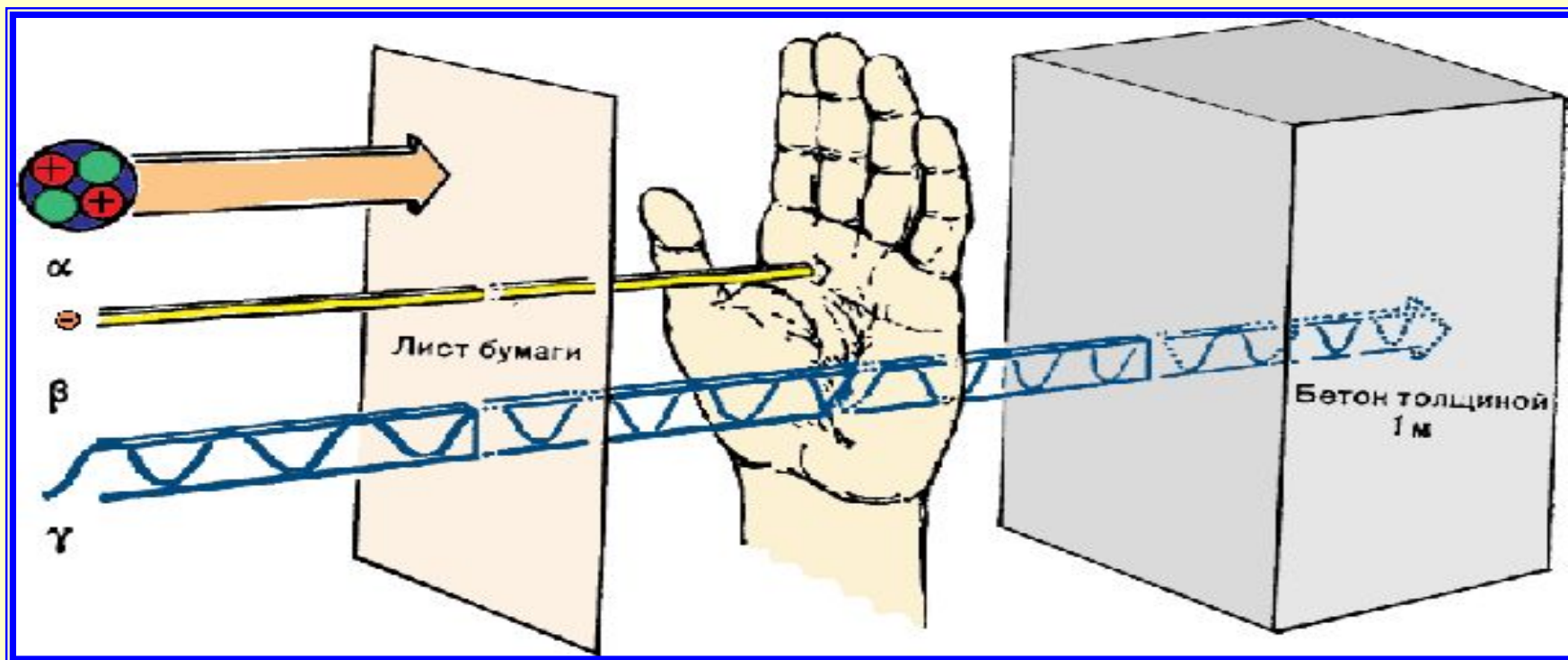


Лекция

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ
ЛЕКТОР ПРОФЕССОР БАБАЛИЕВ С.У.



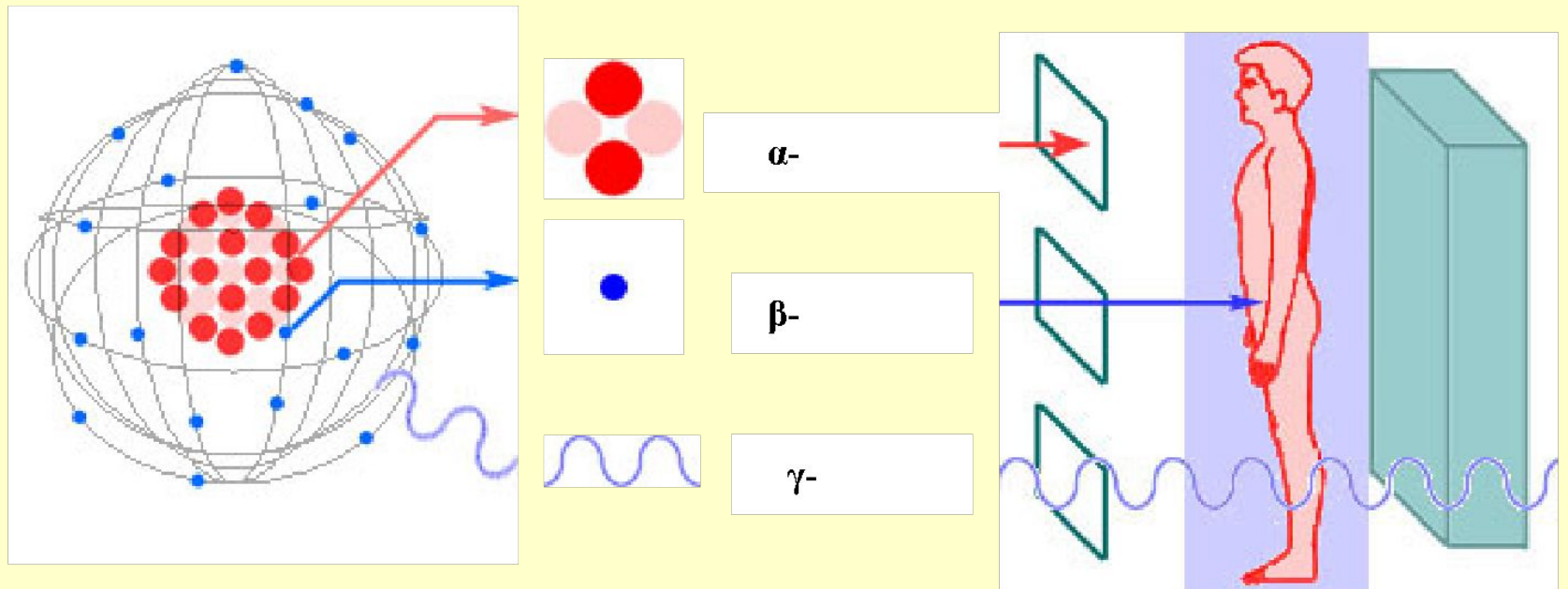
БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

- Механизм взаимодействия с веществом γ -излучения сильно отличается от механизма действия α - и β -радиации.
- **Альфа- и бета- излучения**, обладающие электрическим зарядом и вызывающие ионизацию и возбуждение атомов окружающей среды, **относят к непосредственно ионизирующим излучениям.**
- Гамма-фотоны не имеют заряда и не обладают непосредственным ионизирующим действием. **Ионизацию вызывают вторичные электроны, которые возникают в среде поглощения - косвенно ионизирующее излучение.**
- **Альфа-частица, имея большую массу (4 а.е.м.) и заряд (2+), обладает огромной ионизирующей способностью** (удельная ионизация - до 3000 пар ионов на 1 мм пробега в воздухе) и, взаимодействуя с веществом, быстро теряет энергию. Ее проникающая способность очень мала. Длина пробега альфа-частиц в воздухе составляет несколько сантиметров, а лист бумаги является для большинства из них непреодолимой преградой.
- **Поэтому как источник внешнего облучения альфа-частицы опасности не представляют и при работе с закрытыми источниками альфа-излучения экранирования не требуется.**

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ (продолжение)

- **Бета-излучение обладает значительно меньшей ионизирующей способностью** (удельная ионизация составляет несколько десятков - сотен пар ионов на 1 мм пробега в воздухе).
- Длина пробега бета-частиц в воздухе измеряется уже метрами.
- **Эффективную защиту от бета-частиц обеспечит алюминиевая пластинка толщиной не менее 6 мм.**
- **Итак, альфа-частица, имеющая массу и заряд больше, чем бета-частица, обладает более высокой ионизирующей способностью. Альфа- и бета-излучения наиболее опасны при попадании внутрь организма.**
- **Гамма-излучение характеризуется большой проникающей способностью, оно распространяется со скоростью света.**
- В плотных средах гамма-излучение проходит толщу в десятки и даже сотни сантиметров. С учетом фактора геометрического рассеяния **реальный радиус действия гамма-лучей составляет 200—300 м от источника.**
- Гамма-излучение может задержать лишь толстая бетонная плита или свинцовые пластины толщиной до 5-20 см.

ТРИ ВИДА ИЗЛУЧЕНИЙ И ИХ ПРОНИКАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ



РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

- **Особенность биологического действия ионизирующих излучений** состоит в том, что любой живой объект может быть убит этим излучением.
- **Под радиочувствительностью понимают** степень реакции клеток, тканей, органов и организмов на воздействие ионизирующего излучения.
- **Доза облучения** - мера количественной оценки радиочувствительности, при которой возникает регистрируемый эффект.
- **Видовая радиочувствительность** - свойственная каждому биологическому объекту (клеткам, тканям, органам или организмам) своя мера восприимчивости к воздействию ионизирующей радиации.
- **Индивидуальная радиочувствительность** сильно варьируется в пределах одного вида, к тому же зависит от возраста и пола. Кроме того, даже в одном организме различные клетки и ткани значительно различаются по радиочувствительности. Наряду с радиочувствительными (кроветворная система, эпителий слизистой тонкого кишечника) имеются более радиостойчивые ткани (мышечная, нервная, костная). **Их принято называть радиорезистентными.**
- Ткани, относящиеся к радиорезистентным по непосредственным лучевым реакциям, могут оказаться весьма радиочувствительными по отдаленным последствиям воздействия излучения.

ЛЕТАЛЬНЫЕ И ПОЛУЛЕТАЛЬНЫЕ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ

Вид	ЛД ₅₀ (50%)	ЛД ₁₀₀ (100%)
Морская свинка	1,5...3,0	4,0...6,0
Овца	1,5...4,0	5,5...7,5
Ягнята до 3 месяцев	1,5...3,0	6,0
Крупный рогатый скот	1,6...5,5	6,5
Телята до 5 месяцев	2,0...5,5	8,0
Осел	2,0...5,5	7,5
Коза	2,5	—
Верблюд	2,5...4,0	6,0
Человек	2,5...5,5	4,0...6,0
Обезьяна	2,5...6,0	8,0
Свинья	2,5...3,0	4,5
Поросята до 2 месяцев	2,5...6,0	—
Лошадь	3,5...4,0	5,0...6,5
Собака	2,0...3,5	4,0...5,0
Шенки до 3 мес	4,5...7,0	8,0...10,5
Мышь	4,6...7,5	7,0
Крыса	5,0...7,0	10,0
Кошка	5,0...7,5	8,0
Летучая мышь	5,0...8,0	9,5
Хомяк	5,5...8,0	—
Полевка	6,0...9,0	9,0...10,0
Суслик	6,0...9,5	9,0...11,5
Сурок	8,0...10,0	11,0...12,0
Кролик	10,0...1	14,0
Птицы, рыбы	8,0...20,0	—
Насекомые	10,0...100,0	—
Змеи	80,0...200,0	—

- Каждому биологическому виду свойственна своя радио-чувствительность.
- Чем выше уровень биологического развития организма, тем выше его радио-чувствительность (за некоторым исключением) - закон радио-чувствительности.
- Одним из критериев оценки биологической эффективности излучений является гибель организмов.
- Обязательным требованием к используемому критерию является его строгая количественная связь с дозой облучения.
- Доза ионизирующей радиации, при которой гибнет половина организмов, называется полулетальной (LD₅₀).
- Минимальная доза, смертельная для всех облученных организмов, называется летальной (LD₁₀₀).

ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕГО МОЩНОСТЬ

- Биологическое действие рентгеновского и ядерных излучений на организм обусловлено ионизацией и возбуждением атомов и молекул биологической среды, на которые излучения расходуют свою энергию.
- В результате этого взаимодействия живому организму передается определенное количество энергии.
- Вещества, способные создавать ионизирующие излучения, различаются **активностью (А)**, т.е. числом радиоактивных превращений в единицу времени. **В системе СИ за единицу активности принято одно ядерное превращение в секунду (распад/с). Эта единица получила название беккерель (Бк).**
- Часть поступающего излучения пронизывает облучаемый объект (без поглощения) и действия на него не оказывает.
- **Поэтому основная физическая величина, характеризующая действие излучения на организм, находится в прямой зависимости от количества поглощенной энергии.**
- Для измерения количества поглощенной энергии введено понятие – доза излучения. Это величина энергии, поглощенной в единице объема (массы) облучаемого вещества.

ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕГО МОЩНОСТЬ (продолжение)

- Доза ионизирующего излучения (D) - это характеристика количества излучения и мера его воздействия на облучаемую среду или объекты окружающей среды.
- Доза излучения. Это величина энергии, поглощенной в единице объема (массы) облучаемого вещества. Таким образом: **доза ионизирующего излучения - это характеристика количества излучения и мера его воздействия на облучаемую среду или объекты окружающей среды.** Различают три дозы облучения: поглощённая, эквивалентная и экспозиционная.
- Поглощенная доза (D) – энергия ионизирующего излучения, поглощенная облучаемым телом (тканями организма), в пересчете на единицу массы: $D = dE/dm$, где E – энергия излучения, m – масса объекта. В Международной системе единиц (СИ) поглощенная доза выражается в джоулях на килограмм массы - Дж/кг. Эта величина получила название грей (Гр). Иногда используют другую, внесистемную единицу измерения поглощенной дозы - рад, причем $1\text{ рад} = 10^{-2}\text{ Гр}$. Различают дозу в воздухе, на поверхности (кожная доза) и в глубине облучаемого объекта (глубинная доза), очаговую и интегральную (общую поглощенную) дозы

ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕГО МОЩНОСТЬ (продолжение)

- **Экспозиционная доза D_0** характеризует ионизирующую способность излучений в воздухе. От экспозиционной дозы с помощью соответствующих коэффициентов переходят к дозе, поглощенной в объекте. Установленная в СИ единица измерения экспозиционной дозы - кулон, отнесенный к килограмму (Кл кг^{-1}). На практике и в научной литературе распространена другая, внесистемная, единица экспозиционной дозы - рентген (Р). Экспозиционная доза - специфическая величина в дозиметрии и используется только для оценки внешнего рентгеновского или γ -излучения.
- **Эквивалентная доза.**
- Установлено, что **биологическое действие одинаковых доз различного вида излучений на организм неодинаково.**
- Биологический эффект облучения при прочих равных условиях различен для разных видов излучения прежде всего потому, что он определяется не только величиной поглощенной энергии, но и характером распределения этой энергии в облучаемом объекте.
- Разные виды излучений создают ионы с неодинаковым пространственным распределением.

ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕГО МОЩНОСТЬ (продолжение)

- Например, α -частица, обладая значительными величинами размера, массы, заряда и энергии, по сравнению с β -частицей характеризуется большими значениями линейной плотности ионизации (ЛПИ) и **создает на единице пути в ткани гораздо больше ионов.**
- При одной и той же поглощенной энергии (поглощенной дозе) биологический эффект будет несоизмеримо больше при более высокой плотности ионизации.
- В связи с тем, что одинаковая поглощённая доза различных видов ионизирующего излучения вызывает в единице массы биологической ткани различное биологическое действие, введено понятие **эквивалентной дозы.**
- **Эквивалентная доза излучения $H_{T,R}$** - это поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения, т.е. коэффициент, отражающий способность данного вида излучения повреждать ткани: $H_{T,R} = D_{T,R} W_R$

ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕГО МОЩНОСТЬ (продолжение)

- W_R - взвешивающий коэффициент для излучения R; $D_{T,R}$ - средняя поглощенная доза в органе или ткани (Т), т.к. эквивалентная доза излучения рассчитывается для “средней” ткани организма человека.
- Для определения дозы ионизирующего излучения с учетом биологического эффекта на практике используют регламентированный показатель, который называют взвешивающим коэффициентом (W_R).
- Взвешивающие коэффициенты для расчета эквивалентной дозы отдельных видов излучения регламентируются Нормами радиационной безопасности - 99
- **Эквивалентную дозу в СИ** выражают в зивертах (Зв). Внесистемная единица измерения - бэр (биологический эквивалент рада), $1 \text{ бэр} = 0,013 \text{ Зв}$
- Один зиверт равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на средний взвешивающий коэффициент составляет 1 Дж/кг.
- В случаях, когда на объект воздействуют разные виды излучений с различными взвешивающими коэффициентами, эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучения

ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕГО МОЩНОСТЬ (продолжение)

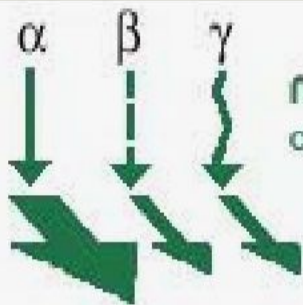
- **Эффективная эквивалентная доза.** Различные органы и ткани живых организмов обладают разной чувствительностью к воздействию ионизирующих излучений.
- Например, при одной и той же поглощенной дозе вероятность возникновения рака легких больше, чем щитовидной железы, а при облучении половых желез более вероятны генетические отклонения.
- Для оценки биологического эффекта (или меры риска) при облучении органов, тканей и организма в целом с учетом влияния разных видов излучения и радио-чувствительности отдельных органов вводят эффективную эквивалентную дозу (E).
- **Эффективная эквивалентная доза** для организма в целом может быть определена как сумма произведений эквивалентной дозы в отдельных органах и тканях на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного органа или ткани (коэффициент радиационного риска).
- Коэффициенты радиационного риска регламентируются НРБ-99

ЗНАЧЕНИЯ ВЗВЕШИВАЮЩИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ (коэффициентов радиационного риска) по НРБ-99

Органы и ткани	W_T , Зв/Гр	Органы и ткани	W_T , Зв/Гр
Гонады	0,20	Печень	0,05
Костный мозг	0,12	Пищевод	0,05
(красный) толстый кишечник	0,12	Щитовидная железа	0,05
Легкие	0,12	Кожа	0,01
Желудок	0,12	Клетки костных поверхностей	0,01
Мочевой пузырь	0,05		
Грудная железа	0,05	Остальное*	0,05

ДОЗЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

- **Эффективная коллективная доза** является суммой индивидуальных эффективных доз. Единица измерения эффективной коллективной дозы - человеко-зиверт (чел.-Зв).

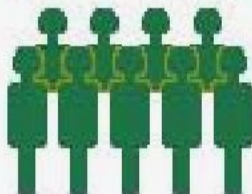


Поглощенная доза – энергия ионизирующего излучения, поглощенная облучаемым телом (тканями организма), в пересчете на единицу массы

Эквивалентная доза – поглощенная доза, умноженная на коэффициент, отражающий способность данного вида излучения повреждать ткани организма



Эффективная эквивалентная доза – эквивалентная доза, умноженная на коэффициент, учитывающий разную чувствительность различных тканей к облучению



Коллективная эффективная эквивалентная доза – эффективная эквивалентная доза, полученная группой людей от какого-либо источника радиации



Полная коллективная эффективная эквивалентная доза – коллективная эффективная эквивалентная доза, которую получают поколения людей от какого-либо источника за все время его дальнейшего существования

МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ)

- **МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ)** разработана с целью замены сложной совокупности систем единиц и отдельных внесистемных единиц, сложившейся на основе метрической системы мер, и для упрощения пользования единицами.
- Наличие ряда значительного числа внесистемных единиц, неудобства, связанные с пересчетом при переходе от одной системы единиц к другой, требовало унификации единиц измерений в международном масштабе.
- Требовалась единая система единиц физических величин, практически удобная и охватывающая различные области измерений. При этом она должна была сохранить принцип *когерентности* (равенство единице коэффициента пропорциональности в уравнениях связи между физическими величинами).
- В 1954 г. X Генеральная конференция по мерам и весам установила шесть основных единиц (метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин и свеча) практической системы единиц.
- Система, основанная на утвержденных в 1954 г. шести основных единицах, была названа Международной системой единиц, сокращенно СИ (*SI* - начальные буквы французского наименования *Systeme International* была принята в 1960 году. Был утвержден перечень шести основных, двух дополнительных и первый список двадцати семи производных единиц, а также приставки для образования кратных и дольных единиц.
- На всех языках мира эта система получила сокращенное название СИ, а её единицы называются единицами СИ.

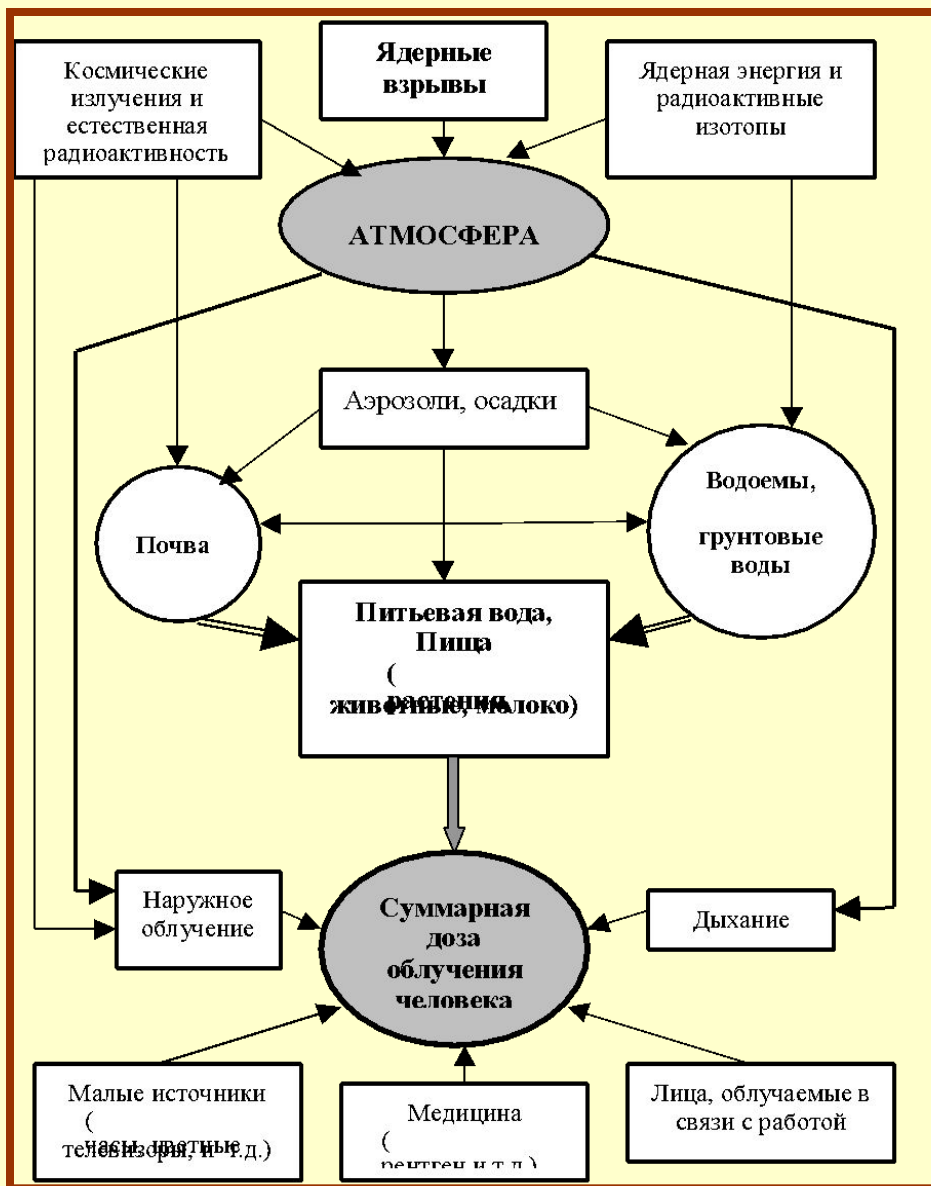
Основные физические величины, используемые в радиационной биологии, и их единицы

Физическая величина	Единица, ее наименование, обозначение	
	Внесистемная (старая)	Международная (СИ) и русская (СИ)
Активность нуклида в радиоактивном источнике	Кюри (Ci, Ки)	Беккерель (Bq, Бк)
Экспозиционная доза излучения	Рентген (R, Р)	Кулон на килограмм (Кл/кг)
Мощность экспозиционной дозы излучения	Рентген в секунду (R/s, Р/с)	Ампер на килограмм (А/kg, А/кг)
Поглощенная доза излучения	Рад (rad, рад)	Грей (Gr, Гр)
Мощность поглощенной дозы излучения	Рад в секунду (rad/s, рад/с)	Грей в секунду (Gr/s, Гр/с)
Интегральная доза излучения	Рад-грамм (rad g, рад г)	Джоуль (J, Дж)
Эквивалентная доза излучения	Бэр (rem, бэр)	Зиверт (Sv, Зв)
Мощность эквивалентной дозы излучения	Бэр в секунду (rem/s, бэр/с)	Зиверт в секунду (Sv/s, Зв/с)

НОРМЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НРБ-99

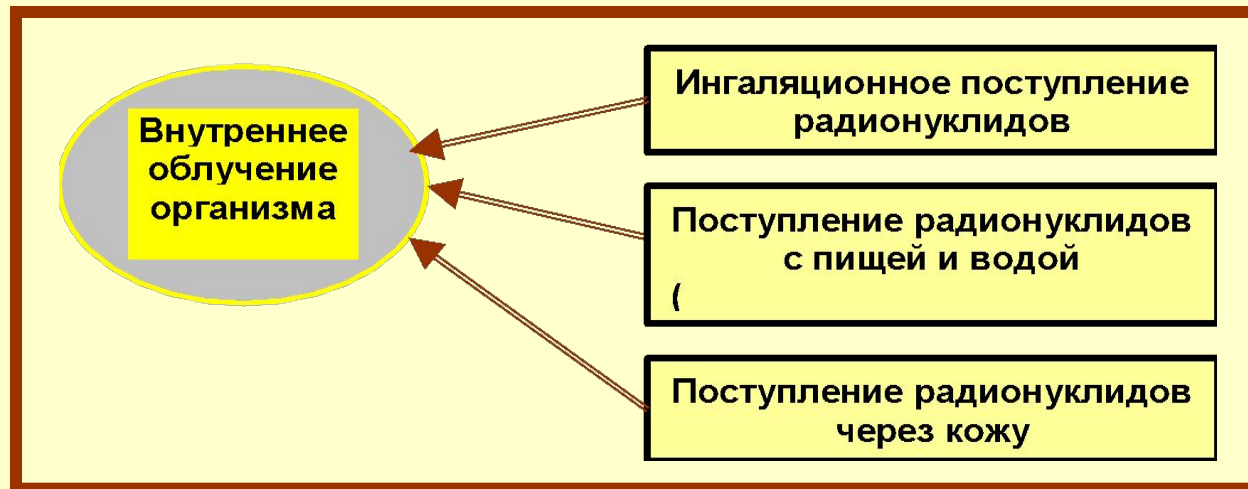
- **НРБ-99 применяются** для обеспечения безопасности человека во всех условиях воздействия на него ионизирующего излучения искусственного или природного происхождения.
- **Нормы распространяются на следующие виды воздействия ионизирующего излучения** на человека: - в условиях нормальной эксплуатации техногенных источников излучения; - в результате радиационной аварии; - от природных источников излучения; - при медицинском облучении.
- **Нормы радиационной безопасности относятся только к ионизирующему излучению.** В Нормах учтено, что ионизирующее излучение является одним из множества источников риска для здоровья человека, и что риски, связанные с воздействием излучения, не должны соотноситься только с выгодами от его использования, но их следует сопоставлять и с рисками нерадиационного происхождения.
- **Основу системы радиационной безопасности, сформулированной в данных Нормах,** составляют современные международные научные рекомендации, опыт стран, достигших высокого уровня радиационной защиты населения, и отечественный опыт. Данные мировой науки показывают, что соблюдение Международных основных норм безопасности, которые легли в основу Норм, надежно гарантирует безопасность работающих с источниками излучения и всего населения.
- **НРБ устанавливают:** требования к ограничению техногенного облучения в контролируемых условиях, требования к защите от природного облучения в производственных условиях, требования к ограничению облучения населения, требования по ограничению облучения населения в условиях радиационной аварии, требования к контролю за выполнением Норм, значения допустимых уровней радиационного воздействия и т.д.

Источники формирования суммарной дозы облучения человека



- Все живое на Земле находится под воздействием ионизирующих излучений.
- Следует различать две компоненты радиационного фона: природный фон и порожденный деятельностью человека.
- Природный фон обусловлен космическим излучением и природными радиоактивными веществами
- Техногенный фон обуславливается работой АЭС, урановых рудников, использованием радиоизотопов в промышленности и т.д.
- Суммарное воздействие искусственных источников ионизирующего излучения на человека складывается из внешнего облучения от источников излучения, находящихся вне человека, и внутреннего облучения от источников излучения, попадающих в организм человека с воздухом, водой, пищей или другими путями.
- Величина дозы внешнего облучения человека зависит от целого ряда факторов: вида и энергии излучения радионуклида, количества и активности нуклида в почве, распределения нуклидов в слое почвы, времени нахождения человека на открытой территории и т.д.

ПУТИ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ОРГАНИЗМ



- Наиболее важным и потенциально опасным является ингаляционное поступление радионуклидов: этому способствует огромная дыхательная поверхность альвеол (легкие, бронхи), площадь которой $\sim 100\text{м}^2$ (в 50 раз больше, чем поверхность кожи).
- Второй по значимости путь – поступление радионуклидов с пищей и водой. В организм поступает лишь некоторая часть попавших в кишечник нуклидов, большая часть проходит “транзитом” и удаляется из кишечника.
- В связи с тем, что спустя некоторое время после аварии подавляющее количество радионуклидов оказывается локализованным в верхнем слое почвы, главным источником внутреннего облучения сельскохозяйственных животных становятся продукты питания, полученные с загрязненных территорий.
- Радионуклиды в составе жидких и газообразных соединений проникают через кожу людей и животных достаточно быстро, а иногда и в значительных количествах.

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА

№	Органы и ткани	Радионуклиды
1	Щитовидная железа	^{129}I , ^{131}I , ^{99}Tc
2	Печень	^{137}Cs , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{239}Pu , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{241}Pu
3	Легкие	^{85}Kr , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{222}Rn , ^{233}U , ^{133}Xe , ^{135}Xe
4	Почки	^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{106}Ru
5	Кости	^{140}Ba , ^{14}C , ^{154}Er , ^{32}P , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{147}Pr , ^{226}Ra , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{234}Th , ^{233}U , ^{90}Y , ^{65}Zn
6	Мышцы	^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{154}Er , ^{155}Er , ^{40}K , ^{42}K
7	Яичники	^{140}Ba , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{58}Co , ^{131}I , ^{85}Kr , ^{239}Pu , ^{40}K , ^{42}K , ^{106}Ru , ^{90}Y , ^{65}Zn
8	Селезенка	^{210}Po
9	Кожа	^{35}S

- По способности накапливать радионуклиды основные органы располагаются следующим образом: щитовидная железа (максимум), печень, кишечник, почки, скелет, мышцы
- По скорости выведения радионуклидов органы располагаются несколько иначе: щитовидная железа (максимум), печень, почки, селезенка, кожа, мышцы, скелет
- Под «критическими органами» понимают жизненно важные органы или системы, первыми выходящие из строя
- Между величиной поглощенной дозы в организме и средней продолжительностью жизни существует строгая зависимость.
- Эта зависимость обусловлена различиями в радиочувствительности отдельных жизненно важных (критических) органов или систем.

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА

Порог детерминированных эффектов у взрослых людей для наиболее радиочувствительных тканей (НРБ-99)		
Ткань и эффект	Порог	
	Доза одного кратковр. облучения, Зв	Мощность дозы ежегодного или протяженного облучения, Зв/год
Семенники Временная стерильность	0,15	0,4
Постоянная стерильность	3,5-6,0	2,0
Яичники Стерильность	2,5-6,0	>0,2
Хрусталики Обнаруживаемые помутнения	0,5-2,0	>0,1
Нарушение зрения (катаракта)	5,0	>0,15
Красный костный мозг Угнетение кроветворения	0,5	>0,4

- Три основные радиационные синдрома:
- костномозговой (кроветворный),
- желудочно-кишечный
- церебральный
- Они развиваются вследствие поражения и выхода из строя соответствующих критических систем организма.
- Ступенчатый характер отмирания, обусловленный дозой облучения. обнаружен для млекопитающих разных видов, земноводных (лягушек), насекомых и червей.

Характеристика основных радионуклидов – загрязнителей агроэкосистем

- Поступления радиоактивных веществ во внешнюю среду происходят различными путями.
- Не все из образующихся радиоактивных элементов в одинаковой степени представляют опасность для функционирования экосистем.
- Это зависит от физических, химических и биологических свойств радионуклидов, попадающих в окружающую среду.
- Величина периода полураспада выпавших радиоактивных веществ определяет характер загрязнения местности.

Излучение	Радиоактивные изотопы
α	U^{235} ; U^{236} ; U^{238} ; Pu^{239} ; Pu^{241} ; Ra^{223} ; Ra^{226} ; Th^{232} ; Np^{237}
β	Sr^{89} ; Sr^{90} ; Y^{91} ; Sr^{95} ; Pr^{117}
γ	Co^{57} ; Co^{60} ; Zn^{63} ; Zr^{95} ; Nb^{95} ; Ru^{103} ; Ru^{106} ; Sb^{125} ; I^{131} ; Cs^{134} ; Cs^{137} ; Ce^{141} ; Ce^{144}

Характеристика некоторых радионуклидов

Радио-нуклид	Период полураспада	Тип распада
Естественные и космогенные		
^3H (водород)	12,3 года	β^-
^{14}C (углерод)	5760 лет	β^-
^{32}P (фосфор)	14,3 суток	β^-
^{226}Ra (протактиний)	1620 лет	α, γ
^{222}Rn (родон)	3,82	α
^{238}U (уран)	$4,47 \times 10^9$ лет	α, γ
^{40}K (уран)	$1,27 \times 10^9$ лет	β^-, γ
Техногенные: осколочные		
^{90}Sr (стронций)	29 лет	β^-
^{90}Y (иттрий)	64 часа	β^-
^{131}I (йод)	8,1 суток	β^-, γ
^{137}Cs (цезий)	30 лет	β^-, γ
^{134}Cs (цезий)	2,1 лет	β^-, γ
Техногенные: трансурановые		
^{239}Pu (плутоний)	24110 лет	α
^{241}Pu (плутоний)	14,3	β^-

Характеристика некоторых радионуклидов (продолжение)

- Более 2/3 из всех радионуклидов, которые образуются в результате аварий и испытания ядерного оружия, характеризуются коротким периодом полураспада и поэтому практически **не представляют опасности для долгосрочного загрязнения агроэкосистем.**
- С течением времени их доля быстро уменьшается, и в составе загрязнений начинают преобладать долгоживущие радионуклиды, такие как цезий-137 (^{137}Cs) с периодом полураспада ($T_{1/2}$) 30 лет и стронций-90 (^{90}Sr) с периодом полураспада 29 лет.
- ^{137}Cs является источником β - и γ - излучений, а ^{90}Sr – источником только β -излучения, следовательно ^{137}Cs может быть источником как внешнего, так и внутреннего облучения, а ^{90}Sr – в основном источником внутреннего облучения.
- При распаде ^{137}Cs образуется одна β -частица, а при распаде ^{90}Sr и его дочернего радионуклида ^{90}Y – две, причем энергии этих частиц (0,55 и 2,27 МэВ соответственно) больше, чем при распаде ^{137}Cs (0,51 МэВ). Именно это делает ^{90}Sr более опасным при внутреннем облучении.