				



Гамма – излучение – это коротковолновое электромагнитное излучение (длина волны менее 10^{-10} м), испускаемое ядром во время перехода от высокоэнергетического состояния на более низкое, при этом количество протонов и нейтронов в ядре неизменно.

Гамма-излучение называют также фотонным излучением. Его скорость равна 300000 км/с.



Гамма-излучение обладает наибольшей проникающей способностью (например, проходит сквозь слой свинца толщиной 5 см) и относительно слабой ионизирующей способностью. Распространяется оно, как и рентгеновское излучение, в воздухе со скоростью света.

		Способность (малая, средняя, большая)		ИИ поглощается экранами из
		ионизирующая	проникающая	
<i>Альфа-излучение</i>	поток ядер гелия, состоящих из двух протонов и двух нейтронов, испускаемых веществом при радиоактивном распаде или при ядерных реакциях.	большая	малая	бумага, фольга, стекло, плексиглас, толщиной несколько миллиметров
<i>Бета-излучение</i>	электроны или позитроны, вылетающие из ядра при радиоактивном распаде со скоростью, близкой к скорости света	малая	большая	плексиглас, тонкий слой алюминия, стекло;
<i>Гамма-излучение</i>	это коротковолновое ЭМИ, испускаемое ядром во время перехода от высокоэнергетического состояния на более низкое, при этом количество протонов и нейтронов в ядре неизменно.	слабая	наибольшая	свинец, сталь, бетон, чугун (толстый слой)

Рентгеновское излучение – электромагнитное излучение, занимающее область спектра между гамма- и УФ – излучением.

Неионизирующие излучения

Ионизирующие излучения


Название ЭМП	Название ЭМИ		Диапазон частот	Диапазон длин волн
Статические	—		0	—
Радиочастотные	Крайне низкие	КНЧ	3...30 Гц	100...10 Мм
	Сверхнизкие	СНЧ	30...300 Гц	10...1 Мм
	Инфранизкие	ИНЧ	0,3...3 кГц	1000...100 км
	Очень низкие	ОНЧ	3...30 кГц	100...10 км
	Низкие	НЧ	30...300 кГц	10...1 км
	Средние	СЧ	0,3...3 МГц	1...0,1 км
	Высокие	ВЧ	3...30 МГц	100...10 м
	Очень высокие	ОВЧ	30...300 МГц	10...1 м
	Ультравысокие	УВЧ	0,3...3 ГГц	1...0,1 м
	Сверхвысокие	СВЧ	3...30 ГГц	10...1 см
	Крайне высокие	КВЧ	30...300 ГГц	10...1 мм
Оптические	Инфракрасные		3...3,75 × 10 ¹⁴ Гц	100...0,8 мкм
	Видимые		3,75 · 10 ¹⁴ ... 7,5 · 10 ¹⁴ Гц	0,8...0,4 мкм
	Ультрафиолетовые		7,5 · 10 ¹⁴ Гц... 3 · 10 ¹⁶ Гц	400...1 нм
Ионизирующие	Рентгеновское излучение		3 · 10 ¹⁶ ... 5 · 10 ¹⁸ Гц	1000...6 пм
	Гамма-излучение		> 5 · 10 ¹⁸ Гц	<...6 пм

В отличие от гамма – лучей, происходящих от атомов ядер, рентгеновские лучи возникают из взаимодействия электронов.



Гамма- и рентгеновское излучение, представляющие собой поток фотонов, относятся к классу косвенно ионизирующего излучения.

Фотон, не обладает зарядом, поэтому непосредственно ионизации не производит. В процессе прохождения через вещество он взаимодействует в основном с электронными атомами, передавая им энергию. Образованные, вторичные электроны в последующих процессах взаимодействия производят ионизацию.



Источник ионизирующего излучения - объект, содержащий радиоактивный материал (радионуклид), или техническое устройство, испускающее или способное в определенных условиях испускать ионизирующее излучение.

Согласно НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010 в табл. приведена классификация источников ионизирующего

тип	класс	определение
Искусственный	Изъятый	Источник, создающий при любых условиях обращения с ним тривиальные ущербы (дозы)
	Техногенный	Источник ионизирующего излучения специально созданный для его полезного применения или являющийся побочным продуктом этой деятельности, на который распространяется действие Норм и Правил
Природный (естественный)	Природный (нетехногенный)	Источник ионизирующего излучения природного происхождения, на который распространяется действие Норм и Правил
	Изъятый	Источник, создающий при любых условиях обращение с ним тривиальные ущербы (дозы)
	Исключенный	Источник, облучением которого невозможно управлять

тип	класс	определение	<i>Примеры ИИИ</i>
Искусственный	Изъятый		
	Техногенный		
Природный (естественный)	Природный (нетехногенный)		
	Изъятый		
	Исключенный		

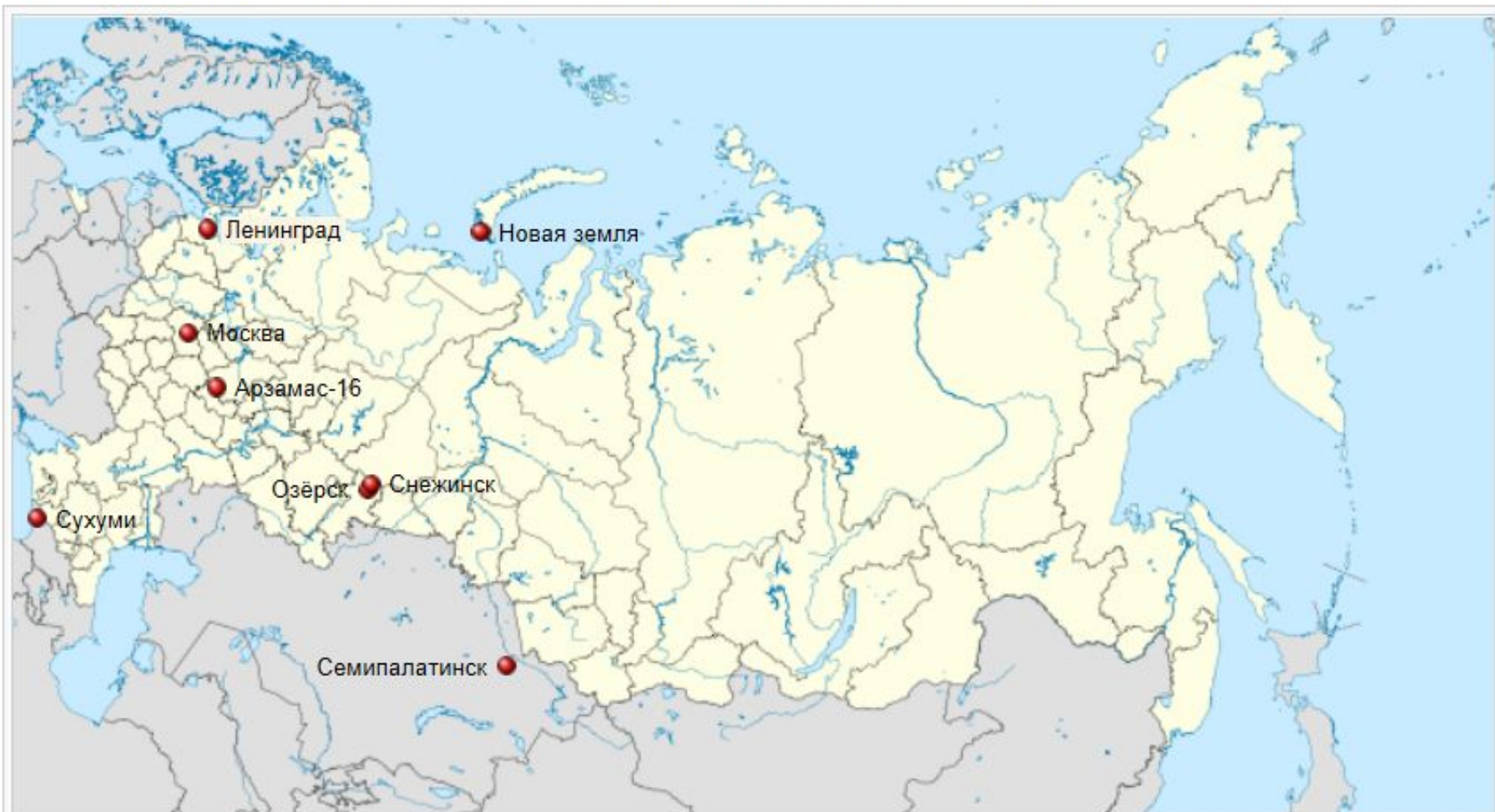
Согласно НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010 в табл. приведена классификация источников ионизирующего

тип	класс	определение
Искусственный	Изъятый	Источник, создающий при любых условиях обращения с ним тривиальные ущербы (дозы)
	Техногенный	Источник ионизирующего излучения специально созданный для его полезного применения или являющийся побочным продуктом этой деятельности, на который распространяется действие Норм и Правил
Природный (естественный)	Природный (нетехногенный)	Источник ионизирующего излучения природного происхождения, на который распространяется действие Норм и Правил
	Изъятый	Источник, создающий при любых условиях обращение с ним тривиальные ущербы (дозы)
	Исключенный	Источник, облучением которого невозможно управлять

Глобальным техногенным источником радиации, являются радионуклиды (в основном цезий-137, стронций-90), выпадающие на поверхность Земли из стратосферы, где они накопились в результате **испытаний атомного оружия**, их вклад в настоящее время составляет 1... 2% от естественного фона.

В период интенсивных испытаний атомного оружия в воздухе эквивалентная доза, обусловленная глобальными выпадениями достигала 0,6... 0,7 мЗв/год. Снижению роли этого фактора способствовало запрещение в 1963 г. испытаний атомного оружия в трех средах (атмосфере, под водой и в космосе).

10^{-3} Зв - миллизиверт мЗв



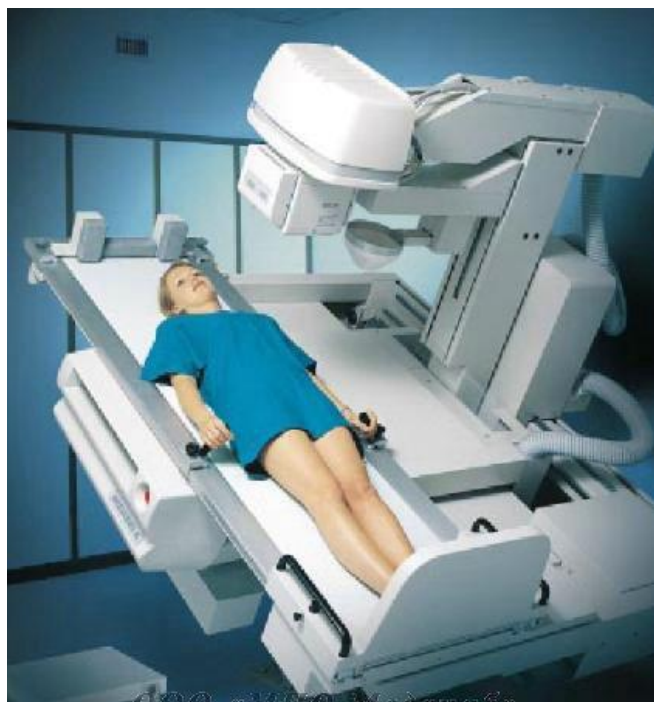
Атомные объекты СССР 1950-х годов на карте России

тип	класс	определение	Примеры ИИИИ
Искусственный	Изъятый		радионуклиды, выпадающие на поверхность Земли из стратосферы, где они накопились в результате испытаний атомного оружия
	Техногенный		
Природный (естественный)	Природный (нетехногенный)		
	Изъятый		
	Исключенный		

После Чернобыльской катастрофы особое внимание уделяется такому техногенному источнику, как **атомные электростанции**. Однако опыт эксплуатации АЭС показывает, что при нормальной работе атомных реакторов радиоактивные выбросы настолько малы, что даже вблизи АЭС практически невозможно обнаружить повышенные, по сравнению с естественным фоном, уровни радиации.



Искусственные (техногенные) источники излучения — это источники ионизирующего излучения, созданные самим человеком (рентгеновские аппараты, ускорители, ядерные реакторы, термоядерные установки, искусственно-радиоактивные радионуклиды). По мере расширения масштабов использования атомной энергии число таких источников и их мощность растут.



тип	класс	определение	Примеры ИИИИ
Искусственный	Изъятый		радионуклиды, выпадающие на поверхность Земли из стратосферы, где они накопились в результате испытаний атомного оружия
	Техногенный		АЭС, рентгеновские аппараты, ускорители, ядерные реакторы, термоядерные установки, искусственно-радиоактивные радионуклиды
Природный (естественный)	Природный (нетехногенный)		
	Изъятый		
	Исключенный		

К природным (не техногенным) источникам ионизирующего излучения относятся космическое излучение и естественно-радиоактивные нуклиды (ЕРН), содержащиеся в земной коре и объектах окружающей среды.



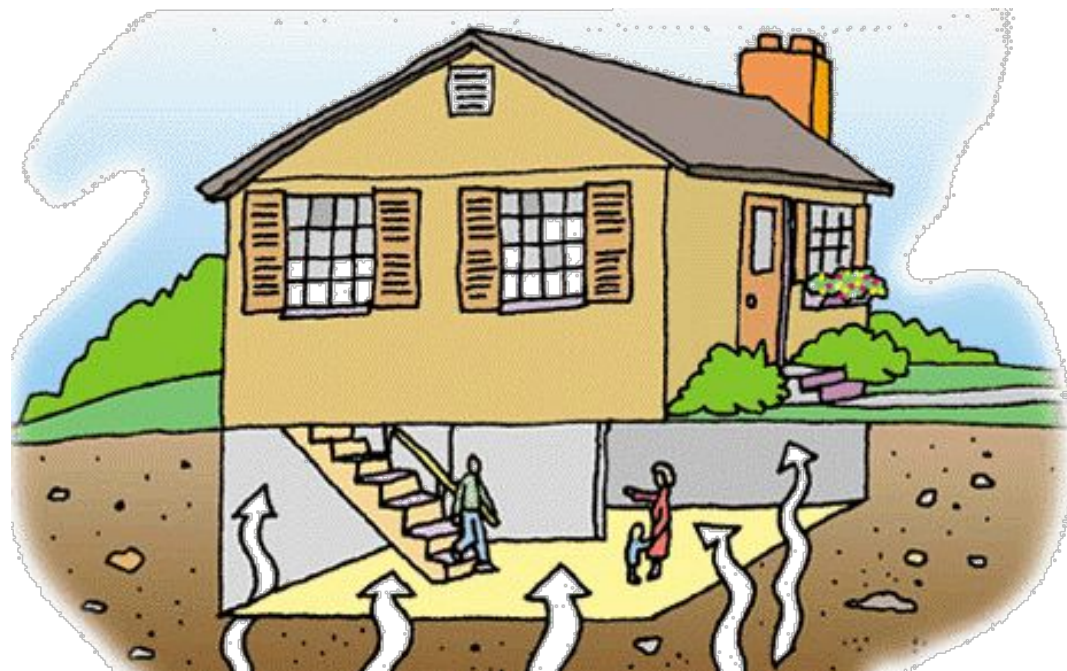
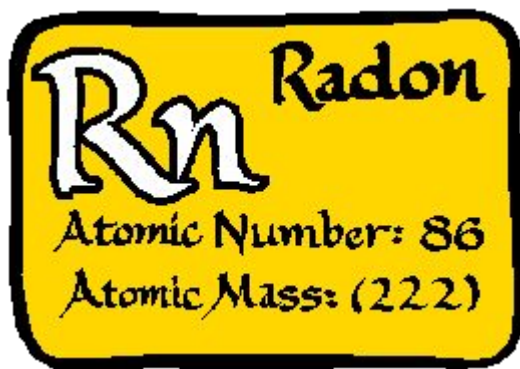
Вид излучения	Нуклид	Период полураспада
α	Уран-238	4,47 млрд. лет
β	Торий-234	24,1 суток
β	Протактиний-234	1,17 минут
α	Уран-234	245 000 лет
α	Торий-230	8 000 лет
α	Радий-226	1 600 лет
α	Радон-222	3,823 суток
α	Полоний-218	3,05 минут
β	Свинец-214	26,8 минут
β	Висмут-214	19,7 минут
α	Полоний-214	0,000 164 секунды
β	Свинец-210	22,3 лет
β	Висмут-210	5,01 суток
α	Полоний-210	138,4 суток
	Свинец-206	Стабильный

До настоящего времени сохранились в заметных количествах радионуклиды, обладающие большими периодами полураспада, в первую очередь, такие как калий-40 ($T_{1/2} = 1,3$ млрд лет), уран-238 ($T_{1/2} = 4,5$ млрд.лет), уран-235 ($T_{1/2} = 0,7$ млрд. лет) и торий-232 ($T_{1/2} = 14$ млрд лет).

тип	класс	определение	Примеры ИИИИ
Искусственный	Изъятый		радионуклиды, выпадающие на поверхность Земли из стратосферы, где они накопились в результате испытаний атомного оружия
	Техногенный		АЭС, рентгеновские аппараты, ускорители, ядерные реакторы, термоядерные установки, искусственно-радиоактивные радионуклиды
Природный (естественный)	Природный (нетехногенный)		
	Изъятый		
	Исключенный		

тип	класс	определение	Примеры ИИИИ
Искусственный	Изъятый		радионуклиды, выпадающие на поверхность Земли из стратосферы, где они накопились в результате испытаний атомного оружия
	Техногенный		АЭС, рентгеновские аппараты, ускорители, ядерные реакторы, термоядерные установки, искусственно-радиоактивные радионуклиды
Природный (естественный)	Природный (нетехногенный)		ЕРН в сырье для отделочных и строительных материалов
	Изъятый		Космическое излучение, ЕРН, содержащиеся в Земной коре
	Исключенный		

Дополнительное облучение человека наблюдается также вследствие его пребывания в помещении. Основным радиоактивным элементом, накапливающимся в помещении, является **радон**, поступающий из почвы, из используемой воды и природного газа. Эффективная доза, обусловленная накоплением радона в помещениях, составляет 1,6 мЗв в год.

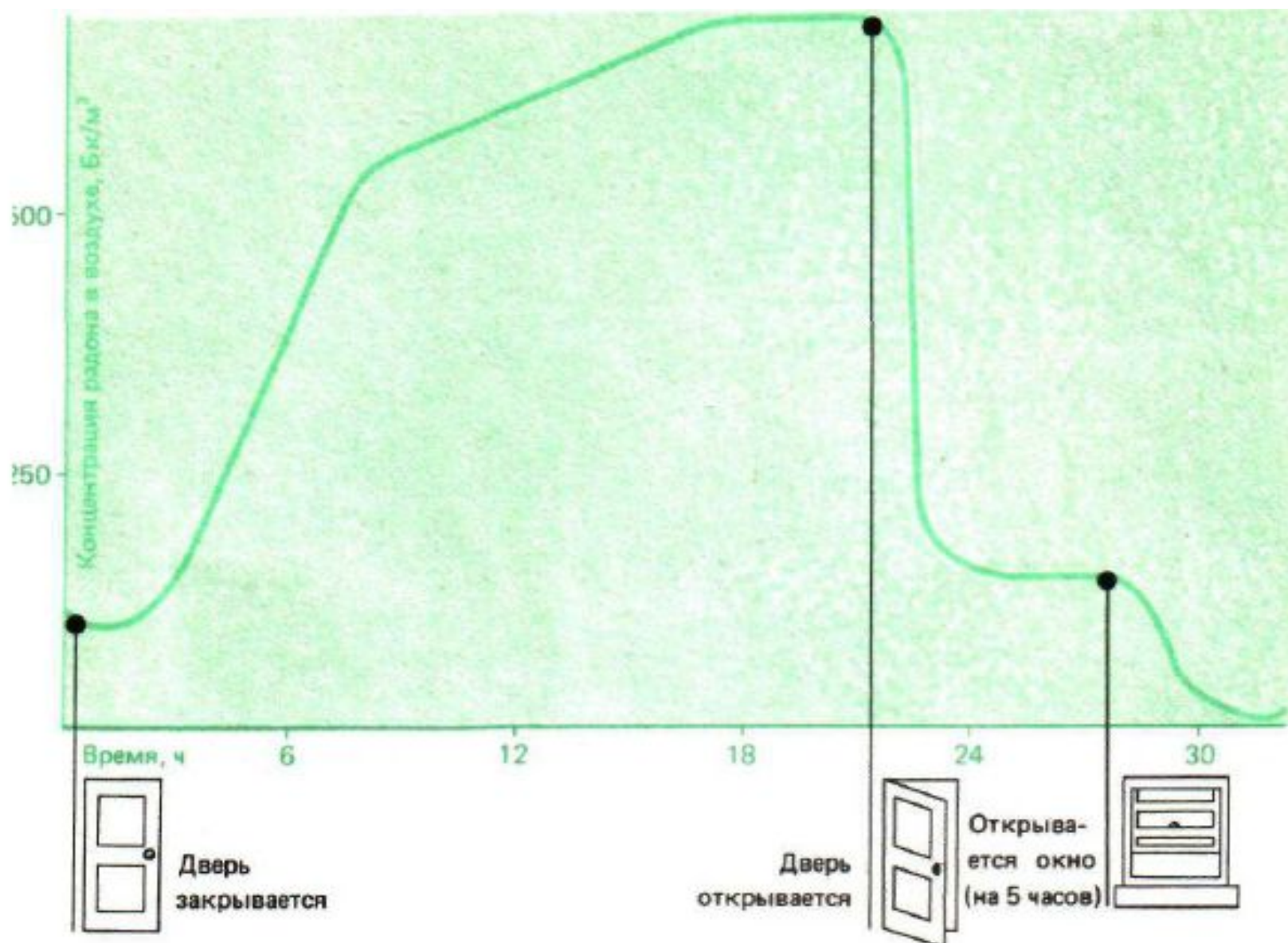


Радон в разных помещениях

Средняя
концентрация
радона
кБк/м³



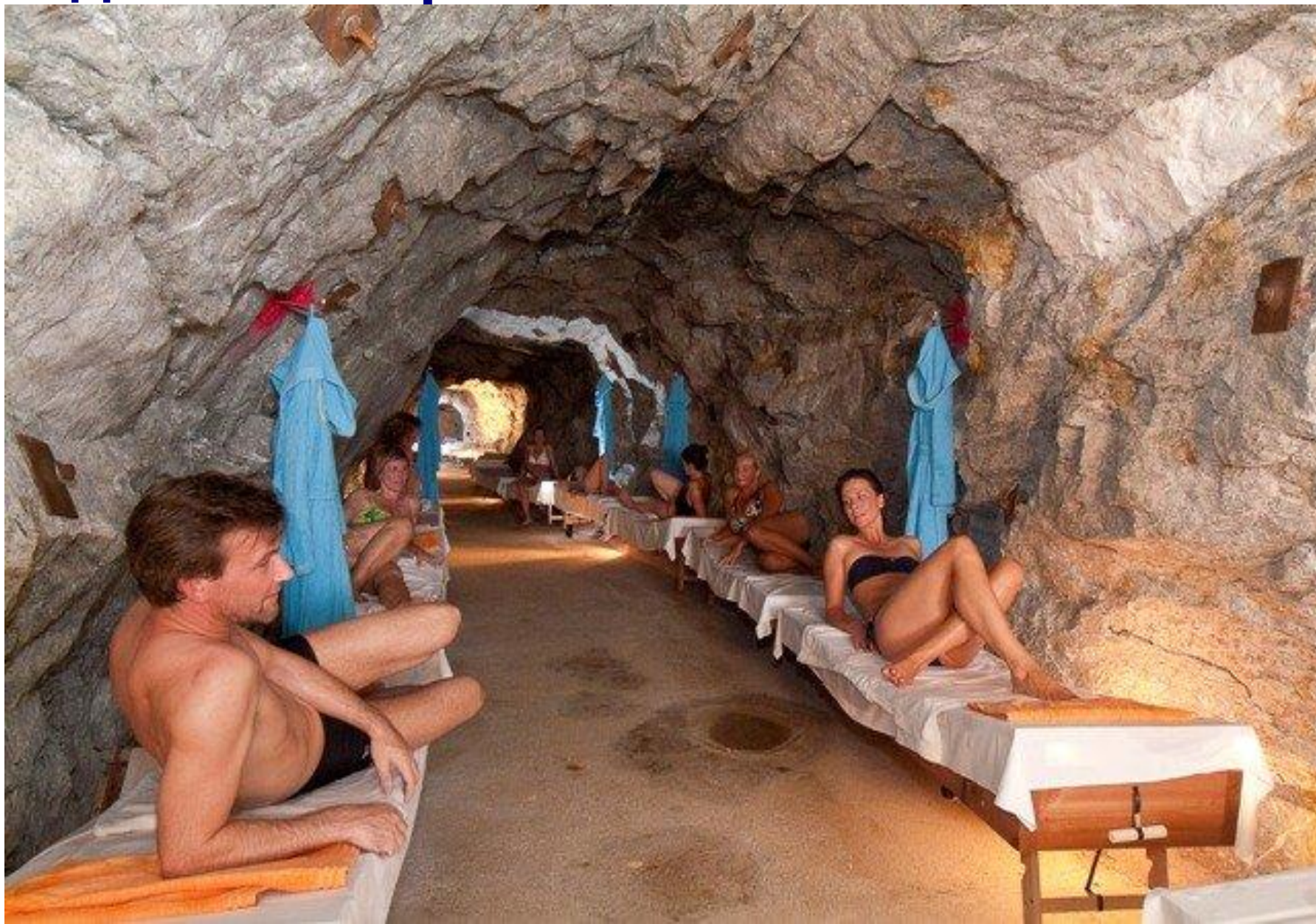
Радон активно поступает в наши дома с бытовым газом, водопроводной водой (особенно, если её добывают из очень глубоких скважин), или же просто просачивается через микротрещины почвы, накапливаясь в подвалах и на нижних этажах. Снизить содержание радона, в отличие от других источников радиации, очень просто: достаточно **регулярно проветривать помещение** и концентрация опасного газа уменьшится в несколько раз.



Влияние проветривания на содержание радона в воздухе жилой комнаты одноквартирного дома.

Радоновая терапия

при лечении хронических заболеваний опорно-двигательного аппарата, дыхательных путей и кожи.







Лечение проходят, вдыхая радон ингаляционно в достаточно высоких концентрациях, или используя радоновые ванны. Несмотря на то, что подобная терапия является достаточно рискованной (**радон сам по себе может вызывать рак легкого**), во многих европейских странах радоновая терапия частично покрывается медицинской страховкой

тип	класс	определение	Примеры ИИИИ
Искусственный	Изъятый		радионуклиды, выпадающие на поверхность Земли из стратосферы, где они накопились в результате испытаний атомного оружия
	Техногенный		АЭС, рентгеновские аппараты, ускорители, ядерные реакторы, термоядерные установки, искусственно-радиоактивные радионуклиды
Природный (естественный)	Природный (нетехногенный)		РАДОН ЕРН в сырье для отделочных и строительных материалов
	Изъятый		Космическое излучение, ЕРН, содержащиеся в Земной коре
	Исключенный		

Природный (естественный)	Природный (нетехногенный)	Источник ионизирующего излучения природного происхождения, на который распространяется действие Норм и Правил
	Изъятый	Источник, создающий при любых условиях обращения с ним тривиальные ущербы (дозы)
	Исключенный	Источник, облучением которого невозможно управлять

На внутреннее облучение человека, создаваемое природным калием, на которые практически невозможно влиять.

Природный калий состоит из трёх изотопов. Два из них стабильны: ^{39}K (изотопная распространённость 93,258 %) и ^{41}K (6,730 %). Третий изотоп ^{40}K (0,0117 %) является бета-активным с периодом полураспада $1,251 \cdot 10^9$ лет. В каждом грамме природного калия в секунду распадается в среднем 32 ядра ^{40}K , благодаря чему, например, в организме человека массой 70 кг ежесекундно происходит около 4000 радиоактивных распадов.

Измерение ионизирующего излучения

Единицы радиоактивности. В качестве единицы активности принято одно ядерное превращение в секунду.

В целях сокращения используется более простой термин – «один распад в секунду» (расп/с). В системе СИ эта единица получила название «беккерель» (Бк).

В практике радиационного контроля широко используется внесистемная единица активности – «кюри» (Ки). Один кюри – это $3,7 \times 10^{10}$ распадов в секунду или Бк.





Счетчик Гейгера

Доза излучения (поглощенная доза) – энергия радиоактивного излучения, поглощенная в единице облучаемого вещества или человеком.

С увеличением времени облучения доза растет.

Поглощенная доза нарушает физиологические процессы в организме и приводит в ряде случаев к лучевой болезни различной степени тяжести.

В качестве единицы поглощенной дозы излучения в системе СИ предусмотрена специальная единица – **грей (Гр)**.

1 грей – это такая единица поглощенной дозы, при которой 1 кг. облучаемого вещества поглощает энергию в 1 джоуль (Дж). Следовательно **1 Гр = 1 Дж/кг**.

В системе СИ эквивалентная доза измеряется в зивертах (Зв). **Зиверт равен одному грею, деленному на коэффициент качества.**

Коэффициент качества излучения, который для различных видов ионизирующих излучений с неизвестным спектральным составом принят для рентгеновского и гамма-излучения - 1, для бета-излучения - 1, для нейтронов с энергией от 0,1 до 10 МэВ -10, для альфа-излучений с энергией менее 10 МэВ -20.

10^6 эВ мегаэлектронвольт **МэВ**

Бэр (биологический эквивалент рентгена) – это внесистемная единица эквивалентной дозы, такая поглощенная доза любого излучения, которая вызывает тот же биологический эффект, что и 1 рентген.

Воздействие ионизирующего излучения на организм человека

Различают два вида эффекта воздействия на организм ионизирующих излучений: *соматический* и *генетический*.

При *соматическом* эффекте последствия проявляются непосредственно у облучаемого, при *генетическом* - у его потомства.

Соматические эффекты могут быть *ранними* или *отдалёнными*.

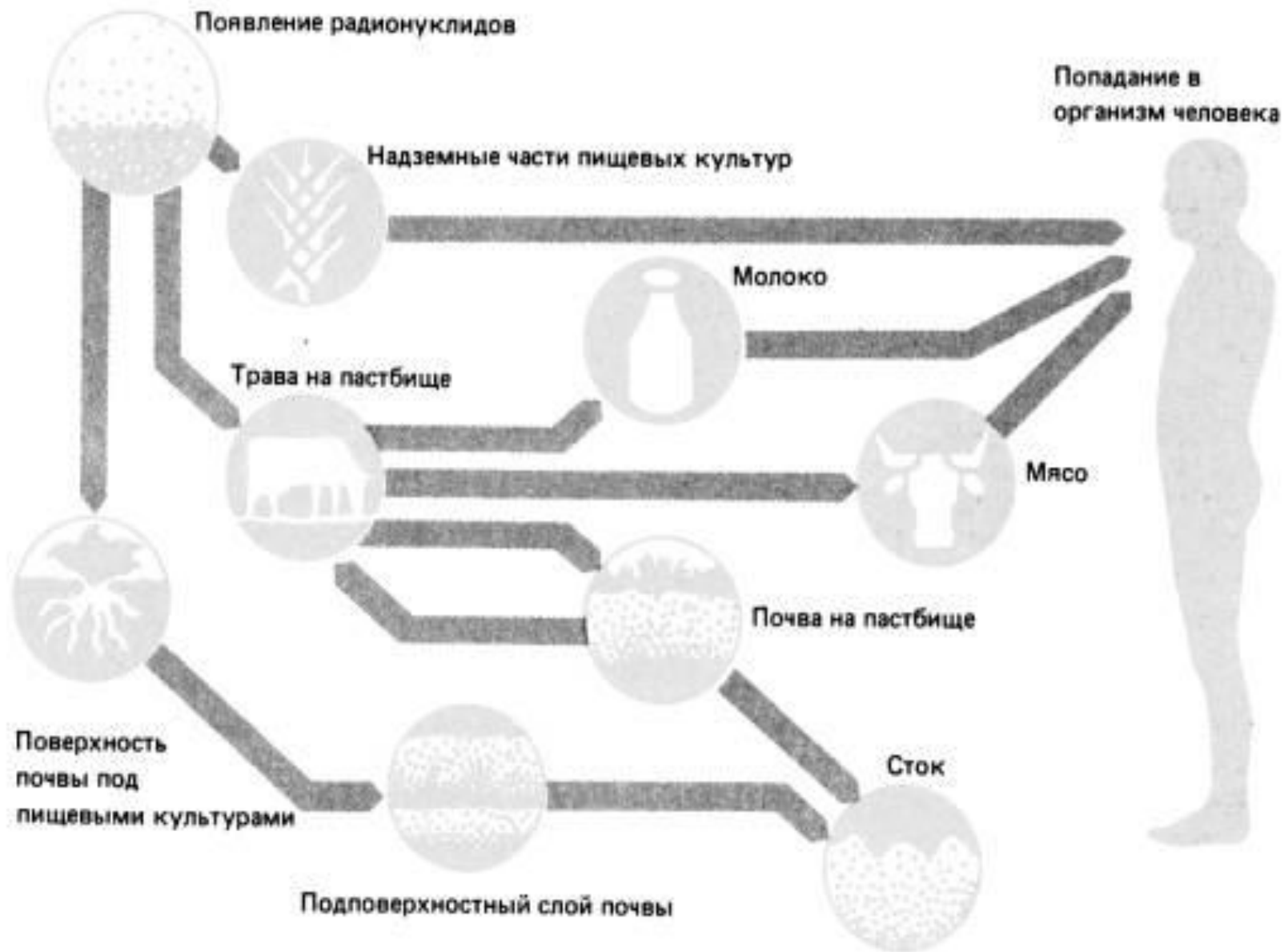
Ранние возникают в период от нескольких минут до 30-60 суток после облучения.

К ним относят покраснение и шелушение кожи, помутнение хрусталика глаза, поражение кроветворной системы, лучевая болезнь, летальный исход.

Отдалённые соматические эффекты проявляются **через несколько месяцев или лет после облучения** в виде стойких изменений кожи, злокачественных новообразований, снижения иммунитета, сокращения продолжительности жизни.

Ионизирующее излучение может оказывать влияние на организм как при **внешнем** (особенно рентгеновское и гамма-излучение), так и при **внутреннем** (особенно альфа-частицы) облучении.

Внутреннее облучение происходит при попадании внутрь организма через лёгкие, кожу и органы пищеварения источников ионизирующего излучения. **Внутреннее облучение более опасно, чем внешнее, так как попавшие внутрь ИИ подвергают непрерывному облучению ничем не защищённые внутренние органы.**



Под действием ионизирующего излучения вода, являющаяся составной частью организма человека (70%), расщепляется и образуются ионы с разными зарядами. Полученные свободные радикалы и окислители взаимодействуют с молекулами органического вещества ткани, окисляя и разрушая её. Нарушается обмен веществ. Происходят изменения в составе крови. Поражение органов кроветворения разрушает иммунную систему человека и приводит к инфекционным осложнениям.

Местные поражения характеризуются лучевыми ожогами кожи и слизистых оболочек. При сильных ожогах образуются отёки, пузыри, возможно отмирание тканей (некрозы).





Острая лучевая болезнь (ОЛБ) — наступившая вследствие однократного облучения.

Доза облучения, (Гр)	Степень лучевой болезни	Начало проявления первичной реакции	Характер первичной реакции	Последствия облучения
До 0,250 -1,0	Видимых нарушений нет. Возможны изменения в крови. Изменения в крови, трудоспособность нарушена			
1 - 2	Лёгкая (1)	Через 2-3 ч	Несильная тошнота с рвотой. Проходит в день облучения	Как правило, 100%-ное выздоровление даже при отсутствии лечения
2 - 4	Средняя (2)	Через 1-2 ч Длится 1 сутки	Рвота, слабость, недомогание	Выздоровление у 100% пострадавших при условии лечения
4 - 6	Тяжёлая (3)	Через 20-40 мин.	Множественная рвота, сильное недомогание, температура -до 38	Выздоровление у 50-80% пострадавших при условии спец. лечения
Более 6	Крайне тяжёлая (4)	Через 20-30 мин.	Эритема кожи и слизистых, жидкий стул, температура - выше 38	Выздоровление у 30-50% пострадавших при условии спец. лечения
6-10	Переходная форма (исход непредсказуем)			
Более 10	Встречается крайне редко (100%-ный смертельный исход)			

Клинические формы острой лучевой болезни в зависимости от поглощённой дозы (по А.К.Гуськовой)

Кишечная	10-20	IV (крайне тяжелая)	Абсолютно неблагоприятный
Токсемическая	20-80	IV (крайне тяжелая)	Абсолютно неблагоприятный
Церебральная	80 и более	IV (крайне тяжелая)	Абсолютно неблагоприятный

Кишечная форма - основные клинические проявления (тошнота, рвота, кровавый понос, метеоризм, паралитическая непроходимость кишечника) обуславливаются поражением ЖКТ. При этом отмечаются лейкопения, лимфопения, сепсис, поражение стенки кишечника, ее прободение (несовместимо с жизнью).


Токсемическая форма ОЛБ (20-80 Гр.)

Проявляется гемодинамическими нарушениями (г. о. в кишечнике, печени), парезом сосудов, тахикардией, кровоизлияниями, тяжелой аутоинтоксикацией и менингеальными симптомами (отек мозга), а также олигурией и гиперазотемией, развивающихся всл поражения почек. Наступает интоксикация организма продуктами распада клеток. Смерть на 4-7-е сутки (летальность 100 %).

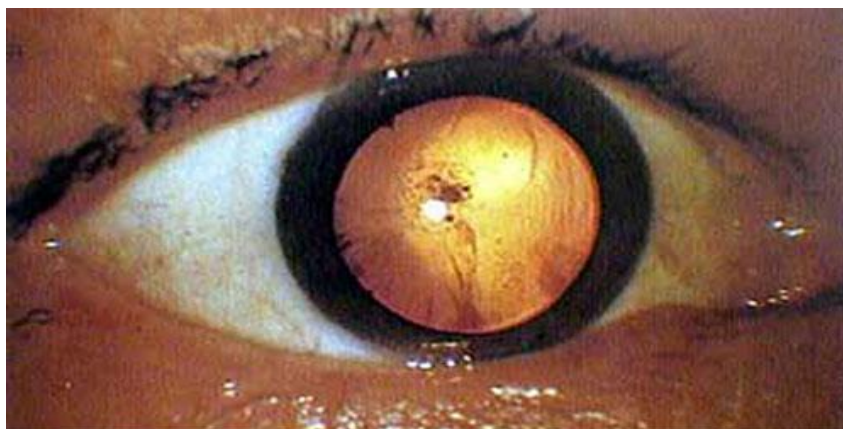
Церебральная форма ОЛБ(80 Гр и выше)

Проявляется судорожно-паралитическим синдромом, нарушениями крово- и лимфообращения в ЦНС, сосудистого тонуса и терморегуляции. Позднее появляются нарушения со стороны ЖКТ. Эти явления длятся не более 1-3 дней. Затем, сразу после облучения или в процессе его, наступает смерть (100 %) всл необратимых нарушений ЦНС, вызывающих структурные изменения, гибель кл коры ГМ и нейронов ядер гипоталамуса.

Хроническая лучевая болезнь (ХЛБ) - развивается в результате длительного непрерывного или фракционированного облучения организма в дозах 0,1-0,5 Гр/сут при суммарной дозе, превышающей 0,7-1 Гр. ХЛБ при внешнем облучении представляет собой сложный клинический синдром с вовлечением ряда органов и систем, периодичность течения которого связана с динамикой формирования лучевой нагрузки, т.е. с продолжением или прекращением облучения.



ХЛБ включают в себя:
изменения в половой системе
склеротические процессы
лучевую катаракту
иммунные болезни
радиоканцерогенез
сокращение продолжительности жизни
генетические и тератогенные эффекты



Нормирование ионизирующего излучения

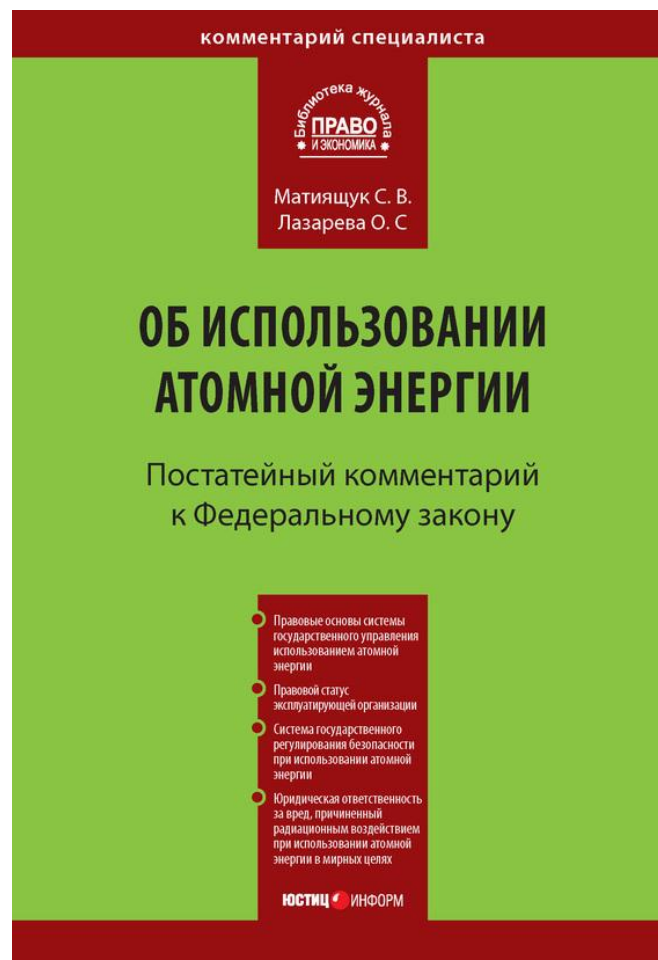


Рис. 10.3. Иерархическая система законодательного и методического обеспечения радиационной безопасности



**Федеральный закон
от 30 марта 1999 г. N
52-ФЗ "О санитарно-
эпидемиологическом
благополучии
населения" (с
изменениями и
дополнениями)**

Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ "Об использовании атомной энергии" (с изменениями и дополнениями)

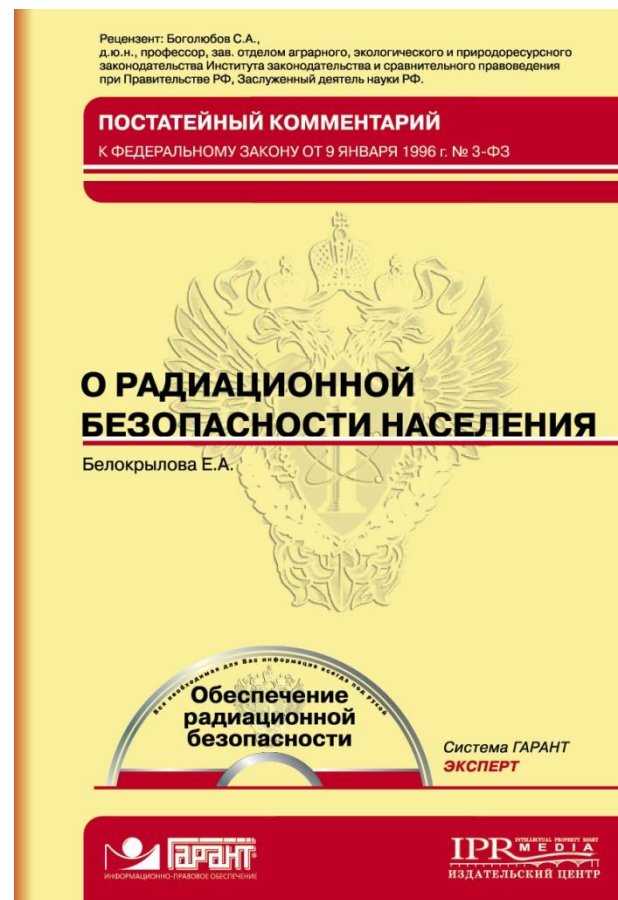


Федеральный закон "О радиационной безопасности населения" от 09.01.1996 № 3-ФЗ (действующая редакция, 2016)

УВЕРЕННОСТЬ В КАЖДОМ РЕШЕНИИ.

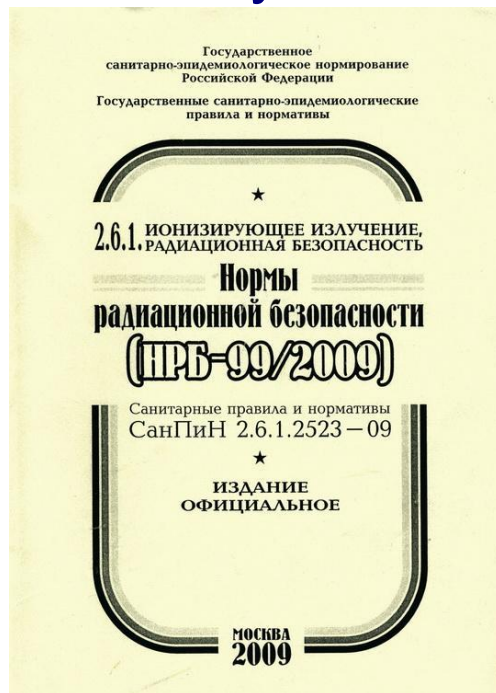


КонсультантПлюс



В России основными нормативами являются нормы радиационной безопасности (НРБ-99 /2009), которые предусматривают следующие основные принципы радиационной безопасности:

- не превышение установленного основного дозового предела;
- исключение всякого необоснованного облучения, снижение дозы излучения до минимально возможного уровня.



Государственное санитарно-эпидемиологическое нормирование
Российской Федерации
Государственные санитарно-эпидемиологические
правила и нормативы

2.6.1. ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ,
РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

**ОСНОВНЫЕ
САНИТАРНЫЕ ПРАВИЛА
ОБЕСПЕЧЕНИЯ
РАДИАЦИОННОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ
(ОСПОРБ 99 / 2010)**

Санитарные правила и нормативы
СП 2.6.1.2612—10

ИЗДАНИЕ ОФИЦИАЛЬНОЕ

Москва
2010

Разработанные нормы радиационной безопасности учитывают три категории облучаемых лиц:

А - персонал, т.е. лица, постоянно или временно работающие с источниками ионизирующего излучения;

Б - ограниченная часть населения, т.е. лица, непосредственно не занятые на работе с источниками ионизирующих излучений, но по условиям проживания или размещения рабочих мест могут подвергаться воздействию ионизирующих излучений;

В - всё население.

Эффективная доза (Е) - величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности.

Основные дозовые пределы

Нормируемые величины	Лица персонала		Население
	Группа А	Группа Б	Группа В
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	5 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 12,5 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год: в хрусталике глаза; коже; кистях и стопах.	150 мЗв 500 мЗв 500 мЗв	33,3 мЗв 125 мЗв 125 мЗв	15 мЗв 50 мЗв 50 мЗв

Критерием при расчете параметров защиты от внешнего облучения является предел эффективной дозы, который для работающих с радиоактивными веществами (персонал-категория А) составляет **20 мЗв в год.**

Хотя в настоящее время предел доз на неделю не регламентируется, при расчетах удобнее пользоваться недельной дозой, которая при равномерном распределении годового облучения составляет **0,4 мЗв.**

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Радиационная безопасность - это состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения.

**Радиационная
обеспечивается
организационных
мероприятий:**

**безопасность
выполнением
и**

**персонала
следующих
инженерно-технических**

- применением средств коллективной защиты;
- применением средств индивидуальной защиты;
- ограничением допуска к работе с источниками излучения по возрасту, полу, состоянию здоровья, уровню предыдущего облучения и другими показателями;
- обучением работников правилам безопасной работы с источниками излучения;
- уменьшением мощности источников до минимальных величин (защита количеством);

- сокращением времени работы с источником (защита временем);
- увеличением расстояния от источников до работающих (защита расстоянием);
- проведением контроля профессионального облучения;
- организацией системы информации о радиационной обстановке;
- проведением эффективных мероприятий по защите персонала при планировании повышенного облучения в случае угрозы и возникновения аварии.

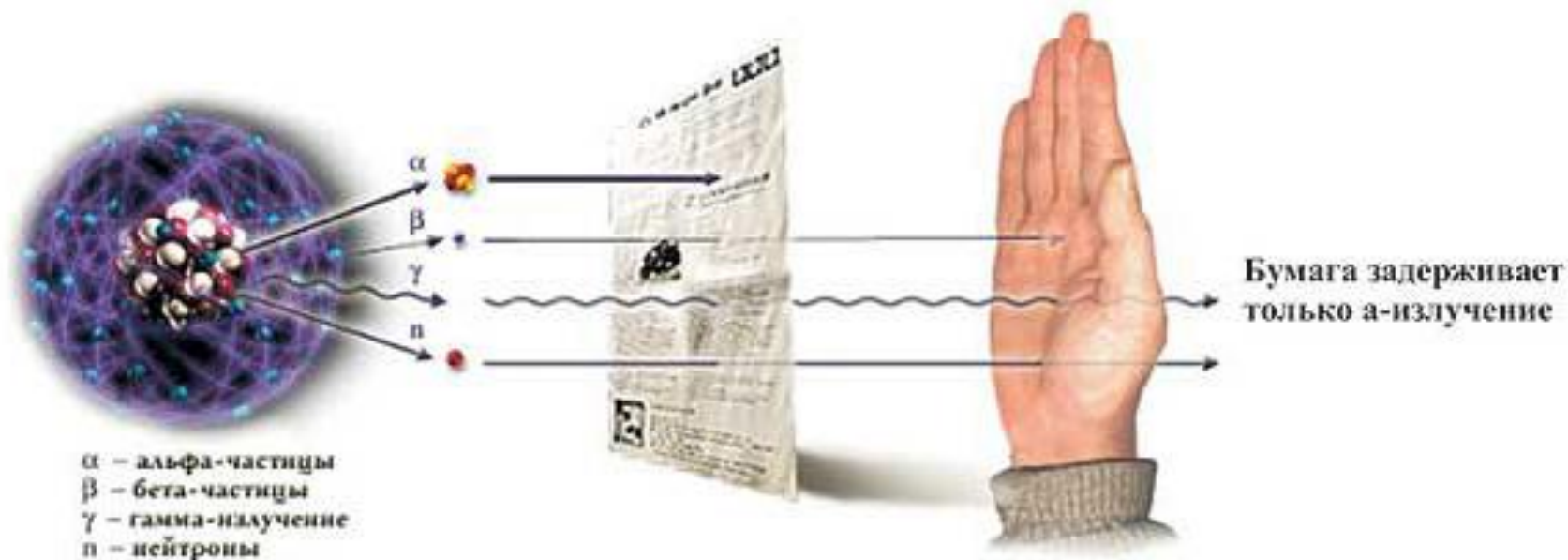
Наиболее широко используемым средством коллективной защиты от ионизирующего излучения является экранирование.

Под термином «экран» понимают передвижные или стационарные оградительные устройства (например, щиты), предназначенные для поглощения или ослабления ионизирующего излучения.

Экранами служат также стенки сейфов для хранения радиоактивных изотопов, стенки боксов, защитных камер и др.

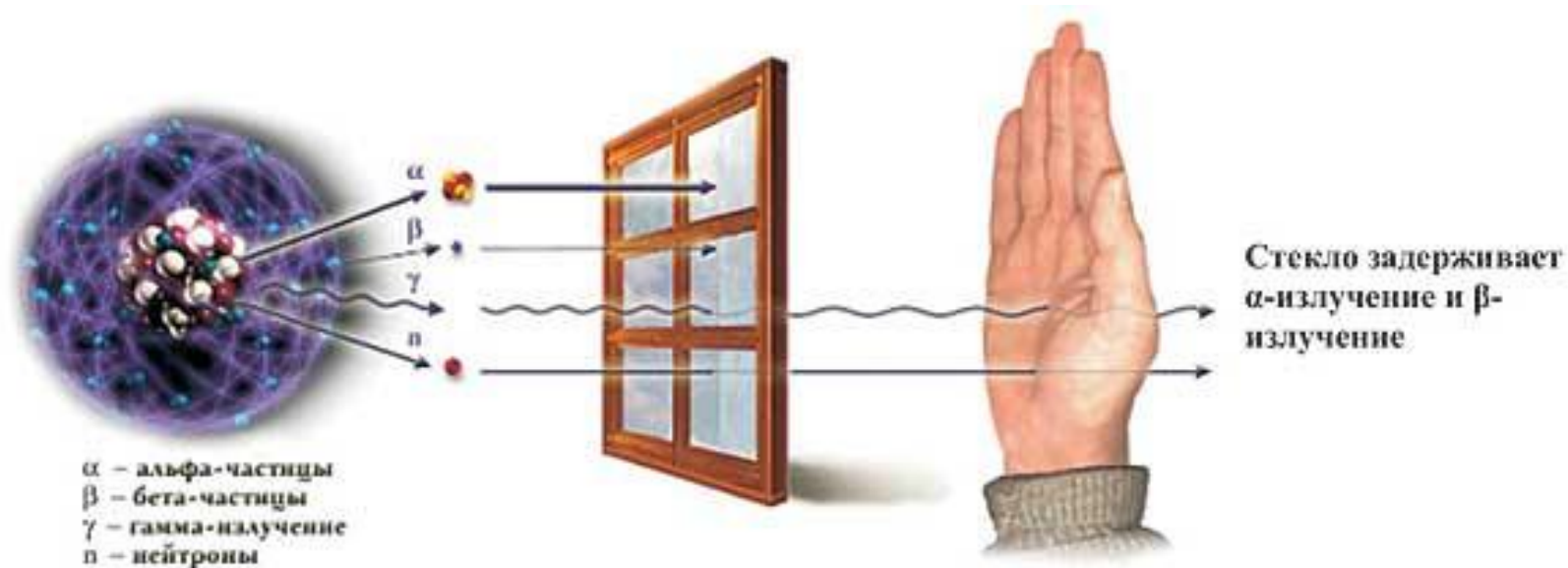
Эффективность экранов определяется, в первую очередь, материалом, из которого они выполнены, и толщиной.

Для защиты от альфа-излучения достаточно слой воздуха в несколько сантиметров, т.е. небольшое удаление от источника. Применяют также тонкую фольгу, лист бумаги, экраны из плексигласа и стекла, толщиной в несколько миллиметров.



от альфа-излучения — лист бумаги, резиновые перчатки или 8-9 см воздуха

Для защиты от бета-излучения изготавливают из материалов с малой атомной массой (например, алюминия), которые дают наименьшее тормозное излучение.



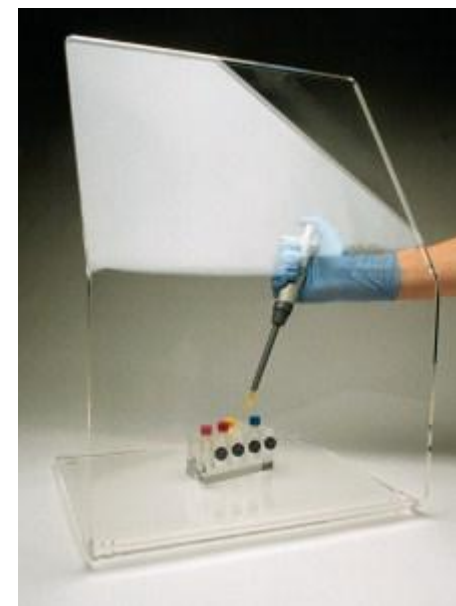
от бета-излучения — плексиглас, тонкий слой алюминия, стекло;



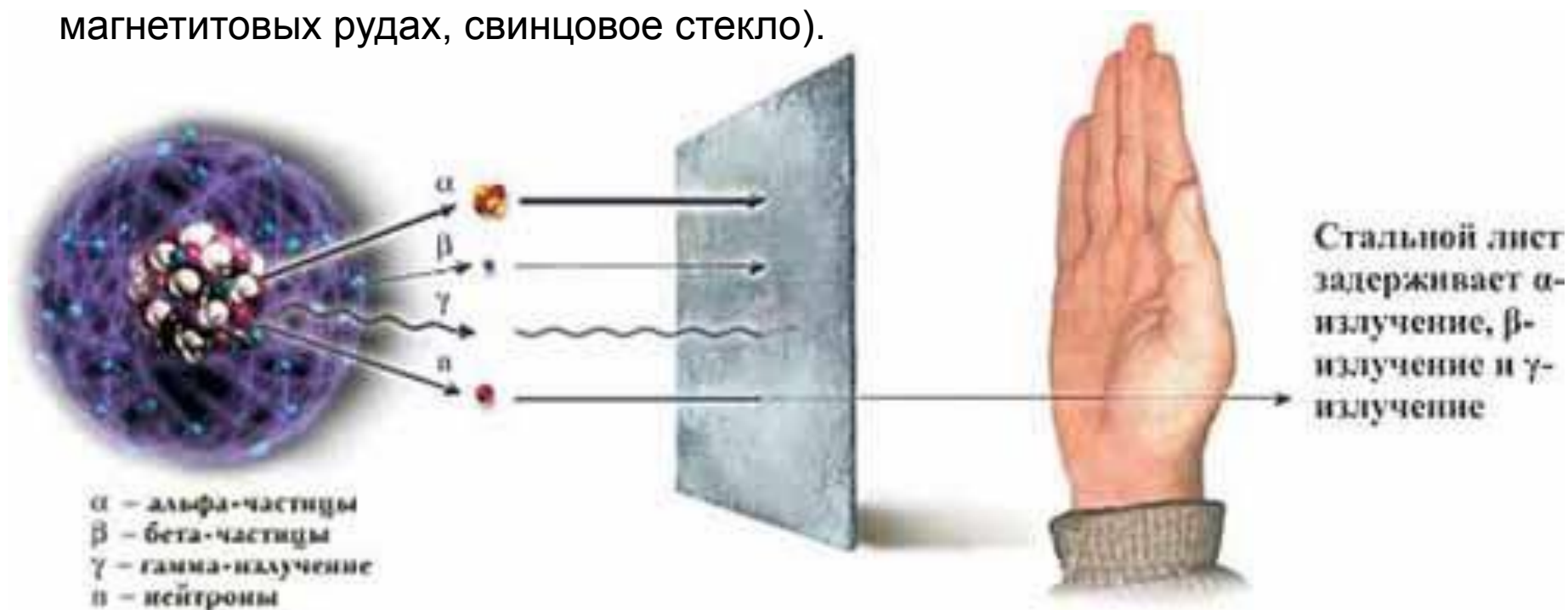
Плексиглас - оргстекло



Экран используется при работе с радиоизотопными растворами. Изготавливается из специального акрилового стекла. Возможны два варианта изготовления: 1) Для защиты от бета излучения, 2) Для защиты от гамма излучения



Гамма-излучение наиболее эффективно ослабляется материалами с большим атомным номером и высокой плотностью (свинец, сталь, бетон на магнетитовых рудах, свинцовое стекло).



от гамма-излучения — тяжёлые металлы (вольфрам, свинец, сталь, чугун и пр.);

Все лица, работающие с источниками излучения или посещающие участки, где производятся такие работы, обеспечиваются средствами индивидуальной защиты в соответствии с видом и классом работ.

При работах 1 класса (наиболее опасных) и при отдельных работах второго класса работающие обеспечиваются основным комплектом СИЗ, включающим: спецбелье, носки, комбинезон или костюм (куртка, брюки), спецобувь, шапочку, перчатки, полотенца и одноразовые носовые платки, а также средства защиты органов дыхания.

К средствам индивидуальной защиты можно отнести противорадиационный костюм с включением свинца, жилеты, накидки.



Защитный костюм



Защитный жилет.



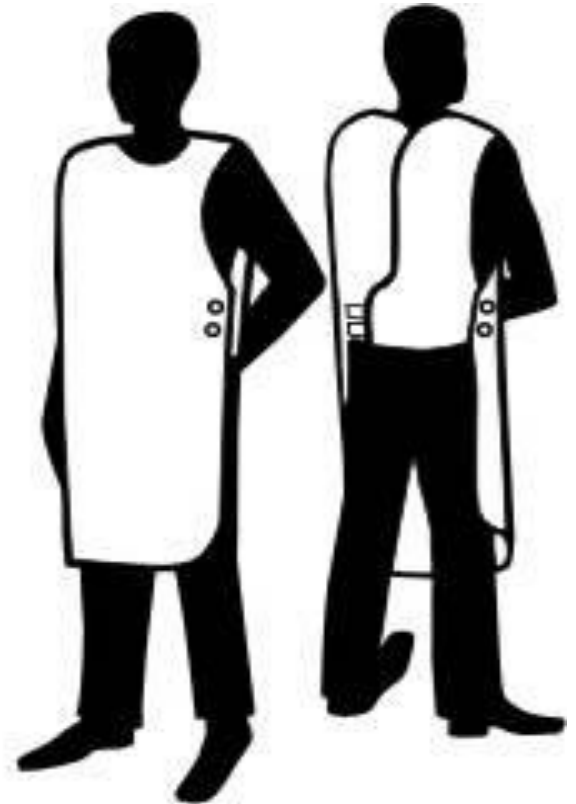
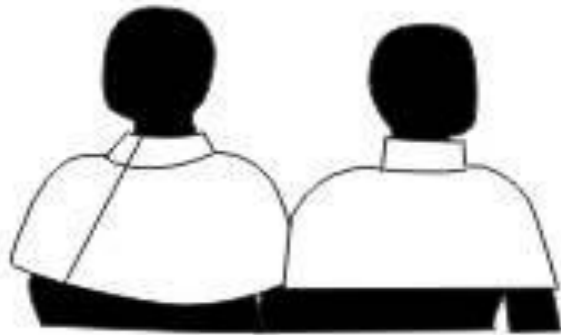
Накидка защитная одноразовая



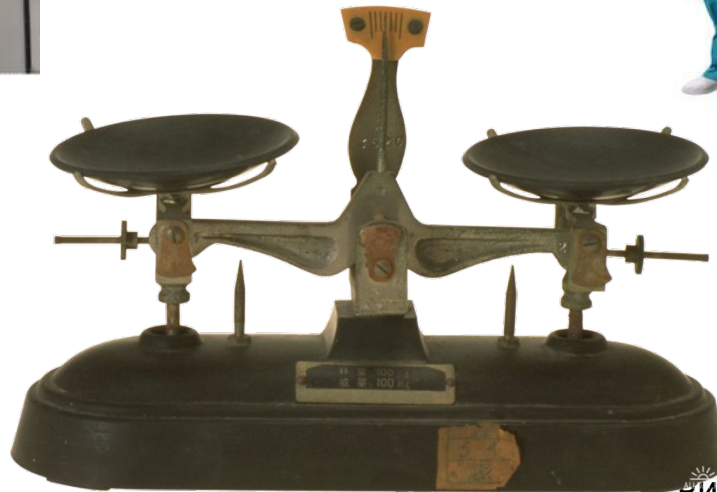
Защитный жилет ("Гамма-1) является индивидуальным средством защиты от гамма-излучения и может использоваться личным составом специальных подразделений и аварийно-спасательных бригад при выполнении работ по ликвидации последствий аварий на объектах ядерной энергетики. Жилет обеспечивает защиту желудочно-кишечного тракта, позвоночника и костей таза.







применение средств индивидуальной защиты изготовленных из поливинилхлорида



вес СИЗ из ПВХ
33.05 кг

вес СИЗ из пресвинцованной резины
40.9 кг



Ширмы ренгенозащитные



Очки рентгенозащитные

Предназначены для защиты глаз медицинского персонала и пациентов от рентгеновского излучения при рентгенодиагностике, операциях под рентгеновским контролем и других видах рентгенологических исследований. Свинцовый эквивалент - не менее 0,25 мм.



Очки защитные

Предназначены для защиты глаз персонала физиотерапевтических медицинских кабинетов, радиолокационных станций и пр. от вредного воздействия электромагнитных излучений в широком диапазоне длин волн. Эффективность экранирования - 20...30 дБ.

Йодная профилактика заключается в приёме препаратов стабильного йода: **йодистого калия или водно-спиртового раствора йода**. При этом достигается 100%-ная степень защиты от накопления радиоактивного йода в щитовидной железе.

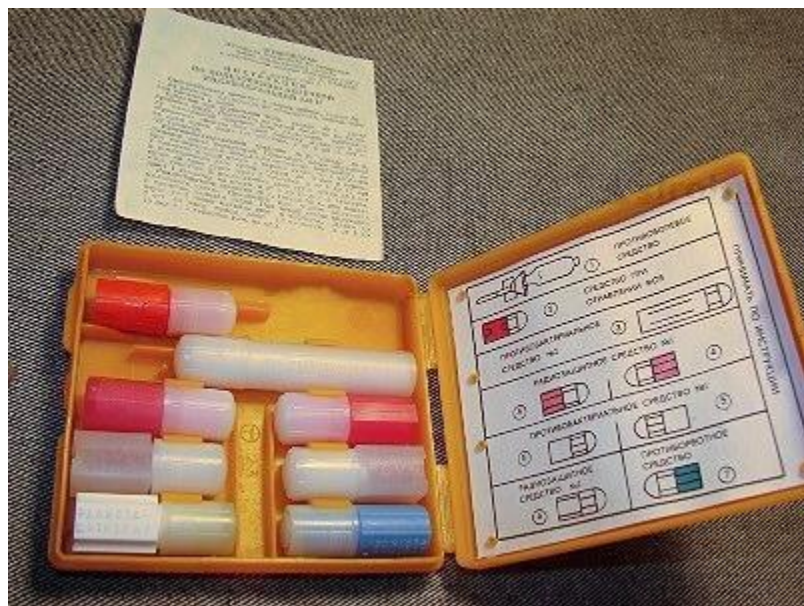
Водно-спиртовой раствор йода следует принимать после еды и наносить на поверхность кистей рук настойку йода в виде сетки.



На Сахалине уже выявлены случаи аллергических реакций населения от чрезмерного употребления йодсодержащих препаратов, сообщила директор Сахалинского территориального центра медицины катастроф врач-радиолог Наталья Беркутова.

«Хотелось бы предостеречь население островного региона: йодную профилактику необходимо проводить только за шесть часов до подхода радиоактивного облака, причем в определенных дозах.

Передозировка йодсодержащих препаратов наносит огромный вред организму, может вызвать насморк, крапивницу, лихорадку, различные дерматиты, аллергические реакции со смертельным исходом и т.д. Особенно вредны такие препараты в больших количествах для маленьких детей».



Радиопротекторы - это вещества, повышающие устойчивость организма к воздействию ионизирующих излучений. К ним относятся соединения, оказывающие противолучевое действие при введении за несколько минут или часов до облучения. Наиболее эффективные радиопротекторы — меркаптоамины, индолилалкиламины, синтетические полимеры, полинуклеотиды, мукополисахариды, цианиды, нитрилы и пр. Наиболее эффективны смеси из нескольких радиопротекторов.

Наиболее эффективными в качестве радиопротекторов являются серосодержащие вещества (цистамин, цистафос, гаммафос и др.); биологически активные амины (мексамин, индралин и др.).

Дозиметрические приборы

Название и тип прибора	Измеряемые характеристики
<i>Дозиметры с газовыми детекторами</i>	
Дозиметры-радиометры МКГ-01	МАЭД и АЭД непрерывного рентгеновского и гамма-излучений; плотность потока бета-излучения. Диапазоны измерений: МАЭД от 0,10 до 500 мкЗв/ч в диапазоне энергий фотонов от 15 кэВ до 3,0 МэВ и от 501 мкЗв/ч до 10 мЗв/ч в диапазоне энергий фотонов от 65 кэВ до 3,0 МэВ; АЭД — от 0,10 мкЗв до 1,0 Зв; плотность потока бета-частиц с энергией свыше 0,25 МэВ от $0,10 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ до $200 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ при фоновом гамма-излучении не более 0,25 мкЗв/ч.
<i>Дозиметры со сцинтилляционными детекторами</i>	
Дозиметры-радиометры ДКС-96	МАЭД и АЭД фотонного излучения, плотности потока альфа- и бета-излучений, мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения. Диапазоны измерений: МАЭД фотонного излучения — от 0,1 мкЗв/ч до 1 Зв/ч; АЭД — от 1,0 мкЗв до 1,0 Зв в диапазоне энергий от 0,015 до 10 МэВ; плотность потока альфа-частиц — от 0,1 до $10^4 \text{ мин}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, плотность потока бета-излучения — от 10 до $10^5 \text{ мин}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, мощность эквивалентной дозы нейтронов — от 0,1 до 10 000 мкЗв/ч.
<i>Дозиметры с полупроводниковыми детекторами</i>	
Дозиметры программируемые персональные RAD52S	Индивидуальная эквивалентная доза $H_p(10)$ фотонного излучения и ее мощность. Диапазоны измерений: от 1 мкЗв до 999 мЗв; от 50 мкЗв/ч до 3 Зв/ч.



Достоверно проверить уровень радиационной безопасности можно только с помощью персонального бытового дозиметра.



Индикатор радиоактивности РАДЭКС РД1503

РД1503 предназначен для оценки мощности эквивалента дозы гамма-излучения населением в бытовых условиях (продукты питания, стройматериалы, почва и т.д.), а также может быть использован персоналом, работающим с источниками ионизирующих излучений. Кроме того, он позволяет обнаруживать загрязненность объектов бета-активными радионуклидами.



Измеритель мощности дозы ДП-5В

предназначен для измерения уровней гамма-радиации и радиоактивной зараженности (загрязненности) различных объектов (предметов) по гамма-излучению.



**Измеритель
мощности дозы
ИМД-5**
предназначен для
измерения
мощности
поглощенной дозы
гамма-излучения в
широком диапазоне
(от 0,05 мрад/час до
200 рад/час) и
обнаружения бета -
излучения.



Комплект индивидуальных измерителей дозы ИД-11 (брелок) предназначен для индивидуального контроля облучения личного состава, подвергающегося воздействию ионизирующих излучений, устойчив к механическим воздействиям (вибрация, удары при падении), компактен, имеет индивидуальный восьмизначный заводской номер.

Дозиметрические приборы



**Дозиметр-радиометр
"МКГ-01".**

Название и тип прибора	Измеряемые характеристики
<i>Дозиметры с газовыми детекторами</i>	
Дозиметры-радиометры МКГ-01	МАЭД и АЭД непрерывного рентгеновского и гамма-излучений; плотность потока бета-излучения. Диапазоны измерений: МАЭД от 0,10 до 500 мкЗв/ч в диапазоне энергий фотонов от 15 кэВ до 3,0 МэВ и от 501 мкЗв/ч до 10 мЗв/ч в диапазоне энергий фотонов от 65 кэВ до 3,0 МэВ; АЭД — от 0,10 мкЗв до 1,0 Зв; плотность потока бета-частиц с энергией свыше 0,25 МэВ от $0,10 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ до $200 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ при фоновом гамма-излучении не более 0,25 мкЗв/ч.
<i>Дозиметры со сцинтилляционными детекторами</i>	
Дозиметры-радиометры ДКС-96	МАЭД и АЭД фотонного излучения, плотности потока альфа- и бета-излучений, мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения. Диапазоны измерений: МАЭД фотонного излучения — от 0,1 мкЗв/ч до 1 Зв/ч; АЭД — от 1,0 мкЗв до 1,0 Зв в диапазоне энергий от 0,015 до 10 МэВ; плотность потока альфа-частиц — от 0,1 до $10^4 \text{ мин}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, плотность потока бета-излучения — от 10 до $10^5 \text{ мин}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, мощность эквивалентной дозы нейтронов — от 0,1 до 10 000 мкЗв/ч.
<i>Дозиметры с полупроводниковыми детекторами</i>	
Дозиметры программируемые персональные RAD52S	Индивидуальная эквивалентная доза $H_p(10)$ фотонного излучения и ее мощность. Диапазоны измерений: от 1 мкЗв до 999 мЗв; от 50 мкЗв/ч до 3 Зв/ч.

Дозиметрические приборы



**Дозиметр-радиометр
«ДКС-96».**

Название и тип прибора	Измеряемые характеристики
<i>Дозиметры с газовыми детекторами</i>	
Дозиметры-радиометры МКГ-01	МАЭД и АЭД непрерывного рентгеновского и гамма-излучений; плотность потока бета-излучения. Диапазоны измерений: МАЭД от 0,10 до 500 мкЗв/ч в диапазоне энергий фотонов от 15 кэВ до 3,0 МэВ и от 501 мкЗв/ч до 10 мЗв/ч в диапазоне энергий фотонов от 65 кэВ до 3,0 МэВ; АЭД — от 0,10 мкЗв до 1,0 Зв; плотность потока бета-частиц с энергией свыше 0,25 МэВ от $0,10 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ до $200 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ при фоновом гамма-излучении не более 0,25 мкЗв/ч.
<i>Дозиметры со сцинтилляционными детекторами</i>	
Дозиметры-радиометры ДКС-96	МАЭД и АЭД фотонного излучения, плотности потока альфа- и бета-излучений, мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения. Диапазоны измерений: МАЭД фотонного излучения — от 0,1 мкЗв/ч до 1 Зв/ч; АЭД — от 1,0 мкЗв до 1,0 Зв в диапазоне энергий от 0,015 до 10 МэВ; плотность потока альфа-частиц — от 0,1 до $10^4 \text{ мин}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, плотность потока бета-излучения — от 10 до $10^5 \text{ мин}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, мощность эквивалентной дозы нейтронов — от 0,1 до 10 000 мкЗв/ч.
<i>Дозиметры с полупроводниковыми детекторами</i>	
Дозиметры программируемые персональные RAD52S	Индивидуальная эквивалентная доза $H_p(10)$ фотонного излучения и ее мощность. Диапазоны измерений: от 1 мкЗв до 999 мЗв; от 50 мкЗв/ч до 3 Зв/ч.

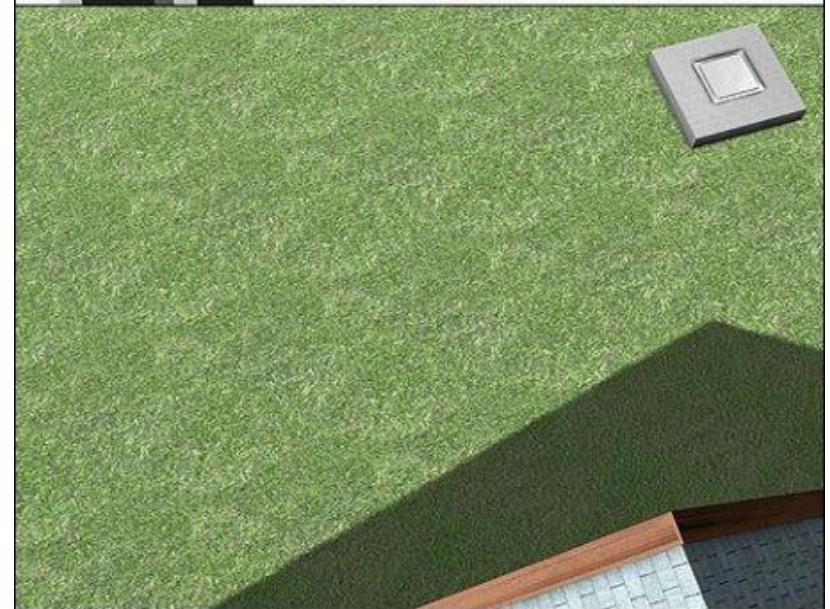
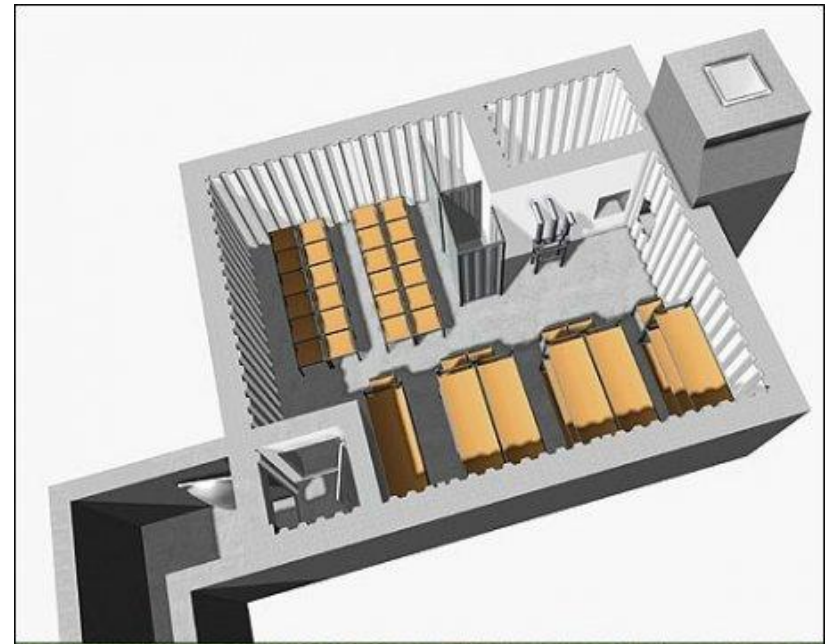
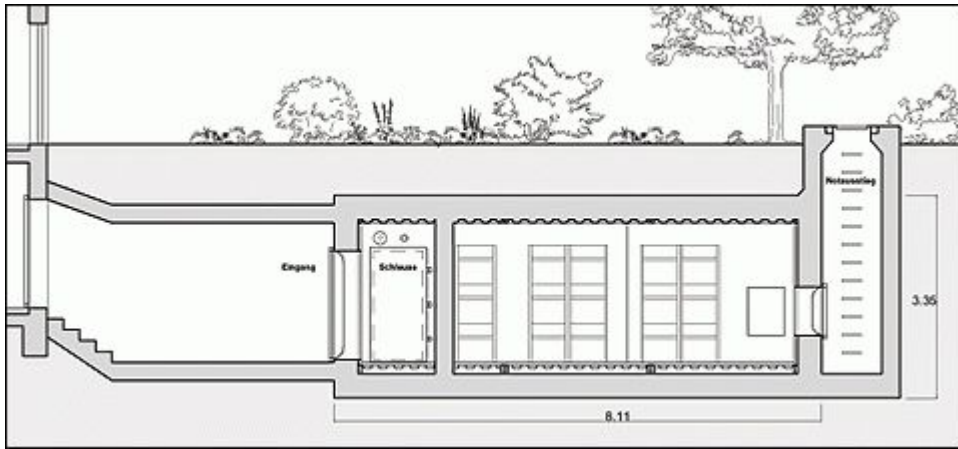
Дозиметрические приборы



Дозиметры RAD52S

Название и тип прибора	Измеряемые характеристики
<i>Дозиметры с газовыми детекторами</i>	
Дозиметры-радиометры МКГ-01	МАЭД и АЭД непрерывного рентгеновского и гамма-излучений; плотность потока бета-излучения. Диапазоны измерений: МАЭД от 0,10 до 500 мкЗв/ч в диапазоне энергий фотонов от 15 кэВ до 3,0 МэВ и от 501 мкЗв/ч до 10 мЗв/ч в диапазоне энергий фотонов от 65 кэВ до 3,0 МэВ; АЭД — от 0,10 мкЗв до 1,0 Зв; плотность потока бета-частиц с энергией свыше 0,25 МэВ от $0,10 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ до $200 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ при фоновом гамма-излучении не более 0,25 мкЗв/ч.
<i>Дозиметры со сцинтилляционными детекторами</i>	
Дозиметры-радиометры ДКС-96	МАЭД и АЭД фотонного излучения, плотности потока альфа- и бета-излучений, мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения. Диапазоны измерений: МАЭД фотонного излучения — от 0,1 мкЗв/ч до 1 Зв/ч; АЭД — от 1,0 мкЗв до 1,0 Зв в диапазоне энергий от 0,015 до 10 МэВ; плотность потока альфа-частиц — от 0,1 до $10^4 \text{ мин}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, плотность потока бета-излучения — от 10 до $10^5 \text{ мин}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, мощность эквивалентной дозы нейтронов — от 0,1 до 10 000 мкЗв/ч.
<i>Дозиметры с полупроводниковыми детекторами</i>	
Дозиметры программируемые персональные RAD52S	Индивидуальная эквивалентная доза $H_p(10)$ фотонного излучения и ее мощность. Диапазоны измерений: от 1 мкЗв до 999 мЗв; от 50 мкЗв/ч до 3 Зв/ч.











Спасибо за внимание!



Практическая работа

Задание студентам: решите задачи.




Расчет основных параметров защиты от внешнего облучения

Задача 1. Лаборант, производящий фасовку радиоактивного золота ^{198}Au с энергией излучения 0,8 МэВ, получит без защиты через неделю дозу облучения 2,0 мЗв. Определите толщину свинцового экрана для создания безопасных условий работы лаборанта, используя данные таблицы.

Толщина защитного экрана из свинца (мм) в зависимости от кратности ослабления и энергии γ -излучения (широкий пучок)

Кратность ослабления, К	Энергия γ -излучения, МэВ									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1,5	0,5	1,0	1,5	2	2	3	4	6	7	8
2	1	2	3	4	5	7	8	10	11,5	13
5	2	4	6	9	11	15	19	22	25	28
8	2	5	8	11	15	19,5	23,5	28	32	35
10	3	5,5	9	13	16	21	26	30,5	35,5	38
20	3	6	11	15	20	26	32,5	38,5	44	49
30	3,5	7	11,5	17	23	30	36,5	43	49,5	55
40	4	8	13	18	24	31	38	45	52	58
50	4	8,5	14	19,5	26	32,5	39,5	46	53	60
60	4,5	9	14,5	20,5	27	34,5	42	49,5	56	63
80	4,5	10	15,5	21,5	28	37	45	53	60	67
100	5	10	16	23	30	38,5	47	55	63	70


$$K = \frac{P}{P_0},$$

где K – кратность ослабления; P – полученная доза; P_0 – предельно допустимая доза.

В нашем примере:

$$K = \frac{2,0}{0,4} = 5 \text{ раз}$$

Задача 1. Лаборант, производящий фасовку радиоактивного золота ^{198}Au с энергией излучения 0,8 МэВ, получит без защиты через неделю дозу облучения 2,0 мЗв. Определите толщину свинцового экрана для создания безопасных условий работы лаборанта, используя данные таблицы.

Толщина защитного экрана из свинца (мм) в зависимости от кратности ослабления и энергии γ -излучения (широкий пучок)

Кратность ослабления, К	Энергия γ -излучения, МэВ									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1,5	0,5	1,0	1,5	2	2	3	4	6	7	8
2	1	2	3	4	5	7	8	10	11,5	13
5	2	4	6	9	11	15	19	22	25	28
8	2	5	8	11	15	19,5	23,5	28	32	35
10	3	5,5	9	13	16	21	26	30,5	35,5	38
20	3	6	11	15	20	26	32,5	38,5	44	49
30	3,5	7	11,5	17	23	30	36,5	43	49,5	55
40	4	8	13	18	24	31	38	45	52	58
50	4	8,5	14	19,5	26	32,5	39,5	46	53	60
60	4,5	9	14,5	20,5	27	34,5	42	49,5	56	63
80	4,5	10	15,5	21,5	28	37	45	53	60	67
100	5	10	16	23	30	38,5	47	55	63	70

Ответ: для защиты лаборанта
необходима толщина свинцового экрана –
22 мм.

Задача 2. Оператор постоянно работает на расстоянии 1 м от источника излучения в течение 36 ч в неделю. С какой максимальной активностью источника излучения он может работать?

При решении задачи используйте формулу:

$$\frac{m \times t}{R^2} = 1,8 \times 10^8,$$

где m – активность источника облучения, в Бк; t – время облучения за рабочую неделю, в ч; R – расстояние от источника облучения; $1,8 \times 10^8$ – коэффициент пересчета.

По формуле вычисляем:

$$m = \frac{1,8 \times 10^8 \times R^2}{t} = \frac{1,8 \times 10^8 \times 1}{36} = 5,0 \times 10^6 \text{ Бк}$$

Ответ: максимальная активность
источника $5,0 \times 10^6 \text{ Бк}$

Задача 3. В лаборатории работают с источником облучения активностью $5,8 \times 10^7$ Бк на расстоянии 1 м от него. Необходимо определить допустимое время работы (за неделю).

При решении задачи используйте формулу:

$$\frac{m \times t}{R^2} = 1,8 \times 10^8,$$

где m – активность источника облучения, в Бк; t – время облучения за рабочую неделю, в ч; R – расстояние от источника облучения; $1,8 \times 10^8$ – коэффициент пересчета.

По формуле вычисляем:

$$t = \frac{1,8 \times 10^8 \times R^2}{m} = \frac{1,8 \times 10^8 \times 1}{5,8 \times 10^7} = 3,2 \text{ часа в неделю}$$

Ответ: допустимое время работы 3,2 часа в неделю.

Задача 4. Лаборант радиологического отделения в течение 6 ч ежедневно (при шести дневной неделе) готовит препараты радия активностью $5,8 \times 10^6$ Бк. На каком расстоянии от источника она должна работать?

При решении задачи используйте формулу:

$$\frac{m \times t}{R^2} = 1,8 \times 10^8,$$

где m – активность источника облучения, в Бк; t – время облучения за рабочую неделю, в ч; R – расстояние от источника облучения; $1,8 \times 10^8$ – коэффициент пересчета.

$$R = \sqrt{\frac{5,8 \times 10^6 \times 36}{1,8 \times 10^8}} = 1,08 \text{ м}$$

Ответ: лаборант должна работать на расстоянии 1,08 метра от источника излучения