

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования «Витебский государственный
университет имени П.М. Машерова»
Кафедра анатомии и физиологии

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Методические рекомендации

*Витебск
ВГУ имени П.М. Машерова
2020*

УДК 614.876:539.16:355.587(075.8)
ББК 51.26я73+22.383я73+68.9я73
Р15

Печатается по решению научно-методического совета учреждения образования «Витебский государственный университет имени П.М. Машерова». Протокол № 5 от 21.05.2020.

Составители: профессор кафедры радиологии и биофизики УО «ВГАВМ», доктор биологических наук **А.Д. Наумов**; доцент кафедры анатомии и физиологии ВГУ имени П.М. Машерова, кандидат медицинских наук **Г.И. Наумова**

Рецензенты:

доцент кафедры неврологии и нейрохирургии УО «ВГМУ»,
кандидат медицинских наук *А.А. Пашков*;
заведующий кафедрой анатомии и физиологии ВГУ имени П.М. Машерова,
кандидат биологических наук, доцент *И.И. Ефременко*

Р15 **Радиационная безопасность** : методические рекомендации /
сост.: А.Д. Наумов, Г.И. Наумова. – Витебск : ВГУ имени
П.М. Машерова, 2020. – 75 с.

Методические рекомендации предназначены для подготовки студентов по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности человека». Будущий специалист должен овладеть знаниями по проживанию в условиях радиоактивного загрязнения, изучить характеристики опасных и вредных факторов ионизирующего излучения, физиологическое воздействие их на человека, основные принципы, средства и способы защиты от чрезвычайных ситуаций различного характера.

УДК 614.876:539.16:355.587(075.8)
ББК 51.26я73+22.383я73+68.9я73

© ВГУ имени П.М. Машерова, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Радиоактивность и свойства ионизирующих излучений	5
Дозиметрические приборы, их классификация и краткая характеристика	10
Основные источники облучения человека	18
Биологическое действие ионизирующих излучений	32
Клинические проявления действия ионизирующих излучений на человека	44
Авария на Чернобыльской АЭС и радиационная безопасность населения	60
Литература	73

ВВЕДЕНИЕ

Радиационная безопасность является важным элементом системы национальной безопасности и подразумевает состояние защищенности настоящего и будущих поколений от вредного влияния радиации. Необходимость изучения данной дисциплины это государственная задача. Законодательство Республики Беларусь устанавливает правовые основы функционирования системы радиационной безопасности, обращения с источниками ионизирующего излучения и направлено на предотвращение и минимизацию вредного воздействия ионизирующего излучения на здоровье человека и окружающую среду.

Радиационная безопасность выступает составной частью обеспечения жизни и здоровья населения в современных условиях. Она подразумевает соблюдение норм, правил, требований к различным категориям граждан, как в повседневной жизни, так и при работе на объектах представляющих опасность. Для обеспечения безопасности граждан современному специалисту необходимо иметь теоретическую и практическую подготовку по данной дисциплине.

В соответствии с типовой программой для высших учебных заведений студентам всех специальностей читается дисциплина «Безопасность жизнедеятельности человека», в рамках которой выделен раздел «Радиационная безопасность».

Данное издание позволяет будущему специалисту познакомиться с ключевыми вопросами данного раздела. Материал, представленный в методических материалах, позволит разобраться с теоретическими и практическими вопросами. Издание предназначено для широкого круга читателей.

Материалы, предложенные в методических рекомендациях, помогут при подготовке к практическим и семинарским занятиям, и будут способствовать формированию у специалистов прочных знаний и умений в области радиационной безопасности, способствовать успешному применению их в практической работе.

РАДИОАКТИВНОСТЬ И СВОЙСТВА ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Радиоактивность – свойство ядер одних химических элементов самопроизвольно превращаться в ядра атомов других химических элементов с испусканием ионизирующего (радиоактивного) излучения. Можно сказать, что радиоактивность – это самопроизвольное превращение неустойчивых ядер в более устойчивые, при котором изменяется заряд, масса, либо энергия ядра и испускается ионизирующее излучение. При этом дополнительно происходит выделение энергии в виде тепла.

Радиоактивность обусловлена процессами, происходящими в ядре атома и повлиять на эти процессы внешними условиями (изменением температуры, давления, химическими реакциями, электрическими и магнитными полями и др.) не удастся. Распад ядер атомов обусловлен их строением и внутренним состоянием. Стабильность или устойчивость ядра атома определяется соотношением числа протонов и нейтронов. У большинства стабильных изотопов легких элементов это соотношение составляет 1:1 или близко к нему, в тоже время у урана (радиоактивен) оно составляет 1:1,6. Более устойчивыми считаются ядра с четным числом нейтронов, значительная часть радиоактивных ядер имеет нечетное число нейтронов и протонов.

При условном «недостатке, избытке» нейтронов или протонов, для конкретного элемента, ядра оказываются неустойчивыми и возможен их радиоактивный распад.

Радиоактивность как явление может происходить в природе, то есть в естественных условиях. Такое явление получило название естественная радиоактивность. Если явление радиоактивности регистрируется в веществах, полученных искусственным путем и не встречающихся в природе, то это явление получило название искусственная радиоактивность.

По своей природе радиоактивные излучения оказались неоднородными.

Э. Резерфорд в 1900 году установил, что часть радиоактивного излучения отклоняется в магнитном поле подобно катодным лучам – потоку электронов. А. Беккерель определил, что отношение заряда этих частиц к их массе (E/m) такое же, как и у электронов, движущихся с большой скоростью. Стало ясно, что эта часть радиоактивного излучения, названная β -излучением, представляет собой поток электронов. Тогда же Э. Резерфорд отметил, что часть излучения, хотя и очень слабо, отклоняется магнитным полем в направлении, противоположном β -излучению. Эта часть излучения была названа α -излучением.

А. Виллард в 1900 году обнаружил, что примерно 0,01% (по интенсивности) радиоактивного излучения не отклоняется в магнитном поле и

способно проникать через любые преграды намного легче, чем даже рентгеновские лучи. Этот вид излучения был назван γ -лучами; позже оказалось, что они представляют собой кванты (порции) электромагнитного излучения (электромагнитные волны).

Названия видов радиоактивных излучений были предложены по первым буквам греческого алфавита (α , β , γ).

Основные виды радиоактивных излучений и их характеристика

Радиоактивное излучение по природе неоднородно и представлено двумя группами: корпускулярными и электромагнитными.

Радиоактивными корпускулярными излучениями являются протоны, нейтроны, альфа-частицы, бета-частицы (электроны и позитроны), нейтрино (антинейтрино), осколки ядер и др. (табл. 1).

Таблица 1

Виды радиоактивных излучений

Корпускулярные (частицы)	Электромагнитные (кванты, фотоны)
Альфа-частицы (α , ${}^4_2\alpha$) – ядра атома гелия Бета-частицы (β^- , β^+) – электроны (β^-) или позитроны (β^+) Нейтроны (${}_0^1n$) Протоны (${}_1^1p$) Нейтрино ($\bar{\nu}$) и антинейтрино (ν) Мезоны (π^+ , π^- , π^0). Осколки ядер тяжелых элементов	Гамма-излучение (γ) – электромагнитные волны ($\leq 10^{-6}$ мкм)

Электромагнитные излучения представлены радиоактивным γ -излучением и ионизирующим рентгеновским излучением (не радиоактивное), которое может быть тормозным и характеристическим. Однако это деление излучений на корпускулярные и электромагнитные несколько условно, так как фотон является в одинаковой мере квантом энергии, проявляющим волновые свойства, и частицей. В 1924 году Луи де Бройль обосновал, что электрон может проявлять корпускулярные и волновые свойства. Двойственность природы микрочастиц в дальнейшем была подтверждена экспериментально.

Для характеристики свойств радиоактивных излучений используют следующие параметры: скорость, энергия и ее спектр, пробег, проникающая способность, ионизация и ее плотность и др. (табл. 2).

К основным видам радиоактивного излучения относят α -, β - и γ -излучения.

Альфа-излучение – поток альфа-частиц. Альфа-частицы – это дважды ионизированные атомы гелия или ядра атомов гелия. Состоят они из двух протонов и двух нейтронов, имеют положительный двойной заряд и массу равную четырем (4,003 а. е. м. – сумма массы двух протонов и двух нейтронов). Обозначаются альфа-частицы символом ${}^4_2\alpha$ или символом ${}^4_2\text{He}$ (в ядерных реакциях). Альфа-частицы появляются при радиоактивном α -распаде ядер. Изотопы, распадающиеся по α -распаду, называются α -активными.

Таблица 2
Сравнительная таблица с характеристиками основных видов излучений

Характеристика	Альфа излучение	Нейтронное излучение	Бета излучение	Гамма излучение	Рентгеновское излучение
излучаются	два протона и два нейтрона	нейтроны	электроны или позитроны	энергия в виде фотонов	энергия в виде фотонов
проникающая способность	низкая	высокая	средняя	высокая	высокая
облучение от источника	до 22 см	километры	до 25 м	сотни метров	сотни метров
скорость излучения	24 000 км/с	40 000 км/с	298 000 км/с	300 000 км/с	300 000 км/с
ионизация, пар на 1 см пробега	30 000	от 3000 до 5000	от 40 до 150	от 3 до 5	от 3 до 5
биологическое действие радиации	высокое	высокое	среднее	низкое	низкое

Альфа-частицы имеют ядерное происхождение. Из ядра вылетают со скоростью 14 тыс. км/с – 24 тыс. км/с. Альфа-частицы – тяжелые частицы ($m = 4,003$ а. е. м.), летят прямолинейно и имеют энергию от 2 до 11 МэВ. Для конкретного радиоизотопа энергия α -частиц постоянная, поэтому такой спектр по энергии носит название моноэнергетический (монохроматический). В воздухе пробег α -частиц составляет (в зависимости от их скорости и энергии) от 2 до 11 см (максимум – 22,4 см), в биологических тканях 5–100 мкм (в среднем – 50-70 мкм), а в алюминии – 0,01 мм.

Пробегом называется путь, пройденный частицей в веществе до ее полной остановки.

Имея значительную массу и энергию, α -частицы вызывают большую ионизацию атомов и молекул среды. В воздухе на 1 см пути α -частицы образуют 100–250 тыс. пар ионов (+ и -) или 3000–4000 пар ионов на 1 мкм пробега в биологических тканях. У α -частиц наибольшая по сравнению с другими видами излучений плотность ионизации. Причем к концу пробега α -частицы плотность ионизации резко возрастает.

Плотность ионизации определяется числом пар ионов, образующихся на единицу длины пути частицы.

Альфа-частицы вследствие малой проникающей способности полностью задерживаются листом бумаги, спецодеждой и роговым слоем эпидермиса. Поэтому внешнее облучение от α -источников излучения практически не создает опасности для биологического объекта. Наиболее опасны α -излучатели, если они попадают внутрь организма. Растратив энергию на ионизацию и возбуждение атомов и молекул и потеряв скорость, α -частицы захватывают два свободных электрона из окружающей среды и становятся атомами гелия.

Бета-излучение – поток β -частиц. Бета-частицы представлены электронами или позитронами, испускаемыми ядрами атомов при их β -распаде. Бета-частицы обозначаются символом β^- или e^- (электроны), β^+ или e^+ (позитроны). Физическая характеристика электронов (β -частиц) ядерного происхождения (масса, заряд, устойчивость) такая же, что и у электронов атомной оболочки. Позитроны отличаются от электронов только наличием положительного заряда.

Бета-частицы испытывают рассеивание на электронах и ядрах облучаемого вещества. При этом они теряют свою энергию, ионизируют и возбуждают атомы, вызывают тормозное рентгеновское излучение.

Скорость полета β -частиц в вакууме составляет от 87 тыс. км/с до 298 тыс. км/с, т.е. приближается к скорости света. Бета-частицы имеют значительную энергию: мягкое β -излучение от 0,015–0,5 МэВ и жесткое – до 3-12 МэВ. Спектр энергетический у β -частиц сплошной или непрерывный, так как энергия излученных частиц изменяется от 0 до E_{\max} . Покидая ядро распадающегося атома, β -частицы имеют разную энергию, что объясняется одновременно вылетом из ядра и другой частицы – нейтрино (антинейтрино), уносящей часть энергии ядра.

Нейтрино (ν) – элементарная электронейтральная частица, имеющая массу покоя (масса нейтрино меньше 0, 0005 массы электрона), движется со скоростью света и обладает большой проникающей способностью. Ее очень трудно зарегистрировать. Экспериментально нейтрино была обнаружена в 1956 году американскими физиками Ф. Рейнсом и К. Коуэном. Нейтрино и антинейтрино для живых организмов опасности не представляют, так как они практически не взаимодействуют с веществом.

Длина пути пробега β -частиц зависит от их энергии. В воздухе может составлять десятки сантиметров, несколько метров (максимально до 25 м), в биологических тканях в среднем – 10 мм. Например, пробег β -частиц с энергией 5 МэВ в воздухе составляет 22,3 м. Путь пробега частиц извилист, так как они, имея малую массу и отрицательный заряд, легко отклоняются в электронном облаке встречных атомов и под действием электрического и магнитного полей изменяют направление движения. В воздухе на 1 мкм пути образуют 50-100 пар ионов. Отдав энергию на процессы

ионизации и возбуждения атомов и потеряв скорость, β -частицы (электроны) становятся «свободными» электронами и могут присоединяться к атомам вещества или участвовать в рекомбинации ионов. Защитой от β -частиц могут служить материалы, состоящие из элементов с малым порядковым номером: оконное стекло, органическое стекло и плексиглас толщиной 0,5 см, алюминий – 3 мм и др.

Так как массы выбрасываемых электрона, позитрона, нейтрино и антинейтрино крайне малы по сравнению с массой протонов и нейтронов, то массовое число атома можно считать неизменным.

Гамма-излучение (кванты, фотоны) – коротковолновое (длина волны $\leq 10^{-6}$ мкм) электромагнитное излучение. Природа γ -излучения аналогична природе рентгеновских, ультрафиолетовых, инфракрасных лучей, видимого света (γ -лучи обладают меньшей длиной волны, большей частотой колебания и более высокой энергией). Фотоны существуют только в движении, их масса покоя равна нулю. Массу движущегося фотона можно определить, исходя из его кинетической энергии по формуле: $E = mc^2$. При энергии γ -кванта равной 1 МэВ масса фотона составляет 0,001 а.е.м.

Гамма-кванты имеют ядерное происхождение (за исключением аннигиляционного γ -излучения, которое образуется в электронных оболочках атома). При α - и β -распаде появившиеся дочерние ядра могут иметь избыток энергии (дочерние ядра возбуждены), и эта энергия мгновенно высвечивается и покидает ядро в виде γ -квантов. Они лишены массы покоя, в электрическом и магнитном полях не отклоняются и имеют большую проникающую способность. Распространяются от источника прямолинейно и во все стороны со скоростью света ($3 \cdot 10^5$ км/с).

Чем меньше длина волны и больше частота колебаний излучения, тем больше его энергия и проникающая способность.

Энергия гамма-квантов может составлять от нескольких кэВ до 2-3 МэВ и редко – 5-6 МэВ, поэтому различают мягкое и жесткое γ -излучение. Гамма-излучатели имеют иногда моноэнергетический спектр, чаще – линейчатый спектр (набор квантов различной энергии для каждого изотопа постоянен).

Пробег гамма-квантов в воздухе составляет 100-150 м (в литературных источниках – до 600 м). Обладают высокой проникающей способностью. Биологические объекты γ -кванты проходят насквозь. Ионизационная способность их низкая – до 3000 пар ионов на всем пути движения в воздухе. Гамма-кванты могут вызывать вторичную ионизацию, чем, наряду с большой проникающей способностью, объясняется их опасность для биологических объектов. Они представляют основную опасность как источник внешнего облучения. После взаимодействия со средой γ -кванты рассеиваются и прекращают свое существование.

Рентгеновское излучение – электромагнитные волны с длиной волны $10^{-8} - 10^{-1}$ мкм, занимающие спектральную область между гамма- и ультра-

трафиолетовым излучением. Отличаются от γ -квантов не только характеристикой волны, но и своим происхождением, так как образуются в атомах, а не в ядрах элементов. Рентгеновское излучение относится к ионизирующему излучению и по биологическому действию близко к γ -излучению.

Рентгеновское излучение возникает при переходе электронов с внешних на внутренние оболочки атома (электронный захват, внутренняя конверсия, переход атомов в невозбужденное состояние) – характеристическое рентгеновское излучение. А также при торможении электронов в электрическом поле ядер атомов вещества – тормозное рентгеновское излучение. Рентгеновское излучение генерируется и в рентгеновских установках рентгеновскими трубками.

Протонное излучение – это поток протонов, составляющих основу космического излучения, а также наблюдаемых при ядерных взрывах. Их пробег в воздухе и проникающая способность занимают промежуточное положение между α - и β -излучением.

Нейтронное излучение – поток нейтронов, наблюдаемых при ядерных взрывах, особенно нейтронных боеприпасов и работе ядерного реактора. Последствия его воздействия на окружающую среду зависят от начальной энергии нейтрона, которая может меняться в пределах 0,025–300 МэВ.

ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ И РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ, ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ И КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Основной задачей дозиметрии является обнаружение и оценка степени опасности ионизирующих излучений для населения в различных условиях радиационной обстановки.

Дозиметрия – это определение дозы (количества энергии ИИ) или ее мощности с помощью дозиметрических приборов (табл. 3).

С помощью дозиметрических приборов осуществляются:

- обнаружение и измерение мощности экспозиционной и поглощенной дозы излучения для обеспечения жизнедеятельности населения;
- измерение активности радиоактивных веществ, плотности потока излучений; удельной, объемной, поверхностной активности различных объектов для определения необходимости и полноты проведения дезактивации и санитарной обработки;
- измерение экспозиционной и поглощенной доз облучения в целях определения работоспособности и жизнеспособности населения в радиационном отношении;
- лабораторное измерение степени загрязнения радиоактивными веществами продуктов питания, воды и т.д.

Таблица 3

Дозиметрические величины и единицы их измерения

Системные единицы (СИ)	Внесистемные единицы	Соотношения между единицами
<i>Экспозиционная доза</i>		
Кулон на килограмм (Кл/кг)	рентген (Р)	$1 \text{ Кл/кг} \approx 3,876 \times 10^3 \text{ Р}$
<i>Поглощенная доза</i>		
Грей (Гр)	рад	$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$
<i>Эквивалентная доза</i>		
Зиверт (Зв)	бэр	$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$
<i>Эффективная доза</i>		
Зиверт (Зв)	бэр	$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$

Классификация дозиметрических приборов осуществляется по их назначению, типу датчиков, измерению вида излучения, характеру электрических сигналов, преобразуемых схемой прибора.

Основными узлами приборов являются детекторы излучений, служащие для обнаружения излучений; электрическая схема преобразования импульсов; измерительные или регистрирующие устройства; источники тока.

Почти все современные дозиметрические приборы работают на основе ионизационного метода.

В основе работы газоразрядных детекторов лежит ионизация вещества под действием радиоактивного излучения, поэтому их еще называют **ионизационными**.

Простейший детектор такого типа – *ионизационная камера* (рис. 1) представляет собой плоский конденсатор, внутренний объем которого заполнен газом.

Попавшая в рабочий объем заряженная частица ионизирует молекулы газа. К обкладкам конденсатора приложено постоянное напряжение, поэтому возникающие электроны и ионы создают кратковременный ток – *импульс*, который на сопротивлении нагрузки превращается в импульс напряжения. Чем больше энергия частицы, тем больше пар ионов она создаст, и тем больше будет амплитуда выходного импульса. Регистрация γ -квантов возможна благодаря тому, что при их взаимодействии с газом возникают *вторичные* электроны, которые появляются в результате фотоэффекта, комптоновского рассеяния и рождения пар. Фактически это бета-частицы, им передается вся или часть энергии γ -квантов.

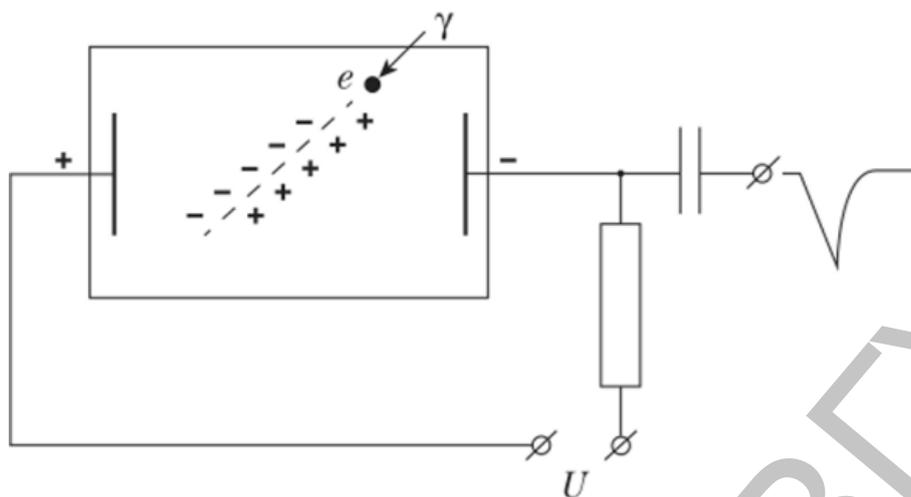


Рис. 1. Устройство ионизационной камеры

Достоинства ионизационной камеры – наличие энергетического разрешения, простота и надежность, недостаток – малая величина электрического сигнала на выходе. Этот недостаток можно устранить, повышая напряжение на обкладках камеры. При определенном напряжении кинетическая энергия каждого движущегося к аноду электрона оказывается достаточной для ударной ионизации молекулы газа, встретившейся на его пути. Таким образом, вместо одного электрона к аноду движутся уже два. В результате последовательного рождения новых заряженных частиц возникает *электронно-ионная лавина*. При этом заряд, собираемый на обкладках, может увеличиться в $10^2 - 10^5$ раз, что зависит от величины напряжения и вида газа. Такой механизм образования выходного сигнала называют *газовым усилением*. Сам же детектор называют *пропорциональным счетчиком*, в силу того, что амплитуда выходного импульса несет информацию об энергии частицы.

Классификация приборов для измерения и контроля ионизирующих излучений

В задачах радиационного контроля используют три основных типа приборов: спектрометры, радиометры и дозиметры.

Спектрометры дают наиболее полную информацию об излучении. Наиболее распространены спектрометры для измерения спектров γ -излучения. В них используют полупроводниковые или сцинтилляционные детекторы, обладающие энергетическим разрешением. Спектрометры позволяют проводить качественный и количественный анализ содержания радионуклидов в образце, то есть определение состава радионуклидов и нахождение их активностей. Задача обработки спектров обычно возлагается на персональный компьютер.

При измерениях β - или α -излучения, в силу их низкой проникающей способности, вклад в регистрируемое излучение дает слой образца, обращенный к детектору. Прохождению излучения не должны мешать стенки

используемого сосуда и входного окна детектора. Влияние стенок можно вообще исключить, растворяя пробу в жидком сцинтилляторе.

Измерение спектров β -излучения чаще всего проводят с использованием сцинтилляционных детекторов на основе пластиковых сцинтилляторов. Именно такой метод используется в отечественном спектрометре МКС-АТ1315 (рис. 2). Для повышения чувствительности измерений исследуемые образцы подвергают термическому концентрированию (до частичного озоления). Жидкие образцы (вода, молоко) пропускают через волокнистый катионит, который после высушивания используют в качестве пробы.



Рис. 2. γ - β -спектрометр МКС-АТ1315

Наиболее сложны α -спектрометры (рис. 3). В силу очень низкой проникающей способности α -излучения измерения обычно производят в вакуумной камере с использованием полупроводникового детектора. Определение состава радионуклидов возможно на «тонких» образцах, получаемых методом электролитического осаждения на специальные подложки.

Более простая задача – определение суммарной активности, которое возможно и для «толстых» образцов. Обычно их получают путем истирания, термического или химического концентрирования.

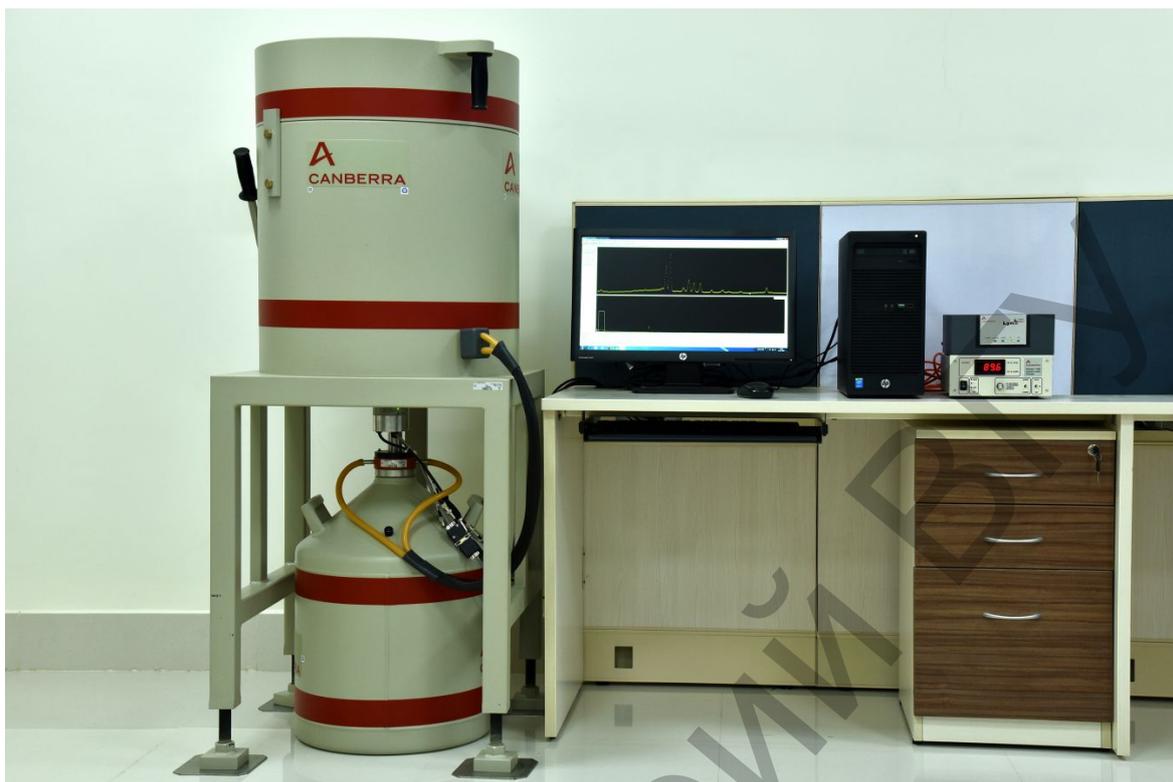


Рис. 3. Альфа-спектрометр

Основное назначение *радиометров* – измерения активности и удельной (объемной) активности источников излучения. Наиболее распространены радиометры для радионуклидов, испускающих гамма-излучение.

В простейших радиометрах активность определялась на основе подсчета всех импульсов детектора за вычетом фона, с учетом геометрии измерений. Однако во многих задачах необходимо, чтобы радиометр обладал избирательными (селективными) свойствами, то есть реагировал на излучения определенного радионуклида. Селективность обеспечивается электронными схемами, отбирающими сигналы детектора только с определенными значениями амплитуды, и микропроцессорным блоком обработки. Современные радиометры, такие как РКГ-АТ1320 (рис. 3), фактически представляют собой усеченный вариант спектрометра.



Рис. 4. Внешний вид радиометра РКГ-АТ1320

Счетчики излучений человека (СИЧ), предназначенные для измерения активности радионуклидов цезия-137 в теле человека, также можно отнести к классу радиометров. В их составе – кресло для человека с несколькими сцинтилляционными детекторами для различных частей тела. Показания прибора позволяют оценить дозу внутреннего облучения. СИЧ для измерения содержания стронция-90 – значительно более сложный прибор. В мире эксплуатируется лишь несколько подобных установок. Одна из них создана в Беларуси (рис. 5).



Рис. 5. Спектрометр излучения человека СКГ-АТ1316

Дозиметры предназначены для оценки эквивалентной или эффективной дозы излучения. Простейшие из них рассчитаны только на фотонное излучение: гамма и рентгеновское. Обычно они строятся на основе недорогих счетчиков Гейгера-Мюллера, сигналы которых не несут информацию об энергии фотонов. Зависимость поглощенной дозы от энергии фотонов учитывается установкой перед детекторами специальных корректирующих фильтров с определенной зависимостью ослабления интенсивности прошедшего излучения в зависимости от его энергии. Некоторые дозиметры, например современный прибор МКС-АТ6130 (рис.6), позволяют определять величину плотности потока β -излучения с загрязненной поверхности.



Рис. 6. Дозиметр – радиометр МКС-АТ6130

В этом режиме крышка с фильтром, установленная на специальном шарнире, откидывается. Отметим, что измерение плотности потока традиционно относится к задачам радиометрии, потому что такие приборы называются дозиметрами-радиометрами.

Заслуживает упоминания еще один комбинированный прибор – радиометр-дозиметр МКС-01 Советник (рис. 7).



Рис. 7. Радиометр-дозиметр МКС-01 Советник

В нем используется сцинтилляционный детектор большого объема (196 см³) и оригинальные алгоритмы функционирования и обработки информации.

В режиме дозиметра он обладает значительно более высокой, чем у простейших приборов, чувствительностью, что позволяет достигнуть 10 % статистической погрешности измерения всего за 2-3 секунды. Поэтому с его помощью можно производить эффективный контроль однородности партий продукции. Как радиометр, прибор особенно удобен для прижизненной радиометрии скота. В названии любого прибора первые три буквы несут информацию о его назначении, остальные знаки – о предприятии изготовителе и номере разработки. Расшифровка первых букв названия для наиболее распространенных приборов представлена в табл. 4.

Таблица 4

Значения букв в названиях приборов

<i>Первая буква</i>		<i>Вторая буква</i>		<i>Третья буква</i>	
<i>Д</i>	<i>дозиметры</i>	<i>Р</i>	<i>мощность экспозиционной дозы</i>	<i>Б</i>	<i>бета-излучение</i>
<i>Р</i>	<i>радиометры</i>	<i>Б</i>	<i>мощность эквивалентной дозы</i>	<i>Г</i>	<i>гамма-излучение</i>
<i>С</i>	<i>спектрометры</i>	<i>У</i>	<i>удельная активность радионуклида</i>	<i>Д</i>	<i>рентгеновское излучение</i>
<i>М</i>	<i>комбинированные</i>	<i>К</i>	<i>две и более физические величины</i>	<i>С</i>	<i>смешанное излучение</i>

Учитывая сказанное, можно определить, например, что название РКГАТ1320 означает радиометр, измеряющий две или более физических величины, характеризующих гамма-излучение. Прибор выпускается предприятием АТОМТЕХ.

Дозиметрический контроль – это система мероприятий, организуемых для контроля радиоактивного облучения населения и определения степени радиоактивного загрязнения техники, производственного оборудования, продовольствия, воды и т.д.

Дозиметрический контроль включает контроль облучения и контроль радиоактивного загрязнения.

Контроль облучения проводится с целью своевременного получения данных о поглощенных дозах населения при проведении спасательных работ. По данным контроля устанавливается факт внешнего воздействия ионизирующих излучений, оценивается работоспособность людей и определяются их радиационные поражения с целью определения необходимости лечения в медицинских учреждениях. Контроль облучения в свою очередь подразделяется на групповой и индивидуальный.

Индивидуальный контроль проводится с целью получения данных о дозах облучения каждого человека (с помощью индивидуального дозиметра ИД-11), определения степени внутреннего радиоактивного загрязнения. Каждому выдается индивидуальный дозиметр.

Групповой контроль проводится с целью получения данных о средних дозах облучения групп населения, находящихся в одинаковых условиях и определения их категорий трудоспособности. 1-2 дозиметра выдаются на группу в 14-20 чел. В зависимости от полученной дозы и продолжительности облучения устанавливаются следующие категории трудоспособности: трудоспособность полная, трудоспособность сохранена, трудоспособность ограничена, трудоспособность существенно ограничена.

Учет полученных доз ведется в индивидуальной карточке учета доз облучения и в журнале контроля облучения (дозы записываются нарастающим итогом).

Контроль радиоактивного загрязнения проводится для определения степени радиоактивного загрязнения людей (кожных покровов и одежды), техники, транспорта, оборудования и других материальных средств. Этот контроль проводится, как правило, при выходе людей из загрязненных районов, при проведении полной специальной обработки.

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ОБЛУЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Человек постоянно подвергается воздействию ионизирующих излучений. Различают естественный радиационный фон, искусственный радиационный фон, технологически измененный (повышенный) радиационный фон. Радиационный фон обусловлен факторами окружающей среды и не включает облучение лиц, которые работают с источниками ионизирующего излучения, а также излучение, применяемое с диагностическими и лечебными целями. Все источники радиационного фона делятся на две основные группы: естественные и искусственные.

Естественный радиационный фон (ЕРФ) является основным компонентом радиационного фона. Источниками ЕРФ являются ионизирующие излучения, которые действуют на человека на поверхности Земли от внешних естественных источников неземного происхождения (космических излучений), внешних естественных источников земного происхождения (присутствующих в земной коре, воде, воздухе), а также от внутренних источников (т.е. радионуклидов естественного происхождения, которые содержатся в организме человека). Большинство естественных источников такое, что избежать облучения от них невозможно. От естественных источников радиации мы получаем до $2/3$ дозы облучения.

ЕРФ является неотъемлемым фактором внешней среды и играет важную роль в жизнедеятельности человека. Естественные радиоактивные элементы вошли в состав Земли с самого ее образования. Эволюционное развитие показывает, что в условиях ЕРФ обеспечиваются оптимальные условия для жизнедеятельности растений, животных и человека. Способность радиоактивного излучения вызывать мутации послужила, вероятно, одной из главных причин эволюции биологических видов.

ЕРФ на поверхности Земли не является строго постоянной величиной. Его изменения связаны как с глобальными, так и с локальными аномалиями. Они обусловлены циклическими колебаниями космического фона и аналогичных процессов, которые приобрели характер глобальных катастроф. Локальные аномалии наблюдаются в отдельных районах Индии, Бразилии, Ирана, Египта, а также на территории США, Франции, стран СНГ (в том числе в Украине). Они являются следствием геологических процессов, когда в результате интенсивной вулканической деятельности и горообразования тяжелые естественные радионуклиды, прежде всего уран и торий, а также продукты их распада переместились из недр на поверхность Земли. Поэтому одни из жителей Земли получают более значительные дозы, чем другие, в зависимости от того, где они живут. Там, где залегают радиоактивные породы, уровень радиации (радиационный фон) значительно выше средних величин, в других местах может быть соответственно ниже средних величин. В Белоруссии средняя эквивалентная доза облучения от естественных источников составляет 2,4 мЗв/год. В штате Кералла (Индия) даже до 28 мЗв/год, а районе Гуарапари (Бразилия) эта доза более 80 мЗв/в в год.

Доза облучения зависит также от образа жизни людей. Применение некоторых строительных материалов (гранит), использование природного газа для приготовления пищи, герметизация помещений – все это увеличивает облучение за счет естественных источников.

Характеристика космических излучений.

Космические излучения – это ионизирующие излучения, непрерывно падающие на поверхность Земли из мирового пространства и образующиеся в земной атмосфере в результате взаимодействия указанных излучений с атомами воздуха.

Различают первичное и вторичное космическое излучение. *Первичное космическое излучение* представляет собой поток элементарных частиц, приходящих на земную поверхность из разных областей всемирного пространства. Оно образуется вследствие извержения и испарения материи с поверхности звезд и туманностей. Различают внегалактические, галактические и солнечные излучения. Космическое излучение состоит из протонов (92%), α -частиц (7%), ядер атомов лития, бериллия, углерода, азота, кислорода и других элементов (1%).

Первичное космическое излучение отмечается большой проникающей способностью, энергия его высокая – до 10^{12} МэВ. Солнечное излучение возникает в основном при вспышках на Солнце, возникающих с характерным 11-тилетним циклом, энергия их не превышает 40 МэВ.

Атмосфера защищает биологические объекты от губительного действия первичных космических частиц. Космические лучи постепенно теряют свою энергию, растрачивая ее на многочисленные столкновения с ядрами атомов воздуха. При этом в результате электронно-фотонных и электронно-ядерных взаимодействий образуются мезоны, электроны, позитроны, протоны, нейтроны, γ -кванты, которые и составляют *вторичное космическое излучение*. Приобретая часть энергии первичных космических частиц, вторичные космические лучи вызывают ионизацию атомов элементов воздуха, они же в основном и достигают поверхности Земли. Вторичное космическое излучение имеет максимум на высоте 20–30 км.

Интенсивность космических излучений зависит от географической широты и высоты над уровнем моря. Так как космические лучи в основном являются заряженными частицами, то они отклоняются в магнитном поле Земли и концентрируются на полюсах, в то время как в экваториальной области поверхности достигают лишь частицы, обладающие максимальными энергиями. Мощность космического излучения увеличивается с увеличением высоты над уровнем моря (в результате разрежения атмосферы). Так, если средняя доза от космических лучей составляет 0,3 мЗв в год, то на высоте 4500 м она составляет до 3 мЗв, а на вершине Эвереста (8848 м) – 8 мЗв в год.

Интенсивность космических лучей за пределами атмосферы составляет около 2-х частиц на 1 см^2 в секунду. Эта величина постоянная и не зависит от времени года, сезона, суток. Но в период максимальной солнечной активности поток космических лучей нарастает. Волновые излучения (в том числе и рентгеновские) достигают поверхности Земли через 8–15 мин после обнаружения вспышки на Солнце, а корпускулярные приблизительно через сутки. Каждая вспышка на Солнце влияет на человека, причем колебания магнитного поля очень сильно действуют на больных.

Внешние источники радиации земного происхождения.

Вторым источником естественного радиационного фона являются радионуклиды земного происхождения. В земной коре рассеяны долгоживущие (с периодом полураспада в миллиарды лет) изотопы, которые не успели распасться за время существования нашей планеты. Они образовались, наверное, одновременно с образованием планет Солнечной системы (относительно короткоживущие изотопы распались полностью). Эти изотопы называются естественными радиоактивными веществами, это значит такими, которые образовались и постоянно вновь

образуются без участия человека. Распадаясь, они образуют промежуточные, также радиоактивные, изотопы.

Внешними источниками излучений являются более 60 естественных радионуклидов, находящихся в биосфере Земли. Естественные радиоактивные элементы содержатся в относительно небольшом количестве во всех оболочках и ядре Земли. Особое значение для человека имеют радиоактивные элементы биосферы, т.е. той части оболочки Земли (лито-, гидро- и атмосфере), где находятся микроорганизмы, растения, животные и человек.

В течение миллиардов лет шел постоянный процесс радиоактивного распада нестабильных ядер атомов. В результате этого общая радиоактивность вещества Земли, горных пород постепенно снижалась. Относительно короткоживущие изотопы распались полностью. Сохранились главным образом элементы с полураспадом, измеряемым миллиардами лет, а также относительно короткоживущие вторичные продукты радиоактивного распада, образующие последовательные цепочки преобразований, так называемые семейства радиоактивных элементов. В земной коре естественные радионуклиды могут быть более или менее равномерно рассеяны или сконцентрированы в виде месторождений.

Все естественные радионуклиды в зависимости от их происхождения можно разделить на 2 категории: радионуклиды земного происхождения и космогенные радионуклиды. *Радионуклиды земного происхождения* в свою очередь делятся на 2 группы.

К первой группе относятся элементы, образующие три радиоактивные семейства – урана, тория, актиноурана и продукты их распада. К ним относятся 32 радионуклида урана-радиевого и ториевого рядов.

Наиболее распространены в земной коре уран и торий. Природный уран, рассеянный в горных породах, относительно редко образует крупные месторождения, но общее его количество на Земле значительно больше, чем серебра или ртути. Природный уран представляет собой смесь трех изотопов: урана-238 (99,28%), урана-235 (0,71%) и урана-233 (0,006%).

Распадаясь, каждый из названных тяжелых ядер рождает множество промежуточных, также радиоактивных ядер, так что образуется соответствующее семейство. Важнейшими из образованных 45 радионуклидов являются: уран-234, актиний-228, торий-230, радий-226, радон-222, полоний-210 и др. Эти промежуточные продукты в основном короткоживущие, они встречаются в виде примесей в месторождениях элементов – родоначальников семейств. Период полураспада колеблется от $3 \cdot 10^{-7}$ с ($^{212}_{84}\text{Po}$) до $2,5 \times 10^5$ лет ($^{234}_{92}\text{U}$). Конечными продуктами трех семейств являются стабильные изотопы свинца: ^{208}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb (соответственно).

Уран и торий в породах всегда сопровождают друг друга, концентрируясь преимущественно в гранитах. Однако в дальнейшем их пути расходятся, так как торий не образует растворимых соединений, а уран образует растворимые в сернокислых водах соединения. Торий и уран пред-

ставляют собой перспективный материал для атомной промышленности. Запасы тория во много раз больше, чем урана-235.

Радионуклиды земного происхождения, не входящие в семейства

Ко второй группе естественных радионуклидов земного происхождения принадлежат радионуклиды, не входящие в радиоактивные семейства (11 долгоживущих радионуклидов: калий-40 с периодом полураспада $1,31 \times 10^9$ лет, рубидий-87 – $6,15 \times 10^{10}$ лет и др.). Наиболее распространенным является рубидий-87. Он составляет 27,8% природного элемента, но энергия его излучений небольшая (бета-частиц – 0,394 МэВ). Рубидий – антагонист калия. В некоторых растениях он накапливается в значительном количестве (1л виноградного сока содержит 1 мг рубидия).

Калий является очень распространенным в литосфере (земной коре толщиной 15-70 км) и биосфере. Является типичным биологическим элементом. Природный калий состоит из трех изотопов (^{39}K , ^{40}K , ^{41}K), из которых только калий-40 – радиоактивен. В земной коре содержится 2,6% калия. В свободном виде не встречается, так как очень химически активен (входит в состав полевых шпатов, слюды). Калий-40 вносит значительный вклад в радиационный фон. Эквивалентная доза за счет калия-40 составляет 0,3 мЗв/год (за счет внешнего облучения – 0,12 мЗв/год, внутреннего – 0,18 мЗв/год).

Искусственная радиоактивность, основные компоненты искусственного радиационного фона

В формировании фонового облучения существенную роль отыгрывают искусственные источники радиации. Явление искусственной радиоактивности открыто в 1934 г. супругами Жолио-Кюри, которые показали, что при бомбардировке альфа-частицами ядер легких элементов образуются другие элементы, являющиеся радиоактивными

Ядра стабильных элементов можно бомбардировать также нейтронами. В настоящее время известно свыше 900 радионуклидов, получаемых искусственным путем. Особенно много искусственных радионуклидов получают в ядерных реакторах, в т.ч. и реакторах АЭС. Большинство из них являются альфа-излучателями и имеют большие периоды полураспада. Не существует элементов, у которых не было бы радиоактивного изотопа.

Искусственные радионуклиды появились в связи с деятельностью человека. Они подразделяются на три группы:

1. Радиоактивные продукты ядерного деления. Они возникают при реакциях деления ядер ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и т. д., которые происходят в результате действия на них нейтронов. Источники этой группы радионуклидов в атмосфере – испытания ядерного оружия, работа предприятий ядерного топливного цикла и атомной промышленности (ядерно-энергетические установки, радиохимические заводы и т. д.). При ядерных взрывах образуется около 250 изотопов 35 элементов. К радиоактивным продуктам деления (РПД): относятся: ^{131}I , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{140}Ba , ^{133}Xe и многие

другие. Период полураспада РПД от нескольких секунд до нескольких десятков лет.

Большинство образующихся радионуклидов являются бета- и гамма-излучателями (^{131}I , ^{137}Cs , ^{140}Ba), остальные испускают или только бета-частицы (^{90}Sr , ^{135}Cs) или альфа-частицы (^{144}Nd , ^{147}Sm).

2. Радиоактивные трансурановые элементы, возникающие в ядерно-энергетических установках и при ядерных взрывах в результате последовательных ядерных реакций с ядрами атомов делящегося вещества и последующего радиоактивного распада образующихся сверхтяжелых ядер. К этим радионуклидам относятся ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{242}Cm и др. В основном они альфа-активны, характеризуются очень большим периодом полураспада, отсутствием стабильных изотопов.

3. Продукты наведенной радиоактивности, образующиеся в результате ядерных реакций. Нейтроны, образующиеся при цепной реакции деления урана или плутония воздействуют на ядра стабильных элементов, превращая их в радиоактивные (реакция активации). К этим радионуклидам относятся: ^{45}Ca , ^{24}Na , ^{27}Mg , ^{29}Al , ^{31}Si , ^{65}Zn , ^{54}Fe и др. Большая часть их распадается с испусканием бета- частиц и гамма- излучения.

Основными компонентами, составляющими искусственный радиационный фон являются выпадения искусственных радионуклидов, связанные с испытанием ядерного оружия; загрязнения локального, регионального и глобального характера, обусловленные технологическими выбросами АЭС, радиоактивными отходами и выбросами при авариях на АЭС. Кроме того, источники ионизирующих излучений используются в промышленном производстве, в сельском хозяйстве, медицине, в научных целях и т.д.

Радиоактивные изотопы широко применяются в промышленности. Например, контроль износа поршневых колец в двигателях внутреннего сгорания осуществляют, облучая кольцо нейтронами, в результате чего оно становится радиоактивным. При работе двигателя частицы материала кольца попадают в смазочное масло. Исследуя уровень радиоактивности масла за определенное время работы двигателя, находят износ кольца. С помощью радиоактивной дефектоскопии устанавливают наличие, место нахождения, форму и размеры внутренних дефектов в материалах и изделиях и т.д.

Широкое применение нашли радионуклиды в медицине. С их помощью диагностируют состояние отдельных органов – печени, легких, щитовидной железы и т.д. (^{32}P , ^{57}Ce , ^{131}I , ^{133}Xe и др.). Их используют для диагностики и лечения опухолей. С этой целью в организм вводят ^{131}I . Так как обмен веществ в опухоли происходит быстрее, чем в здоровых тканях, радиоизотоп йода быстрее накапливается в опухоли. Исследуя излучения над разными участками тела, находят месторасположения метастазов опухоли щитовидной железы.

Особую роль играет радиационная стерилизация инструментов, одноразовых шприцев, ваты, бинтов и т.д. Нашли применение радионуклиды

и в сельском хозяйстве. Облучение семян повышает их всхожесть и урожайность. Применяют излучения и для дезинсекции зерна, консервации сельхозпродуктов. Радиоактивные вещества (их излучения) применяются также в археологии, геологии, геохимии и в др. отраслях.

Характеристика основных естественных радионуклидов

Уран. Природный уран состоит из смеси трех изотопов: уран-234, уран-235, уран-238. Период полураспада урана-235 – $7,0 \times 10^8$ лет, урана-238 – $4,5 \times 10^9$ лет. При распаде урана и дочерних радионуклидов испускаются α - и β -излучения, а также γ -кванты. Проникает уран в организм разными путями, в том числе и через кожу. Растворимые соединения быстро всасываются в кровь и разносятся по органам и тканям, накапливаясь в почках, костях, печени, селезенке. Биологический период полувыведения из легких – 118-150 суток, из скелета – 450 суток. За счет урана и продуктов его распада годовая эквивалентная доза составляет 1,34 мЗв

Торий. Торий-232 – металл. Период полураспада – $1,4 \times 10^{10}$ лет. При превращениях тория и продуктов его распада выделяются α - и β - частицы, а также γ -кванты. В минерале ториианите содержится до 45-88% тория. Из сплава тория с обогащенным ураном изготавливаются ТВЭЛы. В организм поступает через легкие, желудочно-кишечный тракт, кожу. Накапливается в костном мозге, селезенке. Биологический период полувыведения из большинства органов – 700 суток, из скелета – 68 лет.

Радий. Радий-226 является радиоактивным продуктом распада урана-238. Период полураспада равен 1622 года. Это серебристо-белый металл. Широко применяется в медицине в качестве источника альфа-частиц для лучевой терапии. Поступает в организм через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт и кожу. Большинство поступившего радия депонируется в скелете. Биологический период полувыведения из костей около 17 лет, из легких – 180 дней, из других органов выводится в первые двое суток. При попадании в организм человека вызывает повреждение костной ткани, красного костного мозга, что приводит к нарушению гемопоэза, переломам, развитию опухолей. В течение одних суток 1 г радия дает при распаде 1мм^3 радона.

Радон. Радон-222 – бесцветный, инертный газ, тяжелее воздуха, без запаха, продукт распада радия-226. Период полураспада – 3,83 суток. Радон – α -излучатель. Он образуется в месторождения урана в радиоактивных рудах, содержится в природном газе, грунтовых водах и т.д. Может выходить и по трещинам горных пород, в плохо вентилируемых шахтах, рудниках его концентрация может достигать больших величин. Радон, как продукт урана, выделяется из многих строительных материалов. В атмосферу поступает также при вулканической деятельности, при производстве фосфатов, работе геотермальных энергетических станций.

В лечебных целях применяется в виде радоновых ванн при лечении заболеваний суставов, костей, периферической нервной системы, хронических гинекологических заболеваний и др. Применяется также в виде инга-

ляций, орошений, приема внутрь воды, содержащей радон. В организм поступает в основном через органы дыхания. Период полувыведения из организма в пределах суток. Радон дает $\frac{3}{4}$ годовой эквивалентной дозы от земных источников облучения, и около $\frac{1}{2}$ дозы от всех естественных источников радиации.

Калий. Калий-40 – серебристо-белый металл, в свободном виде не встречается, так как очень химически активен. Период полураспада $1,32 \times 10^9$ лет. При распаде излучает бета-частицу. Является типичным биогенным элементом. Потребность человека в калии – 2-3 мг на кг веса в сутки. Много калия содержится в картофеле, бобы, помидорах. В организме всасывается 100% поступившего калия. Он распределяется относительно по всем организму, до 70% в мышечных клетках. Период полувыведения около 60 суток.

Характеристика основных искусственных радионуклидов

Йод. Йод-131 образуется в реакциях деления урана и плутония, а также при облучении теллура нейтронами. Период полураспада 8,05 дней. Поступает в организм через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт (всасывается 100% поступившего йода), кожу. Накапливается в основном в щитовидной железе, концентрация его в железе в 200 раз выше, чем в других тканях. Распадаясь, йод выделяет бета-частицу и 2 гамма-кванта. Период полувыведения из щитовидной железы 138 дней, из других органов 10-15 суток. Из организма беременной женщины йод через плаценту переходит к плоду.

Цезий. Цезий – серебристо-белый металл. Является источником β - и γ -излучений. Период полураспада цезия-137 – 30 лет. Один из главных компонентов радиоактивного загрязнения биосферы. До аварии на ЧАЭС основным источником поступления цезия в окружающую среду являлись ядерные взрывы. Основной дозообразующий элемент чернобыльского происхождения для населения Беларуси. Значительная часть выпавшего цезия находится в форме, которая доступна для растений, в основном накапливается в соломе и ботве. В кишечнике человека всасывается до 100% поступившего цезия. Основная часть поступившего в организм цезия концентрируется в мышечной ткани. Период полувыведения из мышц – 140 суток.

Стронций. Период полураспада стронция-90 – 28,6 лет (у стронция-89 – 50,5 суток). Стронций-90 – β -излучатель. Стронций легко усваивается растениями, животными, человеком. Концентратором стронция является кукуруза, содержание стронция в ней в 5-20 раз больше, чем в почве. В организме человека в зависимости от диеты усваивается в желудочно-кишечном тракте от 5% до 100% поступившего стронция (в среднем 30%). Накапливается в основном в скелете. Максимальная концентрация наблюдается у детей до 1 года. Период полувыведения стронция из мягких тканей составляет до 10 суток, из костей – до 8-10 лет и более.

Плутоний. Плутоний-239 является α -излучателем. Период полураспада его 24390 лет. Это серебристо-белый металл. Источником поступления плутония являются ядерные взрывы, а также реакторы АЭС, особенно аварийные выбросы. В почве находится в поверхностных слоях и донных отложениях водоемов. Поступает в организм через легкие и желудочно-кишечный тракт, причем усваивается из ЖКТ значительно меньше 1%. Накапливается в легких, печени, костной ткани. Период полувыведения из скелета составляет 100 лет, из печени – 40 лет.

Америций. Америций-241 – продукт распада плутония-241 (период полураспада ^{241}Pu составляет – 14,4 года). Период полураспада америция-241 составляет 432,2 года, при распаде выделяется α - частица. Америций растворяется в воде значительно лучше плутония, поэтому отличается большей миграционной способностью. Накапливается до 99% в поверхностных слоях почвы, 10% америция находится в растворимой форме и легко усваивается растениями. Концентрируется у человека в скелете, печени, почках. Период полувыведения из скелета – до 30 лет, из печени – до 5 лет.

Миграция радионуклидов в природе, факторы, её определяющие

Радиоактивные вещества, прежде чем попасть в организм человека, проходят по сложным маршрутам в окружающей среде.

Радиоактивные вещества, если они выброшены в верхние слои атмосферы (стратосферу), многократно огибают землю, постепенно концентрируясь между тридцатым и пятидесятым градусами широты в северном и южном полушариях, независимо от географического положения места их истечения и находясь там в аэрозольном и газообразном состоянии.

Чем выше заброшены радионуклиды, тем дольше они находятся в атмосфере – один-два года и более.

Радионуклиды, поступившие в атмосферу, под влиянием гравитационных сил (сил всемирного тяготения), а также под воздействием ряда метеорологических факторов (дождя, тумана, снега, града) оседают на поверхность Земли. Решающую роль в очищении тропосферы выполняют осадки (захват частиц падающими каплями). Оседание радионуклидов на растительный покров происходит и без осадков, в результате турбулентного движения воздушных потоков в атмосфере. Возможно поступление радионуклидов в почву после их сброса в гидрографическую сеть с паводковыми водами, при орошении полей и т.д.

Оседая на земную поверхность – почвенно-растительный покров, радиоактивные вещества (как естественные, так и искусственные) включаются в биологический круговорот в системе почва – растения – животные – человек.

Попадая в почву, радионуклиды мигрируют в ней. Под миграцией радионуклидов в почве понимается совокупность процессов, приводящих

к перемещению радионуклидов в почве и перераспределению их по глубине и в горизонтальном направлении.

Миграция радиоактивных веществ в почве зависит от ряда условий: физико-химических свойств радиоактивных веществ; физико-химических свойств почвы (типа почвы); характера движения грунтовых вод; кислотности среды; климатических условий; времени нахождения радионуклидов в почве и т.д.

К движущим силам, приводящим к миграции радионуклидов в почвах, относятся:

- конвективный перенос (фильтрация атмосферных осадков в глубь почвы, капиллярный подток влаги к поверхности в результате испарения, термоперенос влаги под действием градиента температуры);
- диффузия свободных и адсорбированных ионов;
- перенос по корневым системам растений;
- перенос на мигрирующих коллоидных частицах;
- роющая деятельность почвенных животных;
- хозяйственная деятельность человека;
- ветровая эрозия почвы.

Различные почвы обладают разной емкостью поглощения радионуклидов. Высокой емкостью поглощения обладают черноземы, глинистые почвы, сорбционная способность которых обусловлена наличием гумуса. Поглотительная способность дерново-подзолистых, песчаных почв значительно меньшая. Некоторые изотопы, например, стронций и цезий могут переходить из обменной формы в необменную благодаря включению их в кристаллическую решетку почвенных минералов и солей: фосфатов, сульфатов и других малорастворимых соединений.

Миграция радионуклидов вглубь почвы протекает крайне медленно. Основная масса радионуклидов до сих пор распределена в 10 сантиметровом слое почвы, а на пашне – в пахотном горизонте. В ближайшие десятилетия самоочищения почв в результате миграции радионуклидов в нижележащие горизонты не произойдет.

Радионуклиды и растительный мир

В растительные организмы радионуклиды попадают в основном двумя путями: адсорбцией радиоактивных аэрозолей, оседающих из атмосферы, и усвоением (в основном с водой) радионуклидов из почвы.

В общем цикле круговорота радионуклидов в наземной среде важным является звено почва – растения. В результате загрязнения почвы радиоактивными веществами отмечается их поступление в наземную растительность. Для оценки поступления радионуклидов из почвы в растения используют различные показатели. Одним из наиболее широко применяемых является коэффициент накопления (КН) – отношение содержания радионуклида в единице массы растений и почвы соответственно.

Накопление радионуклидов растениями из почвы зависит от комплекса факторов: физико-химических свойств радионуклидов; агрохимической характеристики почвы; биологических особенностей растений; агротехники возделывания культур; климатических условий.

Радиоактивные изотопы, находящиеся в почве, как правило, переходят в корневую систему растений, аналогично стабильным изотопам тех же элементов. Из песчаных легких почв радионуклиды поступают в растения значительно легче, чем из тяжелых глинистых почв. Чем сильнее радиоизотоп фиксируется в почве, тем меньшее его количество попадает в растения. Так, например, овес, выращенный на песке, накапливает стронция-90 в несколько раз больше, чем овес, выращенный на суглинке. При этом из глинистого песка поступает 8-10%, а из тяжелых суглинков – всего 1% от всего стронция-90, попавшего в почву. Относительное накопление растениями различных изотопов из почв следующее: стронций > йод > барий > цезий > рубидий > церий > цирконий > плутоний. При одинаковой плотности загрязнения почвы стронцием и цезием, концентрация стронция в грубых кормах в 40-50 раз выше, чем цезия.

Такие изотопы, как стронций и цезий легко проникают через корневую систему во все органы растений. Другие же радионуклиды – церий, цирконий, плутоний – накапливаются в основном в корневой системе растений.

Многолетние луговые травы могут накапливать большое количество радиоактивных веществ, что превышает накопление однолетними сельскохозяйственными культурами. В лесной зоне наибольшей способностью задерживать радиоактивные вещества обладают хвойные породы деревьев, что связано с медленной сменой игл. Имеются там называемые растения – концентраторы, которые способны захватывать и накапливать радиоактивные вещества. Это лишайники, мхи, грибы, бобовые, злаки. Стронций-90 в 2-6 раз интенсивнее поглощается бобовыми культурами, чем злаковыми. Наиболее интенсивно идет накопление радионуклидов в листьях и стеблях. Так, в созревших растениях фасоли стронций-90 распределяется следующим образом: в листьях 53–68%, в стеблях 15–28%, створках бобов 12–15%, в зерне 7–14%. Озимые культуры накапливают радионуклиды в меньших количествах, чем яровые. По количеству цезия-137 от меньшего к большему растения можно расположить в ряд: пшеница < ячмень < горох < гречка < овес < фасоль < картофель < морковь < свекла < бобы. Грибы накапливают радионуклиды на 1-2 порядка больше, чем их концентрация в почве.

По накоплению цезия-137 в плодовых телах грибы делятся на 4 группы:

- слабо накапливающие (опенок осенний, строчок);
- средне накапливающие (подберезовик, белый гриб, лисичка, шампиньон, рядовка);
- сильно накапливающие (груздь черный, рыжик, сыроежки всех видов);

- аккумуляторы (гриб польский, масленок, волнушка, козляк, моховик).

В шляпках накапливается цезия-137 в 1,5–3 раза больше, чем в ножках.

Из дикорастущих ягод сильнее всего концентрируют радионуклиды клюква, малина, черника, земляника (самая «чистая»). По накоплению цезия-137 ягоды располагаются в убывающем порядке: черника, голубика, брусника, клюква, земляника. Содержание радионуклидов на приусадебном участке в ягодах меньше, чем в лесу. Смородина (красная и черная) накапливает радионуклиды, крыжовник является наиболее «чистым».

Повышенное содержание стронция и цезия характерно для ароматической столовой зелени: в укропе, петрушке, шпинате, и особенно в щавеле. Лук, капуста, свекла накапливают радионуклидов меньше, чем огурцы, томаты, морковь.

По накоплению стронция-90 древесными растениями установлен следующий убывающий ряд: осина, береза, ольха, ель, сосна, дуб. Береза поглощает из почвы цезия-137 в 2-18 раз, а стронция-90 – в 13 раз больше, чем сосна.

При отмирании травянистой и древесной растительности, а также с пожнивными остатками радионуклиды возвращаются в процессы миграции.

Поступление радионуклидов в организм гидробионтов

Загрязнение рек, озер и других водоемов происходит в результате оседания радионуклидов на их поверхности из атмосферы, а также путем смыва их дождевыми водами с загрязненных участков почвенно-растительного покрова. Радиоактивные вещества (стронций-90, цезий-137 и др.) могут накапливаться в водоемах. При поступлении радионуклидов в воду открытых водоёмов, в первую очередь отмечается их разбавление, поглощение дном и тканями гидробионтов. Эффективность процесса разбавления в реках и закрытых водоемах неодинаковая (в реках большая).

Накопление радионуклидов гидробионтами происходит в результате адсорбции и диффузии; поступления радионуклидов через органы дыхания и пищеварения. Среди обитателей водоемов существуют организмы-концентраторы, которые активно поглощают радионуклиды. Некоторые гидробионты концентрируют их в десятки тысяч раз больше в сравнении с содержанием радионуклидов в воде. Это водоросли, планктон, моллюски, ракообразные и другие донные организмы. Большая удельная поверхность тела у планктона, губок и некоторых других гидробионтов создает условия для адсорбции ими значительного количества радиоактивных веществ. Так, коэффициент накопления стронция-90 в водорослях достигает 100, в мышцах рыб – только 0,1. При этом скорость накопления радионуклидов довольно значительная. Так, дафния накапливает 50-60% от предельного накопления радиоактивного стронция за 5 мин. В последующем накоплении принимают участие и обменные процессы. Время, необходимое для максимального накопления радиоактивных веществ

зоопланктоном, составляет несколько часов. У водных растений процесс накопления более медленный. Предельное накопление в водорослях происходит в течение 7-30 суток.

У рыб основным путем поступления радионуклидов является поступление через органы пищеварения. Поэтому в данном случае существенное значение имеют уровни загрязнения низших организмов, являющихся кормом для рыб. Радиоактивные изотопы проникают в организм рыб также через жабры. Время предельного накопления радиоизотопов в теле рыб колеблется от 10 до 120 дней. У хищных рыб накапливается радионуклидов меньше, чем у планктонофагов. В порядке убывания содержания радионуклидов в тканях рыб их можно распределить следующим образом: судак > щука > окунь > плотва > лещ > карп.

При снижении удельной активности воды имеет место выведение накопленных радионуклидов из организма гидробионтов. В среднем на протяжении 10 дней нахождения в чистой воде планктон и водоросли теряют 95-97% от общего количества накопленных радионуклидов. Выведение радионуклидов из тканей рыб происходит с меньшей скоростью. Так, стронций-90 даже через 3 месяца пребывания рыбы в чистой воде находится в ее мышцах до 10% накопленного количества, а в костях – до 50% первоначального уровня.

Действие излучений на организм растений и животных

Первичные реакции в сложном растительном организме начинаются с действия радиации на биологически активные молекулы, входящие в состав практически всех компонентов живой клетки. Биологические процессы, вызванные облучением растений, связаны с множеством обменных реакций в клетках. В зависимости от дозы облучения и фазы развития растений в момент воздействия излучений у вегетирующих растений наблюдается значительная вариабельность изменений обменных процессов. Реакция растительных объектов на действие γ - и рентгеновского излучения проявляется в виде активации или подавления ростовых процессов, что сопровождается изменением темпов клеточного деления.

При действии повреждающих доз излучений в растениях возникают различные морфологические аномалии. Так в листьях происходит увеличение или уменьшение их количества и размеров, изменение формы, скручиваемость, асимметричность расположения, утолщение листовой пластинки, опухоли, появление некротических пятен.

При поражении стеблей наблюдается угнетение или ускорение их роста, нарушается порядок расположения листьев, изменяется цвет, появляются опухоли и аэральные корни. Наблюдается также угнетение или ускорение роста корня, расщепление главного корня, отсутствие боковых корней, появление вторичного главного корня, опухолей. Происходит также изменение цветков, плодов, семян – ускорение или задержка цветения, увеличение или уменьшение количества цветков, изменение

цвета, размеров и формы цветков; увеличение или уменьшение количества плодов и семян, изменение их цвета и формы и т.д.

В ряде случаев действие больших доз облучения на растения повышает темпы развития их вследствие активации процессов старения – растение быстрее зацветает и созревает. Разнообразны и генетические повреждения. В результате мутаций, например, у пшеницы встречаются высокорослые, низкорослые, карликовые формы, растения с ветвящимися или стелющимся стеблями. При больших дозах возможна гибель растений.

При действии излучений в невысоких дозах (5–10 Гр для семян и 1–5 Гр для вегетирующих растений) наблюдается так называемая радиостимуляция – ускорение темпов роста и развития растений. Стимуляция наблюдается при действии γ -, β - и рентгеновских излучений (при действии α - излучений стимуляции не наблюдается).

Воздействие больших доз сопровождается не только уменьшением количества зерна в урожае, но заметным снижением и его качества – обычно зерно оказывается щуплым.

Таким образом, реакция растений на действие излучений сложна и разнообразна. Процессы, происходящие на молекулярном и клеточном уровне, в целом сходны у всех живых организмов.

С травой и другими растениями радионуклиды попадают в организм животных, т.е. основным источником радиации является корм. Поступление через органы дыхания и через кожу играет незначительную роль. Попавшие в желудочно-кишечный тракт (ЖКТ) радионуклиды вступают в процессы метаболизма, включающие всасывание, перемещение по отдельным органам и тканям, депонирование и выведение. От интенсивности этих процессов зависит, в конечном счете, накопление радионуклидов в продукции животноводства.

Интенсивность и величина всасывания радионуклидов в ЖКТ зависят от химической формы соединения, в которое включен радионуклид и его физико-химических свойств. Коэффициент всасывания различных радионуклидов различен у разных животных. Такие радионуклиды как йод-131, цезий-137, тритий всасываются в ЖКТ полностью, а стронций-90 – 6-16%. Всасывание зависит от возраста животных (у молодых особей всасывание в несколько раз больше).

Биологические эффекты действия радиации на животный мир изучены недостаточно. Известно, что очень высокие дозы приводят к гибели млекопитающих, меньшие – к заболеваниям, генетическим изменениям, половым расстройствам, неспособности к воспроизведению, выкидышам. Биологические эффекты, происходящие в клетках, подразделяются на 2 группы: стохастические и нестохастические.

Стохастические эффекты признаются беспороговыми и могут наблюдаться в клетках животных после минимальных доз облучения. К

ним относятся: 1) репродуктивная гибель клетки; 2) возникновение генных мутаций; 3) появление хромосомных aberrаций; 4) злокачественная трансформация клетки.

Нестохастические эффекты имеют пороговую дозу, ниже которой изменения отсутствуют. К нестохастическим реакциям относятся: 1) радиационная задержка и стимуляция деления клеток; 2) угнетение синтеза ряда веществ; 3) пострadiационное разрушение ДНК; 4) изменение проницаемости биологических мембран; 5) нарушение обмена кальция и функционирования ферментативных систем.

При действии радиационных излучений наблюдаются радиационные эффекты в тканях и органах животных. Прежде всего, наблюдается патология кроветворения и связанная с ней уменьшение числа клеток крови (эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов). Эти изменения характерны для клинического синдрома острой лучевой болезни. Под действием излучений меняется весь комплекс защитных механизмов и реакций организма (клеточных и гуморальных факторов иммунитета). При радиационных поражениях меняется естественная устойчивость к эндогенным (внутреннего происхождения) инфекциям. Негативное влияние γ -излучений на воспроизводительную функцию сельскохозяйственных животных и качество потомства определяется в основном поражением эмбриона в период дифференцировки органов, а также семяродного эпителия яичек и яичников родителей.

По клиническому проявлению, характеру течения и исходу заболевания при общем облучении у животных различают острую и хроническую лучевую болезнь.

Из местных поражений возможно радиоактивное загрязнение кожных покровов с развитием β -ожогов кожи, по тяжести поражения различают четыре степени: легкую, среднюю, тяжелую и крайне тяжелую.

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Воздействие ионизирующих излучений испытывали на себе первооткрыватели явления радиоактивности и их последователи. Так, Анри Беккерель получил ожог кожи от ампулы с препаратом радия, а Пьер Кюри, сознательно поставил схожий эксперимент на себе, получил на руке ожог и язву. Этот список включает и такие имена, как Мария и Ирен Кюри. Всего же к 1956 году число пострадавших достигло 360 человек. Это обстоятельство, а также продолжающиеся исследования в области ядерной физики и радиохимии, положили начало работам, связанным изучением действия радиации на биологические объекты. Так, уже в 1896 году в России были

опубликованы результаты исследований действия радиации на насекомых и лягушек, позволившие сделать вывод о том, что это воздействие должно распространяться и на обмен веществ в сложных организмах, а следовательно, влиять на все его функции.

Расчет показывает, что с энергетической точки зрения, летальная для человека доза 10 Гр может привести к повышению температуры тела всего на 0,001°C. Следовательно, поглощение организмом крайне малого в традиционном понимании количества энергии в виде ионизирующей радиации приводит к его гибели. Этот эффект основатель радиационной генетики Н.В. Тимофеев-Ресовский назвал «радиобиологическим парадоксом».

Механизм биологического действия радиоактивных излучений до настоящего времени окончательно не выяснен и остается предметом научных исследований. Существуют десятки гипотез и теорий, которые пытаются объяснить механизм действия радиации на биообъект.

Одной из первых теорий была лецитиновая теория, предложенная в 1903 году Г. Шварцем. Сущность ее состоит в том, что при лучевом воздействии происходит разложение лецитина с образованием холиноподобных токсических веществ, которыми и отравляется организм.

По мнению Е.С. Лондона (1911 г.) первичные лучевые поражения в тканях обусловлены нарушениями ферментативных процессов в организме.

Имеются и другие теории, предложенные в первой половине 19 века, но они могут рассматриваться только в историческом аспекте.

В настоящее время выделяют теории прямого и непрямого (косвенного) действия, которые в большей мере отражают сущность проявления биологического действия ионизирующего излучения.

Теория «мишени» получила свое развитие в трудах Ф. Дессауэра, Дж. Кроузера, Н.В. Тимофеева-Ресовского, К. Циммера, Д.Е. Ли и др. Она основана на принципе попадания и принципе мишени. В клетках имеются чувствительные к облучению участки (ген или группа генов) – «мишени». И только при попадании излучения в мишень могут происходить изменения, которые можно оценить количественно. При этом клетка разрушается и гибнет. Эта теория объясняет при облучении гибель микроорганизмов, вирусов, одноклеточных организмов и появление мутаций, что в свою очередь используется в радиационной селекции, генетике и в радиационно-биологических технологиях.

Теория «высвобождения ферментов» (З. Бак и П. Александер). Поражение наступает как следствие изменения проницаемости клеточных мембран (она увеличивается), что сопровождается отделением ферментов от субстратов клетки. Ферменты в свою очередь изменяют химические процессы, и это приводит к поражению клетки.

Б.Н. Тарусовым, А.С. Мочалиной, Ю.Б. Кудряшовым, Н.М. Эммануэлем (в 50-х годах XX столетия) предложена гипотеза «липидных радиотоксинов и цепных реакций». Сущность этой теории заключается в том,

что под влиянием облучения в организме образуются липидные радиотоксины (ЛРТ).

Липидные радиотоксины представляют собой комплекс продуктов окисления ненасыщенных кислот, гидропероксидов, альдегидов, эпоксидов и кетонов. Они вызывают гемолиз, торможение клеточного деления, нарушение кроветворения, повреждение хромосомного аппарата и др. Авторами этой гипотезы ЛРТ и хиноны были отнесены к первичным радиотоксинам.

По «стохастической» (вероятностной) теории О. Хуга и А. Келлерера (монография 1966 года «Стохастическая радиобиология») взаимодействие излучения с чувствительным участком клетки (молекулы) происходит по принципу вероятности (случайности) и результат обуславливается в большей мере состоянием клетки как биологического объекта.

В целом все эти теории и гипотезы не объясняют в полной мере сути поражений и механизма их возникновения.

Наиболее отвечающей современному представлению по механизму биологического действия является «структурно-метаболическая» теория, предложенная ученым радиобиологом А.М. Кузиным.

В 1986 г. А.М. Кузин представил монографию «Структурно-метаболическая теория в радиобиологии». По этой теории ведущим радиационным повреждающим фактором для клетки является изменения ее ядра, цитоплазматических структур, в частности, митохондрий и биомембран. При этом происходят нарушения проницаемости клеточных мембран и метаболических процессов: инактивация ферментов, гормонов, подавление энергетических функций митохондрий, синтеза ДНК, РНК и др.

Вещества, влияющие на геном клетки (депрессивное или репрессивное действие), А.М. Кузин назвал триггер-эффекторами (хиноны, гормоны и др.). К ним он отнес и радиоактивное излучение в целом как своеобразный стресс-фактор. Реакции организма на такой стресс-фактор зависят от дозы ионизирующего излучения.

А.М. Кузин считал, что под действием радиоактивного фактора в организме не возникает новых, необычных для него химических соединений. Но появляется большее число токсических метаболитов, чем есть в «здоровой» клетке и как следствие появляются дополнительно новые токсические соединения. Отсюда и повреждающий эффект.

Данная теория не является универсальной и создание единой теории радиобиологического эффекта еще впереди, так как это связано с углублением познания молекулярных основ жизни.

Этапы биологического действия ионизирующего излучения

В механизме биологического действия выделяют три этапа:

1. Физико-химический.
2. Радиационно-химический.
3. Биологический.

Физико-химический этап. На этом этапе происходят проникновение радиоактивных излучений в ткани, взаимодействие излучений с атомами и молекулами тканей и как результат передача энергии излучения тканям. Передача энергии осуществляется за счет процессов ионизации и возбуждения атомов. Молекулы вещества, имеющие ионизированные и возбужденные атомы, приобретают высокую химическую активность, способствуя рекомбинации ионов с превращением их в нейтральные атомы и молекулы, не свойственные нормальным функциям организма. Длительность этого этапа от 10^{-12} до 10^{-8} с.

Радиационно-химический этап. На этом этапе идет радиолиз. Радиолизом называются химические превращения веществ под действием ионизирующих излучений. В результате образуются свободные радикалы, взаимодействующие с органическими и неорганическими веществами. Длительность этого этапа от 10^{-7} с до нескольких часов.

Биологический этап. Этот этап является наиболее длительным. Он проявляется не сразу, а после некоторого времени с момента облучения. Вначале происходят биомолекулярные повреждения белков, нуклеиновых кислот и др. Повреждения появляются вследствие вступления высокоактивных радикалов в химические реакции с молекулами белка, ферментов, углеводов и липидов, а также других структурных элементов биологической ткани. Это приводит к изменению биохимических процессов. В результате нарушаются обменные процессы, подавляется активность ферментных систем, замедляется и прекращается рост клеток, возникают новые химические соединения, не свойственные организму – токсины. Продолжительность этого изменения от микросекунд до нескольких часов.

Изменения в клетке обусловлены биохимическими процессами, развивающимися под действием продуктов радиолиза, и происходящими структурными нарушениями. Вследствие действия окислительных агентов на липиды, включая фосфолипиды, клеточных мембран, нарушается целостность мембран и увеличивается их проницаемость. Это резко увеличивает отток из клетки ионов K^+ , Na^+ , Ca^+ , Cl^- или высвобождению ферментов из митохондрий и других органелл. В клетке также происходит ингибирование антиоксидантных систем.

Далее развиваются и появляются так называемые «ранние биологические эффекты» – гибель клеток, гибель организма (часы, дни, недели).

В последующем регистрируются отдаленные биологические эффекты, в том числе опухоли, и генетические эффекты. По времени это годы, даже столетия.

Радиолиз воды и его роль в патогенезе лучевых поражений

Именно ионизирующая способность излучения является тем фактором, который вызывает негативные реакции в организме человека. При действии ионизирующего излучения на сложные вещества, молекулы которых состоят из большого числа различных атомов, в результате иониза-

ции и возбуждения происходят первичные радиационно-химические изменения в них и, как следствие, диссоциация молекул в результате разрыва химических связей. Это так называемое прямое действие ионизирующего излучения. Под ним понимают изменения, происходящие в месте поглощения энергии. По А.М. Кузину прямое действие ионизирующего излучения в организме может составлять 45%.

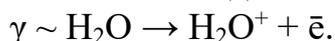
Более существенную роль в формировании биологических последствий облучения имеет механизм косвенного (непрямого) действия ионизирующего излучения, на который приходится 55%. Под непрямым действием излучения понимают радиационно-химические изменения в данном растворенном веществе, обусловленные продуктами радиолиза. Изменения в молекуле происходят в результате поступления энергии излучения из другой молекулы.

Соотношение между прямым и непрямым действием ионизирующего излучения может меняться в зависимости от содержания воды и кислорода в облучаемом объекте.

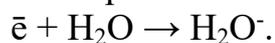
Организм животного в целом на 70% состоит из воды. В белом веществе мозга воды содержится 70%, сером – 84%, коже – 72%, жировой ткани – 20–25%, костях – 16–46%. Поскольку, клетки различных органов и тканей животного содержат от 60 до 90% воды, следовательно, большая часть энергии излучений поглощается водой. Поэтому молекулы воды имеют большую вероятность изменения под действием радиоактивного излучения (радиолиз воды).

Радиолиз воды происходит в три фазы: физическую, физико-химическую и химическую.

В физическую фазу (10^{-13} - 10^{-16} с) радиолиза воды происходит действие ионизирующего излучения на нейтральную молекулу воды и как следствие ее ионизация и возбуждение. В результате ионизации из нейтральной молекулы воды образуется положительный ион воды и свободный электрон:



Свободный электрон захватывается другой нейтральной молекулой воды. Она становится отрицательно заряженным ионом воды:



При возбуждении нейтральная молекула воды обладает избытком энергии:

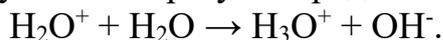


Наступает вторая фаза радиолиза воды – физико-химических реакций (10^{-6} - 10^{-9} с).

Положительные и отрицательные ионы воды, а также возбужденные молекулы воды не являются стабильными и распадаются (диссоциируют) с образованием радикалов: положительного иона водорода (восстановитель) и гидроксильного иона (окислитель):

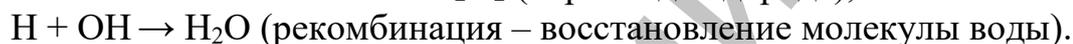
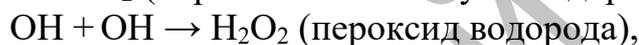


Ионизированная молекула воды H_2O^+ может реагировать с нейтральной молекулой воды, в результате образуется радикал гидроксила:

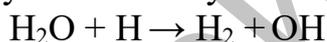


При каждых 1000 эВ энергии, поглощаемых чистой водой, образуются следующие продукты: 26 гидратированных электронов, 26 гидроксильных радикалов, 4 атома водорода и небольшое количество H_2 и H_2O .

Начинается третья фаза – фаза химических реакций (10^{-5} - 10^{-6} с). Свободные радикалы водорода и гидроксила содержат неспаренный электрон на внешней орбите и обладают очень высокой химической реакционной активностью, так как легко теряют электрон или связывают вакантный электрон с аналогичным в другом радикале. Длительное время они не могут существовать, время их жизни не более 10^{-5} с. Они обычно вступают в экзотермические реакции друг с другом, могут димеризовываться (образовывать пары) или взаимодействовать с растворенными в воде веществами:



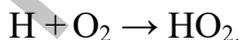
Вступать в реакцию с другими молекулами воды:



Или реагировать с продуктами предыдущих реакций, в которых участвовали радикалы:

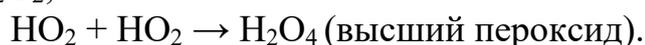
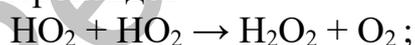


При наличии в среде растворенного кислорода также образуется гидропероксид:



Считается, что основной эффект лучевого воздействия обусловлен такими радикалами, как H , OH , HO_2 . Гидропероксид является сильным окислителем. Выход этого радикала уменьшается пропорционально падению парциального давления кислорода. Этим объясняется кислородный эффект при облучении, проявляющийся в том, что при снижении концентрации кислорода в период облучения уменьшается эффект лучевого воздействия.

Гидропероксиды могут взаимодействовать между собой, с образованием пероксидов:



Свободные радикалы водорода и гидроксил с одной стороны, и перекиси водорода с другой, обуславливают химические изменения биологически важных молекул. Сущность их состоит в восстановительных и окислительных реакциях диаминирования, декарбоксилации, окислению сульфогидрильных групп с образованием дисульфидных мостиков, разрыву углеродных цепей и кольцевых структур. Эти изменения происходят с

компонентами белковых молекул – пептидами и аминокислотами, с компонентами нуклеиновых кислот, полисахаридами и другими биологически активными соединениями.

В клетке организма ситуация значительно более сложная, чем при облучении воды, особенно если поглощающим веществом являются биологические молекулы. В этом случае образуются органические радикалы. Располагая большим количеством энергии, они могут привести к разрыву химических связей и образованию новых молекул.

Таким образом, при действии ионизирующего излучения происходит непосредственное изменение биологически активных соединений в результате прямого попадания излучения в молекулу ДНК, белка (прямое действие) и в результате окислительно-восстановительных реакций при взаимодействии со свободными радикалами и перекисями – не прямое действие.

Пути воздействия ионизирующих излучений на человека

Лучевые поражения человека возникают в результате внешнего, внутреннего, сочетанного и комбинированного воздействия ионизирующих излучений.

Внешнее облучение от источника, расположенного вне организма. Различают внешнее общее (тотальное) и местное (локальное) облучение γ - и рентгеновским излучением, нейтронами и β -частицами. Рентгеновское, γ - и нейтронное излучение повреждает все ткани, находящиеся на пути излучения. β -излучение – только кожу и слизистые, α -частицы – эпидермис кожи и эпителий слизистых.

Внешнее общее облучение может быть:

- однократным, или острым (один раз в 4 суток) и многократным (два и более раз с перерывами более 4 суток);
- равномерным (поглощенная доза на все органы распределена практически равномерно) и неравномерным (поглощенная доза на органы отличается более чем на 10-15%);
- кратковременным (импульсное воздействие), пролонгированным (непрерывное облучение от часов, до месяцев), длительным (от нескольких месяцев до нескольких лет), фракционированным (с перерывами более суток).

В зависимости от продолжительности действия ионизирующих излучений различают острые (при кратковременном облучении), подострые (при пролонгированном облучении) и хронические (при длительном облучении) лучевые поражения.

Значительная часть суммарной дозы внешнего облучения обусловлена естественными источниками радиации, она образуется за счёт радиоактивных веществ, содержащихся в почве, воде и воздухе.

Внутреннее облучение, обуславливающее лучевые поражения, может быть вызвано инкорпорированными радионуклидами, поступившими в организм:

- пероральным (через рот);

- ингаляционным (через легкие);
- перкутаным (через неповрежденную кожу);
- раневым (через поврежденную кожу, рану) путями.

Поступившие радионуклиды распределяются в организме равномерно, в основном в скелете, ретикулоэндотелиальной ткани, или депонируются избирательно в отдельных органах.

Параллельно с поступлением в организм происходит выведение радионуклидов через:

- почки (с мочой);
- кишечник (с калом, желчью, желудочным и кишечным соком);
- легкие (выдыхаемым воздухом);
- железы (с потом, материнским молоком).

Существуют следующие типы распределения радионуклидов в организме: скелетный, ретикулоэндотелиальный, диффузный (равномерный) и органотропный.

Скелетный тип распределения характерен для щелочноземельных металлов – кальция, стронция, бария, радия, а также иттрия, циркония, цитратов плутония. Эти радионуклиды накапливаются в минеральной части скелета, т.е. в костной ткани. Они концентрируются по соседству с красным костным мозгом, самым радиочувствительным органом человеческого тела. При этом поражается система кроветворения, страдает иммунитет и могут развиваться злокачественные перерождения крови – лейкозы.

Ретикулоэндотелиальный тип распределения характерен для радионуклидов редкоземельных элементов – лантана, церия, празеодима, прометия, а также цинка, америция, тория, плутония, калифорния и др. Все они концентрируются в селезенке, лимфатических узлах, где образуются лейкоциты (лимфоциты). В результате уменьшения количества лимфоцитов снижается иммунитет.

Равномерное (диффузное) распределение характерно для щелочных элементов – лития, калия, натрия, цезия, рубидия, а также для трития, азота, углерода, полония и некоторых других элементов. Цезий, калий, рубидий накапливаются в основном в мышечной ткани.

Для изотопов германия, висмута, урана, кадмия, мышьяка, платины, рутения и других характерен почечный тип распределения радионуклидов. В почках откладывается до 5% от общего количества радионуклидов, поступивших в организм человека.

По печеночному типу распределяются такие радионуклиды, как лантан, церий, прометий, нитраты плутония и др. В печени накапливается до 60% этих радионуклидов.

Известны случаи высокой избирательности накопления радионуклидов. Так по тиреотропному (щитовидному) типу накапливается йод, астат, рений, теллур, технеций. Йод избирательно накапливается в щитовидной железе, концентрация его в железе в 100-200 раз больше, чем в других тка-

нях. При облучении в больших дозах происходит дегенерация, потеря функции щитовидной железы и склероз сосудов ее. В дальнейшем увеличивается частота доброкачественных и злокачественных опухолей железы.

Следствием большой неоднородности накопления радионуклидов в тканях являются специфически формирующиеся патологические процессы, например, цирроз печени, очаги склероза в легких и изменения в костной ткани, в том числе образование остеосарком.

Попавшие в организм радионуклиды участвуют в обмене веществ по принципу, аналогичному тому, как это происходит для их стабильных изотопов. Выводятся они из организма через те же самые выделительные системы, что и их стабильные носители.

Основное количество радиоактивных веществ выводится через желудочно-кишечный тракт и почки, в меньшей степени – через легкие и кожу. У кормящих матерей часть радионуклидов выделяется с молоком (йод-131). Скорость выведения радионуклидов зависит от их природы, возраста, функционального состояния организма, особенностей поступления и распределения в организме радионуклидов и от других факторов. Наиболее быстро выводятся радионуклиды, депонирующиеся в тканях, где скорость обмена веществ высокая.

Так, остеотропные радионуклиды выводятся медленнее, потому что в костной ткани обмен веществ ниже, чем в мягких тканях. Кроме того, они способны включаться непосредственно в костную ткань, замещая там кальций (к ним относятся стронций-90, барий-140). Свободные радионуклиды быстрее выводятся из организма (йод-131, рутений-106, цезий-137). Связанные с тканевыми структурами (белком) и находящиеся в коллоидном состоянии радионуклиды выводятся медленнее (лантан-140, цезий-144, прометий-147). Цезий-137 выводится из организма быстрее, чем стронций-90, а йод-131 быстрее, чем цезий-137.

Различны также пути выведения. При хроническом поступлении большая часть йода-131 и цезия-137 выводится через почки, тогда как стронций-90, барий-140, кобальт-60 выводятся в основном через желудочно-кишечный тракт.

Поскольку различные ткани по-разному связывают один и тот же радионуклид, то и скорость выведения из этих тканей различна. Скорость выведения характеризуется биологическим периодом полувыведения. Биологический период полувыведения – это время, за которое из организма выводится половина радионуклидов, поступивших в организм.

Биологический период полувыведения йода-131 из целостного организма 138 суток, щитовидной железы – 138, печени – 7, селезенки – 7, скелета – 12 суток. Биологический период полувыведения для цезия-137 из организма равен 70 суткам, из мышц, легких и скелета – 140 суток. Биологический период полувыведения стронция-90 из мягких тканей – 5–8 суток, из костей – до 150 суток (16% выводится с периодом полувыведения

равным 3360 суток). Радий-226 выводится из скелета человека с периодом полувыведения 17 лет, из легких –180 суток.

Существует ряд особенностей, которые делают внутреннее облучение более опасным, чем внешнее (при одних и тех же количествах радионуклидов):

1. При внутреннем облучении увеличивается время облучения тканей организма, так как при этом время облучения совпадает со временем нахождения РВ в организме (при внешнем облучении доза определяется временем нахождения в зоне радиационного воздействия).

2. Доза внутреннего облучения резко возрастает из-за практически бесконечно малого расстояния до тканей, которые подвергаются ионизирующему воздействию (так называемое контактное облучение).

3. При внутреннем облучении исключается поглощение α -частиц роговым слоем кожи (α -активные вещества становятся наиболее опасными).

4. За небольшим исключением РВ распределяются в тканях организма неравномерно, а выборочно концентрируются в отдельных органах, ещё более усиливая их облучение.

5. В случае внутреннего облучения нет возможности использовать методы защиты, которые разработаны для внешнего облучения (экранирование, сокращение времени нахождения в поле действия РВ, удаление от источника облучения).

За счёт естественной радиоактивности (фона природных изотопов и космических излучений) индивидуальная эквивалентная доза составляет 2,4 мЗв/год, в т.ч. за счёт внешнего облучения 0,8 мЗв/год, за счёт внутреннего облучения 1,6 мЗв/год.

С воздухом в организм человека поступает несколько более 1% радиоактивности. Примерно 5% попадает с питьевой водой. Основную опасность представляет поступление радионуклидов с пищей.

Пищевые цепочки

Большинство радионуклидов поступает в организм с продуктами растениеводства и животноводства. Пути миграции радионуклидов в организм человека осуществляются в основном по следующим пищевым цепочкам.

1. Атмосфера – почва – растения – человек (так поступают в организм человека радионуклиды с овощами, ягодами, злаками, грибами и т.д.).

2. Атмосфера – почва – растения – травоядные животные – молоко и мясные продукты – человек (из почвы радионуклиды поступают в корневую систему растений, а затем в вегетативные органы). Имеет место и поступление радионуклидов в организм животных с пищей, так корова с травой получает за год до 600 кг земли, в т.ч. и загрязненной радионуклидами.

3. Атмосфера – растения – животные – молоко и мясные продукты – человек (в этом случае радионуклиды в растения поступают аэральным путем, а затем уже в организм животных).

4. Атмосфера – вода открытых водоемов – фито- и зоопланктон и другие обитатели водоемов – рыбы – человек. Ракообразные, моллюски, водоросли и вообще придонные животные загрязняются более сильно из-за сорбции радиоактивных веществ. В организм рыб радионуклиды поступают с пищей и через жабры.

5. Атмосфера – вода – человек (с водой поступает до 5% активности). Питьевая вода очищается довольно быстро, так как радиоактивные частицы оседают на дно водоемов.

Питательные вещества вместе с фоновыми концентрациями естественных радиоактивных веществ могут быть загрязнены искусственными радионуклидами, которые из внешней среды по биологическим пищевым цепочкам попадают в растения, организмы животных и, наконец, в продукты питания.

Дальнейшая судьба радиоактивных веществ зависит от их растворимости в кислой среде желудка. Многие растворимые соединения, а именно редкоземельные и трансурановые элементы, в частности соединения плутония, при щелочной среде кишечного сока превращаются в нерастворимые соединения. Возможно и обратное, когда плохо растворимые в воде вещества в жидкой среде ЖКТ превращаются в растворимые компоненты, которые хорошо всасываются в кровь через эпителий кишечника.

В организм поступает только некоторая часть радионуклидов, попавших в кишечник, большая часть их проходит «транзитом» и удаляется из кишечника. Коэффициент всасывания (резорбции) – это доля вещества, которая поступает из ЖКТ в кровь. Он равен для трития, натрия, криптона, йода, цезия, ксенона – 1,0; стронция – 0,3; теллура – 0,25; урана, радия – 0,2; бария, полония – 0,1; церия, висмута – 0,05; плутония – 0,0005. Радиоактивные вещества, которые в ЖКТ всасываются в количестве менее 1% (коэффициент всасывания менее 0,01) очень быстро удаляются с калом (в течение 1-4 суток).

Таким образом, в случае поступления радионуклидов в организм с продуктами питания и водой, когда отдельные участки кишечника поглощают значительную часть энергии излучаемых частиц, ЖКТ становится критическим органом.

Наиболее опасным является ингаляционное поступление радионуклидов. Этому содействует большая дыхательная поверхность альвеол, площадь которой достигает 100 м² и более (более чем в 50 раз превышает площадь кожи). Кроме того, этот путь опасен и из-за более высокого коэффициента захвата и усвоения изотопов из воздуха.

Радиоактивность воздуха может быть обусловлена содержанием в нем радиоактивных газов или аэрозолей в виде пыли, тумана, дыма. Доля радионуклидов, которые задерживаются в дыхательной системе, зависит от размера частиц, минутного объема легких и частоты дыхания.

При вдыхании воздуха радиоактивные вещества, содержащиеся в нем (частицы радиоактивной пыли), задерживаются на всем протяжении дыхательного тракта от преддверия носа, носоглотки, полости рта до глубоких альвеолярных отделов легких. При этом между размером частицы и глубиной ее проникновения имеется зависимость. Чем меньший диаметр частиц, тем относительно меньше их задерживается в верхних дыхательных путях, бронхах и тем больше их проникает в альвеолярные отделы легких, т.е. в те области, где отсутствуют механизмы, которые способны выводить попавшие частицы в бронхи и трахею (т.е. наружу).

Дальнейшая судьба радионуклидов, отложившихся в дыхательных путях, также связана с размерами радиоактивных частиц, их физико-химическими свойствами и транспортабельностью в организме. Вещества, хорошо растворяющиеся, в основном быстро (за несколько десятков минут) всасываются в кровеносное русло. Этому содействует широкое развитие сети капилляров, через которые и происходит обмен газов в легких. Затем эти вещества в процессе обмена веществ откладываются в определенных органах и системах или выводятся из организма.

Вещества, слабо растворяющиеся или не растворяющиеся, оседают в верхних дыхательных путях и выделяются вместе со слизью, после чего с большой вероятностью попадают в ЖКТ, где всасываются кишечной стенкой.

Частицы, которые осели в альвеолярной части легочной ткани, или захватываются фагоцитами и удаляются, либо мигрируют в лимфатические узлы легких, трахеи, удаляясь из них в течение нескольких месяцев и даже лет.

Поступление радионуклидов через кожу. До недавнего времени считали, что неповрежденная кожа является эффективным барьером для радионуклидов. Резорбция через неповрежденную кожу в 200–300 раз меньше, чем из ЖКТ. Сейчас известен целый ряд радионуклидов, которые проникают через кожу в составе жидких или газообразных соединений (особенно через порезы, царапины, ссадины). Так, скорость проникновения паров оксида трития и газообразного йода через неповрежденную кожу сравнивается со скоростью проникновения этих веществ через дыхательные пути, а количество плутония, проникающего через кожу в виде водорастворимых соединений, не меньше, чем при поступлении через ЖКТ. При приеме радоновой ванны на протяжении 20 минут в организм проникает через кожу до 4% радона, содержащегося в воде. Хорошо проникает через кожу молибден, церий, иттрий. Стронций, цезий, теллур через кожу всасывается медленно.

КЛИНИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ЧЕЛОВЕКА

Действие ионизирующих излучений на организм человека зависит от следующих факторов:

Величина дозы. Предельно допустимой дозой при однократном облучении (в течение 3-4 суток) является 0,5 Гр, а при многократном (за 10–30 суток) – до 1 Гр. При больших дозах возникает острое лучевое поражение, степень тяжести которого увеличивается с увеличением дозы.

Время облучения. Чем больше продолжительность времени, в течение которого получена одна и та же доза облучения, тем легче протекает лучевое поражение.

Возраст облучаемых. Наиболее чувствительны к облучению дети. Как уже отмечалось, наиболее подвержены действию радиации клетки, которые активно делятся. А наибольшее деление клеток происходит в растущем организме, поэтому воздействие радиации в раннем возрасте особенно опасно. Большую опасность у женщин представляет 8-15 неделя беременности, когда происходит закладка органов плода.

Вид ионизирующих излучений. Биологическое действие излучений в основном определяется их ионизирующей способностью. Для сравнения биологического действия разных видов ионизирующих излучений в радиобиологии введено понятие «относительной биологической эффективности».

Состояние организма в момент облучения. Перегревание, острая кровопотеря, шок, беременность у женщин содействуют более тяжелому течению лучевых поражений.

Индивидуальная радиочувствительность. Разные люди обладают различной индивидуальной чувствительностью к неблагоприятным факторам внешней среды, в том числе и к радиационным воздействиям.

Половые различия. Замечено, что женщины более устойчивы к радиационному воздействию, чем мужчины (это относится и к животным, самцы более чувствительны к действию радиации).

Распределение поглощённой дозы в организме. Поступая в организм человека радионуклиды накапливаются в определённых органах. Так иод-131, являясь тиреотропным элементом, (концентрация его в щитовидной железе в 200 раз выше, чем в других тканях), даёт большую дозу внутреннего облучения. Происходит дегенерация, нарушение функций щитовидной железы (гипер- и гипофункции), склероз сосудов, а в дальнейшем увеличивается частота доброкачественных и злокачественных опухолей железы, происходит нарушение её функций.

Радиочувствительность тканей, органов и систем организма. Радиочувствительность различных органов и систем организма разная.

Основные проявления лучевого поражения связаны с поглощённой дозой в критических органах. Критические органы – органы, ткани, части тела, облучение которых причиняет наибольший ущерб здоровью человека, т.е. первыми выходящие из строя.

Наиболее чувствительным к действию радиации является система кроветворения, а именно красный костный мозг, основным предназначением которого является выработка зрелых клеток крови. В результате облучения происходит быстрое опустошение костного мозга, так как происходит резкое торможение клеточного деления. Уменьшается количество форменных элементов в периферической крови. В результате снижения количества эритроцитов развивается анемия (малокровие), замедляются процессы репарации (восстановления) и наблюдается дефицит кислорода. Уменьшается количество лейкоцитов, развивается лейкопения, что приводит к подавлению иммунологических реакций. Снижение количества тромбоцитов ведёт к развитию геморрагического синдрома (кровотечений, кровоизлияний).

Другой системой с высокой степенью самовосстановления, а значит и высокой радиочувствительностью является тонкий кишечник и желудок. В результате облучения происходит опустошение ворсинок и крипт кишечника, оголение ворсинок.

Поражение красного костного мозга и тонкого кишечника является важным само по себе. Но оно сопровождается и общими нарушениями: в большей или меньшей степени нарушается согласованность структур и деятельность всех частей тела. Так, поражение костного мозга ведёт к уменьшению количества циркулирующих в крови лейкоцитов, а это в свою очередь ослабляет систему защиты от микробов, в том числе и от нормальных обитателей кожи и слизистых оболочек. Поражение слизистой оболочки кишечника приводит к увеличению её проницаемости, потере белков, солей, жидкости (нарушению баланса жидкости и электролитов), проникновению микробов в кровь, развитию воспалительных процессов (вплоть до общего заражения крови – сепсиса). Микробы и их токсины ещё более ослабляют организм, усиливают результаты лучевого поражения.

Острая лучевая болезнь, формы, степени тяжести, периоды

Острая лучевая болезнь (ОЛБ) – это повреждение органов и тканей, возникающие после кратковременного (мгновенного или в течение часов-суток) внешнего или внутреннего облучения в дозе более 1,0 Гр. это общее нарушение жизнедеятельности организма, характеризующееся глубокими функциональными и морфологическими изменениями всех его систем и органов в результате поражающего действия различными видами ионизирующих излучений при превышении допустимой дозы (или – комплексная реакция организма на воздействие больших доз ионизирующих излучений). Для нее характерны клинические синдромы заболевания, переходные формы, или их сочетания.

Большое значение в патогенезе ОЛБ имеет повреждение критических органов или систем, приводящее к появлению определенных синдромов лучевого поражения и обуславливающее выживаемость организма или его гибель спустя определенное время после облучения.

В зависимости от полученной дозы облучения в клинике ОЛБ преобладают проявления костномозгового, кишечного или церебрального синдромов. В соответствии с этим выделяют *типичную форму* ОЛБ, а также острейшие (молниеносные) формы:

- *кишечную* (10,0–20,0 Гр);
- *токсемическую* (сосудистую) (20,0–50,0 Гр);
- *церебральную* (более 50,0 Гр).

Для типичной формы характерно поражение кроветворных органов, а также в зависимости от степени тяжести – прогноз для жизни от благоприятного до неблагоприятного (смертность от 0 до 95% с летальным исходом через 10–60 суток).

Кишечная форма ОЛБ развивается при облучении в дозе 10–20 Зв. Преобладает поражение тонкого кишечника. Наблюдается денатурация слизистой оболочки тонкого кишечника, потеря жидкости, белков, солей. Картина осложняется микробной инвазией. Желудок, толстый кишечник, прямая кишка подвергается таким же изменениям, но в меньшей степени. Прогноз для жизни абсолютно неблагоприятный, смертность составляет 100% и наступает на 8–16 суток при явлениях тяжелого энтерита.

Сосудистая (токсемическая) форма ОЛБ характеризуется повреждением паренхиматозных органов при облучении дозой в 20–50 Зв. При этом наблюдается тяжелая интоксикация, почечная недостаточность, нарушение сердечной деятельности, падение артериального давления. Смерть в первые 4–7 суток при явлениях энцефалопатической комы.

Церебральная (нервная) форма ОЛБ наблюдается при дозе свыше 50 Зв. В результате прямого повреждающего действия облучения на ЦНС (повреждение нервных клеток и сосудов мозга), наблюдается отёк мозга, нарушение функций жизненно важных центров (дыхания и кровообращения). Смерть наступает на 1–3 суток после облучения на фоне выраженной церебральной и менингеальной симптоматики.

Однократное общее облучение от 1,0 до 10,0 Гр определяет *типичную* или *костномозговую (гемопозитическую)* форму ОЛБ.

Ведущую роль в клинической картине играет поражение кроветворной функции костного мозга. Эта форма по тяжести течения подразделяется на степени:

- I степень (лёгкая) возникает при дозе 1–2 Зв (1,0–2,0 Гр);
- II степень (средняя) – 2–4 Зв (2,0–4,0 Гр);
- III степень (тяжёлая) – 4–6 Зв (4,0–6,0 Гр);
- IV степень (крайне тяжёлая) – 6–10 Зв (6,0–10,0 Гр).

Костномозговая форма ОЛБ имеет явно выраженную клиническую картину, которая состоит из ряда симптомов, развивающихся последовательно и характеризующихся определённой периодичностью течения.

Различают следующие четыре периода ОЛБ:

1. Период первичной общей реакции на облучение (начальный). Начинается в ближайшие часы после облучения. Длится от нескольких часов (при лёгкой степени) до нескольких суток. Происходят нарушения нервно-рефлекторной регуляции со стороны ЦНС и появляются симптомы прямого повреждающего действия излучения на лимфоидную ткань и костный мозг. Характерными клиническими симптомами являются: тошнота, рвота, головная боль, головокружение, потеря аппетита, слабость, сонливость, шаткая неуверенная походка, повышение температуры, покраснение лица, потливость. Со стороны сердечно-сосудистой системы: тахикардия, аритмия, лабильность артериального давления (АД) с тенденцией к снижению (вплоть до коллапса). В тяжёлых случаях – понос, что является признаком повреждающего лучевого действия на эпителий кишечника. Со стороны почек – полиурия, белок и глюкоза в моче. В крови – лимфопения.

2. Скрытый период (латентный), или период мнимого клинического благополучия. Длится от 10-15 дней (при тяжёлой форме) до 4–5 недель. При больших дозах может отсутствовать. Симптомы первичной реакции, обусловленные нервно-регуляторными нарушениями, ослабевают и даже исчезают. Может оставаться лабильность пульса и АД, утомляемость, потливость. В это же время нарушения в организме нарастают: опустошается костный мозг, повреждается эпителий кишечника, подавляется сперматогенез, развиваются поражения кожи (отёчность, краснота, иногда пузыри), начинается выпадение волос. Прогрессирует лимфопения. Развивается тромбоцитопения.

3. Период разгара болезни, или выраженных клинических проявлений. Продолжительность от одной (при лёгкой степени) до 2–3 недель. Ухудшается самочувствие, повышается температура, появляются головные боли, головокружение, бессонница, развивается резкая слабость. Расстройство функции кишечника - рвота, исчезает аппетит, развивается понос с кровянистыми выделениями, масса тела снижается на 25–30%. Нарушается проницаемость сосудов и свёртываемость крови, что сопровождается кровотечениями и кровоизлияниями в кожу, слизистые оболочки, в жизненно-важные органы. Продолжается выпадение волос, наступает облысение. Количество лимфоцитов и тромбоцитов в крови снижается (до их полного исчезновения из русла крови), уменьшается количество лейкоцитов. Глубокое поражение кроветворной и иммунной систем приводит к развитию инфекционных осложнений (некротические пневмонии и др.), которые могут привести к гибели организма.

4. Период восстановления. При благоприятном исходе начинается на 2–5 месяце после облучения и длится от 3–6 месяцев (при лёгкой степени) до 1–3 лет. Самочувствие улучшается, падает температура. Отстают нарушения нервно-регуляторного порядка, уменьшаются головные боли, улучшается сон. Восстанавливается функция ЖКТ, прекращается рвота и понос, заживают изъязвленные участки слизистых, исчезают геморрагические признаки, медленно восстанавливаются функции кроветворения. На местах облучения через 2–6 месяцев после облучения начинается рост волос. Может сохраниться на длительное время нейроциркуляторная дистония гипотонического типа, нервная истощаемость, эндокринные расстройства, недостаточность функции кроветворения.

Исходами ОЛБ могут быть полное или частичное выздоровление, или смерть. К часто встречающимся в отдаленный период последствиям радиационного поражения относятся:

- астеновегетативный синдром;
- эндокринные нарушения;
- кардиоваскулярные изменения;
- умеренная лейкопения и тромбоцитопения;
- лейкозы и новообразования.

Хроническая лучевая болезнь, её характеристика

Хроническая лучевая болезнь (ХЛБ) – самостоятельная нозологическая (нозология – учение о болезнях) форма лучевого поражения. При длительном воздействии низких доз излучения с мощностью более 0,25–0,55 Зв/год с накоплением за 2–5 лет дозы свыше 1 Зв формируется симптомокомплекс хронической лучевой болезни (ХЛБ). Лучевая нагрузка до 0,05–0,10 Зв/год не обуславливает развитие ХЛБ. При суммарной дозе ниже 1,00–1,50 Зв/год клинические формы нечеткие, суммарная доза свыше 4–5 Зв вызывает тяжелые формы ХЛБ. Развивается и протекает ХЛБ длительно, нарушенные функции восстанавливаются медленно. Облучение может быть общим либо местным, внешним или внутренним (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{125}I , ^3H и др.). ХЛБ, как и ОЛБ, характеризуется фазностью течения, особенностями проявления, связанными с неравномерностью облучения, и также имеет отдалённые последствия.

Механизм развития ХЛБ приблизительно такой же, как и при ОЛБ: поражается весь организм, но прежде всего, наблюдается угнетение кроветворения. Своеобразие ХЛБ состоит в том, что в активно пролиферирующих тканях (пролиферация – разрастание ткани организма путём размножения клеток) благодаря интенсивным процессам клеточного обновления, длительное время сохраняется возможность морфологического восстановления тканевой организации. В то же время такие стабильные системы, как нервная, сердечно-сосудистая и эндокринная, отвечают на хроническое лучевое воздействие сложным комплексом функциональных реакций и крайне медленным нарастанием дистрофических изменений.

Для ХЛБ характерны: астенический синдром (вялость, потеря аппетита, быстрая утомляемость, бессонница, снижение трудоспособности); нарушение гемопоэза (умеренно выраженные лейкопения, тромбоцитопения, анемия); периодически обостряющийся геморрагический синдром; упадок питания и т.д.

В течении ХЛБ выделяют 4 нечётко разграниченных периода: начальных функциональных нарушений, собственно заболевания, восстановления и исходов. Сроки развития ХЛБ, степень её тяжести зависят от скорости накопления дозы излучения и индивидуальных особенностей организма; чем быстрее происходит накопление дозы и менее устойчив к воздействию излучения организм, тем быстрее появляется заболевание и тем тяжелее оно протекает.

Строго разграничить заболевание по степени тяжести трудно, однако условно выделяют ХЛБ лёгкой (I), средней (II), тяжёлой (III) и крайне тяжёлой (IV) степени, последние три наблюдаются крайне редко.

Лёгкая степень ХЛБ характеризуется сравнительно небольшими функциональными изменениями со стороны системы крови, а также сердечно-сосудистой системы, увеличением количества эритроцитов, гемоглобина, а затем их уменьшением. Позднее развивается лейкопения, которая носит нестойкий, умеренно выраженный характер. Уменьшается и количество тромбоцитов.

Длительное и систематическое воздействие ионизирующего излучения приводит к астенизации организма (астения – состояние бессилия, общей слабости). Появляется быстро наступающее утомление, плохое самочувствие, слабость, недомогание, головные боли, нарушение сна. Астеническое состояние, как правило, сопровождается различными вегетативными расстройствами (сосудистой дистонией, падением АД и др.). Могут наблюдаться нарушения функции анализаторов (обонятельного, вкусового, вестибулярного, слухового, зрительного, осязательного), что выражается в повышении порога ощущений.

Отмечается волнообразность симптомов, они то увеличиваются, то уменьшаются. Трудоспособность длительное время не нарушается. После длительного (7–8 недель) лечения может наступить полное выздоровление. Доза облучения не превышает 1,5 Зв.

Средняя степень ХЛБ помимо более выраженных функциональных нарушений, характерных для лёгкой степени (сильной головной боли, увеличением утомляемости и т.д.), характеризуется отчётливыми деструктивными изменениями в организме, преимущественно в органах кроветворения (снижение количества эритроцитов, гемоглобина, лейкоцитов, тромбоцитов, увеличение проницаемости капилляров и их хрупкости), что проявляется кровоточивостью десен, слизистой оболочки носа и т.д. Явления астенизации прогрессируют, наблюдается потеря веса, снижается аппетит, развивается потливость, акроцианоз. Нередко отмечается стойкая сосудистая гипотония, тен-

денция к брадикардии, циркуляторные нарушения. Иногда появляются трофические изменения кожных покровов и ногтей. Снижается сопротивляемость инфекциям (грипп, ангина и т.д.). Наступает длительная полная потеря трудоспособности. Доза облучения в пределах 2–2,5 Зв.

Тяжёлая степень ХЛБ характеризуется тяжёлым состоянием больных. Отмечаются выраженные деструктивные изменения. Дистрофические изменения наблюдаются и в таких радиорезистентных тканях, как соединительная, мышечная. У больных ухудшается самочувствие, развивается резкая слабость, стойкое понижение АД, им нужен постельный режим. Ткани утрачивают способность к нормальной регенерации, выявляются глубокие обменно-трофические нарушения в различных органах, в частности, глубокое подавление гемопоэза. Вследствие ослабления иммунологической реактивности организма возможны инфекционно-септические осложнения. Температура тела повышается, усиливаются кровотечения (носовые, кишечные, из полости рта). Заболевание может закончиться смертью по причине гематологических или инфекционных осложнений. Доза облучения превышает 2,5 Зв.

Крайне тяжёлая степень ХЛБ характеризуется более глубоким характером всех изменений в организме. Заболевание, как правило, оканчивается смертью. Для терминального периода характерны глубокие деструктивные изменения в кроветворной системе, ЖКТ и общее истощение (кахексия).

Ближайшие и отдаленные последствия облучения

Ближайшие последствия – это первичная реакция и поражение организма, наступающее в течение нескольких недель после острого облучения (однократного кратковременного облучения). Они могут быть общими и местными. К общим относится, например, острая лучевая болезнь. Локальные (местные) лучевые поражения включают лучевые ожоги кожи, помутнение хрусталика (лучевую катаракту), выпадение волос (эпиляцию), стерилизацию и др.

Кожа отличается относительно высокой радио поражаемостью. Наибольшей чувствительностью к радиационному воздействию обладают клетки волосяных фолликулов, в результате чего происходит выпадение волос. Лучевые ожоги включает субэритематозную, эритематозную, буллезную и язвенно-некротическую формы.

Хрусталик является наиболее уязвимой для радиации частью глаза, особенно чувствительна его периферическая часть.

Клетки половых желез высокочувствительны к ионизирующему излучению. Яичники женщин содержат овоциты, которые гибнут при дозе в 4 Гр, что вызывает стойкое бесплодие. У мужчин временная стерильность наступает при дозе менее 1 Гр.

Отдаленные последствия – изменения в организме, возникающие в отдаленные сроки (через годы) после облучения. Они могут быть сомати-

ческими, когда изменения возникают в самом облучаемом организме, и генетическими, которые наблюдаются в организме потомков облученного человека.

Различают неопухолевые и опухолевые формы отдалённых последствий.

Неопухолевые формы включают три вида патологических процессов:

1. *Гипопластические состояния* – развиваются главным образом в кроветворной ткани, слизистых оболочках органов пищеварения, дыхательных путей, в коже и других органах. Основными нарушениями являются: гипо- или гиперхромные анемии, лейкопения, атрофия слизистой оболочки желудка, кишечника, гипо- или анацидный гастрит, атрофия половых желез и бесплодие (стерильность).

2. *Склеротические процессы*. Происходит обширное и раннее повреждение сосудистой сети облучённых органов, развитие очаговых или диффузных разрастаний соединительной ткани на месте погибших паренхиматозных клеток. Основные нарушения: цирроз печени, нефросклероз, пневмосклероз, атеросклероз, лучевые дерматиты, лучевые катаракты, некрозы костной ткани, поражения нервной системы.

3. *Дисгормональные состояния* развиваются без видимой дозовой зависимости. К проявлениям дисгормональных состояний относятся ожирение, гипофизарная кахексия, несахарный диабет, кистозные изменения яичников, патологические сдвиги в половых циклах, гиперплазия слизистой оболочки матки, паренхимы молочных желез (что может привести к развитию опухолей), поражения щитовидной железы (гипотиреодизм, новообразования), сахарный диабет и др.

Опухолевые формы. К ним относятся опухоли костей, печени, почек, лёгких, кожи, матки, яичников, предстательной железы, желез внутренней секреции. И, наконец, имеются опухоли сложного генеза, – лейкозы, опухоль молочных желез.

Наиболее часто наблюдаются *лейкозы*, развитие которых происходит через 5–25 лет после облучения. Частота лейкозов у облучённых по сравнению с необлучёнными возрастает в 5–10 раз.

Позже возникают другие раковые заболевания (рак щитовидной железы, молочной железы, яичников, желудка и лёгких), главным образом в результате общего лучевого воздействия. Опухоли кожи и костей являются результатом местного облучения – внешнего (кожа) или внутреннего (кости). При хроническом облучении малыми дозами развитие злокачественных опухолей в 3–10 раз ниже, чем при однократном воздействии той же дозы. Детский организм в силу анатомо-физиологических особенностей и большой чувствительности к действию ионизирующего излучения в большей степени подвергается риску (что видно на примере рака щитовидной железы у детей). Сокращается и время появления раковых новообразований у детей по сравнению со взрослыми.

Возникновение *катаракты (помутнения) хрусталика* – типичное отдалённое последствие тотального облучения организма или местного облучения глаза и хрусталика.

К отдалённым последствиям облучения относится также *нефросклероз*, развивающийся в результате повреждения почечной ткани и замещения её соединительной тканью. Стойкое повышение АД, характерное для лучевого поражения, в значительной степени зависит от развития нефросклероза.

Радиобиологические эффекты облучения живого организма делятся на пороговые (детерминированные, нестохастические) и беспороговые (стохастические). Радиационными эффектами нестохастического характера следует считать, прежде всего, острую лучевую болезнь, местные повреждения кожи (ожоги), лучевую катаракту, стерилизацию, дистрофические повреждения различных тканей. При этом имеется определённое пороговое значение дозы облучения (например, при одноразовом воздействии радиации в 1 Гр), ниже которого видимого действия радиации не наблюдается.

Такие нарушения, как опухоли различной локализации, лейкозы, генетические эффекты, умственная отсталость, уродства носят стохастический беспороговый характер. Вероятность возникновения этих поражений существует при самых минимальных дозах облучения.

Генетические повреждения, вызываемые при облучении ионизирующими излучениями

Генетические повреждения – это передаваемые по наследству повреждения генетического кода в половых клетках. Известно, что элементарной единицей наследственности является ген, который имеет строго определённую структуру и функцию. Все гены клеток организма создают общий генотип индивидуума и этим обеспечивают жизнедеятельность организма, как целого.

Мутацией называют изменения в гене или хромосоме. Перед последующим делением клетки измененная хромосома воспроизводит копию самой себя, т.е. происшедшие в ней изменения передаются хромосомам последующих поколений клетки. Таким путём наследуется мутированный ген; он приобретает постоянный характер. Организм, в котором проявляются признаки мутированного гена, принято называть мутантом. Если же мутация произошла в половой клетке, то развивающийся организм будет иметь новые наследственные признаки.

Различают генные, хромосомные и геномные мутации. Генные мутации – это мутации, возникающие в результате изменения лишь одного гена (их называют ещё точковыми). Хромосомные мутации – это изменения в структуре хромосом. Все виды хромосомных мутаций, связанных с нарушением структуры хромосом, называют хромосомными aberrациями (отклонениями). Геномные мутации, или мутации кариотипа, это мутации, связанные с изменением числа хромосом.

Появление мутаций в соматических клетках ведёт к возникновению соматических эффектов радиации. Одно из проявлений соматических мутаций – злокачественный рост клеток. Мутации соматических клеток по наследству не передаются.

Генетические последствия облучения могут наблюдаться при любой дозе. Не установлен дозовый порог, ниже которого излучение не вызывает мутаций.

Мутации приводят к наследственным заболеваниям. Около 10% новорожденных имеют те или иные наследственные нарушения, в подавляющем большинстве они не связаны с воздействием малых доз ионизирующей радиации. Среди аутосомных доминантных генных мутаций известны: аниридия, нейрофиброматоз, мышечная дистрофия, поликистоз почек и др. Среди аутосомных рецессивных генных мутаций наиболее часто встречаются микроцефалия, гидроцефалия, идиотия, ихтиоз, миопатия, гемофилия. Мутации могут привести к различным порокам развития и уродствам: гетерохромии (разной окраски радужной оболочки глаз), порокам сердца, дальтонизму, многопалости, «заячьей губе», «волчьей пасти». Мутации могут быть причиной задержки физического и умственного развития.

Генные мутации и хромосомные aberrации могут привести к самопроизвольным выкидышам. Но даже если дети с наследственными дефектами рождаются живыми, вероятность дожить до года в пять раз меньше, чем для нормальных детей.

Риск генетических повреждений в первых двух поколениях (уродства, умственная неполноценность) составляет 40% от риска рака (рак со смертельным исходом составляет 4,5–7,1% на каждый Зв дозы).

Пути снижения внутреннего облучения при ингаляционном поступлении радионуклидов

Внутреннее облучение – облучение организма, происходящее от источника радиоактивного излучения (радиоактивного вещества), находящегося внутри организма. Оно продолжается непрерывно до тех пор, пока находящееся в организме радиоактивное вещество не распадётся или же не будет выведено из организма.

В условиях проживания на загрязнённой радионуклидами территории следует учитывать основные принципы снижения внутреннего облучения:

- уменьшение поступления радионуклидов в организм;
- усиление выведения радионуклидов из организма;
- использование радиопротекторных свойств пищи;
- обогащение рациона минеральными солями с целью замещения радионуклидов в организме и восполнения дефицита микроэлементов.

Поступление радионуклидов в организм происходит через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт (с водой и пищей) и через кожу.

Для защиты от внутреннего облучения при вдыхании радиоактивных аэрозолей применяются следующие мероприятия:

- сократить до минимума пребывание на загрязнённой радионуклидами (аэрозолями) территории;
- обязательно защищать органы дыхания, для чего использовать респираторы, противогазы, ватно-марлевые повязки;
- защищать кожу и волосяные покровы от попадания радиоактивной пыли (использовать головные уборы, косынки);
- укрыться в жилых домах во время рассеивания радиоактивных веществ;
- принять меры защиты от проникновения радионуклидов в дом с воздухом (закрывать форточки, уплотнить рамы и дверные приёмы);
- систематически проветривать помещение (в основном с целью снижения концентрации радона);
- поддерживать чистоту помещения, ежедневно производить влажную уборку;
- следить за чистотой одежды и обуви, чаще стирать бельё, верхнюю одежду хранить отдельно от домашней;
- обувь регулярно мыть, входя в помещение менять обувь;
- строго соблюдать правила личной гигиены (ежедневно принимать душ, еженедельно мыться в бане);

Для защиты органов дыхания можно использовать подручные средства. Так, мужской платок, сложенный в 16 слоёв защищает органы дыхания от аэрозолей в 17 раз; женский платок в 4 слоя защищает в 3 раза; два слоя туалетной бумаги снижают поступление аэрозолей в 12 раз.

Пути снижения внутреннего облучения при поступлении радионуклидов с пищей

Для уменьшения поступления радионуклидов с пищей следует соблюдать следующие гигиенические требования:

- не пить воду из открытых источников, воду хранить в закрытых ёмкостях;
- пищу принимать в закрытых помещениях, а хранить её в герметической таре;
- ограничить употребление «местных» продуктов, особенно содержащих большое количество радионуклидов – продукты «концентраторы»: грибы (особенно маслята, моховики, говорушки, горькушки), бобовые (фасоль, горох);
- не употреблять овощи, которые росли в открытом грунте и собраны после поступления радионуклидов в окружающую среду;
- не пить молоко от коров, которые продолжают пастись на загрязнённых пастбищах;
- полнее очищать корнеплоды (овощи) от частиц земли, тщательно их мыть;

- снимать кожуру овощей и фруктов, не употреблять «кочерыжки» от капусты;
- овощи предварительно замачивать в воде на несколько часов;
- приготавливать «вторичные» бульоны: мясо вымачивают в течение 2–4 часов в холодной воде (10% растворе поваренной соли); воду сливают, заливают новую порцию и доводят до кипения, после чего воду опять сливают и варку ведут в третьей порции воды;
- широко использовать засолку и маринование овощей, фруктов, грибов (рассол и маринад в пищу не употреблять). Содержание радионуклидов снижается при этом в 1,5–2 раза;
- исключить из меню мясокостные бульоны, особенно кислые, так как стронций преимущественно переходит в бульон в кислой среде; исключить из меню холодец;
- проводить рациональную кулинарную обработку пищевых продуктов (приготавливать отварные, а не жареные или тушёные продукты);
- удалять внутренности, сухожилия, головы рыбы и птицы;
- употреблять общеукрепляющие средства, витамины (как в виде натуральных продуктов – овощей, фруктов, ягод, так и в виде аптечных препаратов);
- увеличить употребление таких минеральных веществ, как калий, кальций, фосфор (наличие их в достаточном количестве в продуктах приводит к уменьшению накопления в организме человека радионуклидов: цезия, стронция и др.). Богаты калием фасоль, горох, картофель, щавель, томаты, крупа овсяная и пшеничная, капуста, редис, чёрная смородина. Кальций содержится в молочных продуктах, фасоли, горохе, крупе овсяной, гречневой, перловой, моркови, капусте. Фосфором богаты яйца, крупа гречневая, овсяная, перловая, горох, фасоль, хлеб ржаной;
- не рекомендуется употреблять вареные яйца, так как в скорлупе накапливается стронций-90, при варке переходящий в белок яиц;
- проводить техническую кулинарную обработку продуктов. Творог содержит цезий-137 в 4–6 раз, сыр – в 10 раз, масло – в 50 раз меньше, чем молоко, из которого они произведены. Отварная рыба содержит цезий-137 в 10 раз меньше, картофель отварной – в 1,7 раз меньше, чем до варки.

Мероприятия по ускорению выведения радионуклидов из организма

Время пребывания радионуклидов в организме определяется, с одной стороны, периодом полураспада, с другой – скоростью процессов их выведения из организма через кишечник, потовые железы, лёгкие, с желчью.

При отсутствии поступления извне радионуклиды удаляются из мышечной и нервной ткани за 5–30 дней, из печени, почек, селезёнки – за 1–2 месяца, из лимфатических узлов – за 2–3 года. Усилить выведение радиоактивных веществ из организма можно регулярным дополнительным введением жидкости (морсы, соки, компоты и т.д.). Рекомендуется приме-

нять настои трав и плодов, обладающих слабым мочегонным действием (ромашки, зверобоя, бессмертника, тысячелистника, мяты, шиповника, укропа, тмина, зелёного чая). Для регулярного опорожнения кишечника используют продукты, содержащие клетчатку (хлеб грубого помола, пшено, гречку, перловку, овсянку, капусту, свеклу, морковь). Можно принимать отвары льна, крапивы, ревеня.

Особенно нужно отметить роль пектинов в выведении радионуклидов. Пектины – полисахариды растительного происхождения, они способны связывать и выводить из организма металлы, в том числе стронций, цезий и др. Пектины содержатся в соках с мякотью, яблоках, персиках, крыжовнике, клюкве, абрикосах, сливе, черной смородине, вишне, черешне, клубнике, дыне, зефире, джемах, мармеладе и др. Пектин содержащие продукты улучшают перистальтику кишечника, которая ускоряет выведение ненужных веществ из организма.

Способствуют выведению радионуклидов из организма катехины – дубильные вещества, антоцианы – красящие вещества. Их много в чае, соках. Поистине уникальными радиопротекторными свойствами обладает грецкий орех. Ядра ореха снижают пероксидное окисление липидов. В их состав входит калий, кальций, магний, фосфор, железо, марганец, медь, цинк и другие микроэлементы. Они богаты витаминами Е, В₁, В₆, дубильными веществами. Толчёные ядра с мёдом увеличивают мочеотделение и обладают желчегонным действием, способствуют выведению радионуклидов (особенно цезия).

При радиационном поражении особая роль отводится режиму питания. При избыточном потреблении пищи в организм попадает и большее количество радионуклидов. В условиях действия малых доз радиации в результате пероксидного окисления липидов в организме образуются ядовитые вещества (токсины). При действии радиации необходимо обеспечить организм достаточным количеством белков. Белки обладают радиопротекторными свойствами, они повышают устойчивость к хроническому внутреннему облучению, снижают всасывание радионуклидов, повышают устойчивость организма к инфекции. Радиозащитным действием обладают продукты, богатые полинасыщенными жирными кислотами. Они регулируют процессы пероксидного окисления липидов (растительные масла, рыба, орехи, семена тыквы, подсолнечника).

К веществам, снижающим радиационное воздействие на организм принадлежат витамины. Особенно большая роль отводится витамину А. Недостаток его сказывается на нервной и иммунной системах. Витамин А и витамин Е способствуют нормализации метаболических процессов и уменьшению пероксидного окисления липидов, способствует стабилизации клеточных мембран. Витамин С способствует усилению окислительно-восстановительных способностей клетки, улучшает тканевое дыхание. Витамины групп В улучшают метаболизм, антитоксическую функцию пе-

чени. Недостаток витаминов и белков отражается на функции защиты организма от вредоносных факторов внешней среды.

Пути снижения содержания радионуклидов в продукции растениеводства

Основные дозовые нагрузки на население, связанные с аварией на ЧАЭС, обусловлены потреблением сельскохозяйственных продуктов, производимых на загрязнённых территориях. Чтобы сократить поступление радионуклидов в организм человека необходимо снижать интенсивность их поступления в растения.

Накопление радионуклидов в урожае сельскохозяйственных культур можно снизить путём использования различных агрохимических и агротехнических приёмов:

1. общепринятые (традиционные) мероприятия в агропромышленном производстве, направленные на сохранение и увеличение плодородия почвы, рост урожайности и одновременно способствующие уменьшению перехода радиоактивных веществ из почвы в растение.

2. специальные приёмы (уменьшающие поступление радионуклидов в растения, но уменьшающие урожайность растений и ухудшающие плодородие почвы).

1. Основным *агрохимическим способом* уменьшения поступления радионуклидов в растения является химизация земледелия. В первую очередь это внесение удобрений и различных химических мелиорантов, улучшающих физико-химические свойства почвы и увеличивающих её плодородие. Вносятся органические удобрения, минеральные удобрения, проводится известкование почвы и другие агрохимические приёмы. Фосфорные и калийные удобрения уменьшают переход радионуклидов в растения в 2 и более раз. Известкование почвы уменьшает поступление радионуклидов в продукцию растениеводства в 1,5–3 раза.

Снижение концентрации радионуклидов в урожае при внесении удобрений обусловлено рядом причин, основными из которых являются:

- улучшение условий питания растений, а отсюда и увеличение биомассы, что приводит к «разбавлению» радионуклидов в урожае;
- усиление антагонизма между ионами радионуклидов и ионами солей вносимых удобрений (цезий – калий, стронций – кальций);
- образование плохо растворимых соединений радионуклидов с удобрениями.

Снижает переход радионуклидов в растения и применение микроэлементов (бора, молибдена), сапропеля и др. Обычно используют некорневую подкормку микроэлементами.

Основным агротехническим приёмом для ограничения перехода радионуклидов в растение является пахота почв, что приводит к перераспределению радионуклидов в корнеобитаемом слое почвы.

Радионуклиды перемещаются в глубину, а большинство растений обладает мелкой корневой системой.

II. К *специальным приёмам* относятся следующие:

- механическое удаление верхнего загрязнённого слоя почвы;
- глубокая вспашка с захоронением загрязненного верхнего слоя почвы;
- фитомелиорация загрязненных почв;
- внесение в почву специальных мелиораторов, связывающих радионуклиды в труднодоступные для растений формы;
- специальный подбор сельскохозяйственных растений (сельскохозяйственных культур и их сортов) для выращивания на загрязненных территориях.

Механическое удаление верхнего загрязненного слоя почвы – трудоёмкий и дорогостоящий способ, который можно использовать на ограниченных площадях.

Наиболее эффективным приёмом считается двухъярусная глубокая вспашка, когда верхний слой толщиной в 4–6 см укладывается на глубину 40–80 см, что снижает поступление радионуклидов в растения в 3–10 раз.

В результате аккумуляции радионуклидов растениями концентрация их в фитомассе может быть больше, чем в почве. Этот приём очищения почвы называется фитомелиорацией почв.

Одним из способов, ограничивающих аккумуляцию растениями радионуклидов, является перевод последних в трудноусвояемые формы путём внесения в почву химических реагентов.

Особое место отводится подбору культур. Концентрация цезия-137 в сельскохозяйственных культурах распределяется следующим образом:

- зерновые, бобовые и зернобобовые (люпин > овёс > гречка > горох > ячмень > просо > соя > фасоль);
- овощные и картофель (капуста > картофель > свекла > морковь > огурцы > томаты);
- травы (овсяница > костёр > клевер > тимофеевка).

По концентрации стронция-90 овощные культуры располагаются в следующем порядке: свекла > огурцы > морковь > капуста > томаты > картофель; травы располагаются в следующем порядке: разнотравье > осоки > ежа сборная > мятлик.

Озимые культуры накапливают радионуклидов меньше, чем яровые. По аккумуляции цезия и стронция зерновые и бобовые культуры разделяются на группы:

- 1) слабо накапливающие (ячмень > пшеница > овёс);
- 2) средне накапливающие (крупяные: просо > чумиза > гречка);
- 3) сильно накапливающие (зернобобовые: фасоль > горох > бобы).

Из технологических приёмов следует использовать переработку растениеводческой продукции: получение растительного масла из подсолнечника и сои, крахмала и спирта из картофеля, сахара из сахарной свеклы.

Концентрация радионуклидов уменьшается при консервировании продукции, засолке и других видах обработки. При переработке зерна в муку много радионуклидов удаляется вместе с оболочками. Дезактивацию растительного сырья можно проводить путём различного рода промывок (при поверхностном загрязнении растений).

Пути снижения содержания радионуклидов в продукции животноводства

Мероприятия по уменьшению содержания радионуклидов в продукции животноводства можно разделить на 4 группы:

1. приёмы, используемые при содержании животных на лугах и пастбищах;
2. изменения в режиме кормления животных;
3. перепрофилирование отраслей животноводства;
4. технологическая переработка продуктов животноводства.

Корм – основной источник поступления радионуклидов в организм животных. В лугопастбищной растительности накапливается радионуклидов больше, чем в кормах искусственных сенокосов. Поступают радионуклиды в организм животных также с почвой (в год крупный рогатый скот получает 600 кг загрязнённой почвы, овцы – 75 кг).

Для защиты организма животных используют временное прекращение выпаса животных и перевод их на стойловое содержание (этот приём эффективен в отношении короткоживущих радионуклидов – йода-131). Количество цезия-137 в молоке при этом снижается в 3–5 раз, в мясе – в 2–3 раза. При отсутствии запаса «чистых» кормов возможно 4–8-ми дневное голодание животных.

В дальнейшем можно преобразовывать естественные сенокосы в искусственные, применять подбор возделываемых трав и специальную агротехнику их воздействия, проводить мелиорацию лугов и пастбищ. Применение всех этих мер может снизить содержание радионуклидов в молоке и мясе соответственно в 10 и 20 раз.

Изменение рациона кормления животных включает переход на использование «чистых» кормов; подбор кормов с минимальным содержанием радионуклидов (злаковые); обогащение рациона кормовыми добавками, которые избирательно связывают радионуклиды цезия и способствуют их удалению из организма (ферроцианидсодержащий препарат – «ФЕРОЦИН»), соли лития и др.); насыщение рациона минеральными веществами, особенно с содержанием кальция и калия, микроэлементами, белково-витаминными препаратами.

Учитывая то, что наиболее «чистое» мясо производится в свиноводстве и птицеводстве необходимо перепрофилировать животноводство с

крупного рогатого скота на свино- и птицеводство. При относительно высоких плотностях радиоактивного загрязнения целесообразно организовывать звероводческие хозяйства. При загрязнении почвы цезием-137 с плотностью в 15-40 Ки/км², где невозможно получение «чистого» молока проводят переспециализацию с молочного на мясное производство.

Технологические приёмы по снижению радионуклидов в животноводческой продукции делится на обычные и специальные. Технологическая переработка молока на сливки, творог, сыр, масло сопровождается переходом радионуклидов в обрат, сыворотку, пахту со снижением радионуклидов в конечном продукте в 10-50 раз. Используют также переработку молока и сливок на сгущённые и сухие. Практически не остаётся радионуклидов в топлёном масле. Для лучшей очистки молока от стронция-90 добавляют лимонную, уксусную и соляную кислоты, которые образуют со стронцием-90 растворимые в воде соли и нерастворимые, выпадающие в осадок.

Для уменьшения концентрации радионуклидов в мясе вываривают его в воде и удаляют бульон (в бульон переходит до 80% цезия-137). Мясо вымачивают также в воде с последующим посолом (содержание радионуклидов снижается на 80-90%). Перетопка сала сопровождается удалением 95% цезия-137 в шкварку.

Среди специальных приёмов очистки молока применяют ионно-обменные смолы (пирофосфат и циалит), хорошо поглощающие ионы цезия и стронция, 80-90% которых удаляется вместе со смолами при тонкой фильтрации молока. Такой же эффект даёт сепарирование молока. Применяют также электродиализ.

Технологическая переработка продукции животноводства с целью уменьшения содержания радионуклидов экономически менее выгодна, чем использование приёмов по ограничению накопления радионуклидов в продукции растениеводства и животноводства.

АВАРИЯ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ

Авария на Чернобыльской АЭС (26 апреля 1986 года) является самой крупной и трагичной радиационной катастрофой в истории Земли. В общей сложности пострадали десятки государств, миллионы человек, вся планета как экосистема в целом.

Две трети всех радионуклидных выбросов (до 70%) пришлось на территорию Беларуси. Загрязненной оказалось 23% территории республики, где размещалось 27 городов, 2697 населенных и проживало более 2,2 млн. человек, 1800 тысяч га сельскохозяйственных угодий, из которых

264 тысячи га полностью исключены из оборота. От Чернобыльской катастрофы пострадал каждый пятый белорус, воздействию облучения подверглись более 500 тысяч детей, 137 тысяч человек были отселены с загрязненных территорий.

Площадь загрязнения почвы ^{137}Cs с плотностью 37 кБк/м² и более составила 46,45 тыс. км² (23% территории). До чернобыльской катастрофы загрязнение ^{137}Cs территории Беларуси за счет глобальных выпадений составляло 1,5-1,9 кБк/м².

^{90}Sr с уровнем содержания в почве свыше 5,5 кБк/м² оказалось загрязненной 21,1 тыс. км² (10%).

Загрязнение почвы изотопами ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu более 0,37 кБк/м² составило 4,0 тыс. км² или почти 2% территории Республики Беларусь.

Имеются места, где уровни загрязнения значительно выше. На таких территориях получить в радиационном отношении «чистую» продукцию не удастся. И это несмотря на то, что с момента аварии на ЧАЭС прошло более 30 лет.

Катастрофа на ЧАЭС произошла 26 апреля 1986 года в 1 час 24 минуты во время испытания на одном из турбогенераторов при плановой остановке реактора 4-го блока типа РБМК (реактор большой мощности, канальный).

В результате резкого высвобождения ядерной энергии, разогрева активной зоны и теплоносителя произошли два последовательных взрыва. Были разрушены паропроводы, смещена тысячетонная стальная крышка реактора, разрушена часть активной зоны. Доступ воздуха к раскаленному графиту вызвал пожары. Из реактора было выброшено большое количество уранового топлива, трансураниевых элементов, продуктов их деления, бетона, графита. Радиоактивные вещества достигли высоты 1,8 км и начали перемещаться с воздушными потоками в северо-западном и северном направлениях.

К 1 мая общее количество выбросов резко снизилось. Но продолжавшееся горение графита постепенно разогрело активную зону реактора до температуры 2000 градусов, что привело к испарению тугоплавких элементов и резкому увеличению выбросов.

В результате сбрасывания с вертолетов песка и глины – 1760 т, свинца – 1400 т, доломита – 800 т, соединения бора – 40 т дополнительно шло выбрасывание в атмосферу радиоактивных пыли и аэрозолей.

5 мая реактор удалось заглушить, но до момента окончания строительства саркофага в атмосферу ежедневно поступало $2 - 6 \cdot 10^{15}$ Бк (около 100 тысяч Ки) активности.

Считается, что из реактора в общей сложности было выброшено от 3,5% до 9%, по некоторым оценкам до 30%, активного вещества. *(Непосредственно 77 кг радиоактивных веществ, представленных 450 радиоактивными нуклидами).*

В первоначальный период значительное повышение мощности экспозиционной дозы γ -излучения (уровень γ -фона) регистрировалось на всей территории Республики Беларусь. До аварии на ЧАЭС она не превышала значений 10-12 мкР/ч., в частности, в районе Мозыря - 2 мкР/ч, на севере республики, где расположены глинистые породы, обогащенные ураном – 12 мкР/ч.

Средний уровень радиации накануне Первомая в районе Чернобыля равнялся 2400 мкР/ч, в Киеве - 1400 мкР/ч, в Минске – 60 мкР/ч, столько же в Бресте и Кишиневе. (*Нормативным считается уровень γ -фона до 20 мкР/ч*).

В связи с ухудшением радиационной обстановки 2 мая началась эвакуация людей из зоны отселения.

Вначале она была определена как 10 км зона, в дальнейшем как 30 км площадью 2,8 тыс. км² и имеющая неправильную форму.

В последующем на этой территории организован Полесский радиационно-экологический заповедник.

В Белоруссии эвакуация населения проходила в три этапа:

первый этап – до 1990 г. эвакуировано 17 тысяч человек;

второй 1991–1992 гг. – 4865 человек;

третий 1993–1994 гг. – 96508 человек.

Общее число эвакуированных со временем составило 130 тысяч человек.

Территория Республики Беларусь разделена на зоны в зависимости от радиоактивного загрязнения почв радионуклидами и величины эквивалентной дозы.

- **Зона проживания с периодическим радиационным контролем** (менее 1 мЗв в год, по цезию –137 37- 185 кБк/км²).

- **Зона с правом на отселение** (менее 5 более 1 мЗв в год, по цезию-137 185-555 кБк/км²).

- **Зона последующего отселения** (более 5 мЗв в год, по цезию-137 555-1840 кБк/км²).

- **Зона первоочередного отселения.**

- **Зона эвакуации** (отчуждения).

Радиационно-экологическая обстановка в Республике Беларусь характеризуется в настоящее время сложностью и неоднородностью загрязнения территории α -, β - и γ -излучающими радионуклидами с различными периодами полураспада, прежде всего цезием, стронцием и плутонием, присутствием радиоизотопов практически во всех компонентах экосистем и вовлечением их в геохимические и трофические циклы миграции. Это обуславливает множественность путей внешнего и внутреннего облучения населения и создает риск для здоровья.

Динамика радиационной обстановки в ближайшее время и на перспективу будет определяться:

- радиоактивным распадом;
- миграцией радионуклидов;
- трансформацией форм их существования.

Радиационная безопасность населения и принципы защиты

Учитывая наличие естественного радиационного фона, расширение использования значительными группами населения искусственных и естественных источников радиоактивности в различных сферах жизнедеятельности, а также особенности воздействия на человеческий организм, были разработаны правовые основы обеспечения радиационной безопасности населения. Базовыми документами являются:

- Закон Республики Беларусь № 198-З «О радиационной безопасности» от 18 июня 2019 г.;
- Закон Республики Беларусь № 426-З «Об использовании атомной энергии» от 30 июня 2008 г.;
- Закон Республики Беларусь № 340-З «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 7 января 2012 г.;

Также радиационная безопасность координируется актами Президента Республики Беларусь и прочими нормативными правовыми актами, включая технические:

- «Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99)», утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь 26.04.1999 г. №16;
- Санитарные нормы и правила «Требования к радиационной безопасности» и Гигиенический норматив «Критерии оценки радиационного воздействия», утвержденные Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 28.12.2012 г. №213.

Основополагающим в области радиационной защиты населения является Закон Республики Беларусь «О радиационной безопасности» устанавливающий правовые основы функционирования системы обеспечения радиационной безопасности, обращения с источниками ионизирующего излучения и направлен на предотвращение и минимизацию вредного воздействия ионизирующего излучения на здоровье человека и окружающую среду.

Закон формулирует радиационную безопасность населения как **«состояние защищенности населения, персонала и окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения»** и устанавливает основные гигиенические нормативы (допустимые пределы доз) облучения на территории Республики Беларусь в случае использования источников ионизирующего излучения:

Для населения (табл. 5) средняя годовая эффективная доза равна 0,001 Зв или за период жизни (70 лет) – 0,07 Зв; в отдельные годы допустимы большие значения эффективной дозы при условии, что среднегодовая эффективная доза, за последовательные 5 лет, не превысит 0,001 Зв/год;

для персонала средняя годовая эффективная доза равна 0,02 Зв или за период трудовой деятельности (50 лет) – 1,00 Зв; допустимо облучение в

дозе до 0,05 Зв при условии, что среднегодовая эффективная доза, за последовательные 5 лет, не превысит 0,02 Зв/год.

Таблица 5

Основные пределы доз (ПД)

Нормируемые величины	Пределы доз	
	персонал	население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 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	150 мЗв	15 мЗв
– коже	500 мЗв	50 мЗв
– кистях и стопах ног	500 мЗв	50 мЗв

Радиационная безопасность населения обеспечивается:

- созданием условий жизнедеятельности людей, отвечающих требованиям норм и правил;
- установлением квот (допустимых пределов) на облучение от различных источников;
- организацией радиационного контроля;
- эффективностью планирования и проведения мероприятий по радиационной защите в нормальных условиях и в случае радиационной аварии;
- организацией системы информирования о радиационной обстановке.

В Законе и Нормах радиационной безопасности сформулированы основные принципы радиационной защиты в случае нормальной эксплуатации источников излучения, а именно:

- принцип обоснования, запрещает все виды деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением, включая нештатные ситуации,
- принцип нормирования, требующий не превышения допустимых индивидуальных доз облучения населения и персонала от всех источников излучения,
- принцип оптимизации, требующий поддержания на возможно низком и достижимом уровне, с учетом экономических и социальных факторов, индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения.

В случае радиационной аварии принципы обеспечения безопасности населения заключаются в том, что, во-первых – мероприятия по ликвида-

ции последствий аварии должны приносить больше пользы, чем вреда, и, во-вторых – деятельность по ликвидации последствий аварии необходимо осуществлять таким образом, чтобы польза от снижения дозовой нагрузки (исключая вред нанесенный ликвидацией) была максимальной.

Планируемое повышенное облучение персонала выше установленных пределов доз может быть разрешено только в случае необходимости спасения людей или предотвращения их облучения при ликвидации последствий аварии. Разрешение на выполнение опасных работ может представляться мужчинам старше 30 лет при их добровольном письменном согласии после информирования о возможных дозах облучения и риске для их здоровья.

Облучение эффективной дозой свыше 200 мЗв в год рассматривается как потенциально опасное.

Облучение техногенными источниками излучения необходимо минимизировать путем обеспечения сохранности источников излучения, контроля технологических процессов и ограничения выбросов радионуклидов в окружающую среду, а также другими мероприятиями на стадии проектирования, эксплуатации и утилизации источников излучения.

Свой вклад в облучение населения от техногенных источников вносят медицинские процедуры, которые не включены в дозовые пределы (табл. 6).

Таблица 6

Эффективные эквивалентные дозы от техногенных источников излучений

№ п/п	Вид облучения	Эффективная эквивалентная доза, мЗв
1	Флюорография	0,10 – 0,50
2	Рентгенокопия желудка, кишечника	0,10 – 0,25
3	Рентгенокопия одного зуба	0,03 – 0,30
4	Прием радоновой ванны	0,01– 1,00

Нормами устанавливаются также допустимые значения содержания радионуклидов в питьевой воде, воздухе и продуктах питания, исходя из пределов дозы техногенного облучения для населения, равной 1 мЗв/год.

Важно отметить, что нормы не устанавливают допустимых значений эффективной дозы, которые обусловлены суммарным воздействием природных источников излучения, но предусмотрено снижение уровней облучения населения за счет ограничений, вводимых для некоторых природных источников (радон, торон – для проектируемого и строящегося жилья, питьевой воде из подземных источников и др.).

Радиационная защита от внешнего облучения

Физические принципы защиты от действия ионизирующей радиации можно сформулировать следующим образом:

– защита временем;

- защита расстоянием;
- защита экранированием;
- защита разведением (количеством).

Кроме этих принципов и способов в целях защиты от действия радиационного фактора используется фармакохимическая защита и дезактивация.

Защита временем обусловлена сокращением времени контакта с источниками ионизирующего излучения. Это достигается различными приемами и мерами: высокая квалификация персонала за счет профессиональной подготовки (отработка на макетах различных манипуляций с источниками излучения и радиоактивными материалами для достижения высокой степени автоматизма выполняемых операций); автоматизация проводимых работ; сокращение продолжительности рабочего дня, увеличение продолжительности отпуска, выход на пенсию в ранние сроки, перевод на работы, не связанные с облучением (происходит временной разрыв – организм больше времени не контактирует с радиоактивным источником, что позволяет ему восстановиться); использование периода полураспада радионуклида. Нахождение как можно меньше времени на загрязненной или зараженной территории, в помещениях и др.

Сокращая срок работы с источниками, можно в значительной степени уменьшить дозы облучения персонала. Этот принцип защиты особенно часто следует соблюдать при работе с источниками относительно малой активности, при прямых манипуляциях с ними персонала.

Защита временем с использованием периода полураспада возможна при условии, что радионуклид короткоживущий и период его полураспада составляет секунды, минуты, часы или дни. (*Йод-131 имеет период полураспада 8,04 суток. До полного распада радионуклида требуется 20 периодов полураспада, то есть для йода-131 – чуть более 160 суток.*)

Защита расстоянием считается эффективным, простым и надежным способом защиты, который обеспечивается достаточным удалением работника или объекта от излучателя (излучение при этом доходит до объекта от источника ослабленным за счет потери энергии на ионизацию среды). При этом используется закон обратных квадратов, когда, например, при увеличении расстояния от гамма-источника в два раза, интенсивность излучения и мощность экспозиционной дозы уменьшается в четыре раза; а при увеличении расстояния в 5 раз мощность экспозиционной дозы уменьшится в 25 раз. Следовательно, чем больше расстояние, тем меньшую дозу получит облучаемый объект.

Альфа-частицы от источника излучения распространяются максимально на расстояние 22,4 см, бета-частицы – на 25 м, гамма-кванты – до 600 м.

Защита расстоянием обеспечивается также применением автопипеток и дистанционных манипуляторов (инструменты – пинцеты, захваты, щипцы, удлинители и более сложные устройства различного вида), кото-

рые по способу их использования могут быть ручными и управляемыми с большого расстояния.

Пример. При работе с точечным источником из ^{60}Co активностью 110 МБк пинцетом длиной 8 см в течение минуты пальцы кисти работающего могут получить дозу около 100 мкГр, а пинцетом длиной 25 см – всего 10 мкГр. В последнем случае обеспечивается полностью защита и от источников, излучающих альфа-частицы.

Для работы с источниками большей активности рекомендуются манипуляторы различного вида и сложного устройства, в некоторых случаях управляемые с большого расстояния.

Защита экранированием считается одной из самых надежных и эффективных. Она дает возможность безопасно находиться и даже работать длительный период по времени вблизи источника излучения. В зависимости от вида излучения экраны изготавливают из различных материалов, а их толщина определяется мощностью излучения.

По конструкции экраны могут быть стационарными (стены, ниши, колодцы), передвижными (ширмы, полуширмы), переносными (защитные фартуки, контейнеры, переносные экраны и др.). По назначению их можно условно разделить на 5 групп:

1. Экраны – контейнеры. Предназначены для хранения и перевозки радиоактивных материалов (из алюминия и пластмассы – для α - и β -излучателей; из стали, чугуна, свинца, урана – для γ -излучателей).

2. Экраны для оборудования. Ими окружают все оборудование при работе с радиоактивным препаратом.

3. Экраны передвижные. Применяются для защиты рабочего места на различных участках рабочей зоны (ширмы, полуширмы и др.).

4. Экраны защитные. Предназначены для защиты помещений для персонала и прилегающей территории (части строительных конструкций – стены, перекрытия полов и потолков, специальные двери).

5. Экраны индивидуальных средств защиты (смотровые стекла, щиток из оргстекла, свинцованные фартуки и перчатки и др.).

Экраны могут быть сборными из стандартных свинцовых или чугунных блоков с пазами (кирпичи).

Защитные свойства материалов определяются коэффициентом ослабления, поэтому толщину защитных экранов можно рассчитать по слоям половинного ослабления ($\Delta 1/2$), которые приведены в справочниках или рассчитаны для данного радиоактивного источника. Слоем половинного ослабления считается такая толщина защитного материала, при прохождении через который доза излучения снижается в два раза. Для свинца она равняется 1,2 см, бетона – 7–10 см, кирпича – 12 см, дерева – 25–30 см. Десять слоев половинного ослабления практически полностью поглощают излучение.

Особенностью электромагнитных (квантовых) ионизирующих излучений является их высокая проникающая способность. В защитных материалах удается ослабить это излучение довольно значительно и тем самым свести до минимума его повреждающее действие. Лучшими для защиты от рентгеновского и гамма-излучения, позволяющими получить необходимый эффект по кратности ослабления, являются материалы с большим порядковым номером (свинец, уран). Можно использовать экраны и из более легких материалов – свинцованного стекла, железа, бетона, железобетона, баритобетона и даже воды.

Для защиты от β -излучений целесообразно применять экраны, изготовленные из материалов с малым атомным номером (стекло, оргстекло, алюминий), что связано со степенью поглощения β -частиц, которая пропорциональна атомному номеру материала. При работе с β -излучателями обязательно пользуются защитными очками или козырьками из стекла, органического стекла и перчатками. Если работать приходится с жестким β -излучением, то защита устраивается двойная (двойное экранирование). Для 1-го защитного слоя, обращенного непосредственно к β -излучателю, применяют легкие материалы с небольшим атомным номером (органическое стекло, пластмассу или алюминий). Это дает возможность полностью поглотить β -частицы и снизить генерацию (образование) тормозного рентгеновского излучения. 2-й защитный слой – это экран из свинца или другого металла (для защиты от тормозного рентгеновского излучения).

Радиационная защита от внешних потоков α -частиц не представляет особых трудностей вследствие их небольшого пробега и малой проникающей способности. Для защиты от внешнего облучения α -частицами специальных мер можно не применять. Поглощающим экраном для α -частиц является любой материал (спецодежда, лист бумаги и др.).

Защита разведением. Этот принцип защиты еще называют защитой количеством. Принцип защиты основан на уменьшении мощности источников излучения до минимальных величин, то есть проведение работ с минимальной активностью радионуклидов.

Радиоактивные источники могут быть представлены в жидкой форме. Например, раствор натрия йодистого с носителем радиоактивного изотопа йода (^{131}I). Если развести данный раствор, то уменьшится и количество радиоактивного йода, следовательно, и его активность.

Путем разведения неактивным носителем можно снизить радиоактивность жидких отходов до минимально значимой активности.

Этот способ защиты ограничен и не имеет широкого применения, так как он ограничен требованиями того или иного процесса технологии. Кроме того, уменьшение активности источника увеличивает срок облучения различных объектов, подвергаемых воздействию ионизирующего излучения.

Радиационная защита от внутреннего облучения

Предельно допустимая доза имеет одну и ту же величину независимо от того, находится источник излучения внутри или вне организма. С задачей защиты можно сравнительно легко справиться, когда это внешний источник. Когда радионуклид находится внутри организма изменить условия в сторону усиления защиты бывает очень сложно. Опасность, создаваемая радионуклидами внутри организма, значительно больше, чем опасность от внешних источников, так как:

- организм облучается непрерывно до тех пор, пока радионуклид не будет из него выведен или пока не произойдет его распад до безвредного уровня;

- бывает невозможно ускорить выведение радионуклидов из организма;

- распадающиеся атомы радионуклидов, излучают внутри ткани α - и β -частицы с малыми пробегами, отдавая всю свою энергию в небольшом объеме, который может быть частью критического органа;

- сложно точно определить радиоактивность организма.

Количество радионуклида, поступившего в организм, как и пути его поступления, зависят от ряда факторов, в частности, от активности препарата, характера проводимых работ, использования защитных приспособлений, соблюдения требований радиационной безопасности.

Радиоактивные вещества могут попасть в организм человека и животного через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт, а также через кожу и ее повреждения.

Главными принципами защиты от внутреннего облучения являются:

- соблюдение принципов защиты от внешнего облучения;

- герметизация производственного оборудования для ограничения поступления радионуклидов в окружающую среду;

- использование средств индивидуальной защиты;

- выполнение правил личной гигиены;

- очистка от радиоактивных загрязнений поверхности строительных конструкций, аппаратуры и средств индивидуальной защиты;

- фармакохимическая защита и др.

Знак радиационной опасности

Знак радиационной опасности (ГОСТ 17925-72) является предупредительным и предназначен для привлечения внимания к объектам, имеющим вредное воздействие на людей ионизирующего излучения (рис. 8). Знак радиационной опасности это равносторонний треугольник с каймой красного цвета, вершина которого расположена вверху. Обычно знак имеет желтый фон, по центру его расположен круг и трилистник красного цвета. Допускается черная окраска внутреннего круга, трех лепестков (трилистник) и каймы треугольника, внутренний фон треугольника белый.

Под тремя лепестками допускается надпись с указанием класса работ (1, 2, 3) или надпись «Радиоактивность», «Гамма-излучение» и др.



Рис. 8. Знак радиационной опасности (ГОСТ 17925-72)

На транспортных средствах знак радиационной опасности может иметь вертикальные красные полосы, обозначающие транспортные категории.

Знак радиационной опасности должны иметь оборудование, контейнеры, упаковки, транспортные средства, аппараты, передвижные установки, помещения, предназначенные для работ с применением источников ионизирующих излучений.

Пребывание на загрязненной территории

На территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, когда дополнительная над фоном доза облучения превышает 1 мЗв/год, помимо проведения защитных мероприятий, направленных на снижение концентрации радиоизотопов в окружающей среде, продукции сельского хозяйства, продуктов питания и организации радиационного контроля, при проживании или длительном нахождении населения следует выполнять определенные правила поведения, которые позволяют снизить или предотвратить радиационную нагрузку на организм.

С целью снижения уровня внешнего и внутреннего облучения населения, рекомендуется соблюдение следующих мер безопасности:

- водоснабжение жилища должно быть централизованным, в противном случае колодец должен быть огражден срубом или другим ограждением и иметь крышку;
- окна и форточки необходимо закрывать пылезащитными сетками, во избежание попадания в квартиру уличной пыли, проветривание помещений проводить при скорости ветра менее 10 м/сек;
- проводить ежедневную влажную уборку помещений с применением моющих средств; тканевые ворсистые покрытия и изделия чистить пылесосом;
- уличную обувь мыть (особенно тщательно подошву) в специальной емкости, вытирать и оставлять перед квартирой;

- Вне квартиры оставлять верхнюю уличную одежду и головные уборы;
- для предотвращения образования пыли вблизи жилых помещений следует высаживать траву, кустарники и деревья;
 - при наличии на территории двора асфальтированного или другого твердого покрытия, его следует увлажнять;
 - во время работы на приусадебном или дачном участке, для предотвращения пыления его необходимо увлажнять;
 - при работе в поле следует использовать СИЗОД, защитную одежду, головные уборы;
 - по окончании работ в поле тщательно вытряхнуть и выколотить рабочую одежду, обувь, головной убор, вычистить их и оставить вне жилого помещения; принять душ;
 - для снижения поступления радионуклидов в выращиваемую продукцию снижать кислотность почв, вносить минеральные и органические удобрения;
 - при уборке урожая плоду не складировать на земле;
 - выращенную продукцию подвергать выборочному радиационному контролю;
 - заготовка дикорастущих растений проводится после радиационного контроля территории;
 - желательно газовое отопление жилища;
 - при нахождении «на природе» следует ограничивать время пребывания в этих условиях, не раздеваться, не лежать на земле, не разжигать костров, не купаться в неизвестных водоемах и не пить из них воду, не собирать лесные ягоды и грибы;
 - постоянно соблюдать правила личной гигиены и общественной; пере едой полоскать рот, горло и мыть с мылом руки и лицо;
 - употребляйте продукты питания, приобретенные в магазинах, а воду используйте только из проверенных источников.

Технологическая и кулинарная обработка загрязненных продуктов питания

Поскольку при проживании на загрязненной территории основные дозовые нагрузки на население формируются за счет потребления воды и производимых на этой территории сельскохозяйственных продуктов, существенного снижения дозовой нагрузки можно достичь уменьшением содержания радионуклидов в продуктах питания путем технической и кулинарной обработки.

Уменьшению содержания загрязнений от 2 до 50 раз в сравнении с исходным, способствует техническая обработка мяса, рыбы, молока и других продуктов (табл. 7).

Таблица 7

Уменьшение содержания радионуклидов в сравнении с исходным,
при технической переработке продуктов питания

Исходный продукт	Готовые продукты	Цезий -137	Стронций-90
Молоко	Творог Сыр Масло Сливки	4-6 раз 10 раз 50 раз 4-14 раз	3-7 раз 2 раза 100 раз 20 раз
Говядина свежая	Говядина отварная Бульон	2 раза до 50% от содержания в говядине	2,5 раза до 40% от содержания в говядине
Картофель	Картофель отварной	17 раз	2 раза
Рыба очищенная	Рыба отварная	10 раз	2 раза

Варка мяса с последующим удалением бульона позволяет удалить из него до 80% ^{137}Cs . Эффективным является и вымачивание мяса в растворе поваренной соли (80–90%). Столь же эффективно и вымачивание рыбы.

Что касается овощей. То по степени накопления ими ^{137}Cs и ^{90}Sr их можно расположить в следующем порядке: капуста, огурцы, томаты, лук, чеснок, картофель, морковь, свекла, редис, фасоль, горох, щавель. Для снижения содержания радионуклидов в овощах сначала их поверхность механически очищают от земли, затем тщательно промывают в проточной воде. Варка картофеля, капусты и свеклы с последующим удалением отвара, дает более глубокую их дезактивацию. Что касается огурцов и томатов, то в силу их малой способности к накоплению радионуклидов. Достаточно тщательного мытья в проточной воде с последующим засолом или маринованием, но от употребления рассола или маринада следует воздержаться.

Фрукты обычно не накапливают радионуклиды в значительных количествах, и они в основном содержатся в косточках и в малых количествах в кожуре. Поэтому достаточно будет промыть водой, с последующей очисткой кожуры и удаления сердцевин.

Более тщательной обработки требуют грибы. Сначала их необходимо очистить от почвы и промыть проточной водой. После чего порезать на кусочки, залить рассолом или маринадом, довести до кипения и кипятить 10 минут, слить рассол, промыть холодной водой и снова прокипятить в течение 20 минут. Такая обработка дает до 100 – крат снижение содержания радионуклидов в грибах. В шляпках грибов ^{137}Cs накапливается в 2–3 раза больше, чем в ножках, а способность к накоплению ^{90}Sr у темноокрашенных в 5 раз выше чем у светлоокрашенных, причем в сравнении с окружающими их растениями эта разница может быть 1000-кратной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галицкий, Э.А. Радиобиология: учеб. пособие / Э.А. Галицкий, В.К. Пестис, И.М. Багель. – Гродно, 2003. – 135 с.
2. Гринин, А.С. Экологическая безопасность. Защита территории и населения при Чрезвычайных ситуациях : учеб. пособие / А.С. Гринин, В.Н. Новиков. – М.: Фаир-пресс, 2000. – 336 с.
3. Радиационная медицина: учеб. пособие / А.Н. Гребенюк [и др.]; под ред. С.С. Алексанина, А.Н. Гребенюка. – СПб.: Политехникасервис, 2013. – Ч. 3: Основы обеспечения радиационной безопасности. – 151 с.
4. О санитарно-эпидемическом благополучии населения Республики Беларусь: Закон Респ. Беларусь, 7 янв. 2012 г., № 340-3 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – Минск, 2006. – № 8. – 2/1892. – 21 с.
5. Алексахин, Р.М. Актуальные экологические проблемы ядерной энергетики / Р.М.Алексахин // Атомная энергия. – 1987. – Т. 64. – № 6.
6. Основы защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях / под ред. В.В.Тарасова. – М.: изд-во МГУ, 1998. – 192 с.
7. Мархоцкий, Я.Л. Основы радиационной безопасности населения: учеб. пособие / Я. Л. Мархоцкий. – МИНСК: Высш. шк., 2011. – 224 с.
8. Никаноров, А.И. Глобальная экология: учеб. пособие / А.И. Никаноров, Т.А. Хорунжая. – М.: приор, 2001. – 284 с.
9. Поленов, Б.В. Дозиметрические приборы для населения / Б.В. Поленов. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
10. Ефремов, С.В. Радиационная и химическая защита: учеб. пособие / С.В. Ефремов. – СПб.: СПб ГПУ, 2005. – 218 с.
11. Овсяник, А. Оценка угроз в атомной отрасли / А. Овсяник, Э. Брунин // Гражданская защита. – 2015. – № 11.
12. Радиационная медицина: учеб. пособие / А.Н. Стожаров [и др.]; под общ. ред. проф. А.Н. Стожарова. – Минск: МГМИ, 2000. – 154 с.
13. Радиационная медицина. Том 2. Радиационные поражения человека / М.В. Васин [и др.]; под ред. Л.А. Ильина. – М.: Изд. АТ, Гос. науч. центр Ин-т биофизики, 2001. – 432 с.
14. Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99). ГН 10-118-99 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь, 1999 г., № 16. – 6 с.
15. Пименова, Е. В. Основы сельскохозяйственной радиозэкологии : учеб. пособие / Е.В.Пименова ; Перм. с.-х. Акад. – Пермь: ПСХА, 2004.
16. Шаптала, В.Г. Основы моделирования чрезвычайных ситуаций: учеб. пособие / В.Г. Шаптала [и др.]. – Белгород: БГТУ, 2010. – 166 с.
17. Требования к радиационной безопасности и Гигиенический норматив «Критерии оценки радиационного воздействия»: сан. правила и

нормы № 213, утв. пост. М-ва здравоохранения Респ. Беларусь 28.12.2012. – Минск: ГУ «РЦГЭ и ОЗ» МЗ РБ, 2013. – 68 с.

18. Ластовкин, В.Ф. Методические указания по разработке раздела «гражданская оборона» в дипломных проектах студентов специальности «архитектура» / В.Ф. Ластовкин, Н.Д. Чекмарев; нижегор. Гос. Архитектур.-строит. ун-т. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2001. – 32 с.

19. Методические рекомендации по ликвидации последствий радиационных и химических аварий / под общ. ред. В.А. Владимирова. – М.: ВНИИ ГОЧС, 2004. – 340 с.

20. Хомяков, Н.Н. Организационные и инженерно-технические мероприятия по радиационной защите населения при авариях на радиационно-опасных объектах / Н.Н. Хомяков, Н.И. Харичев // технологии гражданской безопасности. – 2008. – Вып. 3. – Т. 5.

21. Клименков, К.П. Основы радиационной безопасности: учеб.-метод. пособие / К.П. Клименков, В.В. Гурин, А.Д. Наумов. – Витебск: УО ВГАВМ, 2009. – 60 с.

22. Закон Республики Беларусь «О радиационной безопасности населения» № 122-3 от 05.01.1998 г. в ред. Закона Респ. Беларусь 21.12.2005 г., № 72-3 // Нац. реестр правовых актов Республики Беларусь, 2006 г., № 2, 2/1169. – 15 с.

Учебное издание

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Методические рекомендации

Составители:

НАУМОВ Александр Дмитриевич

НАУМОВА Галина Ивановна

Технический редактор

Г.В. Разбоева

Компьютерный дизайн

Л.Р. Жигунова

Подписано в печать2020. Формат 60x84^{1/16} Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 4,36. Уч.-изд. л. 4,33. Тираж экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение – учреждение образования
«Витебский государственный университет имени П.М. Машерова».

Свидетельство о государственной регистрации в качестве издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/255 от 31.03.2014.

Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Витебский государственный университет имени П.М. Машерова».

210038, г. Витебск, Московский проспект, 33.