

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

Т. А. ТИМОФЕЕВА

РАДИОЭКОЛОГИЯ

Гомель
2012

Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»**

Т. А. ТИМОФЕЕВА

РАДИОЭКОЛОГИЯ

**Практическое руководство
для студентов специальности 1-33 01 02
«Геоэкология»**

**Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2012**

УДК 502:628.4.047(075.8)
ББК 28.080.1я73
Т 415

Рецензенты:

кандидат сельскохозяйственных наук А. Г. Подоляк;
кафедра экологии УО «ГГУ им. Ф. Скорины»

Рекомендовано к печати научно-методическим советом учреждения
образования «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

Тимофеева, Т. А.

Т 415 Радиоэкология: практическое руководство для студентов
специальности 1-33 01 02 «Геоэкология» / Т. А. Тимофеева;
М-во образования РБ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. –
Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2012. – 48 с.
ISBN 978-985-439-614-9

Практическое руководство разработано в соответствии с учебной программой курса «Радиоэкология» и содержит теоретические сведения по различным аспектам радиоэкологии как самостоятельной дисциплины, дает представление об излучениях, включая ионизирующие излучения природного и искусственного происхождения, рассматривает дозиметрические величины, биологические эффекты, вызываемые облучением. Оценены причины и последствия Чернобыльской катастрофы для Республики Беларусь. Рассмотрены особенности ведения производства в условиях радиоактивного загрязнения территории.

Адресовано студентам специальности 1-33 01 02 «Геоэкология».

УДК 502:628.4.047(075.8)
ББК 28.080.1я73

ISBN 978-985-439-614-9

© Тимофеева Т. А., 2012
© УО «Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины», 2012

Содержание

Тема 1	
Радиоактивность и ядерные излучения	6
1.1 Строение атома	6
1.2 Радиоактивность	7
Контрольные вопросы	8
Тема 2	
Искусственная радиоактивность, виды ионизирующих излучений	9
2.1 Открытие искусственной радиоактивности	9
2.2 Закон радиоактивного распада	9
2.3 Активность, единицы измерения	10
2.4 Основные виды ионизирующих излучений	11
Контрольные вопросы	12
Тема 3	
Основы дозиметрии и радиометрии	13
3.1 Основные дозиметрические величины	13
3.2 Способы измерения ионизирующих излучений и определения доз облучения	13
Контрольные вопросы	15
Тема 4	
Дозы облучения	16
4.1 Формирование доз внутреннего и внешнего облучения человека	16
4.2 Поглощенная доза излучения (D)	16
4.3 Эквивалентная доза облучения (H)	17
4.4 Эффективная доза облучения (E)	18
Контрольные вопросы	18
Тема 5	
Радиационный фон окружающей среды	19
5.1 Космическое излучение	19
5.2 Радиация земной коры	20
Контрольные вопросы	20
Тема 6	
Биологические эффекты ионизирующего излучения	21
6.1 Действие ионизирующего излучения на биологические молекулы и клетки	21
6.2 Радиочувствительность органов и тканей	22
Контрольные вопросы	23

Тема 7	
Лучевая болезнь человека	24
7.1 Острая лучевая болезнь при относительно равномерном облучении	24
7.2 Острые и отдаленные последствия облучения	25
Контрольные вопросы	25
Тема 8	
Проблемы атомной энергетики	26
8.1 Типы ядерных реакторов	26
8.2 Перспективы развития ядерной энергетики	27
8.3 Ядерный топливный цикл и захоронение радиоактивных отходов	27
Контрольные вопросы	28
Тема 9	
Катастрофа на Чернобыльской атомной электростанции: причины, общая характеристика	29
9.1 Загрязнение радионуклидами территории Республики Беларусь	29
9.2 Деление территории Республики Беларусь на зоны радиоактивного загрязнения	30
Контрольные вопросы	31
Тема 10	
Особенности поведения «чернобыльских» радионуклидов в окружающей среде	32
10.1 Поведение чернобыльских радионуклидов в почве, вертикальная и горизонтальная миграция	32
10.2 Последствия катастрофы для растительного и животного мира	32
10.3 Загрязнение радионуклидами воздушной и водной сред	33
10.4 Радиологическая обстановка в АПК. Содержание радионуклидов в сельскохозяйственной продукции	34
Контрольные вопросы	34
Тема 11	
Система радиационного контроля	35
11.1 Радиационный контроль и мониторинг как составная часть Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь	35
11.2 Структура сети радиационного контроля Минсельхозпрода Беларуси	35
Контрольные вопросы	36

Тема 12	
Профилактика последствий радиоактивного загрязнения экологической среды.....	37
12.1 Международная шкала аварий на АЭС.....	37
12.2 Дезактивация радиоактивных территорий	37
Контрольные вопросы.....	38
Тема 13	
Медицинские последствия Чернобыльской катастрофы для Республики Беларусь.....	39
13.1 Дозы облучения населения, полученные в результате катастрофы на ЧАЭС	39
13.2 Онкологические заболевания, лучевая болезнь и лучевая катаракта, лейкозы.....	40
Контрольные вопросы.....	40
Тема 14	
Государственные мероприятия, направленные на ликвидацию последствий катастрофы на ЧАЭС.....	41
14.1 Нормативно-правовая база Республики Беларусь по основным направлениям преодоления последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС	41
14.2 Защитные мероприятия в сельском и лесном хозяйстве.....	42
Контрольные вопросы.....	42
Вопросы к зачёту.....	43
Литература	45

Тема 1

Радиоактивность и ядерные излучения

1.1 Строение атома

1.2 Радиоактивность

Основные понятия, включённые в систему тренингов-тестирования: строение атома; протоны; нейтроны; электроны; элементарные частицы; нуклоны; ядерные силы притяжения; радиус действия ядерных сил; массы протона и нейтрона; протонное число; изотопы; радиоактивность; легкие радионуклиды; тяжелые радиоактивные элементы; радиоактивное семейство.

1.1 Строение атома

Атом – это электронейтральная микросистема, состоящая из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов.

Протоны, нейтроны и электроны – элементарные частицы, входящие в состав атома.

В центре атома располагается очень плотное тяжелое ядро, которое состоит из положительно заряженных *протонов* и не имеющих заряда *нейтронов*. Ядро имеет положительный заряд, величина которого определяется числом протонов в ядре. Массы протона и нейтрона почти одинаковы и примерно равны одной условной единице (атомной единице массы или сокращенно а. е. м.). Протоны и нейтроны, составляющие атомное ядро, называют *нуклонами* (от латинского «*nucleus*», что означает «ядро»).

Нуклоны. Ядерные силы притяжения. Нуклоны удерживаются в ядре мощными ядерными силами притяжения, которые уравновешивают силы кулоновского отталкивания положительно заряженных протонов.

В ядре каждого атома нуклоны находятся на определенном расстоянии друг от друга. В масштабах ядра в качестве единицы измерения расстояния используют ферми (ф) – 1 ферми соответствует 10^{-15} м.

Радиус действия ядерных сил. Радиус действия ядерных сил не превышает 1,4 ф. Связь между нуклонами наиболее прочна, когда расстояние между ними 0,5 ф. При сближении на расстояние до 0,2 ф ядерные силы притяжения сменяются силами отталкивания.

Ядро окружают легкие, отрицательно заряженные частицы – *электроны*, которые по размерам и массе значительно уступают

нуклонам. Масса электрона более чем в 1 800 раз меньше массы нуклона. Заряд электрона условно принят за элементарную единицу отрицательного заряда. По абсолютной величине заряд протона равен заряду электрона (таблица 1).

Таблица 1 – Заряд и масса элементарных атомных частиц

Элементарная частица	Относительный заряд	Масса покоя, а. е. м.
протон	+ 1	1,0073
нейтрон	0	1,0087
электрон	-1	$5,4858 \cdot 10^{-4}$

В целом, атом электрически нейтрален, так как число протонов в его ядре равно числу электронов, движущихся вокруг ядра, и положительный заряд ядра уравновешен отрицательным зарядом окружающих его электронов.

Массовое число атома. Число протонов в ядре атома называют *протонным числом* (Z), а число нейтронов – *нейтронным числом* (N). Суммарное количество протонов и нейтронов в ядре атома называют *атомным числом* (A). Массовое число атома:

$$A = Z + N. \quad (1)$$

Протонное число соответствует порядковому номеру химического элемента в Периодической системе Д. И. Менделеева. Ядра атомов одного и того же элемента всегда содержат одинаковое число протонов.

1.2 Радиоактивность

Ядра атомов одного и того же химического элемента при одинаковом количестве протонов могут, однако, отличаться по числу нейтронов. Массовые числа атомов с одинаковым количеством протонов, но разным количеством нейтронов в ядре различны. Такие атомы называют *изотопами*.

Изотопы – это атомы одного и того же химического элемента, то есть атомы, имеющие в своих ядрах одинаковое количество протонов, но отличающиеся массовыми числами из-за разного количества в ядрах нейтронов.

Названия и символы изотопов совпадают с названием и символом соответствующего химического элемента. Только изотопы **водорода** имеют собственные названия и символы (рисунок 1).

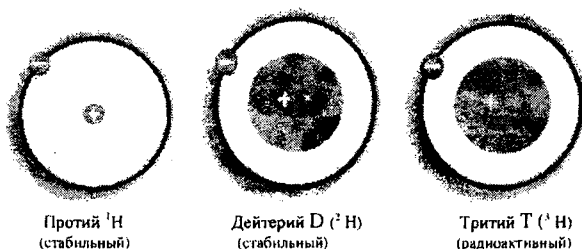


Рисунок 1 – Схемы строения атомов протия, дейтерия и трития

Радиоактивность – это самопроизвольное превращение нестабильных атомных ядер в другие, более устойчивые ядра с выделением в окружающую среду энергии в виде ионизирующего излучения.

Легкие радионуклиды, которые содержат в ядре небольшое число протонов и нейтронов, обычно превращаются в стабильные нуклиды в результате одного ядерного превращения (например, $\text{T} ({}^3\text{H})$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{40}\text{K}$ и др.).

Тяжелые радиоактивные элементы ($Z > 83$) характеризуются цепочкой последовательных ядерных превращений, которая продолжается до тех пор, пока не образуется устойчивое ядро.

Радиоактивные семейства. Группа тяжелых радиоактивных элементов, объединенных цепочкой последовательных самопроизвольных ядерных превращений.

В настоящее время на Земле присутствуют члены трех естественных радиоактивных семейств: ${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$, ${}^{232}\text{Th}$ и полученного искусственно ${}^{237}\text{Np}$.

Контрольные вопросы

1. Зарисуйте схемы строения атомов протия, дейтерия и трития.
2. Из чего состоит атом?
3. Что такое нуклоны и ядерные силы притяжения?
4. Охарактеризуйте радиус действия ядерных сил.
5. Что такое массовое число атома?
6. Охарактеризуйте лёгкие и тяжёлые радионуклиды.

Тема 2

Искусственная радиоактивность, виды ионизирующих излучений

- 2.1 Открытие искусственной радиоактивности
- 2.2 Закон радиоактивного распада
- 2.3 Активность, единицы измерения
- 2.4 Основные виды ионизирующих излучений

Основные понятия, включённые в систему тренингов-тестирования: открытие искусственной радиоактивности; закон радиоактивного распада; скорость радиоактивного распада; период полураспада радионуклида; активность; альфа-излучение (α); бета-излучение (β); гамма-излучение (γ).

2.1 Открытие искусственной радиоактивности

При бомбардировке устойчивых атомных ядер ядерными частицами (нейтронами, протонами, альфа-частицами) и более тяжелыми ядрами атомов других химических элементов можно осуществить различные ядерные превращения. В результате таких ядерных превращений могут образоваться как устойчивые, так и неустойчивые атомные ядра. Если в процессе бомбардировки устойчивые атомные ядра захватывают бомбардирующие частицы, превращаясь в новые неустойчивые ядра, эти неустойчивые ядра затем самопроизвольно распадаются с выделением в окружающую среду энергии в виде ионизирующего излучения. Радиоактивность, вызываемую искусственно при бомбардировке устойчивых атомных ядер ядерными частицами, называют искусственной.

Первое искусственное превращение атомных ядер. Первое искусственное превращение атомных ядер одного элемента в ядра атомов другого химического элемента осуществил в 1919 году Э. Резерфорд. Используя поток быстрых ядер гелия (альфа-частиц), испускаемых при радиоактивном распаде радия (^{226}Ra), ему удалось превратить атомы азота ^{14}N в атомы кислорода ^{17}O .

2.2 Закон радиоактивного распада

Самопроизвольные превращения неустойчивых атомных ядер происходят независимо друг от друга. За конкретный промежуток времени определенная часть ядер обязательно распадается.

Вероятность распада зависит от особенностей строения ядра нуклида и не зависит от того, входит ли радионуклид в состав тех или иных химических соединений, находятся ли вещества в газообразном, жидком или твердом состоянии.

Скорость радиоактивного распада радионуклида пропорциональна числу нераспавшихся атомных ядер этого радионуклида.

Выявленную закономерность назвали *законом радиоактивного распада*.

Закон радиоактивного распада характеризует изменение во времени количества неустойчивых атомных ядер радионуклида. Например, радионуклид ^{90}Sr имеет период полураспада 28,5 года.

Из 10 г радионуклида через 28,5 года останется только 5,0 г ^{90}Sr .

В течение последующих 28,5 года распадется еще половина ^{90}Sr , останется 2,5 г радионуклида и т. д.

Период полураспада радионуклида – это промежуток времени, за который распадается половина любого количества радионуклида.

По величине периода полураспада судят о скорости распада радионуклида. Период полураспада обычно обозначают $T_{1/2}$.

2.3 Активность, единицы измерения

Чем выше активность, тем больше ядерных превращений происходит в веществе в единицу времени и тем больше количество радионуклида в нем.

В системе СИ единицей измерения активности является *Беккерель (Бк)*. В радиоактивном веществе активностью 1 Бк в среднем происходит одно спонтанное ядерное превращение в секунду.

Существуют и внесистемные единицы измерения активности, среди которых наиболее часто употребляется *Кюри (Ки)*. Эта единица названа в честь Марии и Пьера Кюри. 1 Кюри соответствует активности 1 г радия.

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

Концентрацию радионуклида в веществе можно оценивать по *удельной или объемной активности*.

Удельная активность $A_m = A/m$ (Бк/кг) – это активность вещества в расчете на единицу его массы, обычно применяют при оценке содержания радионуклидов в твердых веществах.

Объемная активность $A_v = A/v$ (Бк/м³) – это активность вещества в расчете на единицу объема вещества, обычно применяют при оценке содержания радионуклидов в жидких и газообразных веществах (вода, воздух и т. п.).

Плотность радиоактивного загрязнения территорий

$$As = A/S \text{ (Бк/м}^2, \text{ Ки/км}^2\text{);}$$

$$1 \text{ Ки/км}^2 = 37\,000 \text{ Бк/м}^2.$$

Распределение радионуклида по поверхности объекта характеризуют по активности радионуклида (A) на единице площади поверхности объекта (S).

2.4 Основные виды ионизирующих излучений

Выделяют две группы ионизирующих излучений: *корпускулярные* и электромагнитные (*фотонные*).

Корпускулярное излучение (альфа-, бета-, протонное, нейтронное и др.) представляет собой поток быстро движущихся частиц.

Электромагнитное (фотонное) излучение (рентгеновское, гамма-излучение) – это разновидность электромагнитных волн. Все виды электромагнитных волн излучаются и переносят энергию в пространстве строго определенными порциями – *квантами или фотонами*.

Альфа-излучение (α) – это поток положительно заряженных частиц. Каждая альфа-частица состоит из двух протонов и двух нейтронов, которые прочно связаны между собой. Альфа-частицы представляют собой ядра атомов гелия ${}^4\text{He}$: имеют массу, равную 4 а. е. м., а заряд – +2.

Альфа-частицы образуются при ядерном распаде тяжелых радиоактивных элементов. В результате *альфа-распада* заряд ядра уменьшается на 2 относительные единицы, а его масса – на 4 атомные единицы массы, то есть положение полученного в результате распада атома смещается в Периодической системе элементов на 2 позиции влево.

Бета-излучение (β) – это поток быстро движущихся свободных электронов. По размерам и массе они значительно уступают альфа-частицам. Так, масса электрона в 7 344 раза меньше массы альфа-частицы. Заряд электрона по абсолютной величине вдвое меньше заряда альфа-частицы. Бета-частицы испускаются, например, в результате распада радионуклидов с избыточным содержанием нейтронов в ядре.

В основе бета-распада лежит происходящее в ядре атома превращение нейтрона в протон.

В результате *бета-распада* заряд ядра атома увеличивается на единицу, а его масса остается практически без изменения. Положение атома, полученного в результате такого распада, смещается в Периодической системе элементов на одну позицию вправо.

Гамма-излучение (γ) и рентгеновское излучение относятся к электромагнитным (фотонным) излучениям. Они характеризуются короткими длинами волн (большими частотами) и, как любое электромагнитное излучение, испускаются строго определенными порциями (квантами, или фотонами). Оба вида излучения отличаются высокой энергией фотонов.

Гамма-излучение (γ) и рентгеновское излучение имеют одинаковую природу, их кванты (фотоны) не несут электрического заряда. Оба вида излучения представляют собой электромагнитные волны, которые, как и все виды электромагнитных волн, распространяются в вакууме со скоростью света (300 000 км/с). Отличаются эти разновидности электромагнитного излучения по длине волны и энергии фотонов.

Отличаются эти виды излучения и по способам получения. Рентгеновское излучение можно получить искусственно в рентгеновской трубке, работающей на электрической энергии.

Контрольные вопросы

1. Что такое искусственная радиоактивность?
2. Что такое закон радиоактивного распада?
3. Охарактеризуйте основные виды ионизирующих излучений.
4. Как, для чего и в каких единицах рассчитываются удельная активность, объемная активность и плотность радиоактивного загрязнения территорий?

Тема 3

Основы дозиметрии и радиометрии

3.1 Основные дозиметрические величины

3.2 Способы измерения ионизирующих излучений и определения доз облучения

Основные понятия, включённые в систему тренинж-тестирования: дозиметрия; базовые и нормируемые дозиметрические величины; электронные, газоразрядные (ионизационные), полупроводниковые, сцинтилляционные, фотозумльсионные и пропорциональные детекторы и счетчики Гейгера-Мюллера; радиометры; спектрометры; дозиметры; счетчик излучения человека (СИЧ).

3.1 Основные дозиметрические величины

Дозиметрия – это раздел прикладной ядерной физики, в котором изучают величины, характеризующие ионизирующее излучение и его взаимодействие с веществом.

Базовые дозиметрические величины – физические характеристики излучения, от которых зависят радиационные эффекты, характеризуют:

- степень физического воздействия излучения на вещество;
- источник излучения;
- само излучение.

Могут быть измерены непосредственно. *Поглощенная доза* – базовая величина.

Нормируемые дозиметрические величины связывают дозу облучения с медико-биологическими последствиями действия ионизирующего излучения на организм человека при средних и малых дозах, являются мерой вреда от воздействия ионизирующих излучений на человека. *Эквивалентная и эффективная дозы* – нормируемые дозиметрические величины.

3.2 Способы измерения ионизирующих излучений и определения доз облучения

Детектором называют устройство, в котором энергия ионизирующего излучения преобразуется в электрическую или другие виды энергии, что позволяет регистрировать излучение.

Регистрация каждого вида излучения (*альфа*-, *бета*-, *гамма*- или др.) имеет свои особенности. Существует множество разновидностей детекторов в зависимости от типа регистрируемого излучения и типа прибора.

Электронные детекторы, газоразрядные (ионизационные) детекторы.

Наиболее широко используются *электронные детекторы*, в которых энергия ионизирующего излучения преобразуется в электрический сигнал.

Основные типы электронных детекторов: газоразрядные, полупроводниковые, сцинтилляционные.

Работа *газоразрядных, (ионизационных) детекторов* основана на ионизации рабочего вещества (газа) излучением. Простейший детектор такого типа – *ионизационная камера*.

Пропорциональные детекторы и счетчики Гейгера-Мюллера – это разновидности приборов на основе газоразрядных детекторов. Они отличаются относительно высоким анодным напряжением, что позволяет значительно усиливать электрические сигналы, вызываемые ионизирующим излучением.

Полупроводниковые детекторы также относятся к ионизационным. По принципу действия они подобны ионизационным камерам, но вместо газа в качестве рабочего вещества используют полупроводниковые материалы (*область p-n-перехода, включенного в обратном направлении*).

Сцинтилляционные детекторы широко распространены. Их работа основана на способности некоторых соединений светиться под действием ионизирующего излучения. Световые вспышки регистрируются. Такой способ детектирования ионизирующих излучений нашел широкое применение с появлением фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) – устройств, позволяющих измерять сверхслабые (вплоть до единичных фотонов) световые вспышки.

Фотоэмульсионные детекторы. Принцип действия *фотоэмульсионных детекторов* подобен фотографическому. Ионизирующее излучение воздействует на фотоэмульсию, нанесенную на пленку или пластинку, и образует *скрытое изображение*.

Радиометры предназначены для определения содержания радионуклидов в образцах почвы, воды, продуктов питания и т. д. по величине измеренной активности радионуклидов в этих образцах.

В *гамма-радиометрах* обычно используют сцинтилляционные детекторы. Прибор выдает показания в *Беккерелях на килограмм (Бк/кг)* или в *Беккерелях на литр (Бк/л)*.

Непосредственно измерить содержание *альфа*- и *бета*-излучающих радионуклидов в образцах почвы, воды, продуктов питания, как правило, не удастся. Это связано с незначительным пробегом *альфа*- и *бета*-частиц, которые находятся внутри образца, излучение не достигает рабочего объема детектора и не может быть зарегистрировано. В этом случае используют радиохимический анализ, специальные методы подготовки образцов и регистрации излучений.

Спектрометры дают наиболее полную информацию об излучении радионуклидов. Гамма-, альфа- и бета-спектрометры позволяют определить энергетический спектр излучения, то есть распределение гамма-квантов, альфа- или бета-частиц по энергиям.

Дозиметры. Простейшие *дозиметры* созданы на основе ионизационной камеры и фактически измеряют суммарный электрический заряд частиц, образующихся в веществе за определенный промежуток времени под действием гамма-излучения.

Индивидуальные дозиметры. Современные дозиметры позволяют определять эффективную дозу внешнего облучения организма человека и дают показания в микрозивертах (мкЗв) или миллизивертах (мЗв).

Счетчик излучения человека (СИЧ) является разновидностью радиометра и предназначен для измерения активности в теле человека радиоактивного цезия (^{137}Cs), калия (^{40}K) и других радионуклидов по сопровождающему их распад гамма-излучению. Система регистрации СИЧ состоит из нескольких сцинтилляционных детекторов, которые установлены в кресле или другом устройстве, где размещается человек. В результате измерений определяют активность радионуклидов, содержащихся в организме человека в момент измерения (в *Беккерелях*).

Контрольные вопросы

1. Что такое дозиметрия?
2. Охарактеризуйте базовые и нормируемые дозиметрические величины.
3. Что такое детектор?
4. Какие виды детекторов существуют и чем они отличаются?
5. Охарактеризуйте радиометры и спектрометры.
6. Что измеряют с помощью дозиметров и СИЧ, в каких единицах?

Тема 4

Дозы облучения

- 4.1 Формирование доз внутреннего и внешнего облучения человека
- 4.2 Поглощенная доза излучения (D)
- 4.3 Эквивалентная доза облучения (H)
- 4.4 Эффективная доза облучения (E)

Основные понятия, включённые в систему тренинг-тестирования: внешнее и внутреннее облучение жителей Земли; способы поступления радионуклидов в организм человека; поглощенная доза излучения (D); мощность поглощенной дозы (MD); эквивалентная доза облучения (H); эффективная доза облучения (E).

4.1 Формирование доз внутреннего и внешнего облучения человека

Внешнее облучение жителей Земли. Источники: космическое излучение, радионуклиды земной коры, медицинские источники, промышленные источники.

Внутреннее облучение жителей Земли. Способы поступления радионуклидов в организм человека: ингаляционный (через органы дыхания), пероральный (с пищей и водой), через кожу, слизистые оболочки глаз.

4.2 Поглощенная доза излучения (D)

Поглощенная доза излучения (D) – это количество энергии ионизирующего излучения, поглощенной облучаемым объектом, в расчете на единицу его массы:

$$D = \Delta E / \Delta m, \quad (2)$$

где ΔE – количество энергии, переданное излучением веществу в элементарном объеме;

Δm – масса вещества в этом объеме.

В системе СИ поглощенная доза измеряется в *Джоулях на килограмм (Дж/кг)*. Эта единица получила название *Грей (Гр)*, 1 Грей – это поглощенная доза любого ионизирующего излучения, которая соответствует поглощению 1 Дж энергии излучения в расчете на 1 кг облучаемого вещества. 1 Грей соответствует большой величине

поглощенной дозы излучения. Обычно приходится иметь дело со значительно меньшими дозами, которые выражают в тысячных или миллионных долях Грея – *миллигреях (мГр)* или *микрогреях (мкГр)*. Устаревшей внесистемной единицей измерения поглощенной дозы является *рад*. 1 Грей соответствует 100 радом.

Мощность поглощенной дозы (МД) – это изменение поглощенной дозы в единицу времени:

$$MD = AD / \Delta t, \quad (3)$$

где AD – изменение поглощенной дозы за промежуток времени Δt .

Обычно мощность поглощенной дозы измеряют в *миллигреях в час (мГр/час)* или *микрогреях в час (мкГр/час)*.

4.3 Эквивалентная доза облучения (Н)

Эквивалентная доза – это доза облучения, которая учитывает особенности действия любого вида ионизирующего излучения на биологическую ткань (или орган) человека с помощью взвешивающих коэффициентов излучения.

Эквивалентную дозу (Н) можно получить, если умножить среднюю поглощенную дозу в биологической ткани (или органе) человека на взвешивающий коэффициент ионизирующего излучения, действующего на эту биологическую ткань (или орган):

$$H_T = D_T \cdot W_R, \quad (4)$$

где D_T – средняя *поглощенная* доза излучения R типа α , β , γ (или др.), действующего на биологическую ткань (или орган) человека;

W_R – взвешивающий коэффициент излучения (таблица 2).

Таблица 2 – Величины взвешивающих коэффициентов ионизирующих излучений

Вид излучения и его энергия	Взвешивающий коэффициент излучений (W_R) ¹
1	2
Электромагнитное излучение(гамма-, рентгеновское) с фотонами всех энергий	1
Бета-излучение (β -) с любой энергией электронов	1
Альфа-излучение	20

Окончание таблицы 2

1	2
Нейтронное излучение с энергией нейтронов:	
< 0,01 МэВ	5
0,01–0,1 МэВ	10
> 0,1–2 МэВ	20
> 2–20 МэВ	10
> 20 МэВ	5
Протонное излучение с энергией протонов более 2 МэВ ²	5
Излучение, образованное осколками ядерного деления или тяжелыми ядрами	20

Чтобы различать эквивалентную и поглощенную дозы, для их измерения пользуются разными единицами. В системе СИ единицей измерения *поглощенной дозы* является *Грей*, а единицей измерения *эквивалентной дозы* – *Зиверт* (Зв). 1 *Зиверт* соответствует поглощенной дозе величиной в 1 *Грей* для ионизирующего излучения, взвешивающий коэффициент которого равен единице. На практике для измерения эквивалентных доз облучения используют производные Зиверта: *миллизиверт* (мЗв) и *микрозиверт* (мкЗв).

1 Зиверт (Зв) = 1 000 миллизиверт (мЗв) = 1 000 000 микрозиверт (мкЗв).

4.4 Эффективная доза облучения (Е)

Эффективная доза облучения (Е) – это сумма эквивалентных доз облучения (H_{T_i}) отдельных биологических тканей (или органов), умноженных на соответствующие взвешивающие коэффициенты для тканей и органов (W_{T_i}):

$$E = H_{T_1} \cdot W_{T_1} + H_{T_2} \cdot W_{T_2} + H_{T_3} \cdot W_{T_3} + \dots \quad (5)$$

где H_{T_1} и H_{T_2} – эквивалентные дозы в биологических тканях или органах человека, обозначенных индексами T_1 , T_2 и т. д.;

W_{T_1} , W_{T_2} и т. д. – взвешивающие коэффициенты для соответствующих биологических тканей и органов: щитовидная железа, мышцы, почки, печень, селезёнка – коэффициент 0,05; кости и кожа – 0,01; лёгкие, толстая кишка и желудок – 0,12; яичники – 0,2.

Контрольные вопросы

1. Объяснить принципы формирования доз внутреннего и внешнего облучения.
2. Что такое поглощенная доза излучения (D), единицы измерения?
3. Как рассчитывается эквивалентная доза облучения (H)?
4. Как рассчитывается эффективная доза облучения (E)?

Тема 5

Радиационный фон окружающей среды

5.1 Космическое излучение

5.2 Радиация земной коры

Основные понятия, включённые в систему тренинг-тестирования: космическое излучение; внутренний и внешний радиационный пояса; естественный радиационный фон земной коры; источники поступления радона в атмосферу Земли;

5.1 Космическое излучение

Первичное космическое излучение состоит из излучения галактического и солнечного происхождения.

Космическое излучение галактического происхождения – это, в основном, поток ядер водорода (протонов) колоссальных энергий, несущихся в космическом пространстве с огромными скоростями. В состав галактического излучения также входят ядра гелия (альфа-частицы), ядра атомов более тяжелых элементов (преимущественно с зарядом ядра Z от 3 до 28) и, в незначительном количестве, другие частицы.

Солнечное излучение состоит из *электромагнитного излучения* (электромагнитная компонента) и потока частиц (корпускулярная компонента). Магнитное поле Земли (*геомагнитное поле*) простирается на расстояние 70–80 тыс. км по направлению к Солнцу и на многие миллионы километров в противоположном направлении.

Периодические изменения солнечной активности.

Периодические изменения солнечной активности наблюдают, в среднем, через 11 лет, хотя этот период может сокращаться до 7,5 или увеличиваться до 16 лет. Значительно реже, в среднем через каждые 80 лет, отмечают более существенные изменения солнечной активности.

Электроны и протоны, удерживаемые геомагнитным полем, образуют *внутренний* и *внешний* радиационные пояса Земли.

Внутренний радиационный пояс состоит преимущественно из высокоэнергетических *протонов*. Их максимальная плотность наблюдается над экваториальной областью планеты, на высоте около 3500 км.

Внешний радиационный пояс удален от Земли на расстояние от 1 до 8 ее радиусов и состоит из потоков *электронов* и *протонов* с максимальной плотностью частиц на расстоянии 22 000 км от земной

поверхности. (Средний радиус Земли $R = 6\,367$ км.) Движущиеся заряженные космические частицы создают электромагнитное поле, которое окружает Землю.

Вторичное космическое излучение представляет собой излучение, образующееся в результате взаимодействия частиц первичного космического излучения с ядрами атомов, входящих в состав атмосферы Земли.

5.2 Радиация земной коры

Естественный радиационный фон земной коры создаёт излучение радионуклидов земной коры и всех природных образований, в которые попали эти радионуклиды.

Из радиоактивных нуклидов наиболее часто в земной коре встречаются члены естественных радиоактивных семейств ^{238}U и ^{232}Th , а также ^{40}K , ^{87}Rb . В среднем, содержание каждого из этих радионуклидов превышает 2 г/т.

Радионуклиды ^{238}U , ^{232}Th и менее распространенный ^{235}U являются родоначальниками природных радиоактивных семейств. Конечные продукты цепи ядерных превращений стабильны. Это изотопы свинца.

Радиоактивный торий (^{227}Th , ^{228}Th , ^{232}Th), **уран** ^{235}U , ^{238}U , ^{40}K и ^{226}Ra . Уран и торий в относительно большом количестве содержатся в гранитах. В тех местах земного шара, где эти породы располагаются ближе к поверхности, уровень радиационного фона местности выше (например, во французских Альпах, Закарпатье, Финляндии, Швеции, Норвегии).

Источники поступления радона в атмосферу Земли.

Радон — это невидимый инертный газ, который в 7,5 раз тяжелее воздуха. Он освобождается из земной коры *повсеместно*. Объемная активность *почвенного воздуха по радону* достигает $6000\text{--}7000$ Бк/м³.

Примерно 60 % индивидуальной эффективной дозы, получаемой человеком за год от радионуклидов земной коры, приходится на долю радона и продуктов его распада.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте основные виды космических излучений.
2. Какие радионуклиды формируют естественный радиационный фон Земли?
3. В каких единицах рассчитывается величина радиационного фона?

Тема 6

Биологические эффекты ионизирующего излучения

6.1 Действие ионизирующего излучения на биологически молекулы и клетки

6.2 Радиочувствительность органов и тканей

Основные понятия, включённые в систему тренингов-тестирования: действие ионизирующего излучения на биологические молекулы и клетки; прямое и косвенное действие излучения; действие ионизирующего излучения на молекулы ДНК, белка, липиды, коэффициент всасывания (резорбции); период биологического полувыведения (T_b), эффективный период полувыведения.

6.1 Действие ионизирующего излучения на биологические молекулы и клетки

Действие ионизирующего излучения на молекулы ДНК.

Различают следующие виды повреждения ДНК: *однонитевые разрывы* – разрыв одной из цепочек ДНК; *двунитевые разрывы* – разрыв обеих цепочек ДНК; *изменение структуры азотистых оснований*.

Действие ионизирующего излучения (ИИ) на молекулы белка показано в таблице 3, а на липиды – в таблице 4.

Таблица 3 – Изменение структуры белка под воздействием ИИ

Прямое		Косвенное			
возникновение свободных радикалов в цепях аминокислот		образование свободных радикалов в результате взаимодействия белковых молекул с продуктами радиолитического распада воды			
Изменение структуры белка					
разрыв водородных и дисульфидных связей		модификации аминокислот в цепи	образование сшивков и агрегатов		
Нарушение функций белка					
структурной	регуляторной (гормоны)	каталитической (ферменты)	защитной (антитела)	транспортной (гемоглобин)	энергетической

Таблица 4 – Действие ионизирующего излучения на липиды

Действие ионизирующего излучения на липиды	
↓	
образование свободных радикалов	
↓ + кислород	
перекисное окисление липидов	
↓	↓
изменение биохимических процессов в клетке	сдвиг ионного баланса в клетке

Действие ионизирующего излучения на углеводы. Под действием излучения возможен отрыв атома водорода от молекулы углевода. При этом образуются свободные радикалы, а затем перекиси. В результате облучения из продуктов распада углеводов возможен синтез органического вещества, которое тормозит синтез ДНК и белки и подавляет деление клеток.

6.2 Радиочувствительность органов и тканей

По способности делиться все клетки организма человека бывают *делящиеся*, *слабоделящиеся* и *неделящиеся*. На ранней стадии развития организма все клетки способны к делению. Делящиеся клетки менее устойчивы к действию ионизирующего излучения, чем неделящиеся. Органы кроветворения (костный мозг, лимфатические узлы, селезенка) и пищеварения (слизистые оболочки желудка и кишечника), половые железы (семенники и яичники) состоят из интенсивно делящихся клеток и относятся к наиболее радиочувствительным органам.

Коэффициент всасывания (резорбции) (K_{ac}) – это доля радионуклида, поступившего в кровь в одном из перечисленных органов или системе органов, от общего количества радионуклида, поступившего в организм с воздухом в процессе дыхания, пищей и водой или через кожу. Различают коэффициенты всасывания (резорбции) K_{ac} радионуклидов в кровь в легких, в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ), в коже.

Период биологического полувыведения (T_B) – это промежуток времени, в течение которого активность накопленного в организме (или в отдельном органе) радионуклида сокращается наполовину в результате естественных биологических процессов.

Эффективный период полувыведения ($T_{эф}$) – это промежуток времени, в течение которого активность радионуклида в организме

уменьшается вдвое за счет процессов биологического выведения и радиоактивного распада радионуклида (формула 6):

$$T_{\text{эф}} = \frac{T_{1/2} + T_{\text{Б}}}{2}, \quad (6)$$

где $T_{\text{эф}}$ – эффективный период полувыведения,

$T_{1/2}$ – период полураспада,

$T_{\text{Б}}$ – период биологического полувыведения радионуклида.

Кратность накопления радионуклида (КН) – это отношение максимально накопленного количества радионуклида в органе (ткани) или в организме в целом к количеству радионуклида, ежесуточно поступающего в организм.

Если кратность накопления превышает единицу ($КН > 1$), в органе (ткани) или в организме в целом происходит накопление радионуклида. При кратности накопления, равной единице ($КН = 1$), содержание радионуклида остается постоянным. При кратности накопления меньше единицы ($КН < 1$) радионуклид выводится из органа (ткани) или организма.

Контрольные вопросы

1. Как действует ионизирующее излучение на биологические молекулы и клетки?
2. Как рассчитывается эффективный период полувыведения?
3. Что такое кратность накопления радионуклида (КН)?

Тема 7

Лучевая болезнь человека

7.1 Острая лучевая болезнь при относительно равномерном облучении

7.2 Острые и отдаленные последствия облучения

Основные понятия, включённые в систему тренинж-тестирования: острая лучевая болезнь при относительно равномерном облучении; первичная реакция; фаза клинического благополучия; местное (локальное) облучение в больших дозах, концепция «критического органа».

7.1 Острая лучевая болезнь при относительно равномерном облучении

Лучевая болезнь – это комплексная реакция организма на большие дозы ионизирующего излучения. Выделяют 3 стадии заболевания (рисунок 2).

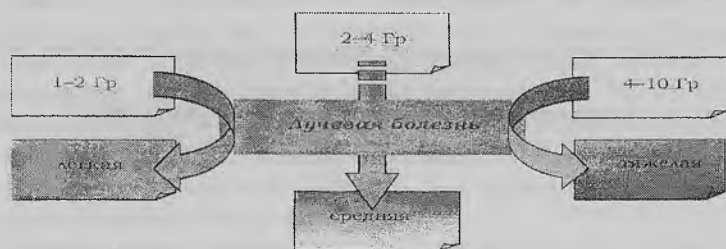


Рисунок 2 – Стадии лучевой болезни человека

Реакция организма человека на действие ионизирующего излучения в больших дозах (равномерное внешнее облучение):

Первичная реакция: тошнота, рвота, общая слабость, головные боли, потливость, сонливость.

Фаза клинического благополучия: исчезновение всех симптомов. Изменения состава крови и костного мозга.

Фаза выраженных клинических последствий: резкое ухудшение самочувствия, слабость, повышение температуры, кровоизлияния, поражение кишечника, снижение содержания лейкоцитов и лимфоцитов в крови, анемия, ослабление иммунитета, возникновение

воспалительных процессов. Данная фаза продолжается от одной до трех недель: *стадия раннего восстановления* (в случае благоприятного исхода) или *возможность отдаленных последствий облучения*.

7.2 Острые и отдаленные последствия облучения

Острые последствия проявляются сразу или в короткие сроки после облучения (в течение нескольких часов, дней, недель).

Острые последствия облучения обычно проявляются в органах и тканях с быстро делящимися клетками и в большинстве случаев приводят к гибели значительного числа клеток.

Отдаленные последствия облучения – это заболевания, вызванные действием ионизирующего излучения на организм и возникающие спустя длительное время после облучения.

Как показали наблюдения, при средних и малых дозах облучения сокращение жизни, в основном, связано с увеличением частоты заболеваний крови (лейкозов) и раковых заболеваний отдельных органов и тканей.

Детерминированные и стохастические эффекты от воздействия радионуклидов на организм человека.

К **детерминированным эффектам** относятся все острые последствия облучения (радиационные ожоги, лучевая болезнь и др.),

Поглощенная доза (в среднем на организм):

0,5–1 Гр – вероятность детерминированных эффектов практически равна нулю;

3–6 Гр – доза смертельна примерно для половины облученных людей, не получивших соответствующего лечения;

6 Гр и выше – в случае получения дозы в течение короткого промежутка времени неизбежен смертельный исход.

Стохастические эффекты – это эффекты, о которых невозможно определенно сказать, реализуются они у конкретного лица или нет. Стохастические эффекты характерны для более низких доз, чем детерминированные эффекты, и наблюдаются при средних (от 0,2 до 1 Гр) и малых (менее 0,2 Гр) дозах облучения.

Контрольные вопросы

1. Что такое лучевая болезнь?
2. Назовите основные стадии лучевой болезни человека.
3. Охарактеризуйте детерминированные и стохастические эффекты от воздействия радионуклидов на организм человека.

Тема 8

Проблемы атомной энергетики

8.1 Типы ядерных реакторов

8.2 Перспективы развития ядерной энергетики

8.3 Ядерный топливный цикл и захоронение радиоактивных отходов

Основные понятия, включённые в систему тренинж-тестирования: типы ядерных реакторов; перспективы развития ядерной энергетики; реакции термоядерного синтеза; дейтерий-тритиевый топливный цикл; ядерный топливный цикл и проблема радиоактивных отходов.

8.1 Типы ядерных реакторов

Существует 6 типов ядерных реакторов (таблица 5).

Таблица 5 – Типы ядерных реакторов

Реакторы	По назначению	Энергетические (для получения электроэнергии, теплофикации, работы силовых установок)
		Размножители (для производства ядерного топлива)
		Экспериментальные (для изучения физических процессов с целью проектирования и эксплуатации реакторов)
		Исследовательские (для исследований в ядерной физике, физике твердого тела, радиационной химии, биологии и т. д.)
	По типу замедлителя	графитовые
		водные
		тяжеловодные
	По энергии нейтронов	на быстрых нейтронах
		на промежуточных нейтронах
		на тепловых нейтронах
	По типу активной зоны	гомогенные
		гетерогенные
	По типу теплоносителя	жидкометаллические
		с газовым теплоносителем
		с органическим теплоносителем
	По типу топлива	водяные
урановые		
	плутониевые	

8.2 Перспективы развития ядерной энергетики

Перспективы развития ядерной энергетики большинство специалистов связывает с освоением ядерной энергии, выделяющейся при синтезе атомных ядер, в реакции термоядерного синтеза.

Новый способ основан на использовании энергии, выделяющейся при слиянии ядер атомов легких элементов, расположенных в самом начале Периодической системы, в ядра атомов более тяжелых элементов. Примером реакции такого типа является так называемый *дейтерий-тритиевый топливный цикл*, то есть синтез гелия (${}^4\text{He}$) из изотопов водорода дейтерия (D) и трития (T) при температуре порядка 10^8 К. Еще более перспективен *дейтерий-дейтериевый цикл*, основанный на реакции синтеза гелия (${}^4\text{He}$) из ядер дейтерия (D).

Термоядерная энергетика более безопасна по сравнению с ядерной энергетикой. В 2001 году завершена разработка технического проекта первого в мире международного экспериментального термоядерного реактора. Планируется построить такой реактор на территории Франции в течение 20 лет. На его основе будут отрабатываться технологии для создания коммерческой термоядерной электростанции.

8.3 Ядерный топливный цикл и захоронение радиоактивных отходов

Весь процесс получения тепловой и электрической энергии за счет деления тяжелых атомных ядер – от разработки урановой руды до утилизации радиоактивных отходов – называют *ядерным топливным циклом (ЯТЦ)*.

Захоронение радиоактивных отходов. Локальный подход предполагает захоронение радиоактивных отходов в местах их образования. Это удобно во многих отношениях, но приводит к увеличению размеров опасных зон.

Региональный подход предусматривает выбор наиболее подходящих мест для захоронения радиоактивных отходов и создание централизованных хранилищ. Размещение высокоактивных отходов в глубоких подземных хранилищах является основным способом захоронения отходов.

Контрольные вопросы

1. Какие направления развития ядерной энергетики наиболее перспективны?
2. Что такое ядерный топливный цикл (ЯТЦ)?
3. Назовите основные подходы при захоронении радиоактивных отходов.
4. Охарактеризуйте основные типы ядерных реакторов.

Тема 9

Катастрофа на Чернобыльской атомной электростанции: причины, общая характеристика

9.1 Загрязнение радионуклидами территории Республики Беларусь

9.2 Деление территории Республики Беларусь на зоны радиоактивного загрязнения

Основные понятия, включённые в систему тренинг-тестирования: загрязнение территории Беларуси ^{131}I , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}Pu , ^{239}Pu и ^{240}Pu ; деление территории Республики Беларусь на зоны радиоактивного загрязнения; зона эвакуации (отчуждения); зона первоочередного отселения; зона последующего отселения; зона с правом на отселение; зона проживания с периодическим радиационным контролем.

9.1 Загрязнение радионуклидами территории Республики Беларусь

Загрязнение территории Беларуси ^{131}I . В первые дни катастрофы вклад ^{131}I в суммарную активность выброшенных радионуклидов достигал 25 %. Практически вся территория Беларуси в различной степени подверглась загрязнению радиоактивным йодом. В апреле-мае 1986 года наибольшие уровни выпадения ^{131}I отмечались в ближней зоне ЧАЭС: в Брагинском, Хойникском и Наровлянском районах Гомельской области. На территории этих районов загрязнение почвы ^{131}I достигало $37\,000\text{ кБк/м}^2$ ($1\,000\text{ Ки/км}^2$) и более. Период полураспада ^{131}I равен 8,0 суткам, поэтому примерно через 2 месяца после катастрофы выброшенный из реактора радионуклид практически полностью распался.

Загрязнение ^{137}Cs подверглись Гомельская и Могилевская области, 10 районов Минской области, 6 районов Брестской, 6 районов Гродненской и 1 район Витебской области.

В 1986 году в зоне загрязнения оказалось более 3 600 населённых пунктов (в том числе 27 городов), в которых проживало 2,2 млн. человек, то есть свыше $\frac{1}{5}$ всего населения Беларуси.

Загрязнение территории Беларуси ^{90}Sr . Основная часть радиоактивного стронция сосредоточена в 30-километровой зоне ЧАЭС. Площади, загрязнённые этим радионуклидом с уровнем выше $5,5\text{ кБк/м}^2$ ($0,15\text{ Ки/км}^2$), занимают примерно 10 % территории республики. Они расположены в Гомельской и Могилевской областях.

Загрязнение трансурановыми элементами (ТУЭ).

Соединения трансурановых элементов выпали на территории Брагинского, Наровлянского, Хойникского, Речицкого, Добрушского и Лоевского районов Гомельской области и Чериковского района Могилевской области. Самые высокие уровни загрязнения плутонием (более 111 кБк/м² или 3 Ки/км²) обнаружены в пределах 30-километровой зоны ЧАЭС в Хойникском районе Гомельской области. После катастрофы около 46 % активности выпавших изотопов плутония приходилось на бета-излучающий ²⁴¹Pu. Радиоактивный распад этого радионуклида приводит к образованию *альфа*-излучающего ²⁴¹Am. Со временем количество ²⁴¹Pu уменьшается, а ²⁴¹Am, наоборот, увеличивается. В 2006 году активности этих радионуклидов сравнивались. По оценкам специалистов, содержание америция достигнет максимальной величины к 2058 году.

9.2 Деление территории Республики Беларусь на зоны радиоактивного загрязнения

В соответствии со статьей 4 Закона «О правовом режиме территорий, подвергшихся загрязнению после катастрофы на Чернобыльской АЭС», территория Республики Беларусь разделена на 5 зон в зависимости от уровня загрязнения почв и величины среднегодовой эффективной дозы облучения населения от чернобыльских радионуклидов.

Зона эвакуации (отчуждения). Территория, прилегающая к ЧАЭС (в основном, в радиусе 30 км), с которой в 1986 году в соответствии с существующими нормами радиационной безопасности было эвакуировано население. Территория, с которой было проведено дополнительное отселение людей в связи с высоким уровнем загрязнения почв радионуклидами стронция и плутония. Уровни загрязнения почв этими радионуклидами составляют:

- ⁹⁰Sr – более 111 кБк/м² (3 Ки/км²), или
- ^{238,239,240}Pu – более 3,7 кБк/м² (0,1 Ки/км²).

Зона первоочередного отселения. Территория с уровнем загрязнения почв:

- ¹³⁷Cs – 1 480 кБк/м² (40 Ки/км²) и более, или
- ⁹⁰Sr – 111 кБк/м² (3 Ки/км²) и более, или
- ^{238,239,240}Pu – 3,7 кБк/м² (0,1 Ки/км²) и более.

Зона последующего отселения также территория с более низким уровнем загрязнения почвы вышеуказанными радионуклидами, где среднегодовая эффективная доза облучения населения от

«чернобыльских» радионуклидов может превышать 5 мЗв/год.

Территория с уровнем загрязнения почв:

- ^{137}Cs – от 555 до 1480 кБк/м² (от 15 до 40 Ки/км²), или
- ^{90}Sr – от 74 до 111 кБк/м² (от 2 до 3 Ки/км²), или
- $^{238,239,240}\text{Pu}$ – от 1,85 до 3,7 кБк/м² (от 0,05 до 0,1 Ки/км²),

Зона с правом на отселение. Территория с уровнем загрязнения почв:

- ^{137}Cs – от 185 до 555 кБк/м² (от 5 до 15 Ки/км²) или
- ^{90}Sr – от 18,5 до 74 кБк/м² (от 0,5 до 2 Ки/км²), или
- $^{238,239,240}\text{Pu}$ – от 0,74 до 1,85 кБк/м² (от 0,02 до 0,05 Ки/км²), а

также территория с более низким уровнем загрязнения почвы вышеуказанными радионуклидами, где среднегодовая эффективная доза облучения населения от «чернобыльских» радионуклидов может превышать 1 мЗв/год.

Зона проживания с периодическим радиационным контролем.

Территория с уровнем загрязнения почв:

- ^{137}Cs – от 37 до 185 кБк/м² (от 1 до 5 Ки/км²) или
- ^{90}Sr – от 5,55 до 18,5 кБк/м² (от 0,15 до 0,5 Ки/км²), или
- $^{238,239,240}\text{Pu}$ – от 0,37 до 0,74 кБк/м² (от 0,01 до 0,02 Ки/км²).

Среднегодовая эффективная доза облучения населения от чернобыльских радионуклидов на этой территории не должна превышать 1 мЗв/год.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте территориальное распространение радиоактивного загрязнения по территории Республики Беларусь.

2. Что такое зона эвакуации (отчуждения)?

3. По каким критериям была выделена зона первоочередного отселения?

4. Охарактеризуйте основные радиологические показатели для выделения зоны последующего отселения зоны с правом на отселение, зоны проживания с периодическим радиационным контролем.

Тема 10

Особенности поведения «чернобыльских» радионуклидов в окружающей среде

10.1 Поведение чернобыльских радионуклидов в почве, вертикальная и горизонтальная миграция

10.2 Последствия катастрофы для растительного и животного мира

10.3 Загрязнение радионуклидами воздушной и водной сред

10.4 Радиологическая обстановка в АПК. Содержание радионуклидов в сельскохозяйственной продукции

Основные понятия, включённые в систему тренингов-тестирования: поведение чернобыльских радионуклидов в почве, вертикальная и горизонтальная миграция; коэффициенты накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr ; последствия катастрофы для животного мира; загрязнение радионуклидами воздушной и водной сред; допустимые для населения среднегодовые объёмные активности радионуклидов во вдыхаемом воздухе; радиологическая обстановка в АПК

10.1 Поведение чернобыльских радионуклидов в почве, вертикальная и горизонтальная миграция

К вертикальному перераспределению радионуклидов в почве могут приводить самые разнообразные процессы: перенос радионуклидов вглубь почвы вместе с атмосферными осадками под действием силы тяжести; перемещение растворов радионуклидов в мелких порах почвы под действием капиллярных сил; диффузионные процессы; миграция по корневым системам растений; деятельность почвенных животных; хозяйственная деятельность человека (перепашивание почвы и т. п.).

Горизонтальная миграция может происходить при переносе радионуклидов с воздушными и водными потоками.

Перемещаясь с воздушным потоком, радиоактивные вещества в другом месте вновь оседают на земную поверхность. Мелкие частицы почвы начинают подниматься в воздух при достижении критического значения скорости ветра: 5–6 м/с – для минеральных почв, 8–9 м/с – для осушенных торфяников.

10.2 Последствия катастрофы для растительного и животного мира

Из пищевой продукции леса наиболее загрязнены грибы и некоторые виды ягод (черника, клюква, голубика, брусника).

Содержание ^{137}Cs в этих растениях обычно превышает допустимые. В ближайшие 20–30 лет многие виды лесной продукции останутся загрязненными выше допустимых уровней (РДУ-99) на территории с плотностью загрязнения 150 кБк/м^2 (4 Ки/км^2) и более, что ограничит их использование.

Коэффициенты накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr травяной растительностью в зависимости от типа почвы и условий произрастания. Способность растений накапливать радионуклиды можно оценивать по величине коэффициента накопления (K_n). Он представляет собой отношение удельной активности растительной биомассы (A_p , Бк/кг) к удельной активности почвы в области корневого питания растения (A_n , Бк/кг):

$$K_n = \frac{A_p}{A_n} \quad (7)$$

Способность растения накапливать радионуклиды зависит также от вида растения и строения его корневой системы.

Последствия катастрофы для животного мира.

На территории Беларуси вне 30-километровой зоны ЧАЭС содержание радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в речной рыбе, как правило, не превышает РДУ (370 Бк/кг по ^{137}Cs и $3,7 \text{ Бк/кг}$ по ^{90}Sr). В непроточных водосмах, загрязненных радионуклидами, накопление ^{137}Cs в мышечной ткани рыб может достигать десятков и даже сотен тысяч Беккерель на килограмм.

У представителей сухопутной фауны поступление радионуклидов в организм существенно зависит от условий обитания.

10.3 Загрязнение радионуклидами воздушной и водной сред

Допустимые для населения среднегодовые объемные активности радионуклидов во вдыхаемом воздухе: ^{131}I – $7,3 \text{ Бк/м}^3$; ^{137}Cs – 27 Бк/м^3 ; $^{239,240}\text{Pu}$ – $0,0025 \text{ Бк/м}^3$. В настоящее время загрязнение воздуха радионуклидами в большинстве населенных пунктов Беларуси практически такое же, как до катастрофы.

Перераспределение радионуклидов происходит и в водных системах. В настоящее время содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в водах рек не превышает Республиканских допустимых уровней (РДУ-99). Лишь в периоды половодий возможно превышение этих уровней на территориях с высокой плотностью загрязнения черными радионуклидами.

10.4 Радиологическая обстановка в АПК. Содержание радионуклидов в сельскохозяйственной продукции

В Беларуси радиоактивному загрязнению с плотностью выше 37 кБк/м^2 по цезию-137 подверглось более 1,8 млн. гектаров сельскохозяйственных угодий, что составляет 20,8 % от общей площади, из которых 265 тыс. гектаров с плотностью загрязнения цезием-137 свыше 1480 кБк/м^2 , стронцием-90 – 111 кБк/м^2 , плутонием – более $3,7 \text{ кБк/м}^2$ были исключены из сельскохозяйственного оборота.

В настоящее время сельскохозяйственное производство в Беларуси ведется на 1296,8 тыс. га земель, загрязненных цезием-137 с плотностью более 37 кБк/м^2 . Особую сложность представляет ведение сельскохозяйственного производства на землях с плотностью выпадения цезия-137 $185\text{--}1480 \text{ кБк/м}^2$ (366 тыс. га), а также стронция-90 с плотностью $6\text{--}111 \text{ кБк/м}^2$ на площади 458 тыс. га.

Основные массивы загрязненных сельскохозяйственных угодий сосредоточены в Гомельской (740,6 тыс. га или 57,1 %) и Могилевской (338,7 тыс. га или 26,1 %) областях. В Брестской, Гродненской, Минской и Витебской областях их доля от общей площади загрязненных земель в республике составляет соответственно 7, 4; 4, 3; 5, 0 и 0,1 %.

В государстве создана система радиационного мониторинга почв. Ситуация по загрязнению сельскохозяйственных угодий периодически уточняется. За послеаварийный период возвращено в сельскохозяйственный оборот 14,6 тыс. га ранее выведенных из пользования земель.

Контрольные вопросы

1. Как рассчитываются коэффициенты накопления радионуклидов травяной растительностью в зависимости от типа почвы и условий произрастания?
2. Охарактеризуйте вертикальную и горизонтальную миграцию радионуклидов в почве.
3. Охарактеризуйте степень загрязнения радионуклидами воздушной и водной сред.
4. Дайте оценку радиологической обстановке в АПК.

Тема 11

Система радиационного контроля

11.1 Радиационный контроль и мониторинг как составная часть Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь

11.2 Структура сети радиационного контроля Минсельхозпрода Беларуси

Основные понятия, включённые в систему тренингов-тестирования: система радиационного контроля Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь; три зоны радиационного контроля; организации, осуществляющие радиационный контроль; порядок проведения радиационного контроля.

11.1 Радиационный контроль и мониторинг как составная часть Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь

Радиационный контроль и мониторинг – это система длительных регулярных наблюдений с целью оценки состояния радиационной обстановки, а также прогноза изменения ее в будущем. Радиационный мониторинг является составной частью Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь. На 12 дозпостах, расположенных в 100-километровых зонах влияния Игналинской, Чернобыльской, Ровенской и Смоленской АЭС, измерения проводятся круглосуточно, ежедневно, включая выходные и праздничные дни, с интервалом через три часа.

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.

Для населенных пунктов, таких как Брагин, Наровля, отмечается сезонное изменение МД гамма-излучения. Для остальных населенных пунктов, где МД гамма-излучения сравнима с доаварийной, ярко выраженных сезонных изменений МД не наблюдается.

11.2 Структура сети радиационного контроля Минсельхозпрода Беларуси

Система радиационного контроля разработана Министерством сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь.

Три зоны радиационного контроля на территории республики:

1) территория радиоактивного загрязнения – территория, где возникло долговременное загрязнение окружающей среды радиоактивными веществами с плотностью загрязнения почвы радионуклидами цезия-137 более 1 ки/кв. км, стронция-90 более 0,15 ки/кв. км – зона А;

2) территория вероятного радиационного воздействия выбросов АЭС сопредельных государств (Игналинская АЭС) – зона Б;

3) «Чистая» территория – территория, где плотность загрязнения почвы по цезию-137 менее 1 ки/кв.км, стронцию-90 менее 0,15 ки/кв. км, и на этой территории за последние 3 года не установлено ни одного случая содержания радионуклидов в продуктах питания, сельскохозяйственной продукции вышедействующих нормативных уровней – зона В.

Организации, осуществляющие радиационный контроль:

– государственная ветеринарная служба – продукция животноводства, производимая в общественном секторе и фермерских хозяйствах, в т. ч. реализуемая на экспорт; рационы кормления животных; продукция, реализуемая на рынках;

– агрохимическая служба – почва сельскохозяйственных и лесных угодий колхозов, совхозов и фермерских хозяйств; продукция растениеводства, в т. ч. корма; торф, применяемый в качестве удобрений;

– радиологические посты и лаборатории перерабатывающих предприятий – сырье, поступающее на переработку, готовая продукция;

– радиологи хозяйств – прижизненный контроль сельскохозяйственных животных; отбор и доставка проб продукции животноводства и растениеводства в соответствующие радиологические лаборатории.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятиям радиационный контроль и мониторинг.

2. Назовите организации, осуществляющие радиационный контроль.

3. Охарактеризуйте три зоны радиационного контроля.

Тема 12

Профилактика последствий радиоактивного загрязнения экологической среды

- 12.1 Международная шкала аварий на АЭС
- 12.2 Дезактивация радиоактивных территорий

Основные понятия, включённые в систему тренингов-тестирования: международная шкала ядерных событий (INES); «Временные санитарные правила обращения с отходами дезактивации, образующимися в результате работ по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС» (СПОД-98); технологии обращения с твердыми ОД; технология обработки отходов из древесины; жидкие радиоактивные отходы (ЖРО).

12.1 Международная шкала аварий на АЭС

Международная шкала ядерных событий (INES). Шкала INES позволяет оценивать все события на предприятиях ЯТЦ по восьмibalльной шкале – от 0 до 7. События, несущественные с точки зрения радиационной опасности, классифицируют как события *нулевого уровня*. Их называют *отклонениями*. Остальная часть шкалы разделена на две части. Нижняя часть, охватывающая три уровня (1–3), соответствует инцидентам (происшествиям), а верхняя часть, охватывающая четыре уровня (4–7) – авариям. Группа событий в нижней части шкалы представляет собой лишь потенциальную угрозу для населения и окружающей среды. Появление таких событий свидетельствует об ухудшении работы АЭС. События уровней 4–7 представляют непосредственную опасность для населения и окружающей среды. К этой группе относятся аварии, которые приводят к превышению допустимых уровней облучения населения. До настоящего времени самый высокий балл по уровню радиационной опасности для населения и окружающей среды получила только Чернобыльская авария. События, влияющие лишь на эксплуатационные возможности турбины или генератора, рассматривают как *выходящие за рамки шкалы*.

12.2 Дезактивация радиоактивных территорий

Негативным последствием дезактивации 1986–1989 годов явилось создание в Беларуси более 80 пунктов захоронения ОД без учета

геолого-гидрологических условий при выборе мест их расположения. Объемы дезактивационных работ в последующие годы были сокращены как в Беларуси, так и на Украине и в России.

С целью создания общегосударственной нормативно-правовой базы для предприятий, занимающихся работами по дезактивации и обращению с отходами дезактивации, в 1998 году введены в действие *«Временные санитарные правила обращения с отходами дезактивации, образующимися в результате работ по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС» (СПОД-98).*

Технологии обращения с твердыми ОД определяются их физико-химическими свойствами. Уменьшение объема твердых радиоактивных отходов осуществляется путем компактирования. Применение такой технологии уменьшения объема отходов, как сжигание, не получило большого распространения в связи с необходимостью создания специальной установки и усложнения последующих операций по обращению с образующейся золой. *В Беларуси нашла применение технология обработки отходов из древесины, которые образуются в результате разборки строений на загрязненных территориях.*

Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО), образующиеся при дезактивации оборудования промышленных предприятий, характеризуются средней удельной активностью 3,7 кБк/л и сложным химическим составом. Специфика этих отходов определяется применением для дезактивации поверхностно-активных и комплексообразующих веществ. Особенностью ЖРО является также высокая концентрация солей и взвешенных частиц. Основными технологическими процессами при переработке ЖРО являются удаление поверхностно-активных веществ методом вакуумной флотации и концентрирование растворов методом выпаривания.

Контрольные вопросы

1. С какой целью созданы «Временные санитарные правила обращения с отходами дезактивации, образующимися в результате работ по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС» (СПОД-98)?
2. Охарактеризуйте Международную шкалу ядерных событий (INES).

Тема 13

Медицинские последствия Чернобыльской катастрофы для Республики Беларусь

13.1 Дозы облучения населения, полученные в результате катастрофы на ЧАЭС

13.2 Онкологические заболевания, лучевая болезнь и лучевая катаракта, лейкозы

Основные понятия, включённые в систему тренинг-тестирования: дозы облучения населения, полученные в результате катастрофы на ЧАЭС; онкологические заболевания; лучевая болезнь и лучевая катаракта; лейкозы; рак щитовидной железы; рак молочной железы; лейкозы; лучевая катаракта.

13.1 Дозы облучения населения, полученные в результате катастрофы на ЧАЭС

Коллективные дозы облучения щитовидной железы. Наиболее облученной когортой среди всех жителей Беларуси, подвергшихся аварийному облучению, являются участники ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС (ликвидаторы, аварийные рабочие).

В соответствии с законодательством к ликвидаторам относятся граждане, принимавшие участие в работах в 1986–1989 годах в пределах зоны эвакуации (отчуждения), а также работавшие в 1986–1987 годах в зонах первоочередного и последующего отселения. Министерством здравоохранения СССР были установлены следующие предельно-допустимые дозы аварийного облучения для ликвидаторов: 1986 год – 250 мЗв (до 21 мая для военнослужащих – 500 мЗв), 1987 год – 100 мЗв, 1988 и 1989 годы – по 50 мЗв.

По состоянию на начало 1996 года в Беларуси статус ликвидаторов имели 113 тыс. человек, из них 91 тыс. человек была внесена в Чернобыльский регистр. Анализ данных регистра показал, что официальные записи о дозах облучения колеблются в широком диапазоне. Максимальные дозы внешнего облучения получили ликвидаторы 1986 года – средняя доза составила 60 мГр.

Дозы облучения ликвидаторов и эвакуированного населения. Большинство ликвидаторов 1986–1987 годов получило дозы не более 100 мГр (80 % в 1986 году и 96 % в 1987 году). Подавляющее число белорусских ликвидаторов не принимало участия в работах на самой

Чернобыльской АЭС и в пределах промплощадки, поэтому средние дозы облучения оказались ниже, чем у ликвидаторов России и Украины.

Годовая коллективная доза для жителей территории радиоактивного загрязнения составляет около 210 чел.-Зв, средняя индивидуальная – 0,15 мЗв. Для населения Беларуси в целом основные дозы облучения были сформированы в течение первых 10 лет после аварии.

13.2 Онкологические заболевания, лучевая болезнь и лучевая катаракта, лейкозы

Рак щитовидной железы. За период с 1986 по 2004 год среди *детей и подростков*, облученных в возрасте до 18 лет, выявлено 2430 случаев рака щитовидной железы, 2399 из них диагностировано с 1990 года.

Рак молочной железы. На загрязненных радионуклидами территориях также отмечалось существенное «омоложение» заболеваемости раком молочной железы – пик заболеваемости достигался на 15 лет раньше и соответствовал возрастной группе 55–59 лет, среди женщин контрольной группы – 70–74 года.

Лучевая катаракта

Среди болезней глаза и его придаточного аппарата в период 1993–2003 гг. среди мужчин-ликвидаторов отмечался достоверный рост заболеваемости катарактой: ежегодно заболеваемость увеличивалась в среднем на 6 %.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте дозы облучения населения, полученные в результате катастрофы на ЧАЭС.
2. Какие онкологические заболевания распространены вследствие Чернобыльской катастрофы для Республики Беларусь?

Тема 14

Государственные мероприятия, направленные на ликвидацию последствий катастрофы на ЧАЭС

14.1 Нормативно-правовая база Республики Беларусь по основным направлениям преодоления последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС

14.2 Защитные мероприятия в лесном и сельском хозяйстве

Основные понятия, включённые в систему тренингов-тестирования: нормативно-правовая база Республики Беларусь по основным направлениям преодоления последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС; защитные мероприятия в лесном и сельском хозяйстве.

14.1 Нормативно-правовая база Республики Беларусь по основным направлениям преодоления последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС

Закон «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС».

Закон «О правовом режиме территорий, подвергшихся загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС»

Закон «О радиационной безопасности населения».

Основные нормативные документы в области радиационной безопасности и защиты населения

1 Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия и стронция в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99).

2 Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия и стронция в сельскохозяйственном сырье.

3 Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000).

4 Регламент лесохозяйственной деятельности на загрязненных территориях.

5 Каталог средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов РБ (2004 год).

6 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСП-2002).

7 Республиканские допустимые уровни содержания ¹³⁷Cs в древесине, продукции из древесины и прочей пищевой продукции лесного хозяйства.

8 Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия и стронция в основных видах кормов.

Создана система радиационного контроля.

Произведены гамма- и бета- радиометры (более 4000), дозиметры гамма-излучения, гамма- и бета- спектрометры.

Комплекс мер по повышению уровня медицинского обслуживания населения в загрязненных радионуклидами районах.

14.2 Защитные мероприятия в сельском и лесном хозяйстве

Защитные меры, осуществляемые в настоящее время в лесном хозяйстве: регламентация лесохозяйственной деятельности; радиационный контроль лесной продукции; выращивание лесов на землях, неперспективных для сельскохозяйственного производства; проведение противопожарных мероприятий.

Защитные мероприятия в сельском хозяйстве: подбор культур и сортов с минимальным уровнем накопления радионуклидов; обработка почвы: известкование кислых почв, внесение удобрений, глубокая вспашка, комплексные мероприятия по защите сельскохозяйственных растений от вредителей, болезней и сорняков, регулирование водного режима переувлажнённых почв; обеспечение животноводства кормами с содержанием радионуклидов, допустимым для получения мясной и молочной продукции, соответствующей РДУ; введение в рацион специальных добавок, снижающих переход радионуклидов в продукцию животноводства; технологическая переработка продуктов животноводства; перепрофилирование отраслей животноводства (замена молочного скотоводства на мясное или производство крупного рогатого скота на свиноводство, птицеводство и т. д.).

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные законы по направлениям преодоления последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС.
2. Назовите основные нормативные документы в области радиационной безопасности и защиты населения.
3. Какие защитные мероприятия применяются в лесном и сельском хозяйстве?

Вопросы к зачёту

1. Радиоактивность и ядерные излучения.
2. Строение атома.
3. Радиоактивность
4. Искусственная радиоактивность, виды ионизирующих излучений.
5. Открытие искусственной радиоактивности.
6. Закон радиоактивного распада.
7. Активность, единицы измерения.
8. Основные виды ионизирующих излучений.
9. Основы дозиметрии и радиометрии.
10. Основные дозиметрические величины.
11. Способы измерения ионизирующих излучений и определения доз облучения.
12. Дозы облучения.
13. Формирование доз внутреннего и внешнего облучения человека.
14. Поглощенная доза излучения (D).
15. Эквивалентная доза облучения (H).
16. Эффективная доза облучения (E).
17. Радиационный фон окружающей среды.
18. Космическое излучение.
19. Радиация земной коры.
20. Ионизирующие излучения искусственного происхождения.
21. Действие ионизирующего излучения на биологические молекулы и клетки.
22. Острые и отдаленные последствия облучения.
23. Лучевая болезнь человека.
24. Острая лучевая болезнь при относительно равномерном облучении.
25. Местное (локальное) облучение в больших дозах, концепция «критического органа».
26. Типы ядерных реакторов.
27. Перспективы развития ядерной энергетики.
28. Ядерный топливный цикл и проблема радиоактивных отходов.
29. Радиоактивные отходы.
30. Испытания ядерного оружия.
31. Основные виды ядерного оружия.
32. Испытательные ядерные полигоны.
33. Последствия ядерных взрывов.

34. Формирование зон загрязнения радионуклидами в результате наземных и воздушных ядерных взрывов.

35. Загрязнение радионуклидами территории Республики Беларусь.

36. Деление территории Республики Беларусь на зоны радиоактивного загрязнения.

37. Особенности поведения «чернобыльских» радионуклидов в окружающей среде.

38. Поведение чернобыльских радионуклидов в почве, вертикальная и горизонтальная миграция.

39. Последствия катастрофы для растительного и животного мира. Загрязнение радионуклидами природной растительности.

40. Допустимые для населения среднегодовые объемные активности радионуклидов во вдыхаемом воздухе.

41. Радиологическая обстановка в АПК.

42. Система радиационного контроля.

43. Радиационный контроль и мониторинг как составная часть Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь.

44. Структура сети радиационного контроля Минсельхозпрода Беларуси.

45. Система радиационного контроля Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь.

46. Международная шкала аварий на АЭС.

47. Дезактивация радиоактивных территорий.

48. Экономические последствия Чернобыльской катастрофы для Республики Беларусь.

49. Медицинские последствия Чернобыльской катастрофы для Республики Беларусь.

50. Дозы облучения населения, полученные в результате катастрофы на ЧАЭС.

51. Онкологические заболевания, лучевая болезнь и лучевая катаракта, лейкозы.

52. Государственные мероприятия, направленные на ликвидацию последствий катастрофы на ЧАЭС.

53. Нормативно-правовая база Республики Беларусь по основным направлениям преодоления последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС.

54. Защитные мероприятия в лесном и сельском хозяйстве.

Литература

1. Ковалева, Т. Н. Основы радиозкологии и безопасной жизнедеятельности / Т. Н. Ковалева, Г. А. Соколик, С. В. Овсянникова. – Мн.: Тонпик, 2008. – 366 с.
2. Переволоцкий, А. Н. Радиозкология: пособие / А. Н. Переволоцкий, А. В. Гаврилов, И. М. Булавик. – Мн.: НПООО «Пион», 2001. – 112 с.
3. Руководство по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель РБ на 1997 – 2000 гг. / под ред. И. М. Богdevича. – Мн.: Академия аграрных наук, 1997. – 78 с.
4. Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси / под общ. ред. В. И. Парфенова, Б. И. Якушева. – Мн.: Наука і тэхніка, 1995. – 582 с.
5. Радиационная безопасность. Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000). Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСП-2002). – Мн.: Министерство здравоохранения РБ, 2003. – 180 с.
6. 20 лет после Чернобыльской катастрофы: последствия в Республике Беларусь и их преодоление. Национальный доклад / под ред. В. Е. Шевчука и В. Л. Гурачевского. – Мн.: Издательство «Беларусь», 2006. – 111 с.
7. Правила ведения агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2002–2005 гг. / под ред. И. М. Богdevича. – Мн.: Министерство сельского хозяйства и природопользования РБ, 2002. – 73 с.
8. Последствия Чернобыльской катастрофы в Республике Беларусь. Национальный доклад / под ред. Е. Ф. Конопли, И. В. Ролевича. – Мн.: МЧС РБ – АН Беларуси, 1996. – 95 с.
9. Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях. Труды Вопросы социальной защиты граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС. – Гомель: Комчернобыль при Совете Министров Республики Беларусь – РНИУП «Институт радиологии», 2005. – 36 с.
10. Атлас загрязнения Европы цезием после Чернобыльской аварии. – Люксембург: Европейская Комиссия, 1998. – 176 с.
11. Алексахин, Р. М. Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах / Р. М. Алексахин, М. А. Нарышкин. – М.: Наука, 1977. – 144 с.
12. Анненков, Б. Н. Основы сельскохозяйственной радиологии / Б. Н. Анненков, Е. В. Юдинцева. – М.: Агропромиздат, 1991. – 287 с.

13. Василенко, О. И. Радиационная экология / О. И. Василенко. – М.: Медицина, 2004. – 216 с.
14. Гусев, Н. Г. Радиоактивные выбросы в биосфере: справочник / Н. Г. Гусев, В. А. Беляев. – М.: Энергоиздат, 1991. – 256 с.
15. Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз / Д. А. Кривоуцкий [и др.]. – М.: Наука, 1988. – 240 с.
16. Животный мир в зоне аварии Чернобыльской АЭС / под ред. Л. М. Сушени, М. М. Пикулика, А. Е. Пленина. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 263 с.
17. Ильенко, А. И. Экология животных в радиационном биогеоценозе / А. И. Ильенко, Т. П. Крапивко. – М.: Наука, 1989. – 224 с.
18. Информация об аварии на ЧАЭС и её последствиях, подготовленная для МАГАТЭ // Атомная энергия. – 1986. – Т. 61. – Вып. 4. – С. 301–320.
19. Корнеев, Н. А. Основы радиэкологии сельскохозяйственных животных / Н. А. Корнеев, А. Н. Сироткин. – М.: Энергоиздат, 1987. – 208 с.
20. Кривоуцкий, Д. А. Радиэкология сообществ наземных животных / Д. А. Кривоуцкий. – М.: Энергоиздат, 1983. – 87 с.
21. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / под общей ред. В. А. Ипатьева. – Гомель, 1994. – 454 с.
22. Методические указания по определению ^{90}Sr и ^{137}Cs в почвах и растениях / под ред. Л. М. Державина // Центральный институт агрохимического обслуживания сельского хозяйства (ЦИНАО). – М.: ЦИНАО, 1985. – 64 с.
23. Переволоцкий, А. Н. Радиэкология / А. Н. Переволоцкий, А. В. Гаврилов, И. М. Булавик. – Гомель, 1998. – 99 с.
24. Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси (в связи с аварией на Чернобыльской АЭС) / под ред. В. И. Парфенова, Б. И. Якушева. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 582 с.
25. Сапожников, Ю. А. Радиоактивность окружающей среды. Теория и практика / Ю. А. Сапожников, В. А. Алиев, С. Н. Калмыков. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 286 с.
26. Сельскохозяйственная радиэкология / под ред. Р. М. Алексахина, Н. А. Корнеева. – М.: Экология, 1991. – 398 с.
27. Смирнов, С. Н. Радиационная экология. Физика ионизирующих излучений / С. Н. Смирнов, Д. Н. Герасимов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 326 с.
28. Тихомиров, Ф. А. Действие ионизирующих излучений на экологические системы / Ф. А. Тихомиров. – М.: Атомиздат, 1972. – 176 с.

Производственно-практическое издание

ТИМОФЕЕВА Татьяна Анатольевна

РАДИОЭКОЛОГИЯ

Практическое руководство
для студентов специальности 1-33 01 02
«Геоэкология»

Редактор В. И. Шкредова
Корректор В. В. Калугина

Подписано в печать 08.02.2012. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,8.
Уч.-изд. л. 3,0. Тираж 60 экз. Заказ № 98.

Издатель и полиграфическое исполнение :
учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины».
ЛИ № 02330/0549481 от 14.05.2009.
Ул. Советская, 104, 246019, Гомель.