

2. РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Катастрофа на Чернобыльской АЭС считается самой крупной радиационной катастрофой в истории человечества. Выбросы Чернобыльской аварии загрязнили радиоактивными веществами ($> 37\text{кБк/м}^2$) 23% территории Республики Беларусь (47 тыс. км²); 0,5% – территории Российской Федерации (35,2 тыс. км²), 4,8% (28,5 тыс. км²) – территории Украины.

Из сельскохозяйственного оборота выведено 2,64 тыс. км² сельхозугодий. Ликвидировано 54 сельскохозяйственных предприятия, закрыто 9 предприятий перерабатывающей промышленности агропромышленного комплекса. Резко сократились посевные площади и валовой сбор сельскохозяйственных культур, существенно уменьшилось поголовье скота.

Около четверти лесного фонда Беларуси – 17,3 тыс. км² леса подверглись радиоактивному загрязнению. Ежегодные потери древесных ресурсов превышают 2 млн. м³. В Гомельской и Могилевской областях, где загрязнено радионуклидами соответственно 51,6 и 36,4% общей площади лесных массивов, заготовка древесины на территории с плотностью загрязнения по цезию-137 555 кБк/м² и выше полностью прекращена.

Ущерб, нанесенный Республике Беларусь чернобыльской катастрофой в расчете на 30-летний период ее преодоления, оценивается в 235 млрд. долларов США, что равно 32 бюджетам нашей страны в 1985 г. Сюда включены потери, связанные с ухудшением здоровья населения; ущербом, нанесенным промышленности и социальной сфере, сельскому хозяйству, строительному комплексу, транспорту и связи, жилищно-коммунальному хозяйству; загрязнением минерально-сырьевых, земельных, водных, лесных и других ресурсов; а также дополнительные затраты, связанные с осуществлением мер по ликвидации и минимизации последствий катастрофы и обеспечением безопасных условий жизнедеятельности населения. Проведенная оценка ущерба не является окончательной, поскольку причинно-следственные связи, отражающие воздействие радиоактивного загрязнения территории на различные стороны жизнедеятельности, достаточно сложны, а проблема получения сельскохозяйственной продукции с допустимым содержанием радионуклидов по-прежнему актуальна.

Деятельность по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС в Беларуси осуществляется на программной основе. В настоящее время действует Государственная программа по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2011–2015 гг. и на период до 2020 года, которая направлена на переход от реабилитации к возрождению и динамичному развитию пострадавших районов (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 31 декабря 2010 г. № 1922).

2.1. Радиоактивные превращения ядер

2.1.1. Природа явления радиоактивности

Атом – наименьшая частица химического элемента, являющаяся носителем его свойств.

Атом имеет сложное строение, состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого движутся по строго определенным орбитам отрицательно заряженные электроны.

Основная масса атома сосредоточена в ядре (99,95%), на долю электронов приходится менее 0,05% массы атома. Ядро состоит из протонов и нейтронов. *Протон* (p) – стабильная элементарная частица с массой равной $1,673 \cdot 10^{-27}$ кг или 1,0076 а.е.м., которая примерно в 1840 раз больше массы электрона. Заряд протона положителен и по величине равен заряду электрона. *Нейтрон* (n) – электрически нейтральная элементарная частица с массой незначительно превышающей массу протона и равной $1,675 \cdot 10^{-27}$ кг или 1,0089 а.е.м. Нейтроны устойчивы только в составе стабильных атомных ядер. Свободные нейтроны распадаются на протоны и электроны. Так как протоны и нейтроны являются составными частями ядра, поэтому для удобства их называют нуклонами (от лат. *nucleus* – ядро). Также, когда говорят о конкретном атомном ядре, используют термин *нуклид* – любое атомное ядро с заданным числом протонов и нейтронов.

В качестве характеристики нуклида используют символ химического элемента (A_ZX). Число протонов в ядре (Z) называют атомным номером или зарядовым числом, оно соответствует порядковому номеру элемента в периодической системе Д.И. Менделеева. Массовое число (A) ядра равно общему числу протонов и нейтронов – число нуклонов. Например, изотоп плутония ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ – означает, что массовое число $A = 239$, зарядовое число $Z = 94$, число нейтронов $N = A - Z = 239 - 94 = 145$.

В ядрах одного и того же химического элемента число протонов всегда одно и то же, а число нейтронов может быть различным. Ядра атомов, содержащие различное число нейтронов, но одинаковое число протонов, называют *изотопами* (например, изотопы углерода: ${}^{11}\text{C}_6$, ${}^{14}\text{C}_6$, ${}^{16}\text{C}_6$; изотопы калия ${}^{39}\text{K}_{19}$, ${}^{40}\text{K}_{19}$, ${}^{41}\text{K}_{19}$). Изотопы бывают стабильные и нестабильные. В легких ядрах должно быть примерно поровну протонов и нейтронов, т. е. величина соотношения $n : p$ близка к 1, для тяжелых ядер это соотношение снижается до 0,7. Если в ядре слишком много нейтронов или протонов, то такие ядра становятся нестабильными (неустойчивыми) и претерпевают самопроизвольные радиоактивные превращения, в результате которых изменяется состав ядра и при этом испускаются заряженные или нейтральные частицы. Стабильными являются ядра с числом нуклонов (A) около 60. Ядра изотопов химических элементов с числом нуклонов (A) ≥ 82 нестабильны и подвергаются самопроизвольному спонтанному распаду.

Явление самопроизвольного превращения (распада) атомных ядер некоторых химических элементов в атомные ядра других элементов с испусканием особого рода излучения называется *радиоактивностью* (от лат. *radio* – излучаю, *radius* – луч, *aktivus* – действенный). Вещества, испускающие излучения, называются *радиоактивными*. Радиоактивность приводит к изменению атомного номера (Z) и массового числа (A) исходного химического элемента.

Впервые способность ядер тяжелых элементов самопроизвольно распадаться была обнаружена А. Беккерелем в 1896 г.

Радиоактивное излучение встречающихся в природе веществ называется *естественной радиоактивностью*, а испускаемое искусственно полученными изотопами – *искусственной радиоактивностью*.

Радиоактивный распад протекает без каких-либо вмешательств извне и не может быть прекращен или ускорен физическим или химическим воздействием.

Процесс радиоактивного распада протекает с выделением энергии. Процесс последовательных ядерных превращений, как правило, заканчивается образованием стабильных ядер.

Вследствие радиоактивного распада количество любых радионуклидов со временем уменьшается. Особенность радиоактивного распада состоит в том, что нуклиды одного и того же элемента распадаются не все сразу, а постепенно, в различное время. Каждое ядро обязательно распадется, только момент распада конкретного ядра предсказать невозможно. Можно лишь указать, что за определенный промежуток времени распадется определенное количество радионуклидов. Радиоактивные превращения подчиняются закону радиоактивного распада:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

где N_t – количество атомных ядер, оставшихся через промежуток времени t ; N_0 – начальное количество атомных ядер (количество ядер в момент наблюдения при $t = 0$); $e = 2,72$ – основание натурального логарифма, которое указывает на графический вид математической зависимости; λ – постоянная радиоактивного распада (показывает, какая доля радионуклидов распадается в единицу времени), является справочной величиной и строго определенной для каждого типа радионуклидов, размерность постоянной распада выражают в обратных единицах времени (s^{-1} , $мин^{-1}$, $ч^{-1}$ и т. д.), чтобы показать, что количество радионуклидов не растет, а убывает; t – время распада.

Согласно зависимости, кривая радиоактивного распада является экспонентой (рис. 2.1).

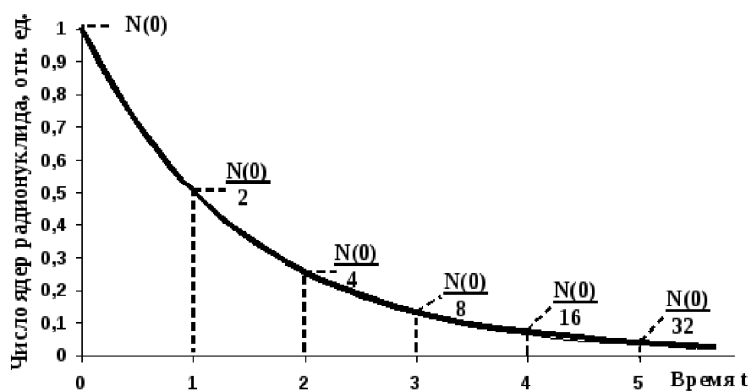


Рисунок 2.1. Кривая радиоактивного распада

Период полураспада ($T_{1/2}$) – это время, в течение которого, вследствие самопроизвольных ядерных превращений, распадается половина от началь-

ного количества ядер. Период полураспада $T_{1/2}$ связан с постоянной распада λ зависимостью:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda$$

Период полураспада $T_{1/2}$ у разных радионуклидов различен и колеблется в широких пределах – от долей секунды до сотен и даже тысяч лет. У одного и того же элемента могут быть изотопы с различными периодами полураспада. Поэтому радиоактивные изотопы разделяются на короткоживущие (часы, дни) и долгоживущие (годы). Период полураспада, также как и постоянная распада, является ядерной постоянной, строго определенной для каждого типа радионуклидов и справочной величиной (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Периоды полураспада некоторых радионуклидов

Радионуклид	$T_{1/2}$	$10T_{1/2}$
Йод-131 (^{131}I)	8,04 суток (короткоживущий)	80,4 суток
Цезий-134 (^{134}Cs)	2,06 года (короткоживущий)	20,6 лет
Стронций-90 (^{90}Sr)	29,12 лет (долгоживущий)	291,2 года
Цезий-137 (^{137}Cs)	30 лет (долгоживущий)	300 лет
Плутоний-239 (^{239}Pu)	24065 лет (долгоживущий)	240650 лет
Америций-241 (^{241}Am)	432,8 года (долгоживущий)	4328 лет
Уран-235 (^{235}U) природный радионуклид	$7,038 \times 10^8$ лет (долгоживущий)	$70,38 \times 10^8$ лет
Калий-40 (^{40}K) природный радионуклид	$1,28 \times 10^9$ лет (долгоживущий)	$12,8 \times 10^9$ лет
Радон-222 (^{222}Rn) природный радионуклид	3,82 суток (короткоживущий)	38,2 суток

Чтобы узнать полное время жизни данных радионуклидов, необходимо увеличить $T_{1/2}$ в 10 раз. Например, у цезия-137 $T_{1/2} \approx 30$ лет, следовательно, через 300 лет данный искусственный радионуклид практически полностью распадется с момента его образования. Однако, исходя из вида экспоненциальной кривой, которая всегда стремится к нулю, но его не достигает, всегда есть вероятность, что хотя бы мизерное количество данных радионуклидов может через $10T_{1/2}$ не распасться.

Скорость распада определяется активностью вещества A . *Активностью* радиоактивного источника (образца) называют число радиоактивных распадов в единицу времени:

$$A = dN/dt = A_0 \cdot e^{-\lambda t} = \lambda N,$$

где A и A_0 – активности вещества в моменты времени t и t_0 .

Активность радионуклида прямо пропорциональна общему количеству радиоактивных атомных ядер на момент времени t и обратно пропорциональна периоду полураспада:

$$A = 0,693 \cdot N / T_{1/2}$$

В соответствии с определением, активность измеряется числом распадов в 1 с. В Международной системе единиц измерения СИ за единицу активно-

сти принят *беккерель (Бк)*.

1 Бк (Bq) равен активности нуклида в радиоактивном источнике, в котором происходит 1 акт распада за 1 с, т.е. 1 Бк = 1 расп/с. Данная единица названа в честь А. Беккереля, открывшего естественную радиоактивность.

Наряду с беккерелем в СИ допускается применение кратных и дольных единиц (кБк, МБк).

Широкое распространение имеет и внесистемная единица – кюри (Ки). Данная единица соответствует активности нуклида в радиоактивном источнике, в котором происходит $3,7 \times 10^{10}$ актов распада в секунду, т.е.

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк.}$$

$$1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки.}$$

Эта единица была названа в честь супругов Кюри, которые установили, что такой активностью обладает 1 г радия.

При измерении активности радиоактивного образца ее обычно соотносят с массой, объемом, площадью поверхности. При этом соответственно получают удельную, объемную и поверхностную активность (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Соотношение между единицами радиоактивности

Величина	Название и обозначение в единицах				Соотношения между единицами
	СИ		в несистемных		
Активность	A	Бк	A	Ки	1 Бк = 1 распад/с = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк
Удельная активность	A_m	Бк/кг	$A_{уд}$	Ки/кг	1 Бк/кг = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки/кг 1 Ки/кг = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк/кг
Объемная активность	A_v	Бк/м ³	$A_{об}$	Ки/л	1 Бк/м ³ = $2,7 \cdot 10^{-8}$ Ки/л 1 Ки/л = $3,7 \cdot 10^{13}$ Бк/м ³
Поверхностная активность	A_s	Бк/м ²	$A_{поверх}$	Ки/км ²	1 Бк/см ² = 10^4 Бк/м ² = 0,27 Ки/км ² 1 Ки/км ² = $3,7 \cdot 10^4$ Бк/м ² = 37 кБк/м ²

Удельная активность A_m ($A_{уд}$) – это активность, приходящаяся на единицу массы:

$$A_m = A/m,$$

где m – масса данного вещества. Единицы измерения – 1 Бк/кг, 1 Ки/кг.

Объемная активность A_v ($A_{об}$) – активность, приходящаяся на единицу объема:

$$A_v = A/v,$$

где v – объем вещества. Основные единицы измерения: 1 Бк/м³, 1 Ки/м³, но чаще используют 1 Бк/м³ и 1 Ки/л.

Поверхностная активность A_s ($A_{поверх}$) – активность, отнесенная к единице площади поверхности:

$$A_s = A/s,$$

где s – площадь поверхности. Основные единицы измерения: 1 кБк/м² или 1 Ки/км².

Данная величина встречается и под другими названиями – плотность загрязнения поверхности радионуклидами или поверхностная концентрация.

Для измерения активности радиоактивного образца используют *радиометры* (рис. 2.2–2.3).

Гамма-радиометр автоматизированный РКГ-02А/1 (рис. 2.2) предназначен для измерения объемной и удельной активности радионуклидов цезия-134 (^{134}Cs), цезия-137 (^{137}Cs) и их смеси в продуктах питания, кормах и других пробах различной консистенции: твердых (измельченных), жидких, сыпучих и пастообразных, а также для измерения объемной активности йода-131 (^{131}I) в жидких пробах.

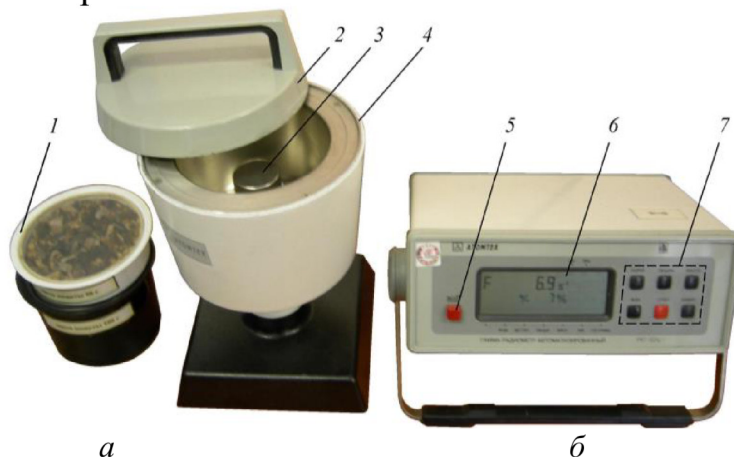


Рисунок 2.2. Общий вид гамма-радиометра автоматизированного РКГ-02А/1:

- а* – блок детектирования (БД): 1 – сосуд Маринелли с пробой;
- 2 – съемная крышка БД; 3 – сцинтиллятор NaI(Tl); 4 – свинцовая защита;
- б* – блок обработки информации: 5 – кнопка включения прибора;
- 6 – экран индикатора; 7 – блок кнопок управления прибором

Автоматизированный бета-радиометр удельной активности радионуклидов РУБ-91 «АДАНИ» (рис. 3) предназначен для измерения удельной (объемной) активности радионуклидов стронция-90 (^{90}Sr) в природных объектах и продуктах питания с соответствующей подготовкой проб.



Рисунок 2.3. Общий вид бета-радиометра РУБ-91 «АДАНИ»:

- 1 – исследуемый образец (проба); 2 – предметный столик;
- 3 – кнопка включения и выключения прибора; 4 – кнопка включения высоковольтных источников питания ФЭУ; 5 – блок анализаторов

Ионизирующее излучение (ИИ) – вид излучения (возникает при радиоактивных распадах), который превращает атомы или атомные ядра в электрически заряженные ионы (ионизация) или продукты ядерных реакций. В организме ионизирующее излучение способно разрывать химические связи молекул, т.е. представляет опасность для здоровья человека.

Ионизирующие излучения подразделяются на 2 вида: *корпускулярное и фотонное*.

Корпускулярное излучение представляет собой поток частиц (корпускул), которые характеризуются определенной массой, зарядом и скоростью (это электроны, позитроны, ядра атомов гелия, нейтроны, протоны и др. частицы). Как правило, корпускулярное излучение непосредственно ионизирует среду (альфа-излучение (α -излучение), бета-излучение (β -излучение), нейтронное и мезонное излучения).

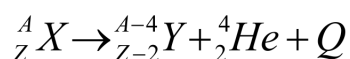
Фотонное излучение (электромагнитное излучение) – это поток квантов или фотонов. Это излучение не имеет ни массы, ни заряда и производит косвенную ионизацию среды (γ -излучение (гамма-излучение), рентгеновское излучение, тормозное излучение и др.).

Существуют следующие основные типы ядерных превращений или виды радиоактивного распада: *альфа-распад* (α); *бета-распад* (β): электронный, позитронный и К-захват.

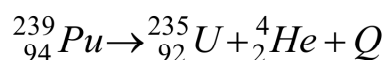
альфа-распад (α) – это испускание ядром радиоактивного изотопа альфа-частиц. Вследствие потери с альфа-частицей двух протонов и двух нейтронов распадающееся ядро превращается в другое ядро, в котором число протонов (заряд ядра – Z) уменьшается на 2, а число частиц (массовое число – A) на 4.

Известно более 200 α -радиоактивных ядер, около 20 радионуклидов редкоземельных элементов (уран, торий, полоний, плутоний, и др. с $Z > 82$).

Процесс альфа-распада в общем виде записывается так:



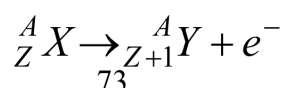
Процесс альфа-распада на примере плутония (${}^{239}_{94}\text{Pu}$):



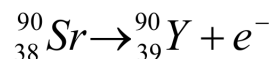
бета-распад (β) – самопроизвольные превращения нейтрона в протон или протона в нейтрон внутри ядра, сопровождающиеся испусканием электронов (e^- или β^-) или позитронов (e^+ или β^+). Это самый распространенный тип радиоактивного распада ядер, особенно для искусственных радионуклидов.

Бета-распад (электронный) возникает при излишке нейтронов в ядре («нейтронная перегрузка» ядра), при котором один из нейтронов превращается в протон с испусканием электрона (β^-). При этом распаде заряд ядра и, соответственно, атомный номер дочернего ядра увеличивается на 1, а массовое число не изменяется, т. е. дочерний элемент сдвинут в периодической системе Д.И. Менделеева на одну клетку вправо от исходного.

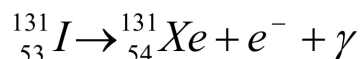
Процесс бета-распада в общем виде записывается так:



Например, распад ядер стронция-90 сопровождается испусканием электронов и превращением их в иттрий-90:

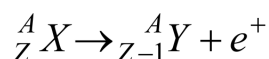


Например, распад ядер йода-131 сопровождается испусканием электронов и превращением их в ксенон-131:

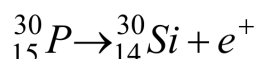


Избыточная энергия ядер некоторых элементов, образующихся при бета-распаде, высвобождается испусканием одного или нескольких гамма-квантов (на примере йода-131).

Если неблагоприятное соотношение нейтронов и протонов в ядре обусловлено излишком протонов, то происходит позитронный бета-распад, при котором ядро испускает позитрон (β^{+}) в результате превращения протона в нейтрон внутри ядра:



Например, распад изотопа фосфора-30 с образованием кремния-30:



Изотопы, имеющие α -распад, называются α -активными, β -распад – β -активными.

Гамма-излучение (γ) представляет собой коротковолновое фотонное (электромагнитное) излучение с длиной волны $<10^{-6}$ мкм, испускаемое при ядерных превращениях или аннигиляции частиц (лат. *annihilatio* – уничтожение – реакция превращения частицы и античастицы при их столкновении в какие-либо иные частицы, отличные от исходных). По своей природе оно аналогично другим видам электромагнитных излучений – световому, ультрафиолетовому, рентгеновскому. Гамма-излучение только лишь может сопутствовать различным типам распадов. При испускании гамма-излучения в ядре не изменяются ни массовое число, ни его заряд. Следовательно, природа радионуклида не изменяется, а меняется лишь содержащаяся в ядре энергия.

Например, при распаде цезия-137 образуется возбужденное ядро бария-137. Переход из возбужденного в стабильное состояние сопровождается испусканием гамма-квантов:



Так как время жизни ядер в возбужденных состояниях очень мало (обычно $t < 10^{-19}$ с), то при альфа- и бета-распадах гамма-квант вылетает практически одновременно с заряженной частицей. Исходя из этого, процесс гамма-излучения не выделяют в самостоятельный вид распада.

По энергии гамма-излучения, как и по энергии альфа-излучения, можно произвести идентификацию радионуклида.

2.1.2. Свойства ядерных излучений

Важнейшими свойствами ионизирующих излучений является их проникающая способность и ионизирующее действие.

Для характеристики ионизирующих излучений используют понятия пробег и удельная ионизация (табл. 2.3).

Пробег – минимальная толщина поглотителя (некоторого вещества), необходимая для полного поглощения ионизирующего излучения.

Удельная ионизация – число пар ионов, образующихся на единицу длины пути в веществе под воздействием ионизирующего излучения.

Таблица 2.3. Основные свойства ионизирующих излучений

Вид излучения	Удельная ионизация в воздухе, пар ионов/см	Пробег в биоткани	Пробег в воздухе	Пробег в металле	Скорость распространения, м/с
α -излучение	40 000	5–100 микрон	2,5–11 см	10–20 микрон	$(14,1–24,9) \cdot 10^6$
β -излучение	50–100	До 1 см	До 10 м	1 мм	$(0,87–2,994) \cdot 10^8$
γ -излучение	10–15	проходит без ослабления	100–150 м	пронизывает слой свинца толщиной в несколько см	$3 \cdot 10^8$

α -излучение обладает небольшой проникающей способностью (задерживается листом бумаги, тканью), но большим ионизирующим действием. Вследствие своей большой массы (4 а.е.м.) α -частицы при взаимодействии с веществом быстро теряют свою энергию. α -частицы являются ядрами атомов гелия (${}^4_2\text{He}$) иногда называют дважды ионизированные атомы гелия). Пробег α -частиц в веществе зависит от энергии α -частицы и от природы вещества, в котором она движется. В среднем в воздухе пробег α -частицы составляет 2,5–9 см, максимальный – до 11 см, в биологических тканях – 5–100 микрон, в стекле – $4 \cdot 10^3$ см. Энергия α -частицы находится в пределах 4–9 МэВ. Удельная ионизация составляет примерно 40 000 пар ионов/см в воздухе, такая же удельная ионизация в организме на пути 1–2 микрона. Особую опасность α -излучение представляет при попадании его источника внутрь организма с пищей или с вдыхаемым воздухом. При ионизации α -лучами наблюдаются химические изменения вещества и нарушается кристаллическая структура твердых тел.

β -частицы несут один элементарный электрический заряд, $m_{\beta} = 0,000548$ а.е.м. Двигаются со скоростями близкими к скорости света, т.е. $(0,87–2,994) \cdot 10^8$ м/с. В отличие от α -частиц β -частицы одного и того же радиоак-

тивного элемента обладают различным запасом энергии (от десятых и сотых долей МэВ (мягкое β -излучение) до 2–3 МэВ (жесткое β -излучение)). β -излучение обладает значительно меньшим эффектом ионизации, чем α -излучение. Так, в воздухе образуются 50–100 пар ионов на 1 см пути. Скорость β -частиц значительно выше скорости α -частиц и пробег в воздухе достигает 10 м (у естественных β -источников). В мягкой ткани пробег может достигать 10–12 мм. Поглощаются они слоем алюминия толщиной 1 мм. β -излучение опасно для здоровья человека, как при внешнем, так и при внутреннем облучении. При внешнем облучении организма β -источниками возникают в основном кожные поражения (β -ожоги). От него можно защититься тонким листом металла, оконным стеклом и даже обычной одеждой.

γ -излучение представляет основную опасность как источник внешнего излучения. Так как γ -излучение является волновым, то характеризуется длиной волны, частотой колебаний и энергией. Энергия γ -кванта пропорциональна частоте колебаний, а частота колебаний связана с длиной их волны. Чем меньше длина волны и больше частота колебаний излучения, тем больше его энергия и, следовательно, проникающая способность. Энергия γ -излучения естественных радиоактивных элементов колеблется от нескольких кэВ до 2–3 МэВ и редко достигает 5–6 МэВ. Пробег γ -квантов в воздухе превышает десятки и даже сотни метров. Излучение пронизывает слой свинца толщиной в несколько сантиметров (рис. 2.4).

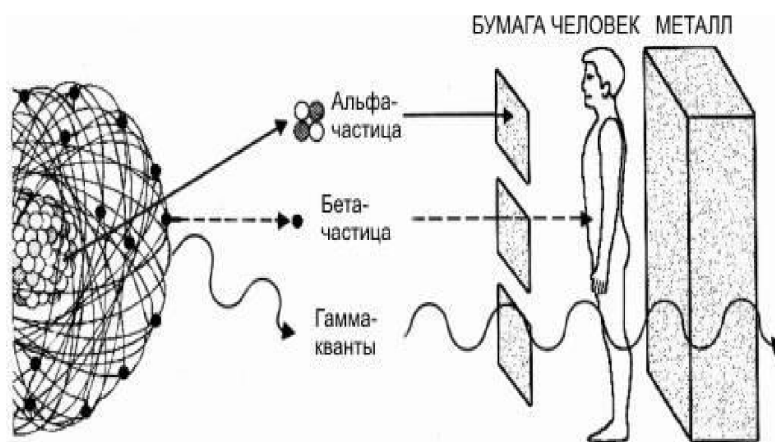


Рисунок 2.4. Проникающая способность ионизирующего излучения

Степень биологического действия разных видов излучений зависит от их *линейной передачи энергии (ЛПЭ)*, т.е. от количества энергии, переданного веществу на 1 мкм пробега излучения в веществе. От величины ЛПЭ зависит удельная ионизация. У тяжелых частиц (альфа-частицы и протоны) плотность ионизации очень высокая, у легких – низкая. Например, в мышечной ткани среднее число ионизаций на пути в 1 мкм для альфа-частиц составляет 4500 кэВ/мкм, для бета-частиц – 8 кэВ/мкм при средней ЛПЭ альфа-частиц равной 143,0 кэВ/мкм и бета-частиц – 0,23 кэВ/мкм. Таким образом, чем выше ионизационная способность и короче пробег частицы, тем больше у нее ЛПЭ и тем сильнее радиобиологический эффект. Облучение биологических

объектов разными видами излучения в равных дозах вызывает различные по величине и значению эффекты. Как правило, излучения с высокой ЛПЭ обладают большим поражающим действием.

Для сравнения биологического действия разных видов ионизирующих излучений введено понятие *относительная биологическая эффективность (ОБЭ)*. Для количественной оценки ОБЭ излучения используют ее коэффициент, который определяется как отношение доз стандартного и исследуемого видов ионизирующего излучения, необходимых для получения одинакового биологического эффекта. Коэффициент ОБЭ определяется по формуле:

$$K_{\text{обэ}} = (DR_0)_{\text{эф}} / (DX)_{\text{эф}},$$

где $(DR_0)_{\text{эф}}$ – доза стандартного излучения (гамма-излучение ^{60}Co или ^{137}Cs с энергией излучения 180–250 кэВ); $(DX)_{\text{эф}}$ – доза изучаемого излучения; *эф* – сравниваемый радиационный эффект.

Относительная биологическая эффективность для любого вида излучений – величина непостоянная, которая зависит от величины линейной передачи энергии и радиочувствительности облучаемого объекта.

Взаимодействие излучения с веществом – физические и химические процессы, которые возникают в веществе при прохождении через него излучения. В результате взаимодействия с атомами и молекулами окружающей среды излучения постепенно растрчивают свою энергию. Потери энергии могут быть двух видов: ионизационные и радиационные.

Ионизационные потери – это энергия излучения, растрчиваемая на ионизацию и возбуждение атомов встречного вещества. Ионизационные потери тем больше, чем больше заряд частицы и меньше ее скорость.

Радиационные потери – это процесс потери энергии излучения на торможение в электрическом поле ядра встречных атомов, при этом тормозящаяся частица изменяет свое направление.

Радиационные потери тем выше, чем больше порядковый номер атомов среды и энергия частицы. Чем меньше масса частицы и чем больше заряд ядра, тем большее количество энергии излучается. При торможении частицы происходит излучение большого количества энергии в виде тормозного рентгеновского излучения.

При прохождении α -частиц через вещество их энергия расходуется, главным образом, на взаимодействие с электронами атомов и молекул среды, что приводит к ионизации и возбуждению атомов или молекул. Треки α -частиц обычно прямолинейны. Это связано с тем, что их масса примерно в 7000 раз больше масс электронов, с которыми они взаимодействуют.

Для β -частиц низких энергий наибольшее значение имеют ионизационные потери, поскольку большая часть их энергии тратится на ионизацию и возбуждение атомов среды. В области высоких энергий, наоборот, решающее значение приобретают радиационные потери, т. е. потери на торможение частиц в электрическом поле ядра.

γ -кванты, также как α - и β -частицы, растрчивают свою энергию в основном за счет взаимодействия с электронами атомов среды. При этом имеют

место три основных эффекта взаимодействия гамма-лучей с веществом: фотоэффект (фотоэлектрическое поглощение), Комptonовское рассеяние (комptonовский эффект) и образование электронно-позитронных пар (рис. 2.5).

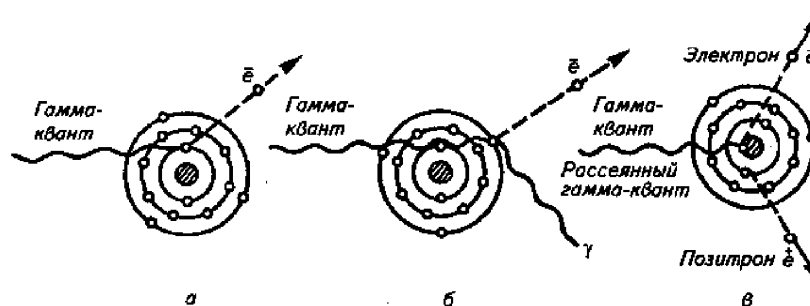


Рисунок 2.5. Виды взаимодействия гамма-излучения с веществом:
 а – фотоэлектрическое поглощение; б – комptonовский эффект;
 в – образование пар

Фотоэффект заключается в том, что γ -квант, взаимодействуя с атомом или молекулой, выбивает из них электрон (называемый обычно фотоэлектроном). При этом γ -квант полностью поглощается, вся его энергия передается электрону. В результате электрон приобретает кинетическую энергию, равную энергии γ -кванта, за вычетом энергии связи электрона в атоме. Этот вид взаимодействия наиболее вероятен, если энергия γ -кванта меньше 0,1–0,2 МэВ. Вероятность фотоэффекта зависит от атомного номера и пропорциональна числу протонов поглотителя.

Комptonовское рассеяние – это процесс, при котором γ -кванты, сталкиваясь с электронами атомов вещества, передают им не всю свою энергию, а только часть ее, и после соударения изменяют свое направление движения, т. е. рассеиваются. Эффект Комптона возникает, когда поглотитель имеет малый атомный вес, а γ -кванты энергию порядка 0,2 МэВ и более.

Некоторые γ -кванты с энергией не ниже 1,02 МэВ, проходя через вещество, превращаются под действием сильного электрического поля вблизи ядра атома в пару «электрон-позитрон». Возникновение пары «электрон-позитрон» приводит (как и фотоэффект) к полному поглощению энергии γ -кванта. Позитроны, замедляясь веществом, взаимодействуют с электронами среды, давая аннигиляционное γ -излучение.

2.1.3. Дозы облучения

Для определения закономерности воздействия, распространения, поглощения ионизирующих излучений и характеристики интенсивности их воздействия введено понятие – доза облучения и ее дозиметрические величины.

Дозой облучения называется часть энергии радиационного излучения, которая расходуется на ионизацию и возбуждение атомов и молекул любого облученного объекта.

Экспозиционная доза – характеризует воздействие рентгеновского и γ -

излучения на среду. Единицей измерения экспозиционной дозы в СИ является Кулон/кг (Кл/кг), внесистемной единицей – Рентген (Р). $1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$; $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$. На практике используются дробные доли рентгена: мР (миллирентген); мкР (микрорентген). Понятие экспозиционной дозы рекомендовано для фотонов с энергией до 3 МэВ и только для воздуха.

Мощность экспозиционной дозы – экспозиционная доза, отнесенная к единице времени: Р/час, мР/час, мкР/час и т.д. Единицей измерения мощности экспозиционной дозы в системе СИ является Ампер/кг (А/кг). Мощность дозы, измеренную на высоте 100 см от поверхности земли, часто называют уровнем радиации (γ -фоном). Для Республики Беларусь естественный радиационный фон (γ -фон) не превышает 20 мкР/час.

Поглощенная доза – количество энергии, переданной ионизирующим излучением веществу в пересчете на единицу массы любого вещества. За единицу измерения поглощенной дозы в системе СИ принимают Джоуль на килограмм (Дж/кг), т.е. в 1 кг массы облучаемого вещества поглощается 1 Дж энергии излучения. Эта единица имеет специальное название – грей(Гр). Внесистемной единицей измерения поглощенной дозы является рад. Рад – единица поглощенной дозы ионизирующего излучения, при которой веществом массой 1г поглощается энергия излучения в 100 эрг. $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад}$. Используются такие значения единиц, как мГр, мкГр, мрад, мкрад и др.

Мощность поглощенной дозы – поглощенная доза, полученная за единицу времени. Единицы измерения мощности поглощенной дозы: рад/с, Гр/с, рад/ч, Гр/ч.

Особенности повреждающего действия ионизирующих излучений на организм человека позволяет учитывать эквивалентная доза.

Эквивалентная доза – поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий коэффициент качества данного вида излучения.

Коэффициент качества излучения (или весовой множитель W_R) учитывает относительную эффективность различных видов излучения в индуцировании биологических эффектов:

фотоны любых энергий	1
электроны и мюоны любых энергий	1
нейтроны с энергией менее 10 кэВ	5
от 10 до 100 кэВ	10
от 100 кэВ до 2 МэВ	20
от 2 до 20 МэВ	10
более 20 МэВ	5
протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи	5
альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20

Единицей измерения эквивалентной дозы в системе СИ является Зиверт (Зв). Зиверт – единица эквивалентной дозы излучения любой природы в биологической ткани, которая создает такой же биологический эффект, как и по-

глощенная доза в 1 Гр образцового рентгеновского излучения с энергией фотонов 200 кэВ. $1\text{Зв}=\text{Дж/кг}$. Используются также производные единицы: мкЗв, мЗв. Внесистемная единица измерения эквивалентной дозы – бэр (биологический эквивалент рада). $1\text{Зв} = 100\text{ бэр}$.

Эквивалентная доза в 1 Зв реализуется при поглощенной дозе в 1 Гр при $W_R = 1$.

Мощность эквивалентной дозы – отношение эквивалентной дозы к единице времени: Зв/с, мЗв/с, мкЗв/час и т.д. В Республике Беларусь уровень естественного гамма-фона (мощность дозы (МД) гамма-излучения) не превышает 0,20 мкЗв/ч.

Допустимая среднегодовая мощность эквивалентной дозы при облучении всего тела при 36-часовой рабочей неделе равна 28 мкЗв/час, естественный радиационный фон создает мощность эквивалентной дозы в пределах 0,05–0,20 мкЗв/час (по данным МКРЕ – Международной комиссии по радиологическим единицам и измерениям). Эквивалентная доза используется для оценки последствий облучения только малыми дозами, ее нельзя измерить, а можно только рассчитать.

Эквивалентная доза рассчитывается при равномерном облучении тела человека для «средней» ткани. Но дозы определяют и для отдельных органов при неравномерном облучении. В данном случае учитывают разную радиочувствительность органов и тканей и используют для этих целей эффективную дозу.

Эффективная доза является мерой риска возникновения отдаленных последствий облучения всего человека, или отдельных его органов с учетом их радиочувствительности. Она равна произведению эквивалентной дозы на соответствующий взвешивающий коэффициент (коэффициент радиационного риска) W_T для данного органа или ткани. МКРЗ приняты следующие значения W_T : гонады – 20; костный мозг (красный), толстый кишечник, легкие, желудок – 0,12; мочевой пузырь, грудная железа, печень, пищевод, щитовидная железа – 0,05; кожа, клетки костных поверхностей – 0,01; остальные органы (надпочечники, головной мозг, экстракраниальный отдел органов дыхания, тонкий кишечник, почки, мышечная ткань, поджелудочная железа, селезенка, вилочковая железа, матка) – 0,05.

Взвешивающий коэффициент характеризует отношение стохастического риска поражения какого-либо органа или ткани к риску поражения всего организма при равномерном облучении всего тела. Риск поражения всего организма принимают равным 1.

Единицами измерения эффективной дозы являются Зиверт (Зв) и бэр.

Коллективная эффективная доза – это эффективная доза, полученная группой людей (облученной популяцией) от какого-либо радиоактивного источника. Измеряется она в человеко-Зивертах (чел.-Зв) и человеко-бэрах (чел.-бэр). Коллективную эффективную дозу можно рассчитать для отдельной местности и таким образом оценить масштабы радиационного поражения и отдаленные последствия облучения населения.

Для измерения дозы излучений используют дозиметры. *Дозиметры* –

приборы, предназначенные для получения информации об экспозиционной, эквивалентной дозе и мощности дозы или (и) об энергии, переносимой ионизирующим излучением или переданной им объекту, находящемуся в поле его действия. Для более универсального использования налажен выпуск дозиметров-радиометров, сочетающих в себе функции и дозиметра, и радиометра (рис. 2.6–2.7)

Дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М в зависимости от комплектации позволяет регистрировать различные виды ионизирующих излучений (альфа-, бета-, гамма-, рентгеновское и нейтронное излучения). В комплектации с блоком детектирования БДПБ-01 (рис. 2.6) прибор позволяет регистрировать бета-излучение.



Рисунок 2.6. Дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М:
1 – блок обработки информации (БОИ); 2 – блок детектирования БДПБ-01;
3 – соединительный кабель

Дозиметр-радиометр МКС-АТ6130 (рис. 2.7) позволяет регистрировать бета-, гамма- и рентгеновское излучения.

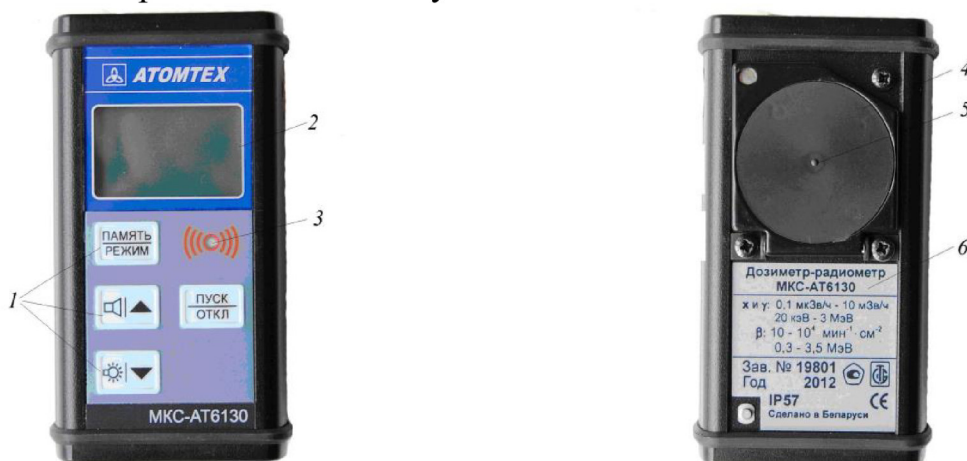


Рисунок 2.7. Общий вид дозиметра-радиометра МКС-АТ6130:
1 – мембранная панель управления; 2 – жидкокристаллический индикатор (ЖКИ);
3 – светодиодный индикатор; 4 – крышка-фильтр с магнитным фиксатором;
5 – метка центр детектора; 6 – этикетка с характеристикой прибора

2.1.4. Действие ионизирующих излучений на биологические системы

Ионизирующее излучение, воздействуя на организм человека, вызывает в нем ионизацию атомов и молекул, поражая жизненно важные органы и системы человека. Последствия облучения зависят от вида радиоактивного ве-

щества, мощности дозы, продолжительности действия, локализации излучения, величины всасывания (накопления), скорости выведения из организма, индивидуальных свойств организма.

Процесс воздействия ИИ на организмы можно подразделить на несколько этапов, занимающих разный временной период: физический (поглощение энергии), физико-химический (возбуждение атомов или их ионизация), химический (образование свободных радикалов), биомолекулярные повреждения (изменения молекул белков, нуклеиновых кислот), биологические и физиологические изменения в организме (рис. 2.8).

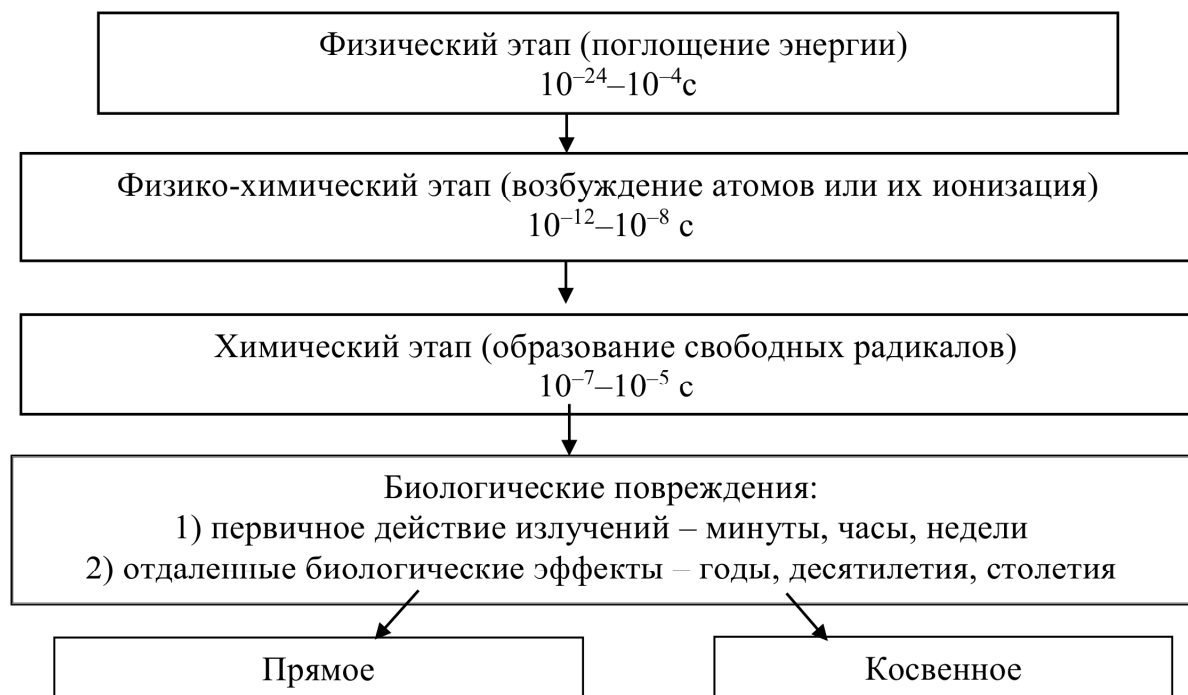


Рисунок 2.8. Схема воздействия ионизирующих излучений на биологическую ткань

Биологические повреждения в организме зависят от взаимодействия ионизирующих излучений с его химическими соединениями. Различают прямое и косвенное действие радиации.

Прямое действие ИИ вызывает ионизацию атомов и молекул, образование ионов, возникновение возбужденных атомов, появление радикалов. Активные молекулы и обломки молекул индуцируют различные химические реакции, повреждая комплексы клеток (ядро, митохондрии и др.).

Косвенное действие. Основное химическое соединение в организме человека – это вода, содержание ее составляет 65–75% от общей массы организма. Образованные под действием ИИ радикалы воды (H^+ , OH^-) и пероксида (H_2O_2) вступают в химические реакции с молекулами белков, липидов и углеводов и приводят к структурным изменениям тканей и клеток.

В результате воздействия ИИ радиационные повреждения возникают на всех уровнях биологической организации организма (табл. 2.4).

Отношение организма к ионизирующему излучению характеризуется радиочувствительностью и радиостойчивостью (радиорезистентностью).

Радиочувствительность– это способность организма (или его тканей, органов и систем) реагировать на малые дозы ионизирующего излучения, которые вызывают кратковременное изменение физиологической реакции организма.

Радиоустойчивость– способность организма (или его тканей, органов и систем) переносить высокие уровни облучения (летальные и полумлетальные дозы).

Летальная доза LD_{100} (или $LD_{100/30}$) – это минимальная доза облучения, вызывающая смерть 100% облученных организмов в течение 30 дней.

Полумлетальная доза LD_{50} (или $LD_{50/30}$) – минимальная доза облучения, вызывающая смерть 50% облученных организмов в течение 30 дней.

Таблица 2.4. Радиационные повреждения организма

Уровень биологической организации	Радиационные повреждения
Молекулярный	Повреждение ферментов, ДНК, РНК, нарушение обмена веществ
Субклеточный	Повреждение клеточных мембран, ядер, хромосом, митохондрий, лизосом
Клеточный	Остановка деления и гибель клеток, трансформация в злокачественные клетки
Тканевый, органный	Повреждение центральной нервной системы, костного мозга, желудочно-кишечного тракта
Организменный	Смерть или сокращение продолжительности жизни
Популяционный	Изменение генетических характеристик в результате мутаций

Величины LD_{50} в природе различаются довольно значительно даже в пределах одного вида. В значительной степени различается видовая радиочувствительность.

Полумлетальная доза (LD_{50}), при которой погибает половина облученных особей, составляет:

- растения – от 10 до 1500 Грей (Гр);
- насекомые – от 10 до 100 Гр;
- птицы – от 8 до 20 Гр;
- рыбы – от 8 до 20 Гр;
- млекопитающие – от 2 до 15 Гр;
- человек – от 2,5 до 3,5 Гр.

У большинства сельскохозяйственных культур величина доз, вызывающих гибель 50 и 70% растений, приводит к полной потере продуктивности. Поэтому при облучении растений используют дозу, вызывающую снижение урожайности на 50% (UD_{50}). Разница между LD_{50} и UD_{50} для одного и того же вида растений может составлять 10–30 раз и более. В зависимости от цели исследования применяют также дозы UD_{10} и UD_{30} .

Для оценки радиочувствительности сельскохозяйственных растений при остром и хроническом облучении используют различные критерии:

1) всхожесть (полевая и лабораторная); 2) длина зародышевых корешков у проростков; 3) рост и развитие растений; 4) количество образовавшихся органов (число стеблей, соцветий и т. д.); 5) число завязавшихся семян (на одном растении или на одном репродуктивном органе); 6) масса плодов и семян с растения; 7) выживаемость растений в фазах развития; 8) выживаемость растений к концу вегетационного периода; 9) частота морфозов органов; 10) частота хлорофильных мутаций; 11) частота хромосомных aberrаций в клетках; 12) стерильность растений и пыльцы; 13) продуктивность растений; 14) урожайность (масса растений с 1 м², с 10 м² и с 1 га). На практике чаще используют выживаемость растений к концу вегетационного периода. Этот критерий характеризует реакцию всей популяции на облучение.

Различия в радиочувствительности отмечены не только на уровне целого организма, но и на уровне его тканей, органов, клеток и даже молекул. Установлено, что морфологические изменения в кроветворной ткани выявляются при сравнительно меньших дозах, чем в мышечной или костной. Молодые, быстро размножающиеся клетки более радиочувствительны, чем зрелые.

Ткани и органы, обладая различной радиочувствительностью, имеют разные коэффициенты радиационного риска. Различие радиочувствительности проявляется также в органах, составляющих организм как целое. Клетки одного органа имеют неодинаковую радиочувствительность и способность к регенерации после лучевого повреждения. По радиочувствительности условно все органы и ткани можно разделить на три группы:

1 группа – красный костный мозг, половые железы, селезенка, лимфоидная ткань. Стволовые клетки этих тканей полностью погибают при дозе облучения 10 Гр;

2 группа – пищеварительный тракт, печень, органы дыхания, органы выделения, органы зрения, мышечная ткань. Клетки этих тканей выдерживают дозу облучения до 40 Гр.

3 группа – нервная ткань, кожные покровы, хрящевая и костная ткань, которые выдерживают дозу облучения до 80 – 100 Гр.

Наиболее радиочувствительные органы и системы называются критическими. *Критические органы* – это жизненно важные органы и системы, которые в данном диапазоне доз повреждаются первыми, что обуславливает гибель организма в определенные сроки после облучения.

Наиболее уязвимыми являются гонады (яичники и семенники), красный костный мозг и молочные железы у женщин. Это обстоятельство необходимо учитывать при планировании и организации защиты от ИИ при внешнем и внутреннем облучении.

При воздействии разных доз облучения у людей могут наблюдаться следующие радиационные эффекты: *детерминированные (нестохастические)* – непосредственные телесные повреждения организма, возникающие вскоре после воздействия облучения; *стохастические* – последствия, которые выявляются на больших группах людей в более отдаленные периоды после облу-

чения. Ими могут быть развитие опухолей разных органов и тканей, лейкозы, сокращение общей продолжительности жизни людей; *генетические* – проявляются в виде возникновения хромосомных aberrаций, доминантных генных мутаций.

Детерминированные эффекты – клинически выявляемые вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением, в отношении которых предполагается существование порога, ниже которого эффект отсутствует, а выше – тяжесть эффекта зависит от дозы.

Главная причина возникновения детерминированных эффектов – это превышение количества погибших клеток над вновь образовавшимися клетками.

К детерминированным эффектам относят:

- опустошение красного костного мозга, проявление лучевой болезни;
- нарушение репродуктивной функции (временная стерильность мужчины при однократном облучении семенников составляет около 0,15 Гр.) Постоянная стерильность у мужчин наступает при дозах от 3,5 до 6 Гр или 2 Гр/год. Постоянная стерильность у женщин наблюдается при дозах 2,5–6 Гр; лучевая катаракта (при дозах от 2 до 10 Гр); неопухолевые формы поражения кожи; сокращение продолжительности жизни и др.

Если повреждается ткань, играющая жизненно важную роль, то это может вызвать смерть человека. Смертельный исход неизбежен, если человек получает дозу на все тело около 6 Гр и выше в течение короткого периода времени. Дозы, равные приблизительно 3 Гр, могут быть смертельными для примерно половины людей из числа облученных, не получивших лечение или получивших недостаточное лечение. Для здоровых людей, получивших нормальное лечение, средняя летальная доза может составлять 5 Гр. При дозах ниже 0,5–1 Гр вероятность детерминированных последствий практически равна нулю.

Установлено, что если облучение проводится многократно долями суммарной дозы, то пороговая доза возрастает. Это свидетельствует о том, что организм обладает эффективным механизмом посттрадиционного восстановления, который за период между моментами новых облучений ликвидирует последствия облучения.

К сожалению, компенсация никогда не бывает полной, и в живом организме в результате облучения накапливаются необратимые повреждения. Эксперименты позволяют предполагать, что 80% последствий облучения являются обратимыми, а 20% – относятся к стойким дефектам, снижающим жизнеспособность организма. На основании этого, всегда различают однократное (острое) и хроническое облучение.

Острая лучевая болезнь (ОЛБ). Под лучевой болезнью человека понимают комплекс проявлений поражающего действия ионизирующих излучений на организм. Многообразие проявлений зависит от того, общее это облучение или местное, внешнее или внутреннее, однократное, пролонгированное или хроническое, равномерное или неравномерное и др.

Острая лучевая болезнь развивается при однократном внешнем равномерном облучении в дозе свыше 1 Гр. При дозе менее 1 Гр может возникнуть острая лучевая травма без признаков заболевания. Выделяют четыре основные формы ОЛБ:

- 1) *Костно-мозговая* (доза 1–10 Гр);
- 2) *Кишечная* (доза 10–20 Гр);
- 3) *Токсемическая* (доза 20–80 Гр);
- 4) *Церебральная* (доза более 80 Гр).

В зависимости от поглощенной дозы костномозговая форма ОЛБ подразделяется по степеням тяжести:

1 (легкая) – наблюдается при дозах 1–2 Гр. Скрытый период продолжается две-три недели, после чего появляется недомогание, общая слабость, тошнота, головокружение, периодическое повышение температуры. Заметные изменения в составе крови. Как правило, в результате лечения человек выздоравливает;

2 (средней тяжести) – наблюдается при дозах 2–4 Гр. Скрытый период длится около недели. Признаки заболевания выражены более ярко. Появляется рвота, головные боли, наблюдаются кровоизлияния и потеря аппетита. Летальность может достигать 30%. Выздоровление при лечении наступает через 1,5–2 месяца;

3 (тяжелая) – наблюдается при дозах 4–6 Гр. Скрытый период составляет несколько часов. Появляется сильная головная боль, рвота, понос с кровью, интенсивное выпадение волос. Летальность может составлять 30–100%. Выздоровление при лечении может наступить через 6–8 месяцев;

4 (крайне тяжелая) – наблюдается при дозах 6–10 Гр. Скрытого периода нет. Признаки заболевания проявляются сразу. Летальность достигает 100%. Причинами смерти чаще всего являются кровоизлияния или инфекционные заболевания, так как иммунная система подавляется полностью.

В течении ОЛБ выделяют три периода: 1) период формирования; 2) период восстановления; 3) период исходов и последствий.

Стохастические эффекты – вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением, не имеющие дозового порога возникновения, вероятность возникновения которых пропорциональна дозе и для которых тяжесть проявления не зависит от дозы.

Стохастические эффекты возникают, когда облученная клетка не гибнет, а изменяется. Изменившаяся, но жизнеспособная клетка может дать в результате деления целый клон (новое поколение) измененных клеток, которые с большой вероятностью будут уничтожены или изолированы защитными механизмами организма. Если гибель или изоляция клеток не произошла, то после продолжительного периода времени, называемого латентным периодом,

изменившиеся клетки (новообразования) могут вызвать рак. При поражении половой клетки появляются наследственные эффекты.

Стохастические (случайные) эффекты могут быть как при больших, так и при малых дозах облучения и являются беспороговыми. Латентный период может различаться по продолжительности в зависимости от состояния организма и вида рака. При малых дозах (менее 1 Гр) заболевания раком носят случайный характер, как и другие заболевания. Особенностью диапазона стохастических эффектов является то, что в его пределах может быть и хроническая лучевая болезнь (ХЛБ).

Хроническая лучевая болезнь возникает в результате многократно повторяющегося в течение длительного времени внешнего облучения малыми дозами (1,5 – 2,5 Гр), а также при попадании внутрь организма радиоактивных изотопов, которые надолго фиксируются в тканях организма и формируют дозы 0,7 – 1 Гр. ХЛБ может быть также и следствием острой лучевой болезни. ХЛБ характеризуется:

во-первых, длительностью и фазностью течения, которая носит волнообразный характер. Это отражает, с одной стороны, проявление повреждений, а с другой – восстановительные и приспособительные реакции в организме;

во-вторых, особенностями проявления;

в-третьих, имеет отдаленные последствия.

В диапазоне доз от 0,7 до 2,5 Гр различают *три степени тяжести хронической лучевой болезни*:

- хроническая лучевая болезнь первой степени (легкая) – доза до 1,5 Гр;
- хроническая лучевая болезнь второй степени (средняя) – доза 1,5–2,0 Гр;
- хроническая лучевая болезнь третьей степени (тяжелая) – доза 2–2,5 Гр.

2.2. Основы радиационной безопасности

2.2.1. Законодательство Республики Беларусь по обеспечению радиационной безопасности

Радиационная безопасность населения – состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного воздействия ионизирующего излучения.

С целью разработки способов защиты от ионизирующих излучений и установления допустимых уровней облучения в 1928 г. на II Международном конгрессе радиологов в Стокгольме была учреждена Международная комиссия по защите от рентгеновских лучей и радия, переименованная в 1950 г. в Международную комиссию по радиологической защите (МКРЗ). Позднее были сформированы и другие международные организации по контролю за обеспечением радиационной безопасности, на рекомендациях которых созданы национальные комиссии и разработаны рекомендации по радиационной защите.

МКРЗ (ICRP) – Международная комиссия по радиологической защите – независимый, неправительственный орган (1928 г.). Ее цель – установление основных принципов радиационной защиты и публикация соответствующих рекомендаций. В отдельных странах имеются свои национальные комиссии по радиационной защите – НКРЗ.

НКДАР (UNSCEAR) – Научный комитет по действию атомной радиации (1955 г.), образованный Генеральной Ассамблеей ООН. Он предназначен для сбора, изучения и распространения информации по наблюдавшимся уровням ионизирующего облучения и радиоактивности (естественной и антропогенной) окружающей среды, а также по последствиям такого облучения для человека и окружающей среды.

МАГАТЭ (IAEA) – Международное агентство по атомной энергии (1957 г.). Это международная межправительственная организация для осуществления сотрудничества и использования ядерной энергии в мирных целях. Агентство оказывает содействие всем странам в развитии ядерной инфраструктуры и осуществляет контроль за безопасностью ядерной энергетики.

Радиационная безопасность обеспечивается:

- проведением комплекса мер правового, инженерно-технического, санитарно-гигиенического, медико-профилактического, агротехнического, воспитательного и образовательного характера;

- осуществлением республиканскими органами государственного управления, местными исполнительными и распорядительными органами, другими организациями, индивидуальными предпринимателями и гражданами мероприятий по соблюдению требований нормативных правовых актов в области обеспечения радиационной безопасности;

- информированием населения о радиационной обстановке и мерах по обеспечению радиационной безопасности;

- обучением населения в области обеспечения радиационной безопасности.

В Республике Беларусь с 1986 г. после аварии на Чернобыльской АЭС начала интенсивно формироваться как самостоятельная наука радиационная медицина. В Республике Беларусь был создан РНПЦ радиационной медицины и экологии человека, а в РНПЦ гигиены – лаборатория радиационной безопасности. В 2009 г. создана Национальная комиссия Беларуси по радиационной защите при Совете Министров Республики Беларусь (НКРЗ).

Правовое регулирование в области радиационной безопасности в Республике Беларусь осуществляется на основе международных конвенций и законодательства Республики Беларусь (Указов и декретов Президента Республики Беларусь, Законов Республики Беларусь).

Республика Беларусь является договаривающейся стороной ряда международных договоров, конвенций и соглашений по вопросам обеспечения ядерной и радиационной безопасности, а также собственных нормативных актов:

- Конвенция об оперативном оповещении о ядерной аварии (№ 1216-XI от 18 декабря 1986 г);

- Конвенция о помощи в случае ядерной аварии или радиационной ситуации (№ 1216-XI от 18 декабря 1986 г.);
 - Конвенция о физической защите ядерного материала (№ 2381-XII от 14 июня 1993 г.);
 - Договор о нераспространении ядерного оружия (№ 2166-XI от 4 февраля 1993 г.);
 - Соглашение между Республикой Беларусь и Международным агентством по атомной энергии о применении гарантий в связи с Договором о нераспространении ядерного оружия от 14 апреля 1995 г.;
 - Венская конвенция о гражданской ответственности за ядерный ущерб (№ 76-3 от 11 ноября 1997 г.);
 - Конвенция о ядерной безопасности (№ 487 от 20 октября 2005 г.);
 - Международная конвенция о согласовании условий проведения контроля грузов на границах (от 30 ноября 1992 г. № 721);
 - Протокол МАГАТЭ «О внесении поправок в Венскую конвенцию о гражданской ответственности за ядерный ущерб» (от 30 апреля 2003 г. № 187-3);
 - Международная конвенция о борьбе с актами ядерного терроризма (от 20 октября 2006 г. № 171-3);
 - Закон Республики Беларусь от 18 июля 2019 г. № 198-3 «О радиационной безопасности»;
 - Закон Республики Беларусь от 30 июля 2008 г. № 426-3 «Об использовании атомной энергии»;
 - Закон Республики Беларусь от 6 января 2009 г. № 9-3 «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий»;
 - Закон Республики Беларусь от 26 мая 2012 г. № 385-3 «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС»;
 - Закон Республики Беларусь от 10 октября 2022 г. № 208-3 «О регулировании безопасности при использовании атомной энергии».
- В Республике Беларусь разработаны санитарные нормативные документы в области радиационной безопасности, в частности:
- Санитарные нормы и правила «Требования к радиационной безопасности». Гигиенический норматив «Критерии оценки радиационного воздействия», (постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28 декабря 2012 г. № 213);
 - Санитарные нормы и правила «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при осуществлении деятельности по использованию атомной энергии и источников ионизирующего излучения» (постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31 декабря 2013 г. № 137);
 - Специфические санитарно-эпидемиологические требования к содержанию и эксплуатации радиационных объектов (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 24 марта 2020 г. №168);

– Санитарные правила и нормы 2.6.6.8-8-2004 «Обращение с отходами дезактивации, образующимися в результате работ по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС (СПООД-2004)» (постановление Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 23 ноября 2004 г. № 121);

– Санитарные правила и нормы 2.6.2.11-4-2005 «Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения» (постановление Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 1 апреля 2005 г. № 36);

– Санитарные правила и нормы 2.6.1.13-60-2005 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при транспортировании радиоактивных материалов (веществ)» (постановление Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 30 декабря 2005 г. № 284);

– Санитарные нормы и правила «Требования к обеспечению радиационной безопасности при проведении работ в зонах радиоактивного загрязнения» (постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 2 июля 2015 г. № 89);

– Санитарные нормы и правила «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при обращении с радиоактивными отходами» (постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31 декабря 2015 № 142).

Согласно санитарным нормам и правилам эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) – 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) – 70 мЗв.

В Республике Беларусь в августе 2020 г. (официальный запуск первого блока – 7 ноября 2020 г.) осуществлен физический запуск первого блока Белорусская АЭС (Островецкая площадка Гродненской области), которая состоит из двух энергоблоков суммарной мощностью до 2400 (2×1200) МВт. Вместе с тем, в приграничных районах сопредельных с республикой государств (Россия, Украина) функционируют, в частности, Смоленская и Ровенская АЭС. Как показывает опыт Чернобыльской катастрофы, аварии на них могут привести к масштабному загрязнению территории Беларуси и дополнительному облучению населения, что требует разработки превентивных мер защиты.

При радиационной аварии на АЭС рассматриваются следующие основные факторы радиационного воздействия:

- внешнее гамма-излучение от радиоактивного облака;
- поступление радиоактивных веществ через органы дыхания;
- радиоактивное загрязнение кожных покровов и одежды;
- внешнее гамма-излучение от радиоактивных веществ, осевших на поверхность земли и местные объекты (здания, сооружения и т.п.);
- поступление радиоактивных веществ в организм в результате потребления населением пищевых продуктов и воды.

На территории Беларуси устанавливаются две зоны первоочередных за-

щитных мероприятий.

Первая в радиусе 30 км от АЭС – зона возможной эвакуации. В случае аварии на АЭС в 30-ти км зонах незамедлительно вводится режим чрезвычайного положения.

Вторая – в радиусе 100 км от АЭС – зона профилактических мероприятий. По опыту аварии на ЧАЭС, на границах этой зоны дозу облучения щитовидной железы, превышающую 200 мЗв, получили более 50% детей.

Защита от воздействия ионизирующих излучений включает в себя комплекс мероприятий – административных, инженерно-технических, санитарно-гигиенических, лечебно-профилактических и др., исключающих или ограничивающих до безопасных уровней облучение лиц из персонала и населения, а также направленных на предотвращение радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Радиационная защита достигается:

- нераспространением ядерного оружия и радиоактивных материалов;
- строгим контролем со стороны государства и Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) над производством, использованием и перемещением радиоактивных материалов;
- соблюдением международных договоров о запрещении испытания ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве и под водой;
- разработкой научно-обоснованных правил и норм безопасности при работе с источниками излучений;
- профессиональным отбором и высоким уровнем подготовки персонала радиационно-опасных объектов;
- соблюдением правил транспортировки и хранения радиоактивных материалов, обращения с ними;
- обеспечением высокой эксплуатационной надежности ядерных реакторов и установок;
- разработкой планов по защите персонала и населения в случае аварий на радиационно-опасных объектах;
- использованием эффективных методов и средств защиты при работе с источниками излучений;
- контролем за соблюдением требований безопасности при работе с радиоактивными источниками;
- дезактивацией местности, зданий, транспортных средств, объектов окружающей среды, санитарной обработкой людей в случае радиационной аварии;
- соблюдением мер предотвращения загрязнения окружающей среды при разработке рудников, переработке радиоактивных руд;
- соблюдением правил захоронения радиоактивных отходов и т. д.

Недопущение переоблучения персонала, работа которого связана с использованием источников ионизирующих излучений, достигается:

- защитой временем и расстоянием;
- экранированием источника излучения или рабочего места;
- герметизацией оборудования;

- вентиляцией помещений и рабочих объемов;
- соблюдением правил личной гигиены;
- применением средств защиты;
- использованием радиопротекторов;
- дезактивацией помещений, оборудования, одежды, средств индивидуальной защиты;
- радиационным и медицинским контролем.

Безопасность транспортировки радиоактивных веществ обеспечивается:

- использованием для перевозки специальных транспортных средств;
- выбором рациональных маршрутов движения;
- нанесением специальных опознавательных знаков на транспортные средства;
- соблюдением правил безопасности при движении транспортных средств;
- использованием для перевозки герметичных контейнеров с нанесением знаков безопасности на них;
- контролем внешнего радиоактивного фона;
- исключением возможности повреждения контейнеров в результате механического, теплового, других физических или химических воздействий;
- учетом количества перевозимых материалов и т.д.

Применение, хранение и транспортировка радиоактивных веществ производятся с разрешения и под контролем органов Госсаннадзора, которыми осуществляется также контроль за соблюдением требований безопасности при эксплуатации устройств, генерирующих ионизирующие излучения, приборов, аппаратуры и установок, действие которых основано на использовании излучений и т.д., а также при переработке и обезвреживании радиоактивных отходов.

Предприятия, на которых используются радиоактивные вещества, должны иметь санитарно-защитную зону, размеры которой определяются расчетным путем. В некоторых случаях также устанавливается зона наблюдения.

Основные меры, направленные на защиту населения от радиации в послеаварийный период:

- 1) оповещение населения о радиационной обстановке;
- 2) эвакуация и отселение;
- 3) дозиметрический контроль радиационной обстановки на всей территории Республики Беларусь и ее прогнозирование;
- 4) дезактивация территории, объектов, техники и продуктов питания и захоронение радиоактивных отходов;
- 5) обеспечение радиационно-безопасных условий труда;
- 6) ограничение свободного доступа населения на территории с высокими уровнями радиоактивного загрязнения, ограничение или прекращение на ней хозяйственной деятельности;
- 7) меры по снижению содержания радионуклидов в сельскохозяйственном сырье и продуктах переработки. Пропаганда рационального питания в условиях радиации;

- 8) организация медицинской помощи пострадавшим от радиации и проведение лечебно-профилактических и санитарно-гигиенических мероприятий;
- 9) компенсация ущерба и проведение социальной защиты населения;
- 10) контроль за использованием, распространением и захоронением радиоактивно загрязненных материалов и отходов.
- 11) реабилитация сельскохозяйственных земель и особый режим ведения агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель.

2.2.2. Внешнее и внутреннее облучение человека

Источник ионизирующего излучения – радиоактивное вещество или устройство, испускающее или способное испускать ионизирующее излучение сверх уровней, установленных нормативными правовыми актами (в т.ч. техническими), либо устройство, содержащее или использующее в работе радиоактивное вещество.

Естественный радиационный фон – доза излучения, создаваемая космическим излучением и излучением природных радионуклидов, естественно распределенных в земле, воде, воздухе, других элементах биосферы, пищевых продуктах и организме человека.

В Беларуси естественный радиационный фон находится в пределах 0,20 мкЗв/час. Естественный фон в среднем по земному шару за счет космического излучения и радиоактивности почв создает дозу 1,25 мЗв в год, в нашей стране – 1 мЗв в год.

Техногенно измененный радиационный фон – естественный радиационный фон, измененный в результате деятельности человека.

Различают естественные и искусственные источники ионизирующих излучений.

Естественные источники – космическое излучение, излучение от природных радионуклидов земного происхождения.

Космическое галактическое и межгалактическое излучение – это поток протонов (92%), альфа-частиц (7%). Остальное (около 1%) – это в основном, ядра легких элементов: лития, бериллия, азота, углерода, кислорода, фтора и др. Средний возраст галактического излучения от 1 млн. до 10 млн. лет, а плотность потока частиц величина постоянная и составляет 1–2 частицы/см²с. Галактическое излучение обладает очень высокой энергией – 10¹²–10¹⁵ МэВ. С ростом высоты интенсивность облучения с каждым километром увеличивается вдвое.

Космические лучи, проходя через атмосферу, вызывают появление космогенных радионуклидов (третий с периодом полураспада 12,3 года, углерод-14 с периодом полураспада – 5730 лет, бериллий-7, сера-32, натрий-22, 24). Эти радионуклиды, распадаясь, испускают β-частицы. Углерод-14 поступает в организм человека через желудочно-кишечный тракт и через легкие. В организме распределяется равномерно. Период биологического полувыведения из организма – около 200 суток. Он вызывает трансмутационный эффект: встраиваясь в азотистые основания нуклеиновых кислот, углерод

при распаде превращается в стабильный азот-14, что вызывает изменение структуры азотистых оснований ДНК, в результате чего меняется смысл генетического кода, доля от всех мутаций составляет около 10%.

Вклад в космическое излучение вносят и вспышки на Солнце – выброс в космическое пространство протонов с энергией до 40 МэВ, иногда энергия достигает и 100 МэВ. Человек, живущий на уровне моря, получает в среднем от космического облучения 0,315 мЗв/год, в том числе за счет внешнего облучения – 0,3 мЗв/год и за счет внутреннего облучения 0,015 мЗв/год.

Земная радиация. Возраст Земли около 5 млрд. лет, поэтому на Земле сохранились только природные радионуклиды с большим периодом полураспада, или продукты их распада, остальные распались.

Основными радионуклидами земного происхождения являются продукты распада урана-238, урана-235, тория-232.

Одним из продуктов распада радиоактивного урана является радон- 222, α -излучатель с периодом полураспада 3,8 суток. Это бесцветный инертный газ, не имеющий вкуса и запаха, тяжелее воздуха примерно в 7,5 раз. Радон является причиной заболеваний раком легких, желудка, надпочечников, гонад и костного мозга.

Половину земной радиации человек получает за счет радона, который выделяется из земли, воды, атмосферы, природного газа.

Радон считается предвестником землетрясений. С геологической точки зрения, радоноопасными участками местности являются места геологических разломов. По литературным данным, более 40% территории Беларуси относится к радоноопасной. Исследованиями геофизической экспедиции ПО «Беларусьгеология» аномально высокие содержания радона в почвенном воздухе надразломных зон установлены на Горецко-Шкловском и других участках Могилевской области. При среднефоновых концентрациях около 1000 Бк/м³ содержание радона в почвенном воздухе зон активного разлома возрастало до 15000–25000 Бк/м³.

Концентрация радона в закрытых помещениях летом выше в 8 раз, зимой – в 5000 раз по сравнению с атмосферным фоном. На кухне и в ванной комнате концентрации радона выше, чем в жилой комнате в 20–40 раз. Допустимая норма содержания радона составляет 100 Бк/м³ воздуха.

Для уменьшения концентрации радона в жилых помещениях необходимо чаще проводить проветривание, особенно кухни и ванной комнаты.

Существенным источником поступления радона могут быть строительные материалы. В Швеции дома оказались построенными на отходах переработки глинозема, кроме того, глинозем использовался для производства бетона при строительстве домов, в результате чего был превышен допустимый уровень радона, начались массовые заболевания жителей. В итоге – люди выселены, остались дома-призраки. В США к 1986 г. обследовали 1377 домов в 38 самых урбанизированных регионах Америки и выяснили, что содержание радона в помещении в среднем в 10 раз превышает его концентрацию снаружи и создает дозу радиоактивного излучения, втрое превышаю-

щую ту дозу, которую средний американец получает в течение всей своей жизни при медицинских обследованиях.

К земным радионуклидам с большим периодом полураспада относится калий-40 ($T_{1/2}=1,3$ млрд. лет). В природном калии содержится 0,01% радиоактивного калия-40, поэтому на отдельных участках (в районе добычи калийных удобрений), активность калия-40 достигает 1–2 Ки/км². Смесь изотопов калия входит в состав мышечной ткани человека.

По подсчетам НКДАР ООН (Научный комитет по действию атомной радиации) средняя эффективная доза внешнего облучения, которую человек получает за год от земных источников естественной радиации, составляет 0,35 мЗв. В целом от естественного радиационного фона человек получает дозу: от радона – около 55%, от калия-40 – около 13%, от космических лучей – 15–16%, от других естественных источников – около 15%.

Искусственные (антропогенные) источники – источники, обусловленные деятельностью человека, они, в свою очередь, могут быть результатом хозяйственной деятельности (аварии на радиационных объектах, ядерные взрывы) или средствами или устройствами для поддержания жизнедеятельности (приборы и оборудование, медицинское обследование и др.).

В Республике Беларусь находится более 1000 объектов, на которых применяются радиоактивные вещества (более 55 тысяч устройств и установок). Потенциальная опасность радиационного объекта определяется его возможным радиационным воздействием на население при радиационной аварии.

Потенциально более опасными являются радиационные объекты, в результате деятельности которых при аварии возможно облучение не только работников объекта, но и населения. Наименее опасными радиационными объектами являются те, где исключена возможность облучения лиц, не относящихся к персоналу. По потенциальной радиационной опасности устанавливается четыре категории объектов:

- к первой категории относятся радиационные объекты, при аварии на которых возможно радиационное воздействие на население и введение мероприятий по его радиационной защите;

- ко второй категории относятся объекты, радиационное воздействие при аварии на которых ограничивается территорией санитарно-защитной зоны;

- к третьей категории относятся объекты, радиационное воздействие которых ограничивается территорией объекта;

- к четвертой категории относятся объекты, радиационное воздействие от которых ограничивается помещениями, где проводятся работы с источниками излучения.

Основные источники радиации:

- тепловые электростанции;

- добыча, хранение и применение минеральных удобрений (калийных с радиокалием-40), фосфорных (с содержанием радионуклидов уранового и ториевого рядов);

- домашние приборы – цветные телевизоры и дисплеи компьютеров;

- предметы личного пользования – часы, компасы со светящимся циферблатом, украшения, антистатические салфетки и установки;
- пожарные дымовые детекторы;
- рентгеновские установки в терминалах аэропортов;
- установки и приборы для контроля (дефектоскопии) качества и износа материалов, деталей, конструкций;
- установки для стерилизации медицинских материалов и инструментов;
- медицинское оборудование для диагностики заболеваний человека;
- радиоизотопные материалы для исследования в медицине;
- радиационная терапия для лечения онкологических заболеваний;
- приборы для бесконтактного контроля агрессивных сред;
- краски, содержащие повышенное количество урана;
- в радиолокаторы для обеспечения слепой посадки самолетов;
- места захоронения радиоактивных отходов.

В радиационном отношении тепловые электростанции гораздо более опасны, чем АЭС, поскольку сжигаемые на них уголь, торф и газ содержат природные радионуклиды семейств урана и тория. При сжигании угля на тепловых электростанциях (ТЭС) в атмосферу выбрасывается значительное количество таких радионуклидов, как калий-40, уран-238, торий-232, и продукты их распада. В результате работы тепло- и электростанций на органическом топливе за последние 80 лет отмечено, что концентрация радия в поверхностном слое почвы увеличилась в 50 раз. Средние индивидуальные дозы облучения в районе расположения тепловых электростанций мощностью 1 ГВт/год составляют от 6 до 60 мкЗв/год, а от выбросов АЭС – от 0,004 до 0,13 мкЗв/год.

Выбросы АЭС при работе в плановом режиме на 99,9% состоят из инертных радиоактивных газов (ИРГ), имеющих малые периоды полураспада (изотопы криптона ^{88}Kr (период полураспада 2,8 ч) и ксенона ^{133}Xe (5,3 сут), ^{135}Xe (9,2 ч). Наиболее опасным в выбросах современных АЭС считается тритий (^3H). Он может замещать водород (H) во всех соединениях с кислородом, серой, азотом. Эти соединения составляют значительную часть массы животных организмов. Доказано, что тритий легко связывается протоплазмой живых клеток и накапливается в пищевых цепях.

В большей степени источниками загрязнения атмосферы радиоактивными выбросами являются аварии на объектах ядерной энергетики и объектах военно-промышленного комплекса, выбросы при испытании ядерного оружия.

Одним из основных источников антропогенного облучения человека стали медицинские обследования. Например: рентгенография зуба – 0,03–3 мЗв, рентгеноскопия желудка – до 0,25 Зв, флюорография – 0,1–0,5 мЗв, рентгенография грудной клетки – 2–4 мЗв. Источником дополнительного облучения человека являются радиоизотопы, широко используемые в медицине для диагностики и лечения многих заболеваний. Средняя индивидуальная доза облучения населения в Республике Беларусь от радиоизотопной диагностики составляет около 5 мЗв/год.

Несмотря на постоянно совершенствуемые защитные системы на совре-

менных атомных реакторах сохраняется опасность аварийной ситуации, при которой может произойти выброс радиоактивных продуктов, в том числе радиоактивных изотопов йода ($^{131-135}\text{I}$), в окружающую среду. В начальный ранний период аварии основной путь поступления радиоактивных изотопов йода в организм – ингаляционный. В более поздние сроки при отсутствии контроля продуктов питания, основным путем поступления радиоактивного йода является алиментарный – в основном с молоком.

Уровни радиационного риска поражения щитовидной железы могут быть снижены или даже предотвращены при назначении йодной профилактики как таковой или в комплексе с другими мерами защиты: укрытие, эвакуация, контроль продуктов питания.

Различают внешнее и внутреннее облучение человека.

Внешнее облучение происходит под воздействием источника излучения, находящегося вне организма. При внешнем облучении, которое создается в основном гамма-излучением, рентгеновским излучением и нейтронным излучением поражающая способность определяется энергией и продолжительностью излучения, расстоянием от источника излучения. Возможно контактное облучение вследствие радиоактивного загрязнения кожных покровов, одежды. Основными источниками внешнего облучения являются космическое излучение, естественные радионуклиды почвы и воздуха, радиоактивные продукты деления, которые появляются в результате проведения испытаний ядерного оружия, сбрасывания отходов атомной промышленности и аварий ядерных реакторов.

Контроль внешнего облучения производится дозиметрами, которые могут измерять экспозиционную дозу или чаще всего уровень радиации. Полученные данные сравниваются с естественным фоном, характерным для данной местности. В настоящее время на территории РБ дополнительное внешнее облучение в связи с аварией на ЧАЭС обусловлено, в основном, присутствием цезия-137 в окружающей среде.

Более подробно остановимся на биологическом действии ИИ на отдельные органы и системы.

Органы кроветворения, костный мозг, селезенка, лимфатические железы. Красный костный мозг и другие элементы кроветворной системы наиболее уязвимы при облучении и теряют способность нормально функционировать уже при дозах облучения 0,5–1 Гр. Нарушения кроветворения могут возникнуть на различных этапах клеточного обновления. При нарушении дифференциации клеток наступает лейкоз. *Лейкоз* («рак» крови или белокровие) – это заболевание, характеризующееся избыточным образованием неполноценных клеток крови (эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов).

Половые железы (при дозах 0,15 Гр происходит клеточное опустошение семенников, при облучении в дозах 3,5–6 Гр возникает постоянная стерильность; воздействие однократного облучения в дозе 1–2 Гр на оба яичника вызывает временное бесплодие и прекращение менструаций на 1–3 года. При остром облучении в диапазоне 2,5–6 Гр развивается стойкое бесплодие.).

Желудочно-кишечный тракт, печень, органы дыхания (наибольшей радиочувствительностью обладает тонкий кишечник, затем в сторону снижения радиочувствительности располагаются полость рта, язык, слюнные железы, пищевод, желудок, прямая и ободочная кишки, поджелудочная железа, печень. Сердце считается радиоустойчивым органом, однако при локальном облучении в дозах 5–10 Гр отмечаются изменения миокарда, при дозе 20 Гр – поражение эндокарда. Последствия облучения легких проявляются не сразу, ЛД₅₀ при однократном внешнем γ -облучении составляет 8–10 Гр, при дискретном в течение 6–8 недель – 30–50 Гр.

Органы выделения, мышечная и соединительная ткань, хрящи, нервная ткань. Почки выдерживают суммарную дозу около 23 Гр, полученную в течение пяти недель, печень – 40 Гр за месяц, мочевой пузырь – 55 Гр за месяц, а зрелая хрящевая ткань – до 70 Гр.

Органы зрения. Повреждения отдельных участков глаза отмечены при дозах облучения 2 Гр и менее, прогрессирующая катаракта – при дозах около 5 Гр. Дозы от 0,5 до 2 Гр, полученные в течение 10–20 лет, приводят к уплотнению и помутнению хрусталика.

Кости, сухожилия. Наибольшая радиочувствительность скелетной ткани характерна для эмбрионального периода. Чем меньше возраст ребенка, тем сильнее подавляется рост костей. Суммарная доза порядка 10 Гр, полученная в течение нескольких недель при ежедневном облучении, вызывает некоторые аномалии развития скелета. Кости и мозг взрослого человека способны выдерживать гораздо большие дозы. Мышцы обладают высокой радиоустойчивостью.

Центральная нервная система человека обладает высокой радиоустойчивостью. Клеточная гибель наблюдается при дозах свыше 100 Гр.

Эндокринная система обладает относительной радиоустойчивостью. Летальная доза для человека составляет 6–8 Грей.

Внутреннее облучение наблюдается при попадании радиоактивных веществ во внутрь организма с вдыхаемым воздухом (2–5%), питьевой водой (5–8%), загрязненными продуктами питания (90%), при курении, пользовании косметикой, через кожу или другими путями (например, введение радиоактивных веществ во внутрь организма при медицинском обследовании).

По степени биологического действия ионизирующие излучения располагаются в следующий убывающий ряд: $\alpha > \beta > \gamma$, что обусловлено их различной ионизирующей способностью.

Существует ряд особенностей, которые делают внутреннее облучение во много раз 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 радионуклида 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 альфа-частиц роговым слоем кожи (альфа-активные вещества становятся наиболее опасными).

4. За небольшим исключением радионуклиды распределяются в тканях организма неравномерно, а выборочно концентрируются в отдельных органах, еще 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).

Попадая в организм человека, радионуклиды накапливаются в отдельных органах и тканях в зависимости от типа радиоактивного изотопа. В костях преимущественно накапливаются кальций, стронций, барий, радий, плутоний, в печени и легких – плутоний, в мышцах – калий, рубидий, цезий, селезенке и лимфатических узлах (рутений, ниобий, полоний), щитовидной железе – йод. Некоторые радиоактивные вещества накапливаются равномерно во всем организме (третий, углерод, железо, полоний).

При внутреннем облучении степень поражения организма зависит не только от количества попавших в организм радионуклидов, от распределения их по органам и системам, но и от времени естественного выведения их из организма.

Биологический период полувыведения – это время, за которое половина радиоактивного вещества выводится из организма за счет обмена веществ.

Эффективный период полувыведения – время, за которое радиоактивное вещество, находящееся в организме, уменьшает в два раза свою активность вследствие радиоактивного распада.

В таблице 2.5 приводятся биологические периоды полувыведения некоторых радионуклидов из организма.

Выводящими системами из организма являются желудочно-кишечный тракт (ЖКТ), легкие, кожа и почки. Установлено, что при внутреннем облучении относительно активно противостоять радиации могут печень, почки, иммунная и кровеносная системы.

Очищению организма от радионуклидов способствует работа печени, которая в организме является «химической лабораторией». Работу печени ухудшают повышенное содержание в рационе питания жиров, углеводов, переедание и злоупотребление алкоголем, зашлакованность организма. Улучшают работу печени витамины групп В, С, серосодержащие аминокислоты, периодическая очистка печени от шлаков по специальным методикам.

Снижению негативных последствий облучения способствует иммунная система (селезенка, вилочковая железа (тимус), костный мозг, кровь, лимфоциты), которая защищает человека от вирусов, бактерий, аллергенов, токсинов и от роста злокачественных клеток. Эффективности работы иммунной

системы способствует здоровый образ жизни, сбалансированное питание, занятия физкультурой. Скорость выведения радионуклидов зависит от природы радионуклида, возраста, функционального состояния организма, особенностей поступления, распределения в организме радионуклидов и от других факторов.

Таблица 2.5. Биологические периоды полувыведения некоторых радионуклидов

Радионуклиды	Органы накопления радионуклидов	Биологический период полувыведения
Йод-131 (I-131).	30% -щитовидной железе, 70% равномерно по всему организму.	из щитовидной железы – 120 суток, из остальных органов – 12 суток
Цезий-137 (Cs-137)	в мышечной ткани	от 40 до 200 суток
Стронций-90 (Sr-90)	накапливается в костях,	49,3 года
Плутоний-238 (Pu-238), Плутоний-239 (Pu-239), Америций-241 (Am-241)	в скелете (45%), в печени (45%), 10% – в остальных органах и тканях.	из костей – 100 лет, из печени – 40 лет, т.е. попав однажды в орга- низм, они закрепляются в нем практически навсегда

Быстро выводятся радионуклиды, депонирующие в тканях, где скорость обмена веществ высокая. Остеотропные радионуклиды выводятся медленнее, потому что в костной ткани обмен веществ ниже, чем в мягких тканях. Остеотропные радионуклиды способны включаться непосредственно в костную ткань, замещая там кальций (стронций-90, барий-140). Свободные радионуклиды быстрее выводятся из организма (йод-131, рутений-106, цезий-137).

Цезий-137 выводится из организма быстрее, чем стронций-90, а йод-131 быстрее, чем цезий-137.

Природа распорядилась так, что если в нашем организме не хватает какого-нибудь элемента, то происходит компенсация его за счет другого похожего элемента (*биологическое правило избирательного поглощения* организмом схожих элементов). В связи с этим возникает возможность поставить барьер для поступления в организм радионуклидов Чернобыльского выброса.

Радиоактивные элементы часто ведут себя, как и подобные им нерадиоактивные. Принцип избирательного поглощения основан на известном биологическом факте: когда клетки организма человека насыщаются необходимыми питательными веществами, то уменьшается вероятность поглощения радиоактивных схожих элементов. С другой стороны, если наши органы не получают достаточных количеств необходимых элементов, таких, как кальций и калий в течение длительного времени, то организм начинает интенсив-

но поглощать доступные в данный момент радиоактивные вещества, подобные недостающим.

Организм человека может уменьшить поступление радиоактивных элементов, создав резервы жизненно важных для него веществ. В таблице 2.6 приведены стабильные элементы, которые блокируют поглощение организмом радиоактивных элементов.

Таблица 2.6. Избирательное поглощение радионуклидов

Стабильный элемент	Радиоактивный элемент
Кальций	Стронций-90
Иод	Иод-131
Железо	Плутоний-238, -239
Калий	Цезий-137
Сера	Сера-35
Витамин В12	Кобальт-60
Цинк	Цинк-65

Перечисленные выше блокировочные элементы находятся в той или иной концентрации в обычных продуктах питания. Составляя соответствующую диету, можно исключить дефицит основных элементов в организме человека, тем самым блокируя поглощение радиоактивных веществ.

В случае внутреннего облучения применяются препараты, сорбирующие либо позволяющие заместить радионуклид стабильным изотопом, а также способствующие ускоренному выведению их из организма.

При внешнем облучении наиболее эффективно применение радиопротекторов.

К средствам противорадиационной защиты относятся *радиопротекторы* – вещества природного или искусственного происхождения, обладающие радиозащитным эффектом и стимулирующие процессы восстановления клеток и молекул ДНК. Механизмы действия радиопротекторов связаны не только с инактивацией окислительных радикалов и других агрессивных агентов, возникающих в клетках и тканях при воздействии ионизирующих излучений, но, в большей степени, – с активацией биологических процессов, обеспечивающих повышение радиоустойчивости клеток, тканей и организма в целом. В случае их применения снижается степень проявления всех типов первичного радиационного поражения клеток, интенсифицируется клеточное деление. Радиопротекторы были открыты еще в 1949 г. (цистеин, цистеамин).

К радиопротекторам относятся отдельные лекарственные препараты (серосодержащие соединения – цистеин, цистеамин), амины (серотин, мегафен, аминазин, мексамин), антибиотики, фенольные соединения (меланин – содержится в кофе, какао, красном вине, винограде, грибах).

Радиопротекторными свойствами обладают некоторые пищевые продукты: – продукты, содержащие клетчатку (грубая и практически неперевариваемая нашим организмом часть растения) и пектины (растворимая клетчатка). Особенно богаты клетчаткой кабачки, тыква, свекла, морковь, огурцы, томаты, шпинат, капуста, спаржа, брокколи, зеленый горошек, салат, петрушка,

укроп, горох, фасоль, чечевица. Большое количество пектина содержат яблоки, груши, чернослив, сливы, апельсины, грейпфруты, лимоны, бананы, абрикосы, малина, клубника. Цельнозерновой хлеб, отруби, пророщенные зерна также содержат клетчатку и пектины.

– продукты, содержащие полиненасыщенные жирные кислоты (растительные масла: кукурузное, подсолнечное, соевое, льняное), орехи (особенно грецкие), семечки подсолнуха и семена тыквы, рыба: скумбрия, сельдь, сардины, тунец, форель, лосось, кальмары, анчоусы, палтус, карп.

– продукты, содержащие витамины Е, С, А, бета-каротин (провитамин А), биофлавоноиды, кальций, калий, магний, селен;

– экстракты элеутерококка, женьшеня, китайского лимонника, натуральные соки, продукт пчелиного яда меллигин-полипептид;

Для ограничения внутреннего облучения населения республики начиная с 1986 г. устанавливаются нормативы предельного содержания радионуклидов в продуктах питания. В настоящее время в Республике Беларусь содержание радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде регламентируется Гигиеническим нормативом № 10-117-99 «Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде» (РДУ-99) (табл. 2.7).

Недопущение переоблучения персонала, работа которого связана с использованием источников ионизирующих излучений, достигается:

– защитой временем и расстоянием;

– экранированием источника излучения или рабочего места;

– герметизацией оборудования;

– вентиляцией помещений и рабочих объемов;

– соблюдением правил личной гигиены;

– применением средств защиты;

– использованием радиопротекторов;

– дезактивацией помещений, оборудования, одежды, средств индивидуальной защиты;

– радиационным и медицинским контролем.

При выполнении работ с радиоактивными изотопами предусматривается три вида защиты:

а) *защита временем* – это ограничение нахождения человека в опасной зоне. Если время облучения сокращается в два раза, полученная доза делится пополам. И наоборот, если время облучения удваивается, полученная доза увеличится в два раза. Работник, получивший за любой малый промежуток времени дозу, превышающую предельно-допустимую, обязан покинуть опасную зону. Рекомендуются использовать специальные защитные средства: пневмокостюмы, респираторы, защитные щитки, перчатки, фартуки из поливинилхлорида (ПВХ), бахилы из пластиковой ткани.

б) *защита расстоянием* предусматривает использование дистанционных инструментов, манипуляторов, захватов, щипцов. Чем больше расстояние от источника проникающей радиации, тем меньше общее облучение.

в) *экранирование* предусматривает применение соответствующих материалов – листы из свинца, пластмасс, резины определенной конфигурации, которые ограждают источник радиоактивного излучения. Мощности дозы могут быть уменьшены до уровня, позволяющего выполнять работу.

Таблица 2.7. Изменение допустимых уровней содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде

Продукт	Нормативы, Бк/кг, Бк/л				
	ВДУ-86	РКУ-90	РДУ-92	РДУ-96	РДУ-99*
Для цезия-137					
Вода питьевая	370	18,5	18,5	18,5	10
Молоко и цельномолочная продукция	370	185	111	111	100
Молоко сгущенное и концентрированное	7400	370	111	370	200
Творог и творожные изделия	3700	185	111	370	50
Сыры сычужные и плавленые	3700	185	111	370	50
Масло коровье	7400	370	111	370	100
Мясо и мясные продукты (говядина и баранина)	3700	592	600	600	500
Свинина, птица и продукты из них	3700	592	600	370	180
Картофель	3700	592	370	100	80
Хлеб и хлебобулочные изделия	–	370	185	74	40
Мука, крупы, сахар	–	370	370	100	60
Жиры растительные	7400	185	185	185	40
Жиры животные и маргарин	7400	185	185	185	100
Фрукты	–	–	185	185	40
Садовые ягоды	–	185	185	185	70
Овощи и корнеплоды	–	185	185	100	100
Консервированные продукты из овощей и фруктов	–	185	185	74	74
Дикорастущие ягоды и их консервированные продукты	–	3700	185	185	185
Грибы свежие	–	185	185	370	370
Грибы сушеные	–	3700	3700	3700	2500
Специализированные продукты детского питания	–	37	37	37	37
Прочие продукты питания	–	592	370	370	370
Для стронция-90					
Вода питьевая	–	0,37	0,37	0,37	0,37
Молоко натуральное	–	3,7	3,7	3,7	3,7
Картофель	–	–	3,7	3,7	3,7
Хлеб, хлебопродукты	–	1,85	3,7	3,7	3,7
Детское питание	–	1,85	1,85	1,85	1,85

*Примечание: Для продуктов питания, потребление которых составляет менее 5 кг/год на человека (специи, чай, мед), устанавливаются допустимые уровни, в 10 раз более высокие, чем установленные величины для прочих пищевых продуктов.

2.3. Радиоэкологическая обстановка в Республике Беларусь

2.3.1. Радиационная обстановка до и после аварии на ЧАЭС

Еще до аварии на Чернобыльской АЭС геологи и геохимики Беларуси сделали съемку естественной радиоактивности ее территории. Оказалось, что естественный радиоактивный фон по уровню экспозиционной дозы излучения в Беларуси колебался в зависимости от пункта измерения от 2 до 12 мкР/ч. Самая малая величина радиационного фона отмечена в районе Мозыря – 2 мкР/ч и более высокая мощность экспозиционной дозы излучения были характерны для северных районов республики – 12 мкР/ч, где имеются глинистые осадочные породы, как правило, обогащенные ураном.

Широкомасштабное загрязнение биосферы радионуклидами началось 16 июля 1945 года, когда состоялось первое в мире испытание атомного оружия – первый ядерный взрыв в истории человечества (в Долине смерти штат Нью-Мексико (США) возле отдаленной авиабазы Аламогордо). 6 августа 1945 года в 8.15 утра была сброшена атомная бомба на Хиросиму, Япония. Около 140 000 человек погибло во время взрыва и умерло в течение последующих месяцев. Тремя днями позже, когда Соединенные Штаты сбросили еще одну атомную бомбу на Нагасаки, было убито около 80 000 человек. Всего ядерные державы провели более 400 испытательных взрывов на земле, в воде и в атмосфере (не считая подземных). В результате радиоактивными веществами была загрязнена вся планета, и естественный фон изменился повсеместно. Было установлено, что максимальная поверхностная плотность загрязнения Cs-137 и Sr-90 наблюдается в широтном поясе 50–60° северной широты и составляет 100–175 и 54–95 мКи/км² соответственно.

В начале 1986 г. в Советском Союзе работало 14 реакторов типа РБМК электрической мощностью 1000 Мвт каждый. Четыре реактора такого типа работало на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), расположенной на севере Украины, в 130 км на северо-восток от Киева и в 18 км к северу от г.Чернобыль. Границы Беларуси и России расположены соответственно в 12 и 140 км от ЧАЭС.

Пуск четвертого блока ЧАЭС состоялся в декабре 1983 г. 26 апреля 1986 г. на 4-м блоке Чернобыльской АЭС произошла техногенная авария, которая классифицируется как глобальная экологическая катастрофа.

Перечень причин был определен путем детального и всестороннего анализа событий приведших к аварии ядерной установки.

Ошибки проектантов: было проанализировано 13 версий причин аварии. Наиболее вероятной является версия, которая связана с:

- наличием эффекта реактивности системы управления;
- несовершенной системой защиты реактора;
- низким уровнем культуры ядерной безопасности в бывшем СССР (отсутствие развитой системы ядерного законодательства, невыполнение прин-

ципа полной ответственности за безопасность ядерной установки эксплуатирующей организацией).

Ошибки персонала: в процессе подготовки к проведению испытаний и в процессе проведения испытаний с нагрузкой собственных нужд блока персоналом были отключены ряд технических средств защиты и нарушены важнейшие положения регламента эксплуатации; оперативный персонал, желая выполнить план экспериментальных работ любой ценой, грубо нарушил регламент эксплуатации, инструкции и правила управления энергоблоком. Операторы произвели такие запрещенные действия, как блокирование некоторых сигналов аварийной защиты и отключение системы аварийного охлаждения активной зоны; работали при запасе реактивности на стержнях СУЗ ниже допускаемого регламентом значения; ввели реактор в режим работы с расходами и температурой воды по каналам выше регламентных, при мощности реактора ниже предусмотренной программой.

Таким образом, первопричиной аварии на Чернобыльской АЭС было крайне маловероятное сочетание допущенных персоналом нарушений порядка и режима эксплуатации, которые разработчики реакторной установки считали невозможными и поэтому не предусмотрели создания соответствующей такой ситуации системы защиты.

После взрыва на ЧАЭС во внешнюю среду были выброшены радиоактивные вещества (около 450 радионуклидов) общей активностью около 10 ЭБк (эксаБеккерели, $1 \text{ Э} = 10^{18}$). Было выброшено 50–60% йода и 30–35% цезия, содержавшихся в реакторе.

За время активного выброса из реактора (с 26 апреля по 5 мая 1986 г.) ветер вокруг Чернобыля развернулся на 360° , в результате чего радиационные выбросы (разного радионуклидного состава в разные дни) покрыли большое пространство. Формирование радиоактивного загрязнения Беларуси началось сразу же после взрыва реактора. 27–28 апреля 1986 г. территория Беларуси находилась под влиянием пониженного атмосферного давления. 28 апреля во всех областях республики прошли дожди, носившие ливневый характер. С 29 апреля переместившиеся в северном направлении воздушные массы с радиоактивными выбросами в связи со сменой направления движения воздушных потоков начали перемещаться из Прибалтики в Беларусь. Такой перенос воздушных потоков сохранялся до 6 мая. С 8 мая произошло повторное изменение направления движения воздушных масс, и их траектория вновь проходила от Чернобыля в северном направлении.

Метеорологические условия движения радиоактивно загрязненных воздушных масс с 26 апреля по 10 мая 1986 г. в совокупности с дождями, особенно в конце апреля и начале мая, определили масштабность радиоактивного загрязнения территории Европы (рис. 2.9).

Выпадения из чернобыльских облаков затронули территории, на которых живет не меньше трех миллиардов человек. В 13 европейских странах более 50% территорий были загрязнены радионуклидами из Чернобыля, и еще в 8 странах – более 30% территорий.

После аварии в разной степени загрязненными радионуклидами оказались 11 областей СССР, в которых проживало 17 млн. человек. Около 2/3 радиоактивных веществ в результате сухого и влажного осаждения выпали на территории Беларуси.

Выброшенные радионуклиды примерно распределились: Беларусь – 34%, Украина – 20%, Российская федерация – 24%, Европа – 22%. В результате первоначального радиоактивного загрязнения цезием-134, цезием-137, стронцием-90 и плутонием-239 в зонах загрязнения оказалось 3668 населенных пунктов с населением более 2 млн. человек, в том числе 500 тыс. детей.

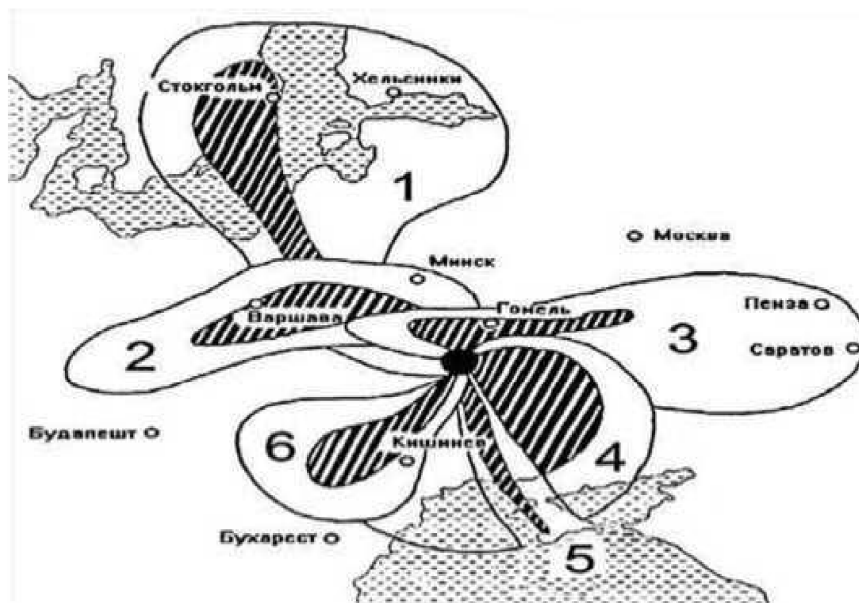


Рисунок 2.9. Шесть этапов формирования радиоактивных газо-аэрозольных выбросов из Чернобыля 26 апреля – 4 мая 1986 г.: 1 – 26 апреля, 2 – 27 апреля; 3 – 27 апреля, 4 – 29 апреля; 5 – 2 мая; 6 – 4 мая

Полностью оказались в зоне радиоактивного загрязнения Гомельская и Могилевская области, 10 районов Минской области, 6 районов Брестской области, 6 районов Гродненской области и 1 район Витебской области.

Основной вклад в радиоактивное загрязнение местности Республики Беларусь в первые дни после аварии внесли короткоживущие радионуклиды: йод-131, йод-132, телур-132, рутений-103, барий-140 и другие.

Йод-131. 25% от общего количества выброшенных радионуклидов составлял йод-131. Практически вся территория Республики Беларусь была загрязнена йодом-131. Являясь β - и γ -излучателем, находясь в аэрозольном состоянии, йод-131 нанес основной удар по щитовидной железе людям с дефицитом йода. Период полураспада ^{131}I составляет 8,04 суток.

Йод – вещество, потребляемое щитовидной железой при образовании определенных гормонов. Йодсодержащие гормоны важны для регуляции процессов в организме. Если в пище недостаточно йода, организм поглотит радиоактивный йод-131, который заполнит щитовидную железу. Радиоактивный йод может попасть из воздуха (в виде паров) или поступать во внутрь организма в виде солей йода. В любом случае, попав в щитовидную железу,

он начнет облучать окружающие клетки и, в зависимости от концентрации, может нарушить функцию щитовидной железы, что приводит к замедлению роста, рождению недоношенных детей, развитию рака щитовидной железы.

При пероральном поступлении радиоактивный йод практически полностью всасывается в желудочно-кишечном тракте. При ингаляции 50% радиоактивного йода откладывается в верхних дыхательных путях, до 15% – в бронхах, остальные (около 35%) – в легких. Уже через 6 часов до 15–20% радиоактивного йода фиксируется в щитовидной железе, а через 24 часа фиксируется до 25–30% изотопа. Основным последствием этого процесса является развитие *гипотериоза* и опухолевых заболеваний щитовидной железы (в отдельные сроки), а при поступлении больших доз – *тееойодита*. Около 30% поступившего в кровь йода откладывается в щитовидной железе и выводится из нее с биологическим периодом полувыведения – 120 суток. Эффективный период полувыведения из щитовидной железы равен 7,5 суток. Остальные 70% поступившего йода в организм равномерно распределяются по различным органам и тканям. Биологический период полувыведения этой части составляет 12 суток, а эффективный – 4,8 суток.

Уровни накопления радиоактивного йода в щитовидной железе зависят от возраста человека и функционального состояния щитовидной железы. В нормально функционирующей щитовидной железе взрослого человека накапливается около 30% от поступившего радионуклида. У детей в связи с более высокой функциональной активностью и меньшими размерами щитовидной железы, чем у взрослого человека, накопление радиоактивного йода в железе происходит в больших количествах, быстрее, и формируются более высокие поглощенные дозы. Так, у детей в возрасте до одного года максимальные поглощенные дозы на единицу поступающей активности ^{131}I формируются примерно в 10 раз выше, чем у взрослого человека. С увеличением возраста ребенка уровни накопления радиоактивного йода в щитовидной железе снижаются и к 14 годам соответствуют уровням накопления его у взрослого человека.

У беременных женщин, в связи с повышенной функцией щитовидной железы, уровни накопления и формирование поглощенных доз в щитовидной железе выше примерно в 1,5 раза, чем у взрослого человека. У кормящих женщин в грудное молоко в течение суток переходит до 30% радиоактивного йода, поступившего в организм. Лактация – один из значимых путей выведения радиоактивного йода из организма матери и дополнительной опасности для ребенка.

При нарушенной функции щитовидной железы уровни накопления радиоактивного йода меняются: при гиперфункции накопление увеличивается до 50%, при гипофункции – снижается до 15–25%. В условиях йодного дефицита уровни накопления радиоактивного йода в щитовидной железе возрастают (при 50% дефиците более чем в 2,5 раза).

Степень поражения щитовидной железы зависит от поглощенной в щитовидной железе дозы, возраста человека и функционального состояния щитовидной железы.

Дозы более 10 Гр могут вызвать острое поражение щитовидной железы (особенно у детей), которые могут проявиться нарушением функции и структуры щитовидной железы (острый гипотиреоз, острый тиреоидит, острый тиреотоксикоз). При меньших дозах в щитовидной железе возможно развитие доброкачественных и злокачественных опухолей (узлы, рак).

Профилактика с помощью препаратов стабильного йода является одной из мер индивидуальной защиты населения в случае радиационной аварии и имеет своей целью предотвращение или снижение поглощенной дозы в щитовидной железе, обусловленной поступлением радиоактивных изотопов йода в организм, и возможных радиологических последствий ее облучения.

Этот метод фармакологической защиты заключается в торможении или временном прекращении функции образования гормонов щитовидной железы (тиреоидных гормонов), которые определяют активность течения метаболических процессов в организме человека. В химическую структуру этих гормонов входит йод. В основе защитного действия лежит процесс блокады функции щитовидной железы большими дозами стабильного йода до начала поступления радиоактивного йода. Полнота и продолжительность блокады зависит от дозировки стабильного йода: чем больше вводимое количество KI, тем продолжительнее блокада, и позднее наступает деблокада (восстановление функции щитовидной железы). Блокада на однократное введение больших дозировок KI (100–250 мг) имеет временный характер. Деблокада определяется скоростью выведения йода из организма и щитовидной железы. У взрослого человека 90% стабильного йода из организма выводятся в течение 2–3 суток, из щитовидной железы йод выводится с периодом полувыведения 120 суток, у детей – 15–50 суток. При однократном поступлении блокирующих дозировок йодида калия время полного восстановления функции щитовидной железы у взрослого человека составляет 5–8 суток. Многократное введение больших дозировок KI увеличивает продолжительность блокады и удлиняет период деблокады. Для блокады щитовидной железы у лиц разного возраста, в зависимости от размеров (массы) щитовидной железы требуются разные количества KI. Чем меньше возраст человека (меньше масса щитовидной железы), тем меньше количества KI требуются для блокады щитовидной железы.

Для защиты организма от накопления радиоактивных изотопов йода в критическом органе – щитовидной железе и теле применяются препараты стабильного йода. Препараты стабильного йода вызывают блокаду щитовидной железы, снижают накопление радиоизотопов йода в щитовидной железе и ее облучение. В Республике Беларусь рекомендован и применяется йодистый калий. Своевременный прием йодистого калия обеспечивает снижение дозы облучения щитовидной железы на 97–99% и в десятки раз – всего организма. У нас в стране разработаны препараты в таблеточной форме стабилизированного йодистого калия. Дозы его применения: 0,125 г для взрослых и детей старше 2 лет; 0,040 г – для детей до 2 лет. Срок хранения таблетки 4 года. Для расширения арсенала средств защиты щитовидной железы от радиоизотопов йода в дополнение к йодиду калия рекомендуются другие пре-

параты йода: раствор Люголя и 5%-ная настойка йода, оказывающие равное с йодистым калием защитное действие при поступлении внутрь радиоioda. Указанные препараты доступны для населения, так как почти всегда имеются в домашних аптечках. Более широкий набор препаратов йода для защиты щитовидной железы от радиоизотопов йода позволит в чрезвычайных условиях осуществлять необходимые меры по обеспечению радиационной безопасности населения, находящегося в зоне радиоактивного выброса или употребляющего загрязненные радиоактивным йодом молоко и другие продукты питания. При отсутствии йодида калия раствор Люголя и настойка йода могут его заменить.

Йодистый калий применяют в следующих дозах (в одном из предлагаемых вариантов): взрослым и детям от 2 лет и старше – по 1 таблетке по 0,125 г; детям до 2 лет – по 1 таблетке по 0,040 г для приема внутрь ежедневно; беременным женщинам – по 1 таблетке по 0,125 г с одновременным приемом перхлората калия – 0,75 г (3 таблетки по 0,25 г). Настойка йода 5%-ная применяется взрослым и подросткам старше 14 лет по 44 капли 1 раз в день или по 20–22 капли 2 раза в день *после еды* на 1/2 стакана молока или воды. Детям от 5 лет и старше 5%-ная настойка йода применяется в 2 раза меньшем количестве, чем для взрослых, т. е. по 20–22 капли 1 раз в день или по 10–11 капель 2 раза в день на 1/2 стакана молока или воды. *Детям до 5 лет настойку йода внутрь не назначают.*

Настойка йода может применяться путем ее нанесения на кожу. Защитный эффект нанесения настойки йода на кожу сопоставим с ее приемом внутрь в тех же дозах. Настойка йода наносится тампоном в виде полос на предплечье, голени. Этот способ защиты особенно приемлем у детей младшего возраста (младше 5 лет), поскольку перорально настойка йода у них не применяется. Для исключения ожогов кожи целесообразно использовать не 5%-ную, а 2,5%-ную настойку йода. Детям от 2-х до 5-ти лет настойку йода наносят из расчета 20–22 капли в день, детям до 2-х лет – в половинной дозе, т. е. 10–11 капель в день.

Раствор Люголя применяется взрослыми и подростками старше 14 лет по 22 капли 1 раз в день или по 10–11 капель 2 раза в день после еды на 1/2 стакана молока или воды. Детям от 5 до 14 лет рекомендуется использование раствора Люголя по 10–11 капель 1 раз в день или по 5–6 капель 2 раза в день на 1/2 стакана молока или воды. Детям до 5 лет применение раствора Люголя не рекомендуется. Препараты йода применяют до исчезновения угрозы поступления в организм радиоактивных изотопов йода.

Для осуществления своевременной защиты населения от радиоактивных изотопов йода лечебно-профилактические учреждения создают запас йодида на все обслуживаемое население из расчета приема его в течение 7 дней (эффективный биологический период полувыведения). Предполагается, что за это время будет принято решение либо об эвакуации населения, либо исключено поступление радиоioda в организм людей. Обеспечение населения йодистым калием, раствором Люголя и 2,5–5%-ной настойкой йода проводится через аптечную сеть, для чего в аптеках создается необходимый запас препа-

ратов йода. Часть запасов йодистого калия медучреждение передает в детские дошкольные учреждения, интернаты, больницы, родильные дома и т. д., где они оперативно могут быть применены.

Прием препаратов йода осуществляется населением самостоятельно согласно рекомендациям по их применению, для чего следует размножить в необходимых количествах памятки, которые можно получить в любой аптеке, а учреждения обеспечиваются ими заранее. Предлагаемые препараты стабильного йода не представляют опасности для организма в дозах, рекомендуемых для защиты организма от радиоактивных изотопов йода и не оказывают побочного действия для большинства населения. Однако в любом случае следует избегать передозировки препаратов, содержащих йодид калия. Во избежание передозировки (КИ) органами здравоохранения необходимо проводить разъяснительную работу через печать, радио, телевидение о показаниях к применению препаратов, порядке их применения, хранения и о поведении населения.

Йодная профилактика начинается немедленно при угрозе загрязнения воздуха и территории в результате аварии ядерных реакторов, утечки или выбросов промышленными предприятиями в атмосферу продуктов, содержащих радиоизотопы йода.

Согласно постановлениям Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31 августа 2006 г. № 41/67 и от 14 января 2009 г. № 3/6, проведение йодной профилактики начинается при ожидаемом значении мощности дозы ионизирующего излучения 50 мкЗв/ч и более (табл. 2.8).

Таблица 2.8. Предельные уровни мощности дозы для принятия решения на проведение защитных мероприятий при радиационных авариях

Значение мощности дозы ионизирующего излучения	Проводимые мероприятия
1 мкЗв/ч и более	Запрещение употребления местных пищевых продуктов (включая молоко) и воды из открытых водоемов и колодцев до получения результатов лабораторного исследования Ограничение пребывания населения в зоне радиоактивного загрязнения при обнаружении неконтролируемых источников ионизирующего излучения (в том числе при транспортных авариях)
50 мкЗв/ч и более	Укрытие и / или (только при авариях на ядерных объектах) блокирование щитовидной железы
100 мкЗв/ч и более	Ограничение пребывания лиц, участвующих в ликвидации радиационной аварии (в том числе транспортной) и ее последствий, на зараженной территории в зоне радиоактивного загрязнения при обнаружении неконтролируемых источников ионизирующего излучения
200 мкЗв/ч и более	Рассмотрение вопроса о временном переселении населения
500 мкЗв/ч и более	Проведение эвакуационных мероприятий

После изучения радиационной обстановки специальной комиссией принимается решение о продолжении или отмене йодной профилактики. Йодная профилактика должна быть продолжена в следующих случаях:

- при превышении объемной активности радионуклидов йода в атмосферном воздухе $1,5 \cdot 10^{-13}$ Ки/л ($5,55 \cdot 10^{-3}$ Бк/л);
- при загрязнении пастбищ радионуклидами йода свыше $0,7$ Ки/км² ($2,6 \cdot 10^{10}$ Бк/км²);
- при превышении объемной активности радионуклидов йода в молоке $1 \cdot 10^{-8}$ Ки/л ($3,7 \cdot 10^2$ Бк/л).

В настоящее время основными долгоживущими радионуклидами, формирующими суммарную дозовую нагрузку населения, являются: цезий-137, стронций-90 и плутоний-239:

- цезий-137 – загрязнил 23% территории республики (46450 км²);
- стронций-90 – загрязнил 10% территории республики (2070 км²);
- плутоний-239 – загрязнил 2% территории республики (430 км²).

Сегодня в основном «аварийным» источником облучения населения, проживающего в зонах, пострадавших от чернобыльского выброса, является цезий-137, который определяет 90–95% суммарной дозы (внешнее и внутреннее облучение).

В настоящее время доза внутреннего облучения человека от радиоцезия является основной, она дает вклад в суммарную дозу более 50%.

Цезий-137. Хорошо сорбируется почвами (особенно черноземами). β - и γ -излучатель, период полураспада составляет 30 лет. На территорию Беларуси выпал в виде дисперсных частиц размером от 2 мкм до нескольких сотен мкм. Цезий химически активен и легко вступает в соединения. В основном цезий не стабилен, в стабильном состоянии встречается очень редко.

Цезий-137 закрепляется в бедных калием почвах, а в почвах, богатых органическим веществом, хорошо усваивается корневой системой и легко передвигается в самих растениях. Цезия-137 много в зерне, стеблях картофеля, в зелени и других растениях. В водной среде процессы миграции цезия идут интенсивнее, поэтому в рыбе он накапливается в значительных количествах.

В организм человека радиоцезий поступает через желудочно-кишечный тракт. Легко всасывается в желудочно-кишечном тракте (50%–80%) и свободно циркулирует в составе крови по всему телу. Основная часть цезия накапливается в мышцах (80%), в костях – 8%. Выводится из организма с мочой, калом и потом.

Обладая свойствами, подобными калию, цезий ведет себя в окружающей среде и в организме человека аналогично. Калий крайне нужен любой живой структуре на Земле (растениям, животным, человеку). При недостатке калия во внутренних органах человека поглощенный радиоактивный цезий концентрируется в мышцах и органах воспроизводства.

Значительно стимулируется вывод цезия при обогащении рациона питания калием.

Стронций-90. β -излучатель. Период полураспада – 29 лет. Входит в состав биологической ткани животных и растений. В растениях в основном

накапливается в корневой системе. Его также много в зерне, листовых овощах. Всасывание стронция в организм человека зависит от ряда факторов:

- возраста (у детей процент всасывания выше);
- физиологического состояния организма (период беременности, лактации);
- приема витамина D (витамин ускоряет всасывание стронция);
- количества поступающего в организм кальция (чем больше поступает кальция, тем меньше всасывается стронция);
- пола (у мужчин всасывание идет активней).

У кур стронций переходит в скорлупу яиц, у коров значительная часть переходит в молоко. Стронций-90 вызывает различные онкологические и другие заболевания.

Плутоний-238, 239, 240, 241 – α -излучатель. Обладает также слабым гамма-излучением и мягким рентгеновским излучением. Период полураспада плутония-239 – 24065 лет. Особо опасен при попадании в органы дыхания, желудочно-кишечный тракт и на поврежденную кожу. При дефиците кальция и стронция избирательно накапливается в костях, но при попадании в кровеносное русло 45% плутония задерживается в печени, откуда половина выводится только через 20 лет. Однако, на практике уже через 2–3 месяца возникает цирроз печени. Плутоний-239 также аккумулируется в скелете и в лимфатических узлах, подавляет систему кроветворения и иммунную систему. Загрязнение почвы изотопами плутония охватывает около 430 км², или 2% площади Республики Беларусь. Эти территории преимущественно находятся в Гомельской области (Брагинский, Наровлянский, Хойникский, Речицкий, Доружский и Лоевский районы) и Чериковском районе Могилевской области. Загрязнение изотопами плутония с высокой плотностью характерно для 30-километровой зоны ЧАЭС.

Америций-241 является продуктом распада плутония-241, α - и γ -излучатель. На территорию Республики Беларусь плутония-241 выпало незначительное количество, однако, этот элемент опасен тем, что в отличие от других радионуклидов, обладает очень жестким гамма-излучением. Оно более опасно, чем рентгеновское излучение. По своему воздействию на организм человека он аналогичен плутонию-239, но с более тяжелыми последствиями, связанными с микровзрывами.

Учитывая, что америций-241 имеет большой период полураспада (432 года), то он будет представлять опасность в течение тысячелетий. Через 100 лет после аварии на ЧАЭС (в 2086 г.) общая активность почвы на загрязненных им территориях Республики Беларусь будет в 2,4 раза выше, чем в начальный послеаварийный период. Снижение α -активности почвы от ²⁴¹Am до 3,7 кБк/м² ожидается после 2400 г.

«Горячие» частицы. Наряду с аэрозолями отдельных радионуклидов в чернобыльском выбросе имелись и аэрозоли диспергированного ядерного топлива (частички топлива). Они были различной величины (от 2 мкм до сотен микрометров), активности и радионуклидного состава. В настоящее время основное количество этих частиц (до 70%) находится в верхнем слое поч-

вы (до 1 см). Эти частицы представляют опасность для всего живого ввиду высокой концентрации в них радионуклидов с разными видами излучений.

При попадании таких частиц в организм человека последствия для здоровья могут быть крайне тяжелыми и зависеть от особенностей каждого типа радионуклида, содержащегося в «горячей» частице.

Радиационная ситуация на территории Беларуси улучшается со временем по причине снижения активности загрязненных объектов согласно закону радиоактивного распада. К 2016 г. произошел период полураспада радионуклидов цезия-137 и стронция-90, т. е. уровень радиации уменьшился в 2 раза.

Выпавшие радионуклиды находятся в постоянной миграции в зоне непосредственного выпадения (вертикальная миграция), а также распространяются в «чистую» зону (горизонтальная миграция).

Прогноз распространения радионуклидов в основном связан с горизонтальной миграцией, деятельностью человека, состоянием погоды и способностью растений аккумулировать радионуклиды. Долгосрочный прогноз показывает, что самоочищение почв, особенно от цезия-137, вследствие вертикальной миграции, будет происходить крайне медленно. Ввиду длительного пребывания цезия-137 в пахотном слое на десятилетия остается опасность радиоактивного загрязнения продукции растениеводства за счет корневого и аэрального поступления.

2.3.2. Территория радиоактивного загрязнения

Для определения территории радиоактивного загрязнения используются следующие критерии:

- величина средней годовой эффективной дозы облучения населения;
- плотность загрязнения почв радионуклидами;
- возможность производства продукции, содержание радионуклидов в которой не превышает республиканских допустимых уровней (РДУ–99).

Для определения зон радиоактивного загрязнения используются следующие критерии:

- величина средней годовой эффективной дозы облучения населения;
- плотность загрязнения почв радионуклидами.

Территория радиоактивного загрязнения – это часть территории Республики Беларусь с плотностью загрязнения почв радионуклидами цезия-137 либо стронция-90 или плутония-238, 239, 240 соответственно 37, 5,55, 0,37 кБк/кв.м (1,0, 0,15, 0,01 Ки/кв.км) и более, а также иные территории, на которых средняя годовая эффективная доза облучения населения может превысить (над уровнем естественного и техногенного фона) 1 мЗв. и другие территории с меньшей плотностью загрязнения почв радионуклидами на которых невозможно или ограничено производство продукции, содержание радионуклидов в которой не превышает республиканских допустимых уровней.

В соответствии с Законом Республики Беларусь от 26 мая 2012 г. № 385-3 «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению после катастрофы на Чернобыльской АЭС» территория Республики Бе-

ларусь разделена на зоны в зависимости от радиоактивного загрязнения почв радионуклидами и величины среднегодовой эффективной дозы (табл. 2.9).

Таблица 2.9. Зонирование территории Республики Беларусь по уровню радиоактивного загрязнения и величины дозовых нагрузок на население

Наименование зоны	Эквивалент доза, мЗв/год	Плотность загрязнения, кБк/м ² (Ки/км ²)		
		Cs-137	Sr-90	Pu-238, -240
Зона проживания с периодическим радиационным контролем	< 1	37–185 (1–5)	5,55–18,5 (0,15–0,5)	0,37–0,74 (0,01–0,02)
Зона с правом на отселение	< 5 > 1	185–555 (5–15)	18,5–74 (0,5–2)	0,74–1,85 (0,02–0,05)
Зона последующего отселения	> 5	555–1480 (15–40)	74–111 (2–3)	1,85–3,7 (0,05–0,1)
Зона первоочередного отселения		> 1480 (40)	> 111 (3,0)	> 3,7 (0,1)
Зона отчуждения (эвакуации)	территория вокруг ЧАЭС, с которой в 1986 году было эвакуировано население			

Территории с меньшей плотностью загрязнения почв радионуклидами, на которых невозможно или ограничено производство продукции, содержание радионуклидов в которой не превышает республиканских допустимых уровней, не относятся к зонам радиоактивного загрязнения.

Зона эвакуации (отчуждения) – территория вокруг Чернобыльской АЭС, с которой в 1986 г. было эвакуировано население (30-километровая зона и территория, с которой произведено дополнительное отселение населения в связи с плотностью загрязнения почв радионуклидами стронция-90 более 111 кБк/м² (3 Ки/км²) и плутония-238, 239, 240 более 3,7 кБк/м² (0,1 Ки/км²). В этой зоне запрещается осуществление хозяйственной и иной деятельности, за исключением природоохранных мероприятий, мероприятий, связанных с обеспечением радиационной безопасности, техническим обслуживанием инженерных сетей, коммуникаций и иных объектов, а также научно-исследовательских и экспериментальных работ.

В зоне отчуждения также запрещается: проживание населения; пребывание граждан без пропуска; въезд без пропуска всех видов транспортных средств и другой техники; привлечение к работе лиц без медицинской справки о состоянии здоровья с заключением о годности к работе в данной профессии в данной зоне, а также без их письменного согласия; использование территории зоны эвакуации (отчуждения) в рекреационных целях.

Зона первоочередного отселения – территория с плотностью загрязнения почв радионуклидами цезия-137 от 1480 кБк/м² (40 Ки/км²) либо стронция-90 111 кБк/м² (3,0 Ки/км²) или плутония-238, 239, 240 3,7 кБк/м² (0,1 Ки/км²) и более.

В зоне допускается осуществление хозяйственной и иной деятельности (за исключением сельскохозяйственной) с соблюдением норм и правил по обеспечению радиационной безопасности и использованием технологий,

обеспечивающих производство продукции, содержание радионуклидов в которой не превышает республиканских допустимых уровней.

В зоне первоочередного отселения запрещается: проживание населения; пребывание граждан без пропуска; въезд без пропуска всех видов транспортных средств и другой техники; сбор дикорастущих растений (в том числе мха, лишайников и грибов) и (или) их частей (ягод, орехов, шишек, иных плодов, почек, листьев, цветов, коры, корней и др.) (далее – дикорастущие растения и (или) их части), охота, рыболовство, все виды водопользования, за исключением использования водных объектов для противопожарных целей, использование территории в рекреационных целях.

Зона последующего отселения – территория с плотностью загрязнения почв радионуклидами цезия-137 от 555 до 1480 кБк/м² (от 15 до 40 Ки/км²) либо стронция-90 от 74 до 111 кБк/м² (от 2 до 3 Ки/км²) или плутония-238, 239, 240 от 1,85 до 3,7 кБк/м² (от 0,05 до 0,1 Ки/км²), на которой средняя годовая эффективная доза облучения населения может превысить (над уровнем естественного и техногенного фона) 5 мЗв.

В зоне последующего отселения допускается осуществление хозяйственной и иной деятельности с соблюдением норм и правил по обеспечению радиационной безопасности и использованием технологий, обеспечивающих производство продукции, содержание радионуклидов в которой не превышает республиканских допустимых уровней.

В зоне последующего отселения запрещается: осуществление сельскохозяйственной деятельности на землях отчуждения; производство (заготовка) продукции, содержание радионуклидов в которой превышает республиканские допустимые уровни; пребывание граждан без пропуска; въезд граждан для проживания; въезд без пропуска всех видов транспортных средств и другой техники; сбор дикорастущих растений и (или) их частей; охота; рыболовство; использование территорий в рекреационных целях.

Зона с правом на отселение – территория с плотностью загрязнения почв радионуклидами цезия-137 от 185 до 555 кБк/м² (от 5 до 15 Ки/км²) либо стронция-90 от 18,5 до 74 кБк/м² (от 0,5 до 2 Ки/км²) или плутония-238, 239, 240 от 0,74 до 1,85 кБк/м² (от 0,02 до 0,05 Ки/км²), на которой средняя годовая эффективная доза облучения населения может превысить (над уровнем естественного и техногенного фона) 1 мЗв.

Зона проживания с периодическим радиационным контролем – территория с плотностью загрязнения почв радионуклидами цезия-137 от 37 до 185 кБк/м² (от 1 до 5 Ки/км²) либо стронция-90 от 5,55 до 18,5 кБк/м² (от 0,15 до 0,5 Ки/км²) или плутония-238, 239, 240 от 0,37 до 0,74 кБк/м² (от 0,01 до 0,02 Ки/км²), на которой средняя годовая эффективная доза облучения населения может превысить (над уровнем естественного и техногенного фона) 1 мЗв.

В зоне с правом на отселение и зоне проживания с периодическим радиационным контролем хозяйственная и иная деятельность осуществляется с соблюдением норм и правил по обеспечению радиационной безопасности и использованием технологий, обеспечивающих производство продукции, со-

держание радионуклидов в которой не превышает республиканские допустимые уровни.

В этих зонах запрещается: сельскохозяйственная деятельность на землях отчуждения; производство (заготовка) продукции, содержание радионуклидов в которой превышает республиканские допустимые уровни; природопользование, не отвечающее требованиям норм и правил по обеспечению радиационной безопасности.

Территории с меньшей плотностью загрязнения почв радионуклидами, на которых невозможно или ограничено производство продукции, содержание радионуклидов в которой не превышает республиканских допустимых уровней, не относятся к зонам радиоактивного загрязнения.

В 1988 г. в белорусском секторе 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС на площади 216,2 тыс. га был учрежден Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (ПГРЭЗ).

Радиационный мониторинг является составной частью Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь. В систему радиационного мониторинга входит широкая сеть пунктов наблюдений и аккредитованных лабораторий.

Радиационный мониторинг – это система длительных регулярных наблюдений с целью оценки состояния радиационной обстановки, а также прогноза изменения ее в будущем.

На территории Республики Беларусь функционируют 55 пунктов наблюдений радиационного мониторинга (рис. 2.10).

Радиационный мониторинг проводится с целью наблюдения за:

- естественным радиационным фоном;
- радиационным фоном в районах воздействия потенциальных источников радиоактивного загрязнения, в том числе для оценки трансграничного переноса радиоактивных веществ;
- радиоактивным загрязнением атмосферного воздуха, почвы, поверхностных вод на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС.

На реперных точках пунктов наблюдений ежедневно в автоматическом режиме проводится измерение МД (мощности дозы) гамма-излучения. Анализ результатов измерения МД на сети радиационно-экологического мониторинга показывает, что уровни, превышающие доаварийные значения, зарегистрированы в городах, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения: Брагин, Наровля, Славгород, Хойники, Чечерск.

На остальной территории МД не превышает уровень естественного гамма-фона (до 0,20 мкЗв/ч). В областных городах среднегодовой уровень МД находится в пределах от 0,10 до 0,12 мкЗв/ч.

В Республике Беларусь создана современная автоматизированная система контроля радиационной обстановки в зонах наблюдения АЭС сопредельных государств (АСРК). Она обеспечивает радиационный контроль в 100-километровых зонах Чернобыльской, Смоленской и Ровенской АЭС, а также 30-километровой зоне Игналинской АЭС.



Условные обозначения:












-  Преобладающее направление ветра "среднегодовая роза ветров"
-  АЭС
-  30
Удаление от АЭС
-  Измерение уровней мощности дозы гамма-излучения
-  Пункты отбора проб радиоактивных аэрозолей в приземном слое атмосферы
-  Пункты отбора проб радиоактивных выпадений
-  Ландшафтно-геохимические полигоны
-  Пункты автоматизированного измерения уровней мощности дозы гамма-излучения
-  Национальный центр реагирования
-  Региональный центр реагирования
-  Локальный центр реагирования

Рисунок 2.10. Размещение пунктов наблюдений радиационного мониторинга на территории Республики Беларусь

АСРК предназначена для контроля радиационной обстановки в реальном масштабе времени, измерения мощности дозы гамма-излучения и передачи данных совместно с метеорологическими параметрами в пункты контроля и центры реагирования.

Аппаратно-программный комплекс автоматизированной системы радиационного контроля представляет собой сеть из территориально разнесенных на десятки километров автоматических пунктов измерения (АПИ), локальных центров реагирования (ЛЦР), региональных центров реагирования (РЦР) и национального центра реагирования (НЦР). Связь между АПИ и ЛЦР осуществляется по радиоканалу.

АСРК функционирует в двух основных режимах – нормальном и аварийном.

В нормальном режиме автоматические пункты измерения и локальные центры реагирования постоянно производят циклический опрос всех датчиков. Интервал по умолчанию – 10 минут.

При превышении показаний допустимых значений, зафиксированных на одном или нескольких АПИ или ЛЦР, происходит инициированный сброс информации в сеть и перевод всей системы в аварийный режим работы.

Радиационный контроль – комплекс административных, организационных, технических и правовых мер, направленных на снижение вредного воздействия радиации на население и другие категории облучаемых лиц, минимизацию последствий облучения населения Республики Беларусь от загрязнения окружающей среды радиоактивными веществами в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС и выбросов АЭС сопредельных государств.

Радиационному контролю подлежат:

- радиационные характеристики источников излучения, выбросов в атмосферу, жидких и твердых радиоактивных отходов;
- радиационные факторы, создаваемые технологическим процессом и в окружающей среде;
- радиационные факторы на загрязненных территориях и в зданиях с повышенным уровнем природного облучения;
- уровни облучения персонала и населения от всех источников излучения, на которых распространяется действие нормативно-гигиенических документов.

Основными контролируемыми параметрами являются:

- годовая эффективная и эквивалентная дозы;
- поступление радионуклидов в организм и их содержание в организме для оценки годового поступления;
- объемная или удельная активность радионуклидов в воздухе, воде, продуктах питания, строительных материалах и др.;
- радиоактивное загрязнение кожных покровов, одежды, обуви, рабочих поверхностей;
- доза и мощность дозы внешнего излучения;
- плотность потока частиц и фотонов.

Для оперативного контроля всех параметров устанавливаются контрольные уровни.

При возникновении радиационной аварии:

- контроль за развитием аварии, защитой персонала осуществляется администрацией данной организации;
- контроль за облучением населения осуществляется местными органами власти и государственным надзором за радиационной безопасностью.

Радиационный контроль проводится на следующих территориях (зонах):

1. Зона А – территория, относящаяся к зонам радиоактивного загрязнения в результате аварии на Чернобыльской АЭС согласно Закону Республики Беларусь от 26 мая 2012 г. «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС». В зоне А радиационный контроль осуществляется в три этапа:

- 1) при производстве продукции;
- 2) при переработке продукции;
- 3) при реализации продукции.

2. Зона Б – территория вероятного радиационного воздействия выбросов АЭС сопредельных государств.

3. Зона В – остальная территория Республики Беларусь.

Контроль за радиоактивным загрязнением поверхностных вод и донных отложений ведется на 5 основных реках Беларуси – Днепр, Сож, Ипуть, Беседь, Припять.

Система контроля радиоактивного загрязнения в Республике Беларусь функционирует на республиканском, ведомственном и производственном уровнях согласно «Положению о системе контроля радиоактивного загрязнения» (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 4 мая 2015 г. № 372).

Кроме государственного, ведомственного и производственного контроля существует также *общественный контроль* радиоактивного загрязнения. Общественный контроль осуществляется в дополнение к государственному, ведомственному и производственному радиационному контролю. Независимые организации могут осуществлять общественный контроль продукции и объектов окружающей среды.

Функционирование системы контроля радиоактивного загрязнения *на республиканском уровне* в Республике Беларусь обеспечивают:

- Министерство по чрезвычайным ситуациям;
- Министерство здравоохранения;
- Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды;
- Государственный комитет по стандартизации.

Функционирование системы контроля радиоактивного загрязнения *на ведомственном уровне* в Республике Беларусь обеспечивают:

- Министерство сельского хозяйства и продовольствия;
- Министерство лесного хозяйства;
- Министерство жилищно-коммунального хозяйства;
- Министерство энергетики;
- Белорусский республиканский союз потребительских обществ;
- другие республиканские органы государственного управления, иные государственные организации, подчиненные Правительству Республики Беларусь, обеспечивающие контроль радиоактивного загрязнения.

Контроль радиоактивного загрязнения на ведомственном уровне осуществляется на основе правил контроля радиоактивного загрязнения.

Правила контроля радиоактивного загрязнения разрабатываются и утверждаются вышеуказанными республиканскими органами государственного управления, государственными организациями, подчиненными Правительству Республики Беларусь, в пределах их компетенции, установленной законодательством, по согласованию с Министерством здравоохранения и Министерством по чрезвычайным ситуациям.

Министерство сельского хозяйства и продовольствия:

– составляет планы радиационного обследования сельскохозяйственных земель земельных участков, находящихся в пользовании, аренде организаций, крестьянских (фермерских) хозяйств;

– обеспечивает контроль радиоактивного загрязнения:

а) почв сельскохозяйственных земель земельных участков, находящихся в пользовании, аренде организаций, крестьянских (фермерских) хозяйств, осуществляемый подразделениями радиационного контроля коммунальных унитарных предприятий и хозяйственных обществ, в уставных фондах которых акции (доли) принадлежат административно-территориальной единице или организации, имущество которой находится в собственности административно-территориальной единицы, осуществляющих деятельность по проведению почвенно-агробиохимических исследований;

б) сельскохозяйственной продукции, сырья, кормов, продуктов животного и растительного происхождения (далее – сельскохозяйственная продукция), производимых сельскохозяйственными организациями, крестьянскими (фермерскими) хозяйствами, осуществляемый подразделениями радиационного контроля коммунальных унитарных предприятий и хозяйственных обществ, в уставных фондах которых акции (доли) принадлежат административно-территориальной единице или организации, имущество которой находится в собственности административно-территориальной единицы, осуществляющих деятельность по проведению почвенно-агробиохимических исследований, и организаций, включенных в государственную ветеринарную службу;

в) сельскохозяйственной продукции, производимой сельскохозяйственными организациями, крестьянскими (фермерскими) хозяйствами, осуществляемый подразделениями радиационного контроля организаций, осуществляющих производство, заготовку, хранение и переработку в целях реализации сельскохозяйственной продукции, и обеспечиваемый этими организациями;

г) продуктов животного и растительного происхождения на рынках, осуществляемый подразделениями радиационного контроля организаций, включенных в государственную ветеринарную службу.

Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь обеспечивает контроль радиоактивного загрязнения лесного фонда, лесной продукции.

Министерство жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь обеспечивает контроль радиоактивного загрязнения питьевой воды и объектов жилищно-коммунального хозяйства.

Министерство энергетики Республики Беларусь обеспечивает контроль радиоактивного загрязнения местных видов топлива, используемых организациями, входящими в его систему, а также образующихся от них зольных отходов.

Белорусский республиканский союз потребительских обществ обеспечивает контроль радиоактивного загрязнения сырья, заготавливаемого подчиненными перерабатывающими организациями, и их продукции.

Функционирование системы контроля радиоактивного загрязнения на

производственном уровне в нашей стране обеспечивается организациями и индивидуальными предпринимателями, осуществляющими деятельность, связанную с контролем радиоактивного загрязнения в связи с катастрофой на Чернобыльской АЭС.

2.3.3. Общая схема миграции радионуклидов в биосфере

Пути миграции радионуклидов в биосфере отличаются многообразием и большой сложностью.

Искусственные радионуклиды, образовавшиеся при испытании ядерного оружия и авариях на атомных электростанциях, попадают в атмосферу, из которой в виде «мокрых» и «сухих» выпадений в составе аэрозолей и частиц поступают на поверхность почвы, водных систем и растительности (рис. 2.11).

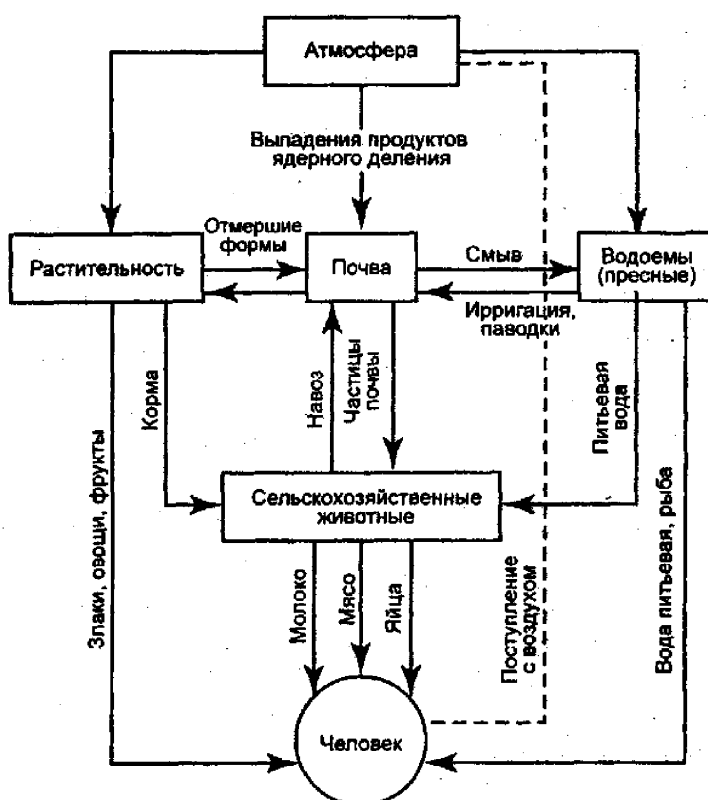


Рисунок 2.11. Схема миграции радионуклидов по биологическим цепям

Радионуклиды, осевшие на поверхность почвы, включаются в миграционные процессы, такие как вертикальная и горизонтальная миграция радионуклидов.

Вертикальная миграция – это совокупность процессов, вызывающих перераспределение радионуклидов вглубь по профилю почвы.

Перемещение радионуклидов по профилю почвы изменяет их распределение в корнеобитаемом слое, приводит к снижению уровня радиации над поверхностью почвы, приводит к уменьшению интенсивности выдувания и вымывания радионуклидов, создает возможность загрязнения грунтовых вод радионуклидами.

Интенсивность вертикальной миграции зависит от свойств почвы, от свойств радионуклидов, от вида биоценоза и других факторов.

Горизонтальная миграция – это перераспределение радионуклидов по поверхности почвы в горизонтальном направлении.

Она обусловлена действием двух природных процессов – ветровой и водной эрозией почвы.

Под *ветровой эрозией* понимают ветровой перенос радионуклидов.

Величина ветровой миграции зависит от ряда факторов, таких как скорость ветра, погодные-климатические условия, свойства радиоактивных выпадений, дисперсность частиц и прочность фиксации их на растительном покрове, свойства почвы, характер подстилающей поверхности, особенности рельефа и ландшафта, структура посевов, система обработки почвы и др.

Основное количество радионуклидов (до 85%) перемещается в приземном слое с мелкой фракцией почвы.

Водная эрозия почвы осуществляется в результате стока поверхностных вод в водные системы и бессточное понижение. Водная миграция радионуклидов осуществляется со стоком вод во время осадков, паводков, разливов рек, сезонного таяния снега, а также с грунтовыми водами.

Миграция растворенных радионуклидов называется жидким стоком.

Известно, что в растениях может накапливаться, не повреждая их и не снижая урожайность, такое количество радионуклидов, при котором растениеводческая продукция становится непригодной для использования.

Радионуклиды в растения могут поступать через вегетативные органы – *аэральным путем* поступления и через корневую систему – *корневой путем* поступления.

Аэральное поступление наиболее значимое при радиоактивном загрязнении воздушной среды сразу после радиационного инцидента.

При попадании радионуклидов в почву преобладает корневой путь поступления.

Для оценки поступления радионуклидов из почвы в растения наиболее часто используются коэффициенты перехода (Кп), а также коэффициенты накопления или коэффициенты концентрации (Кн).

Коэффициент перехода – это отношение содержания радионуклида в растительной массе к поверхностной активности почвы.

Коэффициент накопления – отношение содержания радионуклида в растительной массе к содержанию радионуклида в почве.

Коэффициент накопления различными культурами Sr-90 изменяется от 0,02 до 12, Cs-137 – от 0,02 до 1,1.

Среди миграционных цепей наиболее значима цепь: почва–растение–животное. В звеньях этой цепи можно регулировать поступление радионуклидов. Например, в цепи почва–растение это осуществляется внесением минеральных удобрений, а в цепи растение–животное – путем подбора кормов рациона и введения в рацион сорбентов радионуклидов.

Пути поступления радионуклидов в организм человека различны. В целом пути поступления радионуклидов в организм человека можно представить в виде общих схем (биологических цепочек):

- 1) почва → растения → человек;
- 2) почва → растения → животные → человек.

В связи с аварией на Чернобыльской АЭС остро встала проблема снижения внутреннего облучения населения вследствие употребления загрязненных радионуклидами продуктов питания растительного и животного происхождения.

Первоначальным звеном в получении сырья для производства продуктов питания и кормов для животных является почва.

Снижение поступления радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию и организм человека достигается проведением мероприятий в каждом звене этих биологических цепочек.

В звене «почва → растения» основные мероприятия по снижению поступления радионуклидов в растениеводческую продукцию, согласно Рекомендациям по ведению сельскохозяйственного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь, включают:

- оптимизацию агрохимических свойств почвы;
- подбор культур, в наименьшей степени накапливающих радионуклиды.

В звене «растения → человек» снижение поступления радионуклидов в организм человека обеспечивают:

- радиационный контроль растениеводческой продукции согласно РДУ;
- употребление в пищу продуктов тех культур, которые способны меньше накапливать радионуклиды;
- употребление в пищу растительных продуктов с высоким содержанием природных антиоксидантов, пектина, витаминов, грубых волокон;
- обязательный радиационный контроль дикорастущих грибов;
- правильная первичная подготовка продуктов к употреблению (тщательное мытье овощей и фруктов, домашняя переработка);
- промышленная переработка растениеводческой продукции (производство спирта из зерна с повышенным содержанием радионуклидов, изготовление хлебобулочной продукции с содержанием антиоксидантов и радиопротекторов и др.).

В звене «растения → животные» снижение поступления радионуклидов в организм животного и животноводческую продукцию снижают:

- использование кормов, соответствующих РДУ по содержанию цезия-137 и стронция-90 в сельскохозяйственном сырье и кормах для разных видов животных и целевого использования. Самые «чистые» корма используют молочному скоту, самые «грязные» – скоту на откорме и рабочему скоту;
- возделывание кормовых культур на почвах с ограничительными плотностями загрязнения радионуклидами цезия-137 и стронция-90 для производства цельного молока (Рекомендации по ведению сельскохозяйственного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь).

В звене «животные → человек» снижение поступления радионуклидов в организм включает следующие мероприятия:

- режим кормления животных (откорм животных на «чистых» кормах за 2–3 месяца перед убоем) для получения продукции, соответствующей РДУ;
- введение в рационы минеральных добавок и микроэлементов, повышающих привесы животных и снижающих удельную активность продукции (эффект «биологического разбавления»);
- введение животным ферроцинсодержащих препаратов, связывающих радионуклиды в животном организме (калий-железо гексацианоферрат ($KFe[Fe(CN)_6]$));
- радиационный контроль продуктов с рынка. Рекомендуется меньше употреблять костистого мяса, конечностей (голенки, ножки для холодца);
- выбор мясных продуктов с наименьшим накоплением радионуклидов (по степени накопления: говядина, баранина > свинина > птица);
- первичная подготовка животноводческой продукции (вымачивание в подсоленной воде, удаление отвара после 5–10 минут кипячения). При варке содержание радионуклидов снижается в 3–6 раз;
- переработка продукции: засолка мяса со сменой рассола снижает содержание радионуклидов в 3–10 раз, переработка молока в творог – в 4–6 раз, переработка на масло – в 8–10 раз, перетопка сала и масла – снижение в 90–100 раз;
- промышленная переработка молока и мясного сырья; специальная очистка молока.

2.4. Агропромышленное производство в условиях радиоактивного загрязнения

2.4.1. Классификация защитных мероприятий

В Беларуси радиоактивному загрязнению цезием-137 с плотностью выше 37 кБк/м² (1 Ки/км²) подверглось более 1,8 млн. га сельскохозяйственных угодий (около 20% их общей площади). Масштабы катастрофы потребовали принятия ряда чрезвычайных мер. Вследствие высокой плотности загрязнения радионуклидами из хозяйственного оборота были исключены 265,4 тыс. га сельскохозяйственных угодий. Ликвидировано 53 колхоза и совхоза. По расчетам, выполненным Институтом экономики Национальной академии наук Беларуси, ежегодный ущерб от выбытия сельхозугодий из оборота в ценах 1998 г. составляет 717,5 млн. долларов США. Ежегодный недобор продукции равен 641,1 тыс. т кормовых единиц, 256,4 тыс. т молока, по 24 тыс. т мяса крупного рогатого скота и свинины в живом весе.

За послеаварийный период было выведено из оборота 265 тыс. га сельскохозяйственных угодий, на которых невозможно получать нормативно-чистую продукцию.

Хозяйственная деятельность на загрязненных территориях регламентируется следующими законами Республики Беларусь: Закон Республики Беларусь от 26 мая 2012 года № 385-З «О правовом режиме территорий, подверг-

шихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС»; Закон Республики Беларусь от 5 января 1998 года «О радиационной безопасности населения»; Закон Республики Беларусь от 6 января 2009 года № 9-З «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий»; Закон Республики Беларусь от 23 ноября 1993 года «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» в редакции Закона Республики Беларусь от 28 декабря 2009 года.

Согласно этим законам, в сельскохозяйственном обороте могут находиться земли с плотностью загрязнения Cs-137 до 1480 кБк/м² (40 Ки/км²) и Sr-90 – до 111 кБк/м² (3 Ки/км²). Территории с превышением этих уровней подлежат выводу из оборота.

Главной задачей сельскохозяйственного производства на загрязненных радионуклидами землях является получение сельскохозяйственной продукции с допустимым содержанием радионуклидов.

Специализированными институтами Национальной академии наук Беларуси на основании проведенных научных исследований и оценки результатов работы хозяйств в условиях радиоактивного загрязнения разработан комплекс специальных защитных мероприятий (контрмеры) дополнительно к традиционно сложившимся технологиям для обеспечения производства нормативно чистой продукции, которые нашли отражение в «Рекомендациях по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь». Указанные рекомендации в месте с Законами Республики Беларусь» и «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС» регламентируют порядок ведения сельскохозяйственного производства на загрязненных радионуклидами сельскохозяйственных угодьях и являются основой для производства продуктов питания с содержанием радионуклидов в пределах Республиканских допустимых уровней содержания радионуклидов в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99), Республиканских допустимых уровней содержания цезия-137 и стронция-90 в сельскохозяйственном сырье и обеспечения радиационной безопасности работающих, Технического регламента Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011).

В связи с тем, что в настоящее время основным источником радионуклидов является почва, защитные мероприятия в первую очередь направлены на предотвращение их поступления в растения.

Контрмеры подразделяются на следующие группы: организационные, агротехнические, агрохимические, зооветеринарные, технологические, санитарно-гигиенические, информационные.

Организационные мероприятия предусматривают:

- обследование и инвентаризация земель по плотности радиоактивного загрязнения и их картирование;
- прогноз содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции;
- исключение земель из сельскохозяйственного пользования;
- изменение отраслевой специализации хозяйств;

- оптимизация землепользования, структуры посевов и севооборотов на основе подбора сельскохозяйственных культур;
- организация радиационного контроля продукции;
- оценка эффективности защитных мероприятий.

Агротехнические приемы предусматривают:

- коренное и поверхностное улучшение сенокосов и пастбищ;
- гидромелиорация (осушение и оптимизация водного режима);
- противоэрозионные мероприятия для предотвращения вторичного загрязнения.

Агрохимические мероприятия предусматривают оптимизацию физико-химического режима почв посредством:

- известкование кислых почв;
- внесение органических удобрений;
- внесение повышенных доз фосфорных и калийных удобрений;
- оптимизация азотного питания растений;
- применений микроудобрений;
- использование средств защиты растений.

Технологические приемы включают:

- первичная промывка и очистка продукции;
- предварительная технологическая обработка продукции;
- глубокая технологическая переработка продукции.

Зооветеринарные мероприятия включают:

- специальная система кормления животных;
- двухстадийный откорм животных перед отправкой на мясокомбинат;
- применение сорбирующих препаратов;
- отдельный выпас скота для производства молока цельного и молока-сырья.

Санитарно-гигиенические мероприятия предусматривают:

- соблюдение необходимых санитарно-гигиенических и других требований, установленных действующим в республике законодательством;
- обеспечение дополнительным комплектом спецодежды.

Информационные контрмеры включают:

- информирование населения, заинтересованных министерств и ведомств о результатах радиационного контроля и эффективности проводимых защитных мероприятий;

– информирование работников и населения о новых эффективных мерах, снижающих переход радионуклидов в возделываемые культуры и готовую продукцию;

- научные исследования;
- подготовка и повышение квалификации специалистов сельского хозяйства.

Вся растениеводческая и животноводческая продукция, произведенная на загрязненных радионуклидами землях и используемая для продовольственных целей, переработки и реализации на внутреннем и внешнем рынках, должна соответствовать требованиям нормативов, установленным тех-

ническими регламентами и международными договорами. В Республике Беларусь в отношении сельскохозяйственной продукции действуют следующие нормативы содержания радионуклидов:

– ГН 10-117-99 «Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99);

– Республиканские допустимые уровни содержания цезия-137 и стронция-90 в сельскохозяйственном сырье и кормах (РДУ);

– Ветеринарно-санитарные правила обеспечения безопасности кормов, кормовых добавок и сырья для производства комбикормов.

– Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011).

2.4.2. Мероприятия по уменьшению содержания радионуклидов в продукции растениеводства

Инвентаризация сельскохозяйственных угодий по плотности загрязнения радионуклидами. Радиологическое обследование сельхозугодий проводится специалистами областных проектно-изыскательских станций химизации сельского хозяйства (ОПИСХ) в соответствии с методическими указаниями «Крупномасштабное агрохимическое и радиологическое обследование почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь».

При проведении очередного тура исследования почв почвовед отбирает с каждого элементарного участка пробы для выполнения агрохимических анализов и для определения в них содержания цезия-137 и стронция-90.

Прогноз содержания радионуклидов в урожае. Прогноз – это предварительный расчет содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в будущем урожае.

Прогноз удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в сельскохозяйственной продукции строится на основе следующей исходной информации:

– средняя плотность загрязнения элементарных участков сельскохозяйственных земель ^{137}Cs и ^{90}Sr (Ки/км²) по данным последнего тура радиологического обследования сельскохозяйственных земель;

– тип почвы и ее гранулометрический состав, величина обменной кислотности и содержание подвижного калия по данным последнего тура агрохимического обследования сельскохозяйственных земель;

– коэффициенты перехода Кп (Бк/кг : кБк/м²) радионуклидов в основную и побочную продукцию сельскохозяйственных культур;

– перечень сельскохозяйственных культур для возделывания на продовольственные, технические цели, на переработку, сырье, корма;

Нормативные значения коэффициентов перехода приведены в приложениях Рекомендаций по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь.

Ограничения по плотности загрязнения почв при возделывании различных сельскохозяйственных культур. Предельно допустимая плотность за-

грязнения почв, при которой полученный урожай будет соответствовать Республиканским допустимым уровням, определяется путем деления нормативной предельно допустимой величины загрязнения продукции на коэффициент перехода при соответствующем уровне плодородия почв.

Система обработки почв в условиях радиоактивного загрязнения.

Основным фактором выбора системы основной обработки почвы в условиях радиоактивного загрязнения является характер и глубина распределения радионуклидов в профиле почвенного горизонта. При этом необходимо учитывать степень гидроморфности почвы, поскольку на почвах различного увлажнения используются различные системы обработки.

Традиционная отвальная система обработки почвы совершенствуется в направлении максимально возможного совмещения операций основной и дополнительных обработок, а также применения новых высокопроизводительных машин, особенно на землях со средне- и тяжелосуглинистыми почвами.

При высокой плотности радиоактивного загрязнения почвы (цезием-137 – 15–40 Ки/км², стронцием-90 – 1–3 Ки/км²) рекомендуется комбинированная система обработки почвы, включающая чередование минимальных обработок с ярусной отвальной вспашкой 1–2 раза в севообороте под пропашные культуры при одновременной заделке органических удобрений и сидератов. Глубина ярусной вспашки не должна превышать мощности пахотного слоя.

При загрязнении верхней части обрабатываемого слоя почвы (5–7 см), что характерно для естественных луговых земель, независимо от степени увлажнения рекомендуется вспашка с полным оборотом пласта (на 180°) и сбрасывание загрязненного слоя почвы на дно борозды. Глубина обработки – 20–25 см и более в зависимости от мощности пахотного слоя без выноса на поверхность малоплодородного (иллювиального) подпахотного горизонта почвы.

При загрязнении нижней части обрабатываемого слоя (в пределах 30±5 см) в условиях достаточного увлажнения рекомендуется проводить гладкую вспашку без припашки загрязненного слоя (с использованием фронтальных и оборотных плугов), а в засушливых условиях – безотвальную (чизельную, плоскорезную) обработку на глубину загрязнения или глубже. В данных условиях система основной обработки почвы должна быть направлена на предотвращение вторичного загрязнения почвы ранее глубоко запаханном загрязненным ее слоем.

При загрязнении всего пахотного слоя (0–25 см) на дерново-подзолистых супесчаных автоморфных и глееватых почвах высокой степени окультуренности возможно применение, как отвальной системы основной обработки, так и безотвальной (чизельной, дисковой) и минимальной систем. При этом обеспечивается получение сельскохозяйственной продукции, соответствующей требованиям РДУ-99.

Подбор культур и сортов. Подбор культур в зависимости от величины перехода радионуклидов в урожай является эффективным и широкодоступным приемом получения растениеводческой и животноводческой продукции в пределах допустимых республиканских уровней.

По величине накопления радионуклидов на единицу сухого вещества, при одинаковой плотности загрязнения почв, сельскохозяйственные культуры ранжированы в порядке убывания содержания радионуклидов в продукции.

Убывающий ряд культур по накоплению ^{137}Cs :

– в зерне: люпин > горох > вика > рапс > овес > просо > ячмень > пшеница > озимая рожь;

– в соломе: овес > ячмень > яровая пшеница > озимая пшеница > озимая рожь;

– в зеленой массе, клубнеплодах, клубнях: многолетние злаковые травы > люпин > рапс > многолетние бобово-злаковые смеси > клевер > горох > горохо-овсяная смесь > вико-овсяная смесь > кукуруза > картофель > кормовая свекла;

– в сене многолетних злаковых трав: костер безостый > тимофеевка > мятлик луговой > ежа сборная > овсяница > райграс пастбищный;

– в естественных ценозах: осоковые > осоково-злаковые > злаковые.

Убывающий ряд культур по накоплению ^{90}Sr :

– в зерне: яровой рапс > люпин > горох > вика > ячмень > яровая пшеница > овес > озимая пшеница > озимая рожь;

– в соломе: ячмень > яровая пшеница > озимая пшеница > овес > озимая рожь;

– в зеленой массе, клубнеплодах и клубнях: клевер > люпин > горох > многолетние злаковые травы на пойменных землях > многолетние злаково-бобовые смеси > вика > рапс яровой > горохо-овсяные смеси > вико-овсяные смеси > травы естественных сенокосов > кукуруза > кормовая свекла > картофель;

– в травах: разнотравье > осоки > мятлик луговой > ежа сборная.

За счет подбора сортов сельскохозяйственных культур также можно снизить поступление радионуклидов в растения в 2–3 раза.

Применение удобрений:

– применение органических удобрений уменьшает переход радионуклидов из почвы в растения до 30%. Систематическое применение органических удобрений приводит к повышению содержания гумуса, существенному улучшению агрохимических свойств почв, стабилизации высокой урожайности и качества продукции сельскохозяйственных культур.

– внесение калийных удобрений. Калий (K) и цезий (Cs) являются антагонистами, поэтому вместо радиоактивного цезия в растения поступает калий;

– известкование почв (внесение мела, доломитовой муки, содержащих кальций). Кальций (Ca) и стронций (Sr) – антагонисты, при известковании вместо радиоактивного стронция в растения поступает кальций;

– установлено снижение поступления радионуклидов из почвы в растительную продукцию при внесении фосфорных удобрений, особенно на почвах с низким содержанием фосфатов. Фосфорные удобрения не только спо-

способствуют повышению урожая возделываемых культур, но и закреплению стронция-90 за счет осаждения его фосфатами;

– ограничение доз азотных удобрений, т.к. высокие дозы N-удобрений способствуют поступлению радионуклидов в растения;

– применение микроэлементов (Cu, Zn, Mn, B, Se, Co) – повышают урожайность и качество продукции;

Особенности применения средств защиты в условиях радиоактивного загрязнения. Выбор средств химической защиты растений под посевы корнеплодов и овощей открытого грунта на землях с плотностью загрязнения цезием-137 – 5 Ки/км² или стронцием-90 – 0,5 Ки/км² и более осуществляется на основе ассортимента и регламентов применения, приведенных в Государственном реестре средств защиты растений (пестицидов) и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь. При формировании ассортимента рекомендованных для применения средств защиты должны быть учтены санитарно-гигиенические и экологические характеристики препаратов (острая токсичность, кумулятивные свойства, персистентность в объектах окружающей среды). Жесткие требования предъявляются к соблюдению норм расхода, срокам и кратности применения гербицидов (особенно почвенного действия). Целесообразно совмещение технологических операций по защите растений с целью сокращения времени пребывания работников в условиях повышенного радиационного фона и стоимости работ.

Технологические приемы обработки растениеводческой продукции, направленные на снижение содержания в ней радионуклидов.

Технологическая и кулинарная обработка продукции растениеводства позволяет в значительной степени сократить поступление цезия-137 и стронция-90 в организм человека. Выделяют три категории приемов обработки растительного сырья:

– очистка поверхности путем мытья, споласкивания;

– избирательное удаление наиболее загрязненных частей продукта, например, снятие кожуры, удаление листьев;

– глубокая переработка такими методами, как вымачивание, маринование, варка (при консервировании, засолке, варке радионуклиды переходят в маринад или воду при варке).

Различные способы приготовления пищи могут приводить как к снижению, так и концентрированию радионуклидов в готовых к употреблению продуктах. Обезвоживание продуктов в результате сушки, вяления, вымораживания приводит к увеличению их удельной активности.

Механическая обработка. Несложные процедуры, такие, как тщательная мойка овощей, фруктов, грибов, а также снятие кожуры позволяют снизить содержание в них радионуклидов в 1,3–1,5 раза. Из свежих и сушеных грибов основная часть активности стронция-90 и цезия-137 (до 80%) удаляется путем вымачивания.

Термическая обработка продуктов без добавления воды (жарка), или если она добавляется в небольшом количестве (тушение), снижает содержа-

ние радионуклидов в готовом продукте на 15–20% от исходного уровня. При варке в бульон переходит довольно большое количество радионуклидов, особенно цезия. Предварительное бланширование в течение 10 минут мелко нарезанных овощей дает возможность уменьшить их загрязнение радионуклидами в 2–3 раза.

Засолка, маринование. При засолке огурцов, капусты, грибов и т.д. в рассол переходит примерно половина радионуклидов, находящихся в перерабатываемом исходном сырье. Несколько меньший эффект наблюдается при изготовлении консервированных овощей и маринадов – снижение содержания цезия-137 составляет в среднем до 1,2 раза.

Переработка растительного сырья. Помол зерна пшеницы, ржи, ячменя в белую муку уменьшает содержание радионуклидов в конечном продукте в 2 раза, овса – в 3 раза. Переработка рапса на масло-сырец в промышленном масштабе позволяет уменьшить содержание цезия-137 в конечном продукте масле-сырце до 250 раз, стронция-90 – до 600 раз, а переработка зерновых на спирт практически исключает содержание радионуклидов в конечном продукте.

Очистка картофеля от кожуры снижает концентрацию цезия-137 и стронция-90 в очищенных клубнях на 20%, а переработка его в крахмал уменьшает содержание радионуклидов в готовом продукте до 2%.

Максимальная очистка от радионуклидов готовой продукции достигается при глубокой технологической переработке.

Эффективность очистки оценивается *коэффициентом очистки (КО)* – это отношение содержания радионуклидов в исходном сырье к содержанию радионуклида в конечном продукте. Он показывает, во сколько раз конечный продукт чище, чем исходное сырье.

Установлено, что при некоторых технологических процессах переработки, сопровождающихся разделением продукции на несколько компонентов, большая часть радионуклидов концентрируется в каком-либо одном компоненте. Этим компонентом нередко оказывается не основной, а побочный продукт переработки. Уместно напомнить, что радионуклиды попадают в растения и далее в организм животных и человека преимущественно в виде растворенных в воде солей. Поэтому концентрируются радионуклиды, в основном, в компонентах, содержащих воду. Если же они сосредоточены в других компонентах, то при переработке продукции также переходят в воду. Следовательно, любая технологическая переработка, предусматривающая отделение воды путем отжима, фильтрования, центрифугирования и других способов, кроме высушивания, будет приводить к дезактивации продукта. Высокая степень очистки продукции достигается при переработке картофеля и зерна на крахмал и спирт, масличных культур – на масло, сахарной свеклы – на сахар.

Особенности использования сенокосно-пастбищных угодий. Производство травяных кормов для поголовья крупного рогатого скота на окультуренных высокопродуктивных сенокосах и пастбищах является одним из основных условий получения нормативно чистой животноводческой продукции.

Переход радионуклидов в травы кормовых угодий определяется:

- плотностью загрязнения почв радионуклидами;
- гранулометрическим составом почв;
- уровнем обеспеченности почв элементами питания и кислотностью;
- степенью их увлажнения;
- дозами вносимых удобрений.

Принципы кормопроизводства на загрязненных радионуклидами землях:

- равномерное и бесперебойное обеспечение животных биологически полноценными и нормативно чистыми по содержанию радионуклидов кормами в соответствии с их физиологическими потребностями;
- максимальный выход питательных веществ с единицы кормовой площади;
- наиболее оптимальное сочетание полевого и лугового кормопроизводства с учетом плотности загрязнения почв радионуклидами;
- рациональное кормление разных видов и групп скота, позволяющее получать высокий уровень продуктивности с наименьшими затратами питательных веществ на единицу продукции;
- оптимизация структуры посевов.

2.4.3. Мероприятия по уменьшению содержания радионуклидов в продукции животноводства

Основной задачей животноводства на сельскохозяйственных землях, загрязненных радионуклидами, является получение продукции, соответствующей требованиям республиканских допустимых уровней. В системе мероприятий по снижению концентрации радионуклидов в продукции животноводства применяются следующие приемы:

- производство кормов с допустимым содержанием радионуклидов;
- изменение условий содержания и рационов кормления крупного рогатого скота, использование наименее загрязненных кормов на заключительной стадии откорма;
- введение в рацион специальных добавок, снижающих переход радионуклидов в продукты животноводства;
- технологическая переработка продуктов животноводства;
- репрофилирование отраслей животноводства (замена молочного скотоводства на мясное или скотоводства на свиноводство, птицеводство).

Производство кормов с допустимым содержанием радионуклидов. Известно, что более 90 % радионуклидов поступает в организм животных с кормами, поэтому качеству кормов уделяется особое внимание. Чтобы уменьшить содержание радионуклидов в кормах проводят поверхностное и коренное улучшение пастбищ и сенокосов.

Для получения гарантированно чистых молока и мяса устанавливаются пределы допустимого содержания (ПДС) Cs-137 и Sr-90 в суточном рационе животных и предельно-допустимые уровни (ПДУ) радиоактивного загрязнения различных кормов.

ПДС радионуклидов в рационе определяется из соотношения:

$$ПДС = \frac{РДУ \cdot 100}{K_n},$$

где РДУ – Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде, Бк/кг; K_n – коэффициент перехода радионуклида из рациона в 1 л (1кг) продукта, % суточного поступления.

При загрязнении отдельных видов кормов, превышающем предельно допустимый уровень, нормирование радионуклидов в рационе производится за счет увеличения доли более чистых кормов.

Для получения молока, соответствующего нормативам, рекомендуется использовать улучшенные и культурные пастбища и сенокосы, а также скармливать скоту при стойловом содержании скошенную зеленую массу и не выпасать скот на пастбищах со слабой дерниной и низким (менее 10 см) травостоем. При стойловом содержании рекомендуют включать в рацион сено с культурных сенокосов, силос сеяных трав и кукурузы, кормовую свеклу и концентраты.

Прогноз содержания радионуклидов в продуктах животноводства производится по формуле:

$$A_{\text{ПРОД.}} = \frac{A_{\text{РАЦ.}} \cdot K_n}{100},$$

где $A_{\text{ПРОД.}}$ – активность продукта (Бк/кг); $A_{\text{РАЦ.}}$ – активность суточного рациона (Бк/сут).

Условия содержания и рацион кормления крупного рогатого скота. Выращивание и начальный откорм молодняка проводится без ограничений по обычным рационам. Если радиоактивное загрязнение кормов превышает допустимые уровни и не позволяет нормировать суточный рацион на уровне ПДС, тогда выращивание и откорм скота проводится в два этапа. На первом этапе – кормление животных проводят по принятой в хозяйстве технологии без ограничений. В последние два месяца откорма используют рационы, в которых содержание Cs-137 не превышает ПДС, включающие кукурузный силос, сенаж из однолетних трав, корнеплоды, барду. Контроль рациона по содержанию Sr-90 не проводят, потому что переход Sr-90 в мышечную ткань не превышает 0,04 %, в то время как переход Cs-137 в 100 раз больше и составляет 4%.

Введение в рацион специальных добавок, снижающих переход радионуклидов в продукты животноводства. К числу эффективных контрмер по снижению перехода радионуклидов в продукты животноводства относится применение различного рода препаратов химического и природного происхождения. Для снижения поступления цезия-137 в нашей республике широко используются ферроцинсодержащие препараты (с ферроцином $KFe[Fe(CN)_6]$). Применение ферроцина в мясном скотоводстве в виде болюсов, солебрикетов или добавок к комбикорму позволяет получать «чистое» мясо практически во всех хозяйствах Беларуси. Препарат используется также для снижения поступления радиоцезия в молоко. Использование ферроцинсодержащих

препаратов позволяет при различных уровнях загрязнения продуктов животноводства снизить содержание цезия-137 в мясе и молоке, соответственно, в 4,5-6,6 и 5,0-12,0 раз.

Цезий связывается ферроцианидом в 1000 раз больше, чем калий. Ферроцианиды являются самым эффективным сорбентом радиоцезия.

Для снижения поступления Sr-90 в рационе повышают содержание усвояемого кальция, при этом не должно нарушаться его соотношение с фосфором.

В первые недели после радиоактивного выброса введение йодистого калия в рацион способствовало уменьшению содержания радиоактивного йода-131 в молоке на 50%.

Снижение содержания радионуклидов в молоке и мясе отмечается при насыщении рациона минеральными веществами и особенно кальцием и калием, а также микроэлементами, белково-витаминными препаратами.

Переработка продукции животноводства. Технологическая и кулинарная обработка продукции животноводства позволяет в значительной степени сократить поступление радионуклидов в организм человека.

Установлено, что радиоцезий равномерно распределяется в мягких тканях, одинаково загрязняя мышцы, печень и почки. Уровень загрязнения костей цезием-137 намного ниже, чем мягких тканей. Наименьшая концентрация радиоцезия наблюдается в сале и жире. Концентрация радиоцезия в мясе молодняка обычно выше, чем у взрослых животных. Как правило, концентрация радионуклидов меньше в свинине, чем в говядине или мясе птицы и диких животных.

Выделяют три категории приемов обработки пищевого сырья:

- очистка поверхности путем мытья, споласкивания;
- избирательное удаление наиболее загрязненных частей продукта, например, удаление костей;
- глубокая переработка такими методами, как вымачивание, засаливание, варка, изготовление творога и сыра.

Различные способы приготовления пищи могут приводить как к снижению, так и концентрированию радионуклидов в готовых к употреблению продуктах. Обезвоживание продуктов в результате сушки, вяления, вымораживания приводит к увеличению их удельной активности.

Механическая обработка. Несложные процедуры позволяют снизить содержание в них радионуклидов в 1,3–1,5 раза. Предварительное вымачивание мелко нарезанного мяса в воде или в 4%-ном растворе поваренной соли в течение 3 часов обеспечивает удаление из него 30–60% цезия-137. Для снижения потерь белка и улучшения вкусовых качеств при вымачивании мяса к солевому раствору можно добавлять уксусную кислоту (3–5 миллилитров 70% эссенции на 1 л раствора).

Термическая обработка пищевых продуктов. Термическая обработка пищевых продуктов без добавления воды (жарка), или если она добавляется в небольшом количестве (тушение), снижает содержание радионуклидов в готовом продукте на 15–20% от исходного уровня. При варке в бульон перехо-

дит довольно большое количество радионуклидов, особенно цезия.

Для снижения концентрации радионуклидов в мясе рекомендуется производить выварку (с добавлением поваренной соли) и удаление бульона из рациона человека. Так, при варке мяса (говядина, куры) в бульон переходит около 50% стронция-90 и до 80% цезия-137.

Выход цезия-137 в бульон из костей составляет до 75% от первоначального содержания. При этом максимальная интенсивность выхода радионуклидов в бульон наблюдается в первые 10 минут варки. Удаление радионуклидов с бульоном из мяса взрослых животных происходит эффективнее, чем из мяса молодняка.

В отличие от цезия-137, стронций-90 прочно удерживается в костной ткани, и практически не удаляется с бульоном. Переход стронция-90 и цезия-137 из костей в бульон составляет 0,001–0,18% и 65–80%, соответственно.

При обжаривании мяса говядины, свинины, баранины, крольчатины снижение содержания цезия-137 составляет 20–30%. Жировые продукты могут содержать допустимые количества радионуклидов даже при очень высоких уровнях загрязнения мяса животных. Концентрация цезия-137 в жировой ткани в 4–10 раз ниже, чем в мышечной ткани. Перетапливание сала позволяет снизить концентрацию радионуклида еще в 20 раз.

Засолка. Уровень радиоактивного загрязнения мяса может быть значительно снижен путем засолки его в рассоле. Наибольший эффект достигается при предварительной нарезке мяса на куски и последующем посоле при многократной смене рассола. При этом цезий-137 переходит в рассол, а эффективность извлечения радионуклидов возрастает с увеличением длительности вымачивания.

Уменьшить концентрацию радионуклидов в мясе можно длительным хранением его в виде солонины. После предварительного вымачивания мяса в воде и последующего выдерживания в 25%-ном рассоле (3 месяца) сваренное мясо загрязнено цезием-137 примерно в 10 раз ниже по сравнению с исходным уровнем. Маринование мяса дичи для улучшения его вкусовых качеств также способствует снижению содержания стронция-90 в 1,9 раза.

Переработка животноводческой продукции. Замена в пищевом рационе молока с повышенным содержанием радионуклидов, полученными из него продуктами, позволяет более чем в 10 раз снизить поступление радионуклидов в рацион человека. Переработка цельного молока в сливки, сметану, творог домашним способом снижает содержание радионуклидов в этих продуктах в 4–6 раз, а переработка такого молока на сыр (сычужный) и сливочное масло – в 8–10 раз.

При сепарировании молока около 85% радионуклидов переходит в обезжиренное молоко, в 20%-ных сливках находится только ~15% радионуклидов. В ходе дальнейшей переработки сливок для получения сливочного масла большая часть стронция-90 и цезия-137 удаляется в сыворотку и пахту, а в масле обнаруживается соответственно 1,3 и 2,3% радионуклидов, находившихся в исходном загрязненном молоке. Топленое масло после перетопки

сливочного масла практически не содержит радионуклидов.

В сыре, полученном из молочной сыворотки, остается от 74 до 96% радионуклидов. В кислом сыре содержится до 12%, а в сычужном – 4–23% радионуклидов от содержания их в цельном молоке. По способности переходить из молока в творог при кислотном способе свертывания радионуклиды образуют ряд: цезий-137 > стронций-90. После промывки кислотного сгустка происходит эффективное вымывание из него цезия-137, тогда как стронций-90 остается в сгустке.

В яйцах радионуклиды концентрируются в основном в скорлупе, меньше всего их в желтке. Поэтому лучше употреблять яйца в пищу в виде яичниц, омлетов, в кондитерских изделиях.

Перепрофилирование отраслей животноводства. В хозяйствах, расположенных на почвах с плотностью загрязнения Cs-137 15–40 Ки/км², где невозможно получение молока, содержание радионуклидов в котором не превышает установленных пределов, целесообразна переспециализация молочного скотоводства на мясное с разведением скота симментальской породы или переспециализация скотоводства на свиноводство или птицеводство.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое радиоактивность?
2. Дайте определение периоду полураспада. Какие периоды полураспада у цезия-137, стронция-90, плутония-239, йода-131?
3. Что подразумевается под термином активность? Назовите виды активностей и их единицы измерения.
4. Какие виды радиоактивного распада существуют? Охарактеризуйте альфа-, бета-, гамма-излучения. Приведите схемы распада цезия-137, стронция-90, плутония-239, йода-131.
5. Какие основные свойства ядерных излучений вы знаете?
6. Как взаимодействуют ионизирующие излучения с веществом?
7. Что такое доза облучения, мощность дозы? Назовите основные дозы и их единицы измерения.
8. Перечислите этапы действия ионизирующих излучений на биологические системы. Что такое радиочувствительность и радиостойчивость организма?
9. Какие законы и нормативные документы по обеспечению радиационной безопасности населения существуют в Республике Беларусь?
10. Что такое внешнее и внутреннее облучение человека?
11. Назовите источники ионизирующих излучений и загрязнения окружающей среды.
12. Как защититься от воздействия ионизирующих излучений?
13. Что такое территория радиоактивного загрязнения? На основании каких показателей происходит зонирование территорий?
14. Как мигрируют радионуклиды в биосфере? Назовите основные пути поступления радионуклидов в организм человека.
15. Перечислите защитные мероприятия (контрмеры) по ведению агропромышленного производства на радиоактивно загрязненных территориях.
16. Что включают в себя мероприятия по уменьшению содержания радионуклидов в продукции растениеводства?
17. Какие мероприятия предусматривают уменьшение содержания радионуклидов в продукции животноводства?