

**Курс «РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В
ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ»**

ЛЕКЦИЯ №2

**Ионизирующее излучение.
Доза излучения и доза при внешнем
облучении.**

**Москва
2024**

ПЛАН ЛЕКЦИИ

- Ионизирующее излучение (ИИ).
- Основные характеристики ИИ.
- Основные единицы физических величин.
Терминология.
- Краткий исторический экскурс накопления информации.
- Виды доз ИИ.

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (ИИ)

ИИ было на нашей планете всегда.

Земная радиация (излучение радионуклидов, содержащихся в геологических породах :

^{238}U ($T_{1/2} \approx 4,5 \cdot 10^9$ лет),

^{232}Th ($T_{1/2} \approx 14 \cdot 10^9$ лет),

^{40}K ($T_{1/2} \approx 1,3 \cdot 10^9$ лет)).

Космическое излучение.

Протоны (~90%) и α -частиц (~10%)

Порождает радионуклиды (^3He , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na , ^{24}Na и др.)

○ **Ионизирующее излучение** – поток заряженных или нейтральных частиц и квантов электромагнитного излучения, прохождение которых через вещество приводит к ионизации и возбуждению атомов или молекул среды.

По своей природе делится на фотонное (гамма-излучение, тормозное излучение, рентгеновское излучение) и корпускулярное (альфа-излучение, электронное, протонное, нейтронное, мезонное).

Ионизация – это акт разделения электрически нейтрального атома на две противоположно заряженные частицы: отрицательный электрон и положительный ион

Уровни и стадии радиобиологических процессов



К вопросу о сравнении действия ионизирующего и неионизирующего излучений.



В более узком смысле к ионизирующему излучению не относят ультрафиолетовое излучение и излучение видимого диапазона света, которое в отдельных случаях также может быть ионизирующим. Излучение микроволнового и радиодиапазонов не является ионизирующим.

ИИ ДЕЛИТСЯ НА:

- Непосредственно ионизирующее излучение – ИИ, состоящее из заряженных частиц, имеющих кинетическую энергию достаточную для ионизации при столкновении (может состоять из электронов, протонов, α -частиц).
- Косвенно ионизирующее излучение – ИИ, состоящее из незаряженных частиц, которые могут создавать непосредственно ИИ и (или) вызывать ядерные превращения (может состоять из нейтронов, фотонов)

Нейтроны и другие нейтральные элементарные частицы непосредственно не производят ионизацию, но в процессе взаимодействия со средой они высвобождают заряженные частицы (электроны, протоны и т.д.), способные ионизировать атомы и молекулы среды, через которую они проходят.

Основные характеристики ИИ.

Корпускулярное ИИ – поток элементарных частиц с массой покоя отличной от нуля, образующихся при радиоактивном распаде, ядерных превращениях либо генерируемых на ускорителях.

(α - и β - частицы, нейтроны, позитроны, мезоны и др.)

Корпускулярное ИИ, состоящее из потока заряженных частиц (α - и β - частиц, протонов, электронов), кинетическая энергия которых достаточна для ионизации атомов при столкновении, относится к классу **непосредственно ионизирующего излучения**.

Корпускулярное ИИ, состоящее из потока незаряженных частиц (например, нейтроны), которые в процессе взаимодействия со средой высвобождают заряженные частицы (электроны, протоны и др.), способные ионизировать атомы и молекулы среды, через которую они проходят, - относится к классу **косвенно ионизирующего излучения**.

Фотонное излучение (γ -излучение, тормозное и рентгеновское) является **косвенно ионизирующего излучения**.

Основные характеристики ИИ.

Фотонное излучение (γ -излучение, тормозное и рентгеновское) является **косвенно ионизирующего излучения**.

--- при перестройке внутренних электронных оболочек атомов, называется **характеристическим**.

Гамма – излучение – это излучение, испускаемое в процессе радиоактивного распада или ядерных реакций, т.е. при изменении энергетического состояния атомных ядер.

Фотонное излучение, образующееся при аннигиляции частиц, также называется γ -излучением.

Оба излучение обладают дискретным спектром, т.к. электроны в атоме и атомное ядро могут находиться во вполне определенных энергетических состояниях. Следовательно, переход электрона или ядра из одного энергетического состояния в другое происходит скачкообразно, и испускаемые при этом фотоны характеристического или γ -излучения будут обладать набором дискретных значений энергии.

Основные характеристики ИИ.

В процессе взаимодействия ИИ с веществом изменяются его энергетическое и пространственно-временное распределение в рассматриваемой среде. Для установления закономерностей распространения и поглощения ИИ в среде необходимо знать:

- сколько частиц или фотонов,
- с какой энергией и в каком направлении приходят в кажд. точку пространства, т.е. необходимо иметь представление о поле излучения.

Для характеристики поля ИИ необходимы понятия:

- поток частиц и поток энергии,
- плотность потока частиц и энергии,
- флюенс (перенос) частиц и энергии.

ПОТОК ИОНИЗИР.ЧАСТИЦ И ПОТОК ЭНЕРГИИ ИИ

$$F = \frac{dN}{dt}$$

dN – число ионизир. частиц, проходящих через данную поверхность за интервал времени dt .

$$F_{\omega} = \frac{d\omega}{dt}$$

$d\omega$ – суммарная энергия (исключая энергию покоя) всех ионизир. частиц, проходящих через данную поверхность за интервал времени dt .

Т.о., поток частиц или энергии характеризует число частиц или их энергию, проходящую через данную поверхность за единицу времени.

$$[F] = [c^{-1}]$$

(c^{-1}) равна потоку ионизирующих частиц, при котором через данную поверхность за 1с проходит одна частица.

$$[F] = \left[\frac{\text{Дж}}{c} \right] = [\text{Вт}] = [\text{эВ}]$$

Ватт равен потоку энергии ИИ, при котором через данную поверхность за 1с проходит излучение с энергией 1 Дж.

ФЛЮЭНС (ПЕРЕНОС) ИОНИЗИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ Φ –

- это отношение числа ионизирующих частиц dN , проникающих в элементарную сферу, к площади центрального сечения dS этой сферы:

$$\Phi = \frac{dN}{dS} \quad [\Phi] = [\text{м}^{-2}]$$

равен флюенсу ионизир. частиц, при котором в сферу с площадью центрального сечения 1м^2 проникает 1 частица.

ФЛЮЭНС (ПЕРЕНОС) ЭНЕРГИИ ИИ Φ –

- это отношение суммарной энергии ИИ $d\omega$ (исключая энергию покоя), проникающего в элементарную сферу с площадью центрального сечения dS .

$$\Phi_{\omega} = \frac{d\omega}{dS} \quad [\Phi] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^{-2}} \right] = \left[\frac{\text{эВ}}{\text{м}^2} \right]$$

ПЛОТНОСТЬ ПОТОКА ИОНИЗИР. ЧАСТИЦ

$$\varphi = \frac{dF}{dS}$$

dF – поток ионизир. частиц, проникающих в элементарную сферу, к площади центрального сечения dS .

Т.о., плотность потока частиц или энергии характеризует число ионизир. частиц или энергию, проходящую через единицу поверхности в единицу времени, а флюенс (перенос) – число частиц или энергию, проходящих через единицу поверхности. **Число частиц или энергия, проходящая в единицу времени через единицу поверхности, есть плотность потока ионизирующих частиц или излучения и является характеристикой интенсивности излучения.**

$$[\varphi] = [c^{-1} \cdot m^{-2}]$$

равна плотности потока ионизирующих частиц, при котором в сферу с площадью центрального сечения $1m^2$ за $1c$ проникает одна частица.

ПЛОТНОСТЬ ПОТОКА ЭНЕРГИИ ИИ

$$\varphi_{\omega} = \frac{dF_{\omega}}{dS}$$

dF_{ω} – поток энергии ИИ, проникающего в элементарную сферу, к площади центрального сечения dS этой сферы.

$$[\varphi_{\omega}] = \left[\frac{Дж}{c \cdot m^2} \right] = \left[\frac{Вт}{m^2} \right] = \left[\frac{эВ}{c \cdot m^2} \right]$$

КАК ЖЕ МЕНЯЮТСЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИИ ?

При упругом взаимодействии:

- не изменяется природа частиц и их суммарная энергия остается постоянной до и после взаимодействия,
- происходят только распределении энергии между взаимодействующими частицами.
- Либо не изменяется энергия каждой из взаимодействующих частиц, а происходит только изменение направления их движения. *(Например, рассеяние α -частиц или протонов на ядрах, рассеяние электронов на электронах и ядрах и т.п.)*

При неупругом взаимодействии:

- не изменяется природа частиц, но их суммарная энергия после взаимодействия оказывается меньше, часть энергии затрачивается на производство какой-либо работы (нагревание системы, возбуждения атомов или молекул, излучение и др.)
- могут происходить и изменение природы частиц в результате протекания тех или иных ядерных реакций, рождения и аннигиляции частиц и т.д.

Доза излучения



Рисунок 2.10. Радиоактивные вещества накапливаются в различных частях тела



ШКАЛА РАДИОАКТИВНОГО ЗАРАЖЕНИЯ

2 мЗв
в год

Обычный радиационный фон, которому подвергаются все люди в повседневной жизни

1000 мЗв
разовая доза

Вызывает лучевую болезнь, с тошнотой и пониженным содержанием белых телец в крови, но не летальный исход

5000 мЗв
разовая доза

Половина людей, получивших такую дозу радиации, умирают в течение месяца

9 мЗв
в год

Облучение, получаемое экипажем самолета, совершающего перелет Токио — Нью-Йорк через Северный полюс

350 мЗв
на протяжении жизни

Основание для эвакуации людей после катастрофы в Чернобыле

100 мЗв
в год

Уровень, резко увеличивающий вероятность развития рака

20 мЗв
в год

Средний допустимый уровень облучения для работников атомной промышленности

1 мЗв = 0,001 Зиверт

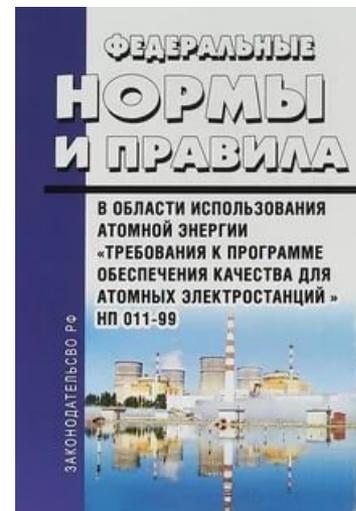
1 Зиверт единица измерения эффективной и эквивалентной доз ионизирующего излучения.

ТЕРМИНОЛОГИЯ

- Разработкой терминологии дозиметрии в международном масштабе занималась Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ).
- Принятая терминология в области радиационной безопасности и дозиметрии ионизирующих излучений основана на международных стандартах, рекомендациях Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) и Международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ).

- Единая международная система единиц (международное сокращенное наименование — SI, в русской транскрипции — СИ) принята в 1960 г. XI Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ) и уточнена на последующих ГКМВ.
- В любой стране терминология и единицы физических величин в конкретной сфере (в том числе –дозиметрии и радиационной безопасности) определяются государственными стандартами – ГОСТ.

С учетом этих ГОСТов строятся основные нормативные документы, например, «Нормы радиационной безопасности», «Санитарные правила» и др.



- Введение ГОСТ 8.417-81 изъяло из обращения все основные широко использовавшиеся ранее в области ионизирующих излучений и радиационной защиты внесистемные единицы активности и дозовых характеристик излучения.
- Среди них:
 - **кюри** для активности радионуклида в источнике,
 - **рад** для поглощенной дозы и кермы,
 - **бэр** для эквивалентной дозы,
 - **рентген** для экспозиционной дозы фотонного излучения.

Все же было разрешено применять без ограничения срока внесистемную единицу энергии электрон-вольт (эВ) и ее десятичные кратные единицы, такие, как кэВ, МэВ, ГэВ.

- На практике, выполнить эти рекомендации оказалось достаточно трудно – все учебники, методические пособия, задачки, справочники построены на старых, внесистемных единицах. На этих же единицах строятся расчеты доз и защиты. Поэтому мы в данном курсе лекций будем рассматривать как единицы системы СИ, так и внесистемные единицы.

Термин «ДОЗА» означает определенное точно отмеренное количество чего-либо

– вещества, лекарства, излучения и т.п.

(происходит от греч. dósis—порция, приём).

«ДОЗА ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ» является одним из основных понятий в радиационных исследованиях, включая радиационную биологию, радиационную экологию, радиационную гигиену, радиационную медицину, радиационный контроль и т.д.

Без использования понятия «дозы ионизирующего излучения» невозможно количественное описание каких-либо биологических эффектов ионизирующего излучения.

ДОЗИМЕТРИЯ ИИ

- самостоятельный раздел прикладной ядерной физики, в которой рассматриваются свойства ионизирующих излучений, физические величины, характеризующие поле излучения или взаимодействие излучения с веществом, а также принципы и методы определения этих величин.

Дозиметрическими называются такие физические величины, которые связаны с ожидаемым радиационным эффектом.

Доза излучения – это рассчитанная на единицу массы облученного вещества поглощенная энергия излучения

$$D = \frac{dE}{dm}$$

Единица дозы облучения получила название рентген (Р)

ФИЗИЧЕСКАЯ ДОЗА

- Доза излучения, энергия ионизирующего излучения (потоков частиц и квантов), поглощенная облучаемым веществом и рассчитанная на единицу его массы. Является мерой радиационного воздействия.
- *Доза - мера энергии, которая передана ионизирующим излучением мишени.*

Зависимость величины дозы от энергии частиц, плотности их потока и состава облучаемого вещества различна для разных видов излучения.

Например, для рентгеновского и γ -излучений доза зависит от атомного номера Z элементов, входящих в состав вещества; характер этой зависимости определяется энергией фотонов $h\nu$ (h — Планка постоянная, ν — частота электромагнитных колебаний). Для этих видов излучений доза в тяжёлых веществах больше, чем в лёгких (при одинаковых условиях облучения).

В случае нейтронов (при одинаковых условиях облучения) поглощённая доза в лёгком веществе будет выше, чем в тяжёлом.

Задачи дозиметрии ионизирующего излучения

Вид дозиметрии	Область применения	Диапазон измерений	Краткое обозначение
Индивидуальная	Повседневный радиационный контроль Аварийная дозиметрия Дозиметрия в условиях ядерной войны Дозиметрия при космических полетах Дозиметрия естественного излучения	10^{-3} — 10 бэр 1 — 1000 бэр* 10 — 1000 бэр 10^{-3} — 1000 бэр 10^{-4} — 10^{-1} бэр	И1 И2 И3 И4 И5
Клиническая	При внешнем и внутреннем лечебном облучении	1 — 10^4 рад	К
Дозиметрия в радиобиологии	При воздействии ионизирующего излучения на биологические объекты в процессе радиобиологических исследований	1 — 10^7 рад	Б
Дозиметрия в радиационной технике	Радиационная химия Лучевая стерилизация Облучение продуктов питания	10^3 — 10^8 рад $\sim 2,5 \cdot 10^6$ рад 10^3 — $5 \cdot 10^6$ рад	Т
Внутриреакторная	Измерение потоков нейтронов Измерение дозы излучения	10^7 — 10^{14} нейтрон/(см ² ·сек) 10^3 — 10^9 рад	Р

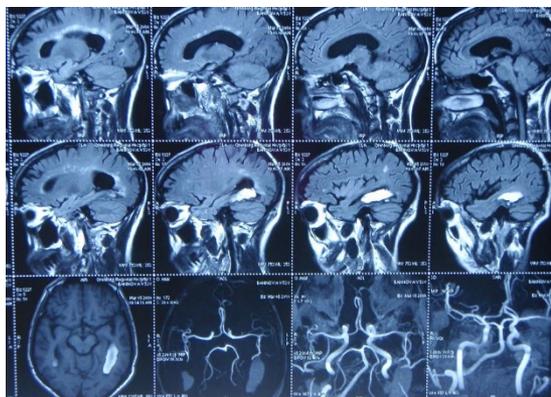
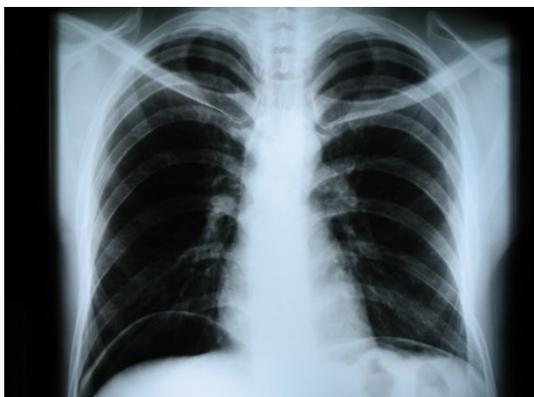
* Совещание экспертов МАГАТЭ в 1970 г. рекомендовало при авариях измерять дозу в радах отдельных компонентов излучения. Диапазон измерений, учитывая вероятность локальных облучений, должен быть расширен до 5000 рад. — Прим. ред.

Физико-химические эффекты, используемые в дозиметрии

Рабочее тело	Эффект	Измеряемый параметр	Область применения (по табл. 1)	
Газ	Ионизация	Ионизационный ток	И 1—5, К, Б, Р	
	Химические превращения	Изменение концентрации	К, Б, Т, Р	
Жидкость	Нагревание	Изменение температуры	Т, Р	
	Активация	Активность	И 2, Р	
	Засвечивание фотоэмульсии	Почернение пленки	И 1—5, К, Б	
	Термолюминесценция	Свечение термолюминесценции	И 1—5, К, Б	
	Радиофотолюминесценция	Свечение радиофотолюминесценции	И 1—4, К, Б	
	Экзоэлектронная эмиссия	Ток экзоэлектронов	—	
	Твердое тело	Деградация люминесценции	Интенсивность люминесценции	Т, Р
		Окрашивание	Пропускание света	И 3, К, Б, Т, Р
		Образование трека	Число треков	И 1—4
		Сцинтилляция	Световой поток, число сцинтилляций	И 1, К, Б
Изменение сопротивления полупроводников		Ток, напряжение	И 1—3, К, Б	

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

- 1. Сравнить дозы для флюорографии, МРТ и панорамного снимка зубов.



- 2. Определить активность 1г. $^{226}_{88}\text{Ra}$, находящегося в равновесии с дочерними продуктами распада.
 $T_{1/2}=1600$ лет.

ИСТОРИЧЕСКИЙ ЭКСКУРС

- 1895 г. – Открытие рентгеновских лучей. Рентген.
- 1896 г. – Открытие радиоактивности. Беккерель.
- 1897 г. – Открытие электрона. Томсон.
- 1911 г. – Открытие атомного ядра. Резерфорд.
- 1919 г. – Осуществление первой ядерной реакции. Резерфорд.
- 1930 г. – Запуск первого циклотрона. Лоуренс.
- 1932 г. – Открытие нейтрона. Чадвик.
- 1932 г. – Обоснование протон-нейтронной модели ядра. Гейзенберг, Иваненко.
- 1935 г. – Обоснование капельной модели ядра. Вайцзеккер.
- 1938 г. – Открытие деления ядер. Ганн, Штрассман.
- 1940 г. – Обнаружение спонтанного деления ядер. Флеров, Петржак.
– Открытие первого трансуранового элемента ($Z=93$, нептуний). Мак-Миллан, Абельсон.
- 1942 г. – Запущен первый ядерный реактор. П/р Ферми.
– Осуществлена управляемая ценная реакция деления тяжелых ядер.
- 1945 г. – Первый взрыв атомной бомбы. США в Хиросиме. Через 3 дня второй – в Нагасаки. **Только в Хиросиме сразу погибло 78 000 и были ранены и облучены 164 000 чел.**
- 1949 г. – Первый взрыв атомной бомбы в СССР.
– Обоснование оболочечной модели ядра. Гепперт-Майер, Йенсен, Хаксель, Суэсс.

ИСТОРИЧЕСКИЙ ЭКСКУРС

1952 г. – Обоснование обобщенной модели ядра. О. Бор, Моттelson, Рейнуотер.

– Первый взрыв наземного водородного (термоядерного) устройства. США.

1953 г. – Первый взрыв водородной бомбы в СССР.

1954 г. – Запуск первой атомной электростанции. Обнинск. СССР.

1956 г. – Обнаружение антиядер дейтерия. США.

1970 г. – Обнаружение антиядер гелия-3. СССР.

1975 г. – Обнаружение антиядер трития. СССР.

В пятидесятых (и последующих десятилетиях) разрабатываются мощные ускорители заряженных частиц.

- 1956 г. – Запущен синхрофазотрон в Дубне (энергия 10 Гэв, длина орбиты частиц около 200м, вес кольцевого электромагнита 40 тысяч тонн). СССР.
- 1967 г. – Построен синхротрон в Протвино (близ Серпухова). СССР. Энергия частиц 70 Гэв, длина орбиты 1.5км, вес электромагнита 22 тысячи тонн. Он и поныне остается крупнейшим в России.
- В США, Японии, Германии, а также в Европейской организации ядерных исследований (Церн, Швейцария) работают коллайдеры-ускорители на встречных пучках.
- 1983 г. – В Протвино начались работы по сооружению УНК (ускорительно-накопительный комплекс) с предполагаемой энергией частиц 3000 Гэв (или 3Тэв). Энергия частиц в самом мощном в мире ускорителе лаборатории имени Э. Ферми (ФНАЛ) в США – 1Тэв (10^{12} эв).
- Для УНК прорыли кольцевой тоннель длиной 21км и диаметром ~5м. Работы затормозились в связи с распадом СССР. В настоящ. вр. – планируется синхротрон СИЛА.

- 1984 г. – Обнаружение кластерной радиоактивности (самопроизвольное испускание тяжелыми ядрами углерода). Роуз. Джонс. Позже – испускание Ne, Mg, Si, S.
- 1994 - 2000 гг. – Синтез сверхтяжелых элементов с $Z=110, 111, 112, 114, 116, 118$ ($A=271, 272, 277, 285, 289, 293$). Германия. Россия. США.
- 2000 г. – Получение кварк-глюонной плазмы в столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер. Европейский центр ядерных исследований. Швейцария.

НАКОПЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ПО РБ :

- Уже в 1896 г. Броун и Осгоуд обнаружили азооспермию у молодых мужчин, работавших с рентгеновскими лучами (на заводах по производству рентгеновских трубок). В печати появились сведения о поражении кожи, выпадении у них волос.
- В 1902 г. Фрибен описал первый лучевой рак кожи (перед этим появились сведения о том, что X-лучи поражали клетки опухоли).
- Крупнейшие ученые, работавшие с радиоактивными веществами, подверглись воздействию излучений, которые генерировались в ходе распада ядер. С трудом спасли Беккереля, умерли от лучевой болезни Мария, Кюри, Ирен и Фредерик Жолио – Кюри. Пьер Кюри рано погиб в катастрофе, но перед смертью жаловался на характерную болезнь рук.
- В 1903 г. Альберс–Шонберг (умерший впоследствии от лучевого рака) обнаружил азооспермию у кроликов и нарушения семяродного эпителия.
- В 1903 г. Боун определил важнейшую роль поражения ядра клетки при облучении.
- В 1903 г. Лондон (русский исследователь) обнаружил смертельное действие лучей Ra (а Хейнеке X-лучей) на мышей.

НАКОПЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- В 1905 г. Хальберштадтер наблюдал атрофию яичников у облученных животных.
- В 1906 г. Бергонье и Трибондо сформулировали принцип: **“чем быстрее делятся клетки и чем менее они дифференцированы, тем они чувствительнее к радиации”**.
- К 1910 г. Было показано пагубное действие радиации на эмбриогенез.
- В 1911 г. Опубликована Лондоном первая в мире монография по радиобиологии “Радий в биологии и медицине”.
- И так, в начале 20-ого века начато интенсивное накопление качественного экспериментального материала по действию радиации на живые объекты.
- В 1922 г. Дессауэр предложил первую теорию радиобиологического эффекта, которая была развита Циммером, Ли, Тимофеевым-Ресовским и др. и нашла свое отражение в теории попадания, теории мишени в последующих десятилетиях.
- В 1925 г. Надсон и Филиппов в опытах на дрожжах показал поражение генетических структур клетки, передающееся по наследству.
- Нобелевскую премию в 1945 г. за открытие передачи по наследству радиационных дефектов в клетке получил Меллер, установивший радиационный мутагенез на дрозофилах – традиционном объекте исследований в этой области.

Различают 4 основные вида дозы ИИ:

Экспозиционная доза

Поглощенная доза

Эквивалентная доза

Эффективная доза

ЭКСПОЗИЦИОННАЯ ДОЗА

Для характеристики поля фотонного излучения, возникающего в воздушной среде, окружающей источник излучения, используется понятие экспозиционной дозы.

- **Экспозиционная доза, X ,** - количественная характеристика гамма- и рентгеновского излучения, основанная на их ионизирующем действии в воздухе - отношение полного заряда dq всех ионов одного знака, создаваемых в воздухе, при полном торможении электронов, к массе воздуха в этом объеме.

$$X = dq/dm$$

- **Внесистемная единица экспозиционной дозы - рентген (Р),** которой соответствует такое рентгеновское и гамма- излучение, которое при температуре 0°C и давлении 760 мм рт. ст. образует в 1 см³ сухого воздуха (имеющего при $\rho = 1/(4.8 \cdot 10^{-10})$ 2,08 · 10⁹ пар ионов. Эти ионы несут суммарный заряд одного знака нормальных условиях вес 0,001293 г) 2,082 · 10⁹ пар ионов (2.08 · 10⁹ ка в 1 эл.-статическую единицу (в системе СГСЭ), что в единицах работы и энергии (в системе СГС) составит около 0,114 эрг поглощённой воздухом энергии (6,77 · 10⁴ Мэв). (1 эрг = 10⁻⁷ Дж = 2,39 · 10⁻⁸ кал). При пересчёте на 1 г воздуха это составит 1,610 · 10¹² пар ионов или 87,3 эрг/г сухого воздуха.

Экспозиционная доза определяет энергетические возможности ионизирующего излучения.

Ее можно определить как часть энергии γ -излучения E_γ , преобразованную в кинетическую энергию заряженных частиц в единице массы Δm воздуха. Под энергией E_γ понимают ту часть энергии γ -излучения, которая затрачена на образование комптоновских и фотоэлектронов, электрон-позитронных пар (т.е. сопряжённая корпускулярная эмиссия) в некотором объёме воздуха массой Δm .

$$X_\gamma = \frac{E_\gamma}{\Delta m_{\text{возд}}}$$

За единицу экспозиционной дозы X в СИ принята единица кулон на килограмм (**Кл/кг**) т.е. доза, создаваемая γ -излучением, при котором сопряжённая корпускулярная эмиссия производит в 1 кг сухого атмосферного воздуха при нормальных условиях (при температуре 0°C и давлении 760 мм рт. ст.)

1 Кулон электричества положительно и отрицательно заряженных частиц ($6,24 \cdot 10^{18}$ пар ионов).

1 кулон = $3 \cdot 10^9$ ед. СГСЭ = 0,1 ед. СГСМ.

Физический эквивалент 1 Кл/кг = 33 Дж/кг (для воздуха).

- Для получения экспозиционной дозы 1 Р нужно, чтобы энергия, затраченная на ионизацию 1 см³ (или 1г) воздуха, была равна:

$$1 \text{ Р} = 7,06 \cdot 10^4 \text{ МэВ/см}^3 = 5,47 \cdot 10^7 \text{ МэВ.г} = 0,114 \text{ эрг/см}^3 = 87,7 \text{ эрг/г.}$$

- Соотношения между рентгеном и Кл/кг следующие:

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг} - \text{ точно.}$$

$$1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р} - \text{ приблизительно.}$$

Экспозиционная доза (рус.) – Exposure (англ.)

На что нужно обратить внимание в этом определении:

- 1. Экспозиционная доза – это характеристика ПОЛЯ излучения.**
- 2. Понятие экспозиционной дозы применяется только для γ - и РЕНТГЕНОВСКОГО излучения (т.е. только для электромагнитных ИИ).**
- 3. Экспозиционная доза характеризует ионизирующее действие указанных ионизирующих излучений в ВОЗДУХЕ.**

Единицы экспозиционной дозы

Единица в системе СИ	Внесистемная единица
Кулон/кг (Кл/кг) Coulomb/kg (C/kg)	Рентген (Р) Roentgen (R) За 1Р принимают такое количество γ -или рентгеновского излучения, которое создает $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов 1 см^3 атмосферного воздуха (т.е. в 0.001293 г воздуха при 0°C и давлении 760 мм. рт. ст.) Единица введена в 1928г.
$1\text{Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг.}$	

МОЩНОСТЬ ДОЗЫ

- Величина X для γ - излучения за время t действия потока квантов γ - излучения называют мощностью X^* экспозиционной дозы X . X^* характеризует интенсивность γ - излучения.

$$X^* = X/t.$$

- X^* измеряют в амперах на кг, А/кг. При использовании вне системных единиц мощность экспозиционной дозы измеряют в Р/сек или Р/час. Более дробные доли – одна тысячная и одна миллионная (мР/ч, мкР/ч).

Мощность дозы - мера мощности, при которой энергия излучения передается мишени.

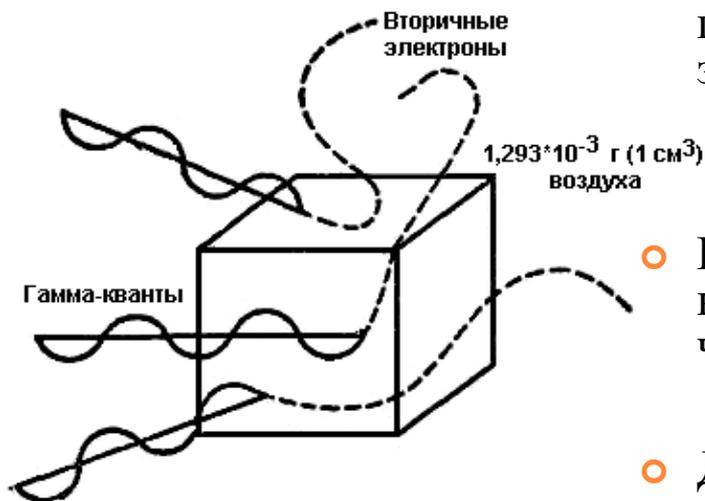


Рис. Взаимодействие γ -квантов с 1 см^3 воздуха с образованием вторичных электронов, в свою очередь создающих ионы как внутри, так и вне рассматриваемой массы воздуха.

- Линейный коэффициент ослабления моноэнергетического γ -излучения μ представляет собой сумму двух коэффициентов – коэффициента истинного поглощения (или электронного преобразования) μ_e и коэффициента μ_k , характеризующего преобразование энергии первичных γ -квантов в энергию вторичного электромагнитного излучения:

$$\mu = \mu_e + \mu_k$$

- В создании дозы участвует только та часть энергии, которая преобразовалась в энергию заряженных частиц.
- Для перехода от X_γ к D необходимо, чтобы выполнялось **условие электронного равновесия** – это такое состояние взаимодействия излучения с веществом, при котором энергия излучения, поглощенная в некотором объеме вещества, равна кинетической энергии всех ионизирующих частиц, образовавшихся в том же объеме.

Электронное равновесие может иметь место при поглощении γ -излучения неограниченно протяженной, однородной по составу средой (воздух).

Официальное использование понятия «экспозиционной дозы» прекращено с 1 января 1990 г.

Тем не менее, понятие «экспозиционная доза» и ее внесистемная единица «рентген» до сих пор продолжают довольно часто использоваться и в СМИ, и в научно-популярной, и в научной литературе, а иногда и в нормативных документах (например, в методических указаниях).

В настоящее время основной дозиметрической величиной, определяющей степень радиационного воздействия, является поглощенная доза.

ПОГЛОЩЕННАЯ ДОЗА

Доза поглощенная (D) - величина энергии ионизирующего излучения (любого вида), переданная веществу:

$$D = dE / dm,$$

где dE - средняя энергия, переданная ионизирующим излучением облучаемому веществу (теперь – не обязательно воздуху), находящемуся в элементарном объеме, а dm - масса вещества в этом элементарном объеме*.

$$\underline{1 \text{ Гр.}} = 1 \text{ Дж/кг} = 10^4 \text{ эрг/г} = \underline{100 \text{ рад.}}$$

$$1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/г} = 0,01 \text{ Дж/кг} = 0,01 \text{ Гр} = 2,388 \cdot 10^{-6} \text{ кал/г}$$

(внесистемная единица)

Поглощенная доза в 1 Гр является довольно значимой радиационной величиной и может вызвать в облученном организме ряд последствий. Но в энергетическом смысле эта величина очень мала – повышение температуры тела человека в результате воздействия этой дозы менее одной тысячной градуса.

**Элементарный объем среды – это наименьший объем среды, который воспринимается как однородный.*

ПОГЛОЩЕННАЯ ДОЗА (РУС.) – ABSORBED DOSE (АНГЛ.)

- Дозу излучения D , поглощенную веществом за время t действия потока корпускулярного ионизирующего излучения, называют мощностью поглощённой доз, D^* :

$$D^* = \frac{dD}{dt} .$$

- Мощность поглощённой дозы D^* измеряют в ваттах на килограмм (Вт/кг). В случае использования внесистемных единиц мощность поглощенной дозы измеряется в рад/с или в рад/час.

В отличие от экспозиционной дозы понятие **ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ** распространяется:

- не только на γ - и рентгеновское излучение, но и на любой другой вид ионизирующего излучения;
- не только на воздух, и на любые другие материалы.

Единицы поглощенной дозы

Единица в системе СИ	Внесистемная единица
<p>Дж/кг joule/kg (J/kg)</p> <p>- единица, получившая специальное наименование</p> <p>Грей (Гр) Gray (Gy)</p> <p>Единица введена в 1975г.</p>	<p>рад rad</p> <p>(от англ. Radiation absorbed dose)</p> <p>1 рад = 100 эрг/г.</p> <p>Единица введена в 1953г.</p>
1Гр = 100 рад.	



Louis Harold Gray
1905-1965

Льюис Харольд Грей (Грэй)

–известный английский физик, работавший в области радиационной физики, радиобиологии и радиационной медицины.

Дал определение поглощённой дозы.

Внес большой вклад в становление дозиметрии ионизирующих излучений.

Подробно исследовал кислородный эффект в радиобиологии (1952).

В его честь в 1975г. названа единица измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения в Международной системе единиц (СИ) –грей (Гр).

КЕРМА И СЕМА

- Взаимодействие излучения с веществом состоит из двух стадий: преобразование энергии и вклад энергии. Этим стадиями соответствуют две группы дозиметрических величин.

Термин керма относят к кинетической энергии заряженных частиц, высвобожденных незаряженными частицами.

$$K = dE_k / dm$$

Термин сема определяет потерю энергии заряженными частицами в столкновениях с атомными электронами. В потерю энергии входит и потеря на преодоление связи электронов.

КЕРМА

- **Количество кинетической энергии, переданное заряженным частицам, которые образовались в единице массы облучаемой среды под действием ионизирующего излучения, называется кермой.**

Керма: $K = dE_k/dm$ –

мера поглощенной дозы косвенно ионизирующих излучений

*(название KERMA - аббревиатура английской фразы **KINETIC ENERGY RELEASED PER UNIT MASS** – выделение кинетической энергии на единицу массы). Керма (K) представляет собой сумму первоначальных кинетических энергий dE_k всех заряженных частиц, появившихся в элементарном объеме вещества в результате воздействия на него косвенно ионизирующих излучений, отнесенную к массе вещества в этом объеме dm .*

Единицей кермы в системе СИ является джоуль на килограмм (дж/кг или Грей). Внесистемная единица кермы – рад.

- Для γ -излучения керма выражает отношение суммарной кинетической энергии электронов и позитронов, образовавшихся под действием γ -квантов в некотором объеме вещества, к массе вещества в этом объеме, т.е.

$$K = \frac{\Delta E_\gamma}{\Delta m} = \Phi E_\gamma \frac{\mu}{\rho} \frac{\text{эрг}}{\text{г}}$$

где Φ - поток энергии γ -квантов, эрг/см²; $\mu'_e = \mu/\rho$ - массовый коэффициент передачи энергии, см²/г.

Следовательно, **под кермой можно понимать величину, которая характеризует первую степень поглощения γ -квантов в веществе.**

- В случае спектра незаряженных частиц Φ_E , керма вычисляется следующим образом:

$$K = \int \Phi_E E \frac{\mu}{\rho} dE$$

Мощность кермы, K , есть отношение dK к dt , где dK - приращение кермы за время dt :

$$K^* = dK/dt$$

Единица: Дж кг⁻¹ с⁻¹ (Гр с⁻¹).

СЕМА

- Сема - отношение dE_c к dm , где dE_c — потери энергии заряженных частиц, за исключением вторичных электронов, в столкновении с электронами в веществе массой dm :

$$C = dE_c / dm.$$

Единица: Дж кг⁻¹(Гр).

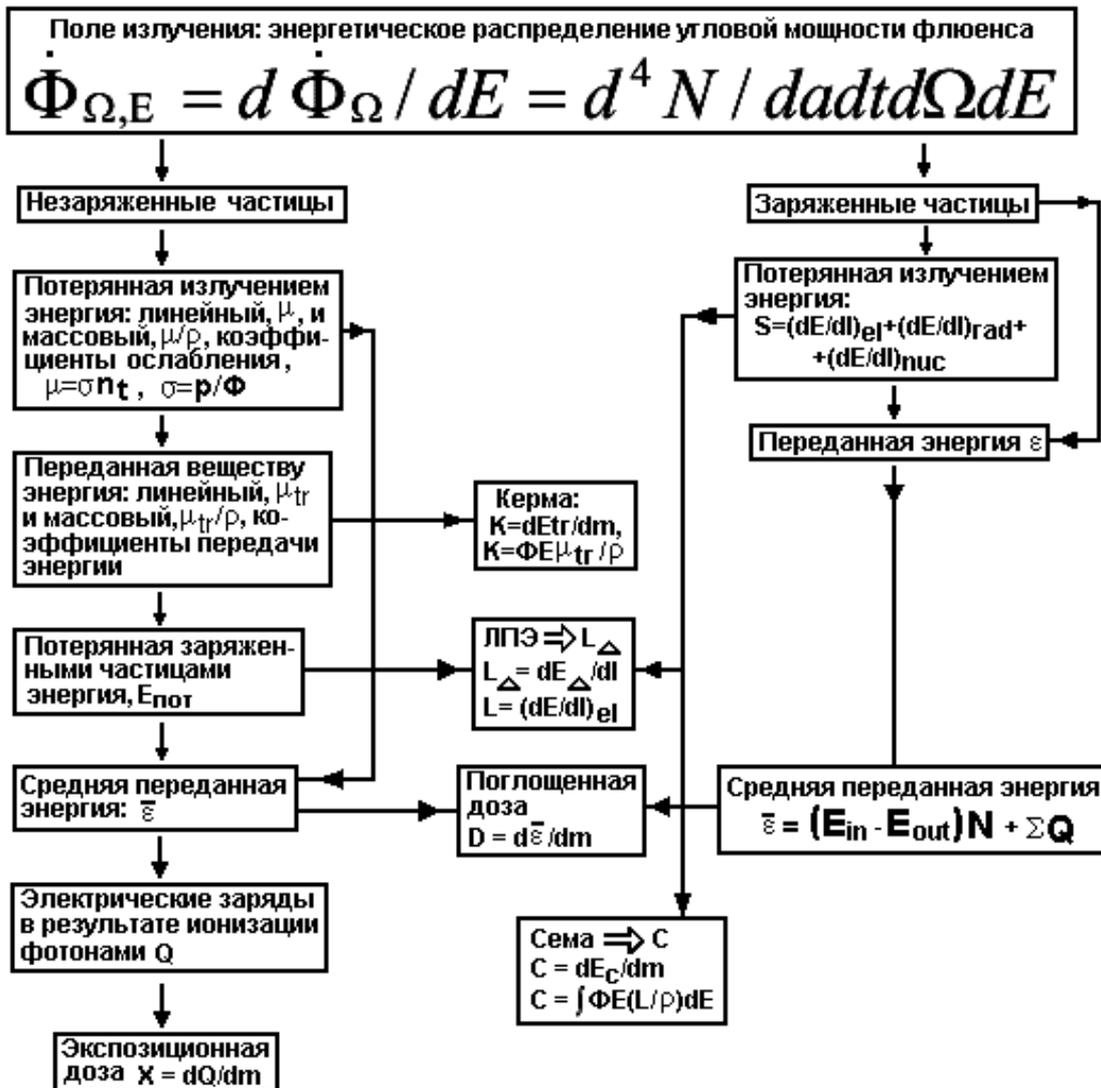
Наименование сема есть абривиатура **Converted Energy Per Unit Mass**.

- Сема может быть определена с помощью энергетического распределения флюенса заряженных частиц, Φ_E . В это распределение не должны включаться вторичные электроны.

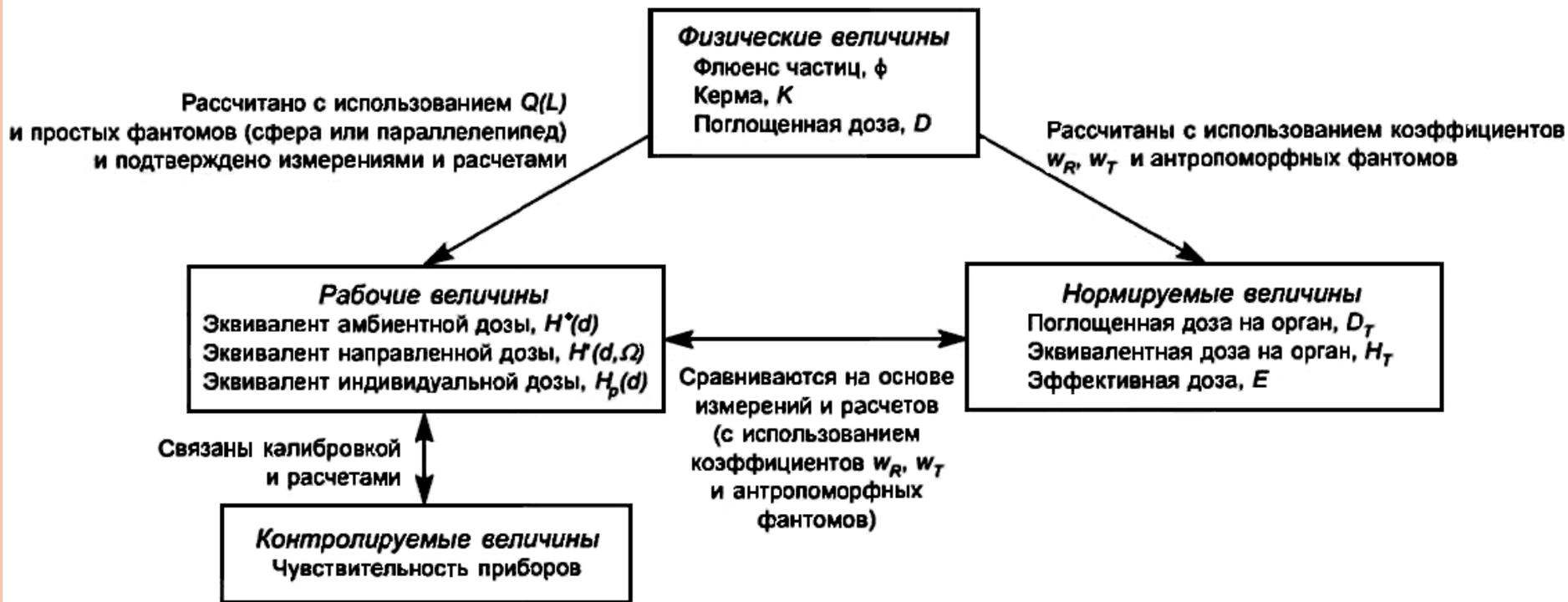
$$C = \int \Phi_E \frac{S_{el}}{\rho} dE = \int \Phi_E \frac{L_{\infty}}{\rho} dE$$

- где S_{el} - *линейная электронная тормозная способность*, L_{∞} - *неограниченная линейная передача энергии*.
- Величина сема может быть использована как приближенная величина поглощенной дозы заряженных частиц. Такое имеет место в условиях равновесия вторичных электронов и пренебрежения радиационными потерями и упругими ядерными взаимодействиями.

СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ БАЗИСНЫХ ВЕЛИЧИН ДОЗИМЕТРИИ.



Связи между различными дозиметрическими величинами



Соотношение дозиметрических величин для целей радиологической защиты

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ДОЗА (РУС.) –EQUIVALENT DOSE (АНГЛ.)

Биологический объект – сложное образование, как по элементному составу, так и структуре. Поэтому введенного ранее «физического» понятия поглощенной дозы здесь недостаточно – нельзя делить поглощенную энергию излучения на массу всего организма, необходимо вычлнить дозу, полученную конкретным органом, обладающим конкретной массой. В связи с чем в радиационной защите прежде всего **вводится понятие дозы в органе или биологической ткани.**

- **Доза в органе или ткани (D_T)** - средняя поглощенная доза в определенном органе или ткани человеческого тела:

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int_{m_T} D^* dm$$

где m_T - масса органа или ткани,

D - поглощенная доза в элементе массы dm .

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ДОЗА

Введение эквивалентной дозы позволяет учесть радиобиологический эффект – зависимость эффективности радиационного воздействия от типа излучения (точнее – от плотности ионизации, вызываемой этим типом излучения). Чтобы учесть качественные различия излучений, их биологическая эффективность сравнивается с биологической эффективностью рентгеновского излучения, имеющего энергию кванта 250 КэВ.

Доза эквивалентная ($H_{T,R}$) - поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения, W_R : $H_{T,R} = W_R * D_{T,R}$

где $D_{T,R}$ - средняя поглощенная доза в органе или ткани Т, а W_R - взвешивающий коэффициент для излучения R.

В системе СИ $1 \text{ Зв (зиверт)} = 1 \text{ Дж} * \text{кг}$

При одновременном воздействии на человека нескольких различных видов излучения с различными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучения.

$$H_T = \sum_R H_{T,R}$$

Единицы эквивалентной дозы

Единица в системе СИ	Внесистемная единица
<p>Дж/кг joule/kg (J/kg) - единица, получившая специальное наименование Зиверт (Зв) sievert (Sv)</p> <p>Единица введена в 1979г.</p>	<p>бэр (аббревиатура от <i>биологический эквивалент рентгена</i>)</p> <p>рэм (аббревиатура от <i>рентген-эквивалент медицинский</i>)</p> <p>rem (от англ. roentgen equivalent man)</p> <p>Единица введена в 1956г.</p>
1Зв = 100 бэр.	

1 Зв—это эквивалентная доза любого вида ИИ, которая создает такой же биологический эффект, что и поглощенная доза в 1Гр рентгеновского или гамма-излучения.

Эквивалентная доза, равная 1 Зв, создается при поглощенной дозе, равной $1/W_R$ Гр.

Например, для α -излучения эквивалентная доза, равная 1Зв, создается при поглощенной дозе $1/20\text{Гр}=0,05\text{Гр}$.



Rolf Maximilian Sievert
1896-1966

Рольф Максимилиан Зиверт – известный шведский физик, работавший в области радиационной физики, медицинской физики, радиационной защиты и радиобиологии. *Изучал воздействие радиационного излучения на биологические организмы.*

В 1964 основал Международную ассоциацию по радиационной защите (International Radiation Protection Association)

Один из основоположников дозиметрии ИИ (особенно при его использовании в медицине в диагностических и лечебных целях) и радиационной защиты.

Внес большой вклад в изучение биологических эффектов ионизирующего излучения, в частности малых доз хронического облучения.

В его честь в 1979г. названа единица измерения эквивалентной дозы и эффективной дозы ИИ в Международной системе единиц (СИ) – зиверт (Зв).

ЗАЧЕМ ВВЕДЕНО ПОНЯТИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ?