Г.А. Чернуха, Н.В. Лазаревич, Т.В. Лаломова

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Рекомендовано Учебно-методическим объединением высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию в области сельского хозяйства в качестве учебного пособия для студентов сельскохозяйственных высших учебных заведений

КОМЧЕРНОБЫЛЬ

Горки 2005

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение…….. 3
1. Радиоактивные превращения ядер……...5
1.1. Строение вещества……. 5
1.2. Явление радиоактивности ……... 10
1.3. Активность, единицы измерения……..…….11
1.4. Закон радиоактивного распада…….. 12
1.5. Виды радиоактивного распада…… 15
2. Характеристика ионизирующих излучений…… 20
2.1. Свойства ядерных излучений…… 20
2.2. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом……... 22
2.3. Методы регистрации ионизирующих излучений…… 24
3. Дозиметрические величины, единицы измерения……29
3.1. Понятие о дозе…….. 29
4. Действие ионизирующих излучений на биологические системы….. 32
4.1. Этапы действия ионизирующих излучений на биологические объекты……32
4.2. Радиочувствительность сельскохозяйственных растений, животных и человека…….. 52
5.Основы радиационной безопасности……70
5.1. Законодательство Республики Беларусь по обеспечению радиационной безопасности населения…… 70
5.2. Концепция защиты населения Республики Беларусь при радиационных авариях на АЭС…… 70
5.3. Принципы и критерии радиационной безопасности…… 72
5.4. Внешнее и внутреннее облучение человека…… 74
6. Радиоэкологическая обстановка в Республике Беларусь…….. 76
6.1. Источники ионизирующих излучений и загрязнения окружающей среды……. 76
6.2. Радиационная обстановка до и после аварии на ЧАЭС……78
6.3. Территория радиоактивного загрязнения, зонирование территории…… 81
7. Поведение радионуклидов в окружающей среде…….... 83
7.1. Миграция радионуклидов в биосфере и в сфере сельскохозяйственного производства……... 83
7.2. Поведение радионуклидов в почве……84
7.3. Поступление радионуклидов в растения……. 96
7.4. Накопление радионуклидов растительностью лесных фитоценозов…… 107
7.5. Пути поступления и особенности распределения радионуклидов в организме животных и птицы…… 109
7.6. Переход радионуклидов из кормов в молоко и мясо……. 115
8. Агропромышленное производство в условиях радиоактивного за-

грязнения ……. 118
8.1. Общие принципы организации агропромышленного производства……. 118
8.2. Мероприятия по уменьшению содержания радионуклидов в продукции растениеводства…….. 120
8.2.1. Инвентаризация сельскохозяйственных угодий по плотности загрязнения радионуклидами ……120
8.2.2. Прогноз содержания радионуклидов в урожае ……121
8.2.3. Ограничения по плотности загрязнения почв при возделывании различных сельскохозяйственных культур……...122
8.2.4. Система обработки почв в условиях радиоактивного загрязнения……... 123
8.2.5. Принципы подбора культур и сортов……. 126
8.2.6. Применение удобрений, известкование кислых почв…….. 130
8.2.7. Особенности применения средств защиты в условиях радиоактивного загрязнения……. 137
8.2.8. Технологические приемы обработки растениеводческой продукции, направленные на снижение содержания в ней радионуклидов …… 138
8.2.9. Особенности использования сенокосно-пастбищных угодий…. 140
8.3. Мероприятия по уменьшению содержания радионуклидов в продуктах животноводства…… 145
8.4. Радиационный контроль природной среды и сельскохозяйственной продукции …… 149
8.5. Радиационная безопасность при проведении сельскохозяйственных работ……. 153
Заключение……..156
Приложения 158
Литература…….173

ВВЕДЕНИЕ

В результате катастрофы на Чернобыльской АЭС радиоактивному загрязнению подверглось более 1,8 млн. га сельхозугодий, т.е. около 20% их общей площади, из которых 106 тыс. га были исключены из землепользования в первый год после катастрофы. Всего за период с 1986 по 1989 годы из оборота было выведено 256,7 тыс. га сельхозугодий. С 1990 года земли с плотностью загрязнения Cs-137 более 1480 кБк/м^2 полностью исключены из землепользования.

Основные массивы загрязненных пахотных земель и луговых угодий сосредоточены в Гомельской (66%) и Могилевской (24%) областях. В Брестской, Гродненской и Минской областях их доля от общей площади загрязненных земель в республике составляет 4,5; 3,0 и 2,5 % соответственно.

Несмотря на то, что после катастрофы на ЧАЭС прошло более 19 лет, проблема получения сельскохозяйственной продукции с допустимым содержанием радионуклидов по-прежнему актуальна. Это обусловлено тем, что радионуклиды цезий-137 и стронций-90 являются долгоживущими, их периоды полураспада составляют около 30 лет, и основная часть этих радионуклидов до настоящего времени находится в верхних слоях почвы, т.е. самоочищение почвы за счет вертикальной миграции почти не происходит. Влиять на снижение содержания радионуклидов в продуктах питания можно на трех этапах: 1 – почва-растение; 2 – корм-животное; 3 – доработка и переработка сельскохозяйственного сырья. Ключевым в трофической цепи является звено почва-растение. Связав радионуклиды в почве, мы останавливаем их миграцию. Контрмеры, применяемые на данном этапе, являются наиболее рациональными и оправданными.

По предварительным и, возможно, заниженным оценкам ущерб, нанесенный Беларуси чернобыльской катастрофой в расчете на 30-летний период ее преодоления, оценивается в 235 млрд. долларов США. В структуре общего ущерба наибольшую долю (81,6 %) занимают затраты, связанные с поддержанием функционирования производства и осуществлением защитных мер, которые составляют 191,7 млрд. долларов. На долю прямых и косвенных потерь приходится около 30 млрд. долларов (12,6 %). Прямые потери включают стоимость выведенной из использования составной части национального богатства нашей страны. К косвенным отнесены потери, обусловленные влиянием экономических и социальных факторов. Упущенная выгода оценивается в 13,7 млрд. долларов.

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 2001–2005 гг. и на период до 2010 года. Ей предшествовали две национальные государственные программы. В действующей Государственной программе предусматривается решение следующих основных задач:

- развитие и совершенствование системы медицинской диспансеризации пострадавшего населения на основе научно-практических рекомендаций;
- реализация защитных мероприятий на наиболее загрязненных территориях;
- обеспечение в полном объеме мер по социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС;
- снижение социально-психологических последствий воздействия на население чернобыльской катастрофы;
- получение исчерпывающей объективной информации о радиоактивном загрязнении объектов окружающей среды и уровнях радиационного воздействия на население для обоснования и корректировки принимаемых решений;
- обеспечение производства сельскохозяйственной продукции с содержанием радионуклидов, не превышающим допустимых уровней, и снижения радиационного воздействия на население;
- повышение степени благоустройства загрязненных населенных пунктов, создание нормальных условий проживания;
- проведение научных исследований, обеспечивающих обоснованное планирование и реализацию комплекса проводимых мероприятий;
- организация международного сотрудничества по проблемам последствий катастрофы.

1. РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЯДЕР

1.1. Строение вещества

Все в природе состоит из простых и сложных веществ. К простым

веществам относятся химические элементы, к сложным – химические соединения. Известно, что вещества в окружающем нас мире состоят из атомов, которые являются наименьшей частью химического элемента. Атом – это мельчайшая частица вещества, определяющая его химические свойства, он имеет сложное внутреннее строение. В природе только инертные газы обнаруживаются в виде атомов, так как их внешние оболочки замкнутые, все остальные вещества существуют в виде молекул.

В 1911 г. Э. Резерфорд предложил планетарную модель атома, которая была развита Н Бором (1913 г.). По общепринятой модели строения атома в нем различают две области: тяжелое, положительно заряженное ядро, находящееся в центре, в котором сосредоточена почти вся масса атома, и легкую электронную оболочку, состоящую из отрицательно заряженных частиц – электронов, с огромной скоростью вращающихся вокруг ядра.

Электрон (e^-) – устойчивая элементарная частица с массой покоя равной $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг или 0,000548 а.е.м. (атомная единица массы – это безразмерная величина атомной массы, которая показывает, во сколько раз атом данного элемента или частица тяжелее $^1/_{12}$ части атома изотопа углерода-12; энергетический эквивалент 1 а.е.м. составляет 931 МэВ). Электрон несет один элементарный отрицательный заряд электричества ($q=1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл), т. е. наименьшее количество электричества, встречающееся в природе. Исходя из этого заряд электрона принят за одну элементарную единицу электрического заряда.

В зависимости от энергии, которая удерживает электроны при вращении вокруг ядра, они группируются на разных орбитах (уровнях или слоях). Число слоев у различных атомов неодинаковое. В атомах с большой массой число орбит достигает семи. Их обозначают цифрами, или буквами латинского алфавита, начиная обозначение от ядра: K, L, M, N, O, P, Q. Число электронов в каждом слое строго определенное. Так, К-слой имеет не более 2 электронов, L-слой – до 8, М-слой – до 18, N-слой – 32 электрона и т. д.

Размеры атома определяются размерами его электронной оболочки, которая не имеет строго определенных границ. Приблизительно линейные размеры атома составляют 10^{-10} м.

Ядро – центральная массивная часть атома, состоящая из протонов и нейтронов, которая заряжена положительно. В ядре сосредоточена почти вся масса атома (более 99,95 %). Суммарное количество электронов на орбитах всегда равно сумме протонов в ядре. Например, атом кислорода содержит 8 протонов в ядре и имеет 8 электронов на орбитах, атом свинца – 82 протона в ядре и 82 электрона на орбитах. Вследствие равенства суммы положительных и отрицательных зарядов атом представляет собой электрически нейтральную систему. На каждый из движущихся вокруг ядра электронов действуют две равные,

противоположно направленные силы: кулоновская сила притягивает электроны к ядру, а равная ей центробежная сила инерции стремится "вырвать" электрон из атома. Кроме того, электроны, двигаясь (вращаясь) вокруг ядра по орбите, одновременно обладают собственным моментом движения, который называют спином, упрощенно представляемый как вращение подобное волчку вокруг собственной оси. Спины отдельных электронов могут быть ориентированы параллельно (вращение в одну и ту же сторону) и антипараллельно (вращение в разные стороны). В упрощенном виде все это обеспечивает устойчивое движение электронов в атоме.

Известно, что на связь электрона с ядром действует не только кулоновская сила притяжения и центробежная сила инерции, но и сила отталкивания других электронов. Данный эффект называют экранировкой. Чем дальше электронная орбита от ядра, тем сильнее экранировка находящихся на ней электронов и тем слабее энергетическая связь ядро–электрон. На внешних орбитах энергия связи электронов не превышает 1-2 эВ, тогда как у электронов К-слоя она во много раз больше и возрастает с увеличением атомного номера элемента. Например, у углерода энергия связи электронов К-слоя составляет 0,28 кэВ, у стронция – 16 кэВ, у цезия – 36 кэВ, у урана – 280 кэВ. Поэтому электроны внешней орбиты больше подвержены воздействию внешних факторов, в частности, излучений низкой энергии. При сообщении электронам извне дополнительной энергии они могут переходить из одного энергетического уровня на другой или даже покидать пределы данного атома. Если энергия внешнего воздействия будет слабее энергии связи электрона с ядром, то электрон может только перейти с одного энергетического уровня на другой. Такой атом остается нейтральным, однако он отличается от остальных атомов этого химического элемента избытком энергии. Атомы, обладающие избытком энергии, называют возбужденными, а переход электронов с одного энергетического уровня на другой, более удаленный от ядра, – процессом возбуждения. Поскольку в природе любая система стремится перейти в устойчивое состояние при котором энергия ее будет наименьшей, то и атом через некоторое время переходит из возбужденного состояния в основное (первоначальное). Возвращение атома в основное состояние сопровождается выделением избыточной энергии. Переход электронов с внешних орбит на внутренние сопровождается излучением с длиной волны, характерной только для данного перехода с одного энергетического уровня на другой. Переходы электронов в пределах наиболее удаленных от ядра орбит дают излучение, состоящее из ультрафиолетовых, световых и инфракрасных лучей. При сильных внешних воздействия, когда энергия превышает энергию связи электронов с ядром, электроны вырываются из атома и удаляются за его пределы. Атом, лишившийся одного или нескольких электронов,

превращается в положительный ион, а “присоединивший” к себе один или несколько электронов – в отрицательный ион. Следовательно, на каждый положительный ион образуется один отрицательный ион, т. е. возникает пара ионов. Процесс образования ионов из нейтральных атомов называется **ионизацией**. Атом в состоянии иона существует в обычных условиях чрезвычайно короткий промежуток времени. Свободное место на орбите положительного иона заполняется свободным электроном (электроном, не связанным с атомом), и атом вновь становится нейтральной системой. Этот процесс носит название рекомбинации ионов (деионизация) и сопровождается выделением избыточной энергии в виде излучения. Энергия, выделяющаяся при рекомбинации ионов, численно приблизительно равна энергии, затраченной на ионизацию.

Протон (p) – стабильная элементарная частица с массой равной $1{,}6725 \cdot 10^{-27}$ кг или 1,00758 а.е.м., которая примерно в 1840 раз больше массы электрона. Заряд протона положителен и по величине равен заряду электрона. Атом водорода представляет собой ядро, содержащее один протон, вокруг которого вращается один электрон. Если “сорвать” этот электрон, то оставшаяся часть атома и будет протоном, поэтому протон часто определяют как ядро водорода.

Каждый атом любого элемента содержит в ядре определенное число протонов, которое постоянно и определяет физические и химические свойства элемента. Например, в ядре атома серебра их 47, в ядре урана – 92. Число протонов в ядре (Z) называют атомным номером или зарядовым числом, оно соответствует порядковому номеру элемента в периодической системе Д. И. Менделеева.

Нейтрон (n) – электрически нейтральная элементарная частица с массой незначительно превышающей массу протона и равной $1{,}6749 \cdot 10^{-27}$ кг или 1,00898 а.е.м. Нейтроны устойчивы только в составе стабильных атомных ядер. Свободные нейтроны распадаются на протоны и электроны.

Нейтрон, вследствие своей электрической нейтральности, не отклоняется под действием магнитного поля, не отталкивается атомным ядром и, следовательно, обладает большой проникающей способностью, что создает серьезную опасность как фактор биологического действия излучения. Число нейтронов, находящихся в ядре, дает только в основном физическую характеристику элемента, так как в разных ядрах одного и того же химического элемента может быть разное число нейтронов (от 1 до 10). В ядрах легких устойчивых элементов число протонов относится к числу нейтронов как 1:1. С увеличением атомного номера элемента (начиная с 21-го элемента – скандия) в его атомах число нейтронов превышает число протонов. В самых тяжелых ядрах число нейтронов в 1,6 раза больше числа протонов.

Протоны и нейтроны – составные части ядра, поэтому для удобства

их называют нуклонами. **Нуклон** (от лат. nucleus – ядро) – общее наименование для протонов и нейтронов ядра. Также, когда говорят о конкретном атомном ядре, используют термин нуклид. **Нуклид** – любое атомное ядро с заданным числом протонов и нейтронов.

Обозначая нуклиды или атомы, пользуются символом элемента, которому принадлежит ядро, и указывают сверху массовое число – A, внизу – атомный (порядковый) номер – Z в форме индексов ${}^{A}_{Z}Э_{N}$, где Э – символ химического элемента. A показывает число нуклонов, из которых состоит ядро атома (A = Z + N). Z показывает не только заряд ядра и порядковый номер, но и число протонов в ядре и соответственно число электронов в атоме, т.к. атом в целом нейтрален. N – число нейтронов в ядре, которое чаще всего не указывается. Например, ${}^{137}_{55}Cs$ – радиоактивный изотоп цезия, A = 137, следовательно ядро состоит из 137 нуклонов; Z = 55, значит в ядре 55 протонов и, соответственно, 55 электронов в атоме; N = 137 – 55 = 82 – это число нейтронов в ядре. Порядковый номер иногда опускают, так как символ элемента вполне определяет его место в периодической системе (например, Cs-137, He-4). Линейные размер ядра атома равны 10^{-15}-10^{-14} м, что составляет 0,0001 диаметра всего атома.

Протоны и нейтроны удерживаются внутри ядра силами, называемыми **ядерными**. По своей интенсивности они намного мощнее электрических, гравитационных и магнитных сил. Ядерные силы являются короткодействующими с радиусом действия 10^{-14}–10^{-15} м. Они проявляются одинаково между протоном и нейтроном, протоном и протоном, нейтроном и нейтроном. С увеличением расстояния между нуклонами ядерные силы очень быстро уменьшаются и становятся практически равными нулю. Ядерные силы обладают свойством насыщения, т. е. каждый нуклон взаимодействует только с ограниченным числом соседних нуклонов. Поэтому при увеличении числа нуклонов в ядре ядерные силы значительно ослабевают. Этим объясняется меньшая устойчивость ядер тяжелых элементов, в которых содержится значительное число протонов и нейтронов.

Чтобы разделить ядро на составляющие его протоны и нейтроны и удалить их из поля действия ядерных сил, необходимо совершить работу, т.е. затратить энергию. Эта энергия называется **энергией связи ядра**. При образовании ядра из нуклонов наоборот выделяется энергия связи.

Если рассчитать массу ядра, например гелия, по формуле

$$m_я = m_p N_p + m_n N_n,$$

где $m_я$ – масса ядра; m_p – масса протона; N_p – число протонов; m_n – масса нейтрона; N_n – число нейтронов, то она будет равна $1{,}0076 \cdot 2 + 1{,}0089 \cdot 2 = 4{,}033$ а.е.м.

Вместе с тем фактическая масса ядра гелия равна 4,003 а.е.м. Та-

ким образом, фактическая масса ядра гелия оказывается меньше расчетной на величину 0,03 а.е.м. и в этом случае говорят, что ядро имеет дефект массы (недостаток массы). Разницу между расчетной и фактической массой ядра называют дефектом массы (Δm). Дефект массы показывает, насколько прочно связаны частицы в ядре, а также сколько энергии выделилось при образовании ядра из отдельных нуклонов. Связать массу с энергией можно с помощью уравнения, выведенного А. Эйнштейном:

$$\Delta E = \Delta m c^2,$$

где ΔE – изменение энергии; Δm – дефект массы; c – скорость света.

Учитывая, что 1 а.е.м. = $1{,}661 \cdot 10^{-27}$ кг, а в ядерной физике за единицу энергии принят электрон-Вольт (эВ), причем 1 а.е.м. эквивалентна 931 МэВ, то энергия, которая выделится при образовании ядра гелия будет равна 28 МэВ. Если бы существовал способ разделения ядра атома гелия на два протона и два нейтрона, то для этого потребовалось бы затратить не менее 28 МэВ энергии.

Энергия связи ядер соразмерно возрастает с увеличением числа нуклонов, однако не строго пропорционально их числу. Например, энергия связи ядра азота – 104,56 МэВ, а урана – 1800 МэВ.

Средняя энергия связи, приходящаяся на один нуклон, называется **удельной энергией связи**. Для гелия она составит 28:4 = 7 МэВ. Если не считать самых легких ядер (дейтерий, тритий), то энергия связи на один нуклон составляет для всех ядер примерно 8 МэВ.

Большинство химических элементов в природе представляют собой определенные смеси атомов с ядрами различных масс. Различие масс обусловлено наличием в ядрах разного числа нейтронов.

Изотопы (от греч. isos – одинаковый и topos – место) – разновидности атома одного и того же химического элемента, которые имеют одинаковое число протонов (Z) и различное число нейтронов (N). У них практически одинаковые физические и химические свойства, разделить их в природной смеси очень сложно. Число изотопов элементов варьирует от 3 – у водорода до 27 – у полония. Изотопы бывают стабильные и нестабильные. Стабильные изотопы со временем не претерпевают никаких изменений, если нет воздействия из вне. Нестабильные или радиоактивные изотопы за счет процессов, протекающих внутри ядра, со временем превращаются в изотопы других химических элементов. Стабильные изотопы встречаются только у элементов с порядковым номером $Z \leq 83$. В настоящее время известно около 300 стабильных и более 2000 радиоактивных изотопов. Для всех элементов периодической системы Д. И. Менделеева синтезированы радиоактивные изотопы, называемые искусственными.

1.2. Явление радиоактивности

Все химические элементы стабильны лишь в узком интервале соотношения числа протонов к числу нейтронов в ядре. 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 неустойчивыми (нестабильными) и претерпевают самопроизвольные радиоактивные превращения, в результате которых изменяется состав ядра и при этом испускаются заряженные или нейтральных частицы. Явление самопроизвольного излучения было названо радиоактивностью, а вещества, испускающие излучения, – радиоактивными.

Радиоактивность (от лат. radio – излучаю, radius – луч, aktivus – действенный) – это самопроизвольные превращения (распады) атомных ядер некоторых химических элементов в атомные ядра других элементов с испусканием особого рода излучения. Радиоактивность приводит к изменению атомного номера и массового числа исходного химического элемента.

Открытию явления радиоактивности способствовали два крупнейших открытия XIX века. В 1895 г. В. Рентген обнаружил лучи, которые возникали при пропускании тока высокого напряжения между электродами, помещенными в запаянную стеклянную трубку, из которой был откачан воздух. Лучи были названы рентгеновскими. А в 1896 г. А. Беккерель обнаружил, что соли урана самопроизвольно испускают невидимые лучи, обладающие большой проникающей способностью, вызывающие почернение фотопластинки и свечение некоторых веществ. Это излучение он назвал радиоактивным. В 1898 г. Пьер Кюри и Мария Склодовская-Кюри открыли два новых радиоактивных элемента – полоний и радий, которые испускали подобные излучения, но интенсивность их во много раз превышала интенсивность излучения урана. Кроме того было обнаружено, что радиоактивные вещества непрерывно выделяют энергию в виде теплоты.

Радиоактивные излучения также называют ионизирующими, так как они могут ионизировать среду, или ядерными, подчеркивая то, что излучение испускается ядром, а не атомом.

Радиоактивный распад связан с изменениями в атомных ядрах и выделением энергии, величина которой, как правило, на несколько порядков выше энергии химических реакций. Так, при полном радиоактивном распаде 1 г-атома ^{14}C выделяется $3 \cdot 10^9$ калорий, тогда как при сгорании этого же количества ^{14}C до углекислого газа выделяется лишь $9{,}4 \cdot 10^4$ калорий.

В качестве единицы энергии радиоактивного распада принимается 1 электрон-Вольт (эВ) и производные от него 1 кэВ = 10^3 эВ и 1 МэВ = 10^6 эВ. 1 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж. 1 эВ соответствует энергии, приобретаемой электроном в электрическом поле при прохождении пути, на котором

разность потенциалов составляет 1 Вольт. При распаде большинства радиоактивных ядер высвобождаемая энергия составляет от нескольких кэВ до нескольких МэВ.

Радиоактивные явления, происходящие в природе, называют естественной радиоактивностью; аналогичные процессы, протекающие в искусственно полученных веществах (через соответствующие ядерные реакции), – искусственной радиоактивностью. Однако оба вида радиоактивности подчиняются одним и тем же законам.

1.3. Активность, единицы измерения

Активность *(A)* — мера радиоактивности какого-либо количества радионуклида, находящегося в данном энергетическом состоянии в данный момент времени:

$$A = \frac{dN}{dt},$$

где *dN* — ожидаемое число спонтанных ядерных превращений из данного энергетического состояния, происходящих за промежуток времени *dt.* Единицей активности в СИ является обратная секунда ($с^{-1}$), называемая **беккерель (Бк).**

Использовавшаяся ранее внесистемная единица активности **кюри** (Ки) составляет $3{,}7 \times 10^{10}$ Бк.

Активность является мерой количества радиоактивного изотопа. Она прямо пропорциональна числу радионуклидов, содержащихся в данном образце, т. е. количеству радиоактивного вещества. В определениях активности и единиц измерения активности говорится о числе распадов радионуклидов, а не о числе вылетающих из источника (образца) частиц. Как установлено в настоящее время, при одном акте распада может вылетать как одна, так и несколько частиц. Таким образом, активность не характеризует количество вылетающих частиц при распаде, а лишь констатирует количество самих распадов нуклидов. С течением времени активность убывает согласно основному закону радиоактивного распада.

Отметим, что величина активности характеризует лишь количественное наличие радионуклида и интенсивность испускаемого излучения, не определяя ни тип радионуклидов, ни вид излучения.

Активность удельная (объемная) — отношение активности *A* радионуклида в веществе к массе *m* (объему *V)* вещества:

$$A_m = \frac{A}{m};\ A_V = \frac{A}{V}.$$

Единица удельной активности — **беккерель на килограмм, Бк/кг**. Единица объемной активности — **беккерель на метр кубический, Бк/м^3.**

Поверхностная активность A_s - активность, отнесенная к едини-

це поверхности:

$$A_S = \frac{A}{S},$$

где S - площадь поверхности.

Данная величина встречается и под другими названиями - плотность загрязнения поверхности радионуклидами или поверхностная концентрация. Основная единица измерения – кБк/м^2, внесистемная – Ки/м^2.

Активность радиоактивного вещества непосредственно не характеризует ионизирующее воздействие излучения, так как при одной и той же активности ионизирующее воздействие зависит от вида и энергии излучения, физических свойств облучаемой среды и других факторов. Ионизирующее действие излучений, а следовательно, и их поражающее воздействие на организм характеризуется дозой излучения (облучения).

1.4. Закон радиоактивного распада

Количество любых радионуклидов со временем уменьшается вследствие радиоактивного распада. Особенность радиоактивного распада состоит и 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 такое-то количество радионуклидов. Поэтому говорят, что радиоактивный распад носит вероятностный характер.

Скорость распада определяется строением ядра, и поэтому на этот процесс невозможно повлиять никакими обычными физическими или химическими способами.

Кроме того, если мы будем наблюдать за малым количеством радионуклидов (например, 5 или 25 нуклидов), то мы не заметим никаких закономерностей радиоактивного распада. Малое число ядер может распасться сразу в момент начала наблюдения, а может не распадаться довольно большое время, или распад может идти неравномерно: то большими, то меньшими порциями. Закономерности распада проявляются для большого числа радионуклидов, как правило, более чем 100 ядер. Такие закономерности, характерные для большого количества данных, описываются математически с помощью статистики. Исходя из этого говорят, что радиоактивный распад носит статистический характер, т. е. справедлив для большого количества нуклидов.

Все указанные выше особенности радиоактивного распада позволяют определить его как статистический вероятностный процесс, т.е. вероятность распада для данного радионуклида постоянна и не зави-

сит от присутствия или отсутствия других радиоактивных ядер. Скорость распада зависит только от числа радиоактивных ядер в данный момент времени. Такие процессы описываются экспоненциальным соотношением. Математически закон радиоактивного распада выражается следующим уравнением и устанавливает, что за единицу времени распадается всегда одна и та же доля имеющихся в наличии ядер:

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

где N_t – количество атомных ядер, оставшихся через промежуток времени t; N_0 – начальное количество атомных ядер, т. е. количество ядер в момент наблюдения при t =0; e = 2,72 - основание натурального логарифма, которое указывает на графический вид математической зависимости (графически распад выражается не прямой линией, а экспонентой); λ - постоянная радиоактивного распада, показывающая какая доля радионуклидов распадается в единицу времени; t – время распада.

Постоянная радиоактивного распада является справочной величиной и строго определенной для каждого типа радионуклидов; она также характеризует относительную скорость распада. Размерность постоянной распада выражают в обратных единицах времени: $с^{-1}$, $мин^{-1}$, $ч^{-1}$ и т. д., чтобы показать, что количество радионуклидов не растет, а убывает. Величину, обратную постоянной радиоактивного распада $\tau = 1/\lambda$, называют средней продолжительностью жизни ядра.

Графически закон радиоактивного распада выражается экспоненциальной кривой (рис. 1).

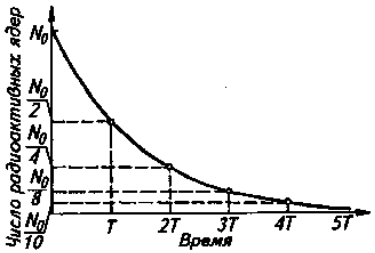


Рис.1. Кривая радиоактивного распада.

Для характеристики скорости распада радиоактивных элементов в практике пользуются вместо постоянной распада периодом полураспада.

Период полураспада – это время, в течение которого распадается половина исходного количества радиоактивных ядер. Он обозначается буквой $T_{1/2}$ и выражается в единицах времени. Для различных радиоактивных изотопов период полураспада имеет значения от долей секунды до миллиардов лет. причем у одного и того же элемента могут быть изотопы с различными периодами полураспада. Поэтому радио-

активные 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. Только случайно два периода полураспада могут оказаться одинаковыми или очень близкими для того, чтобы их можно было отличить. Так, марганец-56 и никель-65 имеют периоды полураспада 2,58 и 2,56 ч соответственно.

Зная период полураспада или постоянную распада, всегда можно произвести идентификацию радионуклида, т. е. указать, какой именно радионуклид присутствует в данном образце или продукте. Период полураспада связан с постоянной радиоактивного распада соотношением:

$$\lambda = 0{,}693/T_{1/2} \text{ или } T_{1/2} = 0{,}693/\lambda.$$

Это соотношение показывает, что между этими двумя постоянными существует обратная зависимость, т. е. чем больше значение λ, тем меньше величина $T_{1/2}$ и, соответственно, распад протекает быстрее; и, наоборот, чем меньше λ, тем больше $T_{1/2}$ и распад идет медленнее. Заменив λ в формуле на $T_{1/2}$, получим

$$N_t = N_0 \cdot e^{-0{,}693t/T}$$

Чтобы узнать полное время жизни данных радионуклидов, необходимо увеличить $T_{1/2}$ в 10 раз. Например, у стронция-90 $T_{1/2} \approx 29$ лет, следовательно, через 290 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.

Радиоактивное превращение одного из ядер никак не влияет на превращение соседних ядер, т.е. процессы распада различных ядер протекают абсолютно независимо друг от друга. Радиоактивный распад нельзя замедлить или ускорить действием температуры, давления, изменением химического состояния атомов или каким-либо другим способом. Поэтому, в отличие от химических отравляющих веществ, радиоактивные вещества нельзя обезопасить ни какой-либо химической реакцией, ни физической обработкой.

Также бессмысленно говорить о времени полураспада или времени жизни одного радиоактивного ядра. При использовании этих терминов подразумевают усредненные величины, справедливые при наличии достаточного большого числа ядер данного изотопа. Когда говорят о среднем времени жизни радиоактивного ядра, то понимают под этим среднее время жизни ядер в каком-либо образце, содержащем эти радиоактивные ядра.

1.5. Виды радиоактивного распада

Ядра атомов устойчивы, но изменяют свое состояние при нарушении определенного соотношения протонов и нейтронов. В легких ядрах должно быть примерно поровну протонов и нейтронов. Если в ядре слишком много протонов или нейтронов, то такие ядра неустойчивы и претерпевают самопроизвольные радиоактивные превращения, в результате которых изменяется состав ядра и, следовательно, ядро атома одного элемента превращается в ядро атома другого элемента. При этом процессе испускаются ядерные излучения.

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

Альфа-распад – 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) уменьшается на 2, а число частиц (массовое число) на 4. Следовательно, при данном радиоактивном распаде в соответствии с правилом смещения (сдвига), сформулированным Фаянсом и Содди (1913 г.), образующийся (дочерний) элемент смещен влево относительно исходного (материнского) на две клетки влево в периодической системе Д. И. Менделеева. Процесс альфа-распада в общем виде записывается так:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}Y + ^{4}_{2}He + Q,$$

где X – символ исходного ядра; Y – символ ядра продукта распада; $^{4}_{2}$He – альфа-частица, Q – освобожденный избыток энергии.

Например, распад ядер радия-226 сопровождается испусканием альфа-частиц, при этом ядра радия-226 превращаются в ядра радон-222:

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow ^{222}_{86}Rn + ^{4}_{2}He + Q$$

Энергия, выделяющаяся при альфе-распаде, делится между альфа-частицей и ядром обратно пропорционально их массам. Энергия альфа-частиц строго связана с периодом полураспада данного радионуклида (закон Гейгера-Неттола)**.** Это говорит о том, что, зная энергию альфа-частиц, можно установить период полураспада, а по периоду полураспада идентифицировать радионуклид. Например, ядро полония-214 характеризуется значениями энергии альфа-частиц E = 7,687 МэВ и $T_{1/2} = 4{,}5 \cdot 10^{-4}$ с, тогда как для ядра урана-238 E = 4,196 МэВ и $T_{1/2} = 4{,}5 \cdot 10^{9}$ лет. Кроме того, установлено, что чем больше энергия альфа-распада, тем быстрее он протекает.

Альфа-распад – достаточно распространенное ядерное превращения тяжелых ядер (уран, торий, полоний, плутоний, и др. с Z > 82); в настоящее время известно более 160 альфа-излучающих ядер.

Бета-распад – самопроизвольные превращения нейтрона в протон или протона в нейтрон внутри ядра, сопровождающиеся испусканием электронов или позитронов и антинейтрино $\tilde{\nu}_e$ или нейтрино ν_e.

Если в ядре имеется излишек нейтронов ("нейтронная перегрузка" ядра), то происходит электронный бета-распад, при котором один из нейтронов превращается в протон, испуская при этом электрон и антинейтрино:

$$^1_0 n \rightarrow ^1_1 p + e^- + \tilde{\nu}_e .$$

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:

$$^A_Z X \rightarrow ^A_Z Y + e^- + \tilde{\nu}_e + Q .$$

Таким способом распадаются ядра с избытком нейтронов. Например, распад ядер стронция-90 сопровождается испусканием электронов и превращением их в иттрий-90:

$$^{90}_{38} Sr \rightarrow ^{90}_{39} Y + e^- + \tilde{\nu}_e + Q,$$

Часто ядра элементов, образующихся при бета-распаде, имеют избыточную энергию, которая высвобождается испусканием одного или нескольких гамма-квантов. Например:

$$^{131}_{53} J \rightarrow ^{131}_{54} Xe + e^- + \tilde{\nu}_e + \gamma,$$

Электронный бета-распад характерен для многих естественных и искусственно полученных радиоактивных элементов.

Если неблагоприятное соотношение нейтронов и протонов в ядре обусловлено излишком протонов, то происходит позитронный бета-распад, при котором ядро испускает позитрон и нейтрино в результате превращения протона в нейтрон внутри ядра:

$$^1_1 p \rightarrow ^1_0 n + e^- + \tilde{\nu}_e .$$

Заряд ядра и, соответственно, атомный номер дочернего элемента уменьшается на 1, массовое число не изменяется. Дочерний элемент будет занимать место в периодической системе Д. И. Менделеева на одну клетку влево от материнского:

$$^A_Z X \rightarrow ^A_{Z-1} Y + \nu_e + Q$$

Позитронный распад наблюдается у некоторых искусственно полученных изотопов. Например, распад изотопа фосфора-30 с образованием кремния-30:

$$^{30}_{15} P \rightarrow ^{30}_{14} Si + e^+ + \nu_e + Q$$

Позитрон, вылетев из ядра, срывает с оболочки атома “лишний” электрон (слабо связанный с ядром) или взаимодействует со свободным электроном, образуя пару “позитрон-электрон”. Вследствие того, что частица и античастица мгновенно взаимоуничтожаются с выделением энергии, то образованная пара превращается в два гамма-кванта с энергией, эквивалентной массе частиц (e^+ и e^-). Процесс превращения пары “позитрон-электрон” в два гамма-кванта носит название аннигиляции (уничтожения), а возникающее электромагнитное излучение называется аннигиляционным. В данном случае происходит превращение одной формы материи (частиц вещества) в другую (излучение). Это подтверждается существованием обратной реакции – реакции образования пары, при которой электромагнитное излучение достаточно высокой энергии, проходя вблизи ядра под действием сильного электрического поля атома, превращается в пару “электрон-позитрон”.

Таким образом, при позитронном бета-распаде в конечном результате за пределы материнского ядра вылетают не частицы, а два гамма-кванта, обладающие энергией в 0,511 МэВ каждый, равной энергетическому эквиваленту массы покоя частиц – позитрона и электрона $E = 2m_ec^2 = 1{,}022$ МэВ.

Превращение ядра может быть осуществлено путем электронного захвата, когда один из протонов ядра самопроизвольно захватывает электрон с одной из внутренних оболочек атома (K, L и т. д.), чаще всего с К-оболочки, и превращается в нейтрон. Такой процесс называют также К-захватом. Протон превращается в нейтрон согласно следующей реакции:

$$ {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{1}_{0}n + \nu_e $$

При этом заряд ядра уменьшается на 1, а массовое число не изменяется:

$$ {}^{A}_{Z}X + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + \nu_e + Q $$

Например,

$$ {}^{40}_{19}K + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{40}_{18}Ar + \nu_e + Q $$

При этом место, освобожденное электроном, занимает электрон с внешних оболочек атома. В результате перестройки электронных оболочек испускается квант рентгеновского излучения. Атом попрежнему сохраняет электрическую нейтральность, т. к. количество протонов в ядре при электронном захвате уменьшается на единицу. Таким образом, этот тип распада приводит к тем же результатам, что и позитронный бета-распад. Характерен он, как правило, для искусственных радионуклидов.

Энергия, выделяемая ядром при бета-распаде конкретного радионуклида, всегда постоянна, но ввиду того, что при этом типе распада образуется не две, а три частицы: ядро отдачи (дочернее), электрон (или позитрон) и нейтрино, то энергия по-разному в каждом акте рас-

пада перераспределяется между электроном (позитроном) и нейтрино, т. к. дочернее ядро всегда уносит одну и ту же порцию энергии. В зависимости от угла разлета нейтрино может уносить большую или меньшую энергию, в результате чего электрон может получить любую энергию от нуля до некоторого максимального значения. Следовательно, **при бета-распаде бета-частицы одного и того же радионуклида имеют различную энергию,** от нуля до некоторого максимального значения, характерного для распада данного радионуклида. **По энергии бета-излучения практически невозможно произвести идентификацию радионуклида.**

Некоторые радионуклиды могут распадаться одновременно двумя или тремя способами: путем альфа- и бета-распадов и через К-захват, сочетанием трех типов распадов. В таком случае превращения осуществляются в строго определенном соотношении. Так, например, естественный долгоживущий радиоизотоп калий-40 ($T_{1/2}$=1,49·10^9 лет), содержание которого в природном калии составляет 0,0119 %, подвергается электронному бета- распаду и К-захвату:

$$^{40}_{19}K \rightarrow {}^{0}_{-1}e + {}^{40}_{20}Ca + \nu_e \quad \text{(88 \% – электронный распад),}$$

$$^{40}_{19}K + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{40}_{18}Ar + \nu_e \quad \text{(12 \% – К- захват).}$$

Из описанных выше типов распадов, можно сделать вывод, что гамма-распада в “чистом виде” не существует. 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. Гамма-излучение испускается при переходе ядер с возбужденных уровней на более низкие уровни, в том числе и на основной. Например, при распаде цезия-137 образуется возбужденное ядро бария-137. Переход из возбужденного в стабильное состояние сопровождается испусканием гамма-квантов:

$$^{137}_{55}Cs \rightarrow {}^{137}_{56}Ba^{*} + e^{-} + \tilde{\nu}_e,$$

$$^{137}_{56}Ba^{*} \rightarrow {}^{137}_{56}Ba + \gamma$$

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.**

Внутренняя конверсия. Возбужденное (в результате того или иного ядерного превращения) состояние ядра атома свидетельствует о наличии в нем избытка энергии. В состояние с меньшей энергией (нормальное состояние) возбужденное ядро может переходить не

только путем излучения гамма-кванта или выброса какой-либо частицы, но и путем внутренней конверсии, или конверсии с образованием электрон-позитронных пар.

Явление внутренней конверсии состоит в том, что ядро передает энергию возбуждения одному из электронов внутренних слоев (K-, L- или M-слой), который в результате этого вырывается за пределы атома. Такие электроны получили название конверсионных электронов. Следовательно, испускание электронов конверсии обусловлено непосредственным электромагнитным взаимодействием ядра с электронами оболочки. Конверсионные электроны имеют линейчатый спектр энергии в отличии от электронов бета-распада, дающих сплошной спектр.

Если энергия возбуждения превосходит 1,022 МэВ, то переход ядра в нормальное состояние может сопровождаться излучением пары «электрон–позитрон» с последующей их аннигиляцией. После того как произошла внутренняя конверсия, в электронной оболочке атома появляется «вакантное» место вырванного электрона конверсии. Один из электронов более удаленных слоев (с более высоких энергетических уровней) осуществляет квантовый переход на «вакантное» место с испусканием характеристического рентгеновского излучения.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

2.1. Свойства ядерных излучений

Ядерные (радиоактивные) излучения – это излучения, которые образуются в результате радиоактивного распада. Излучение всех естественных и искусственных радионуклидов делится на два типа – корпускулярное и электромагнитное. Корпускулярное излучение представляет собой поток частиц (корпускул), которые характеризуются определенной массой, зарядом и скоростью. Это электроны, позитро-

ны, ядра атомов гелия, дейтроны (ядра изотопа водорода дейтерия), нейтроны, протоны и др. частицы. Как правило, корпускулярное излучение непосредственно ионизирует среду.

Электромагнитное излучение – это поток квантов или фотонов. Это излучение не имеет ни массы, ни заряда и производит косвенную ионизацию среды.

На образование 1 пары ионов в воздухе необходимо в среднем 34 эВ. Поэтому к ионизирующим излучениям относятся излучения с энергией от 100 и выше эВ (не относят видимый свет и УФ-излучение).

Для характеристики ионизирующих излучений используют понятия пробег и удельная ионизация. 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. Отметим, что понятие пробега и длины пройденного пути – это не тождественные понятия. Если частицы движутся прямолинейно, то эти величины совпадают, если траектория движения частиц – ломаная извилистая линия, то пробег всегда меньше, чем длина пройденного пути.

Альфа-излучение представляет собой поток α-частиц, которые являются ядрами атомов гелия $\left({}_2^4He\right)$ иногда называют дважды ионизированные атомы гелия). Альфа-частица состоит из 2-х протонов и 2-х нейтронов, заряжена положительно и несет с собой два элементарных положительных заряда. Масса частицы m_α=4,003 а.е.м. – это самая крупная из частиц. Скорость движения составляет $(14{,}1\text{-}24{,}9)\cdot 10^6$ м/с. В веществе альфа-частицы движутся прямолинейно, что связано со сравнительно большой массой и значительной энергией. Отклонение происходит только при лобовом столкновении с ядрами.

Пробег альфа-частиц в веществе зависит от энергии альфа-частицы и от природы вещества, в котором она движется. В среднем в воздухе пробег альфа-частицы составляет 2,5–9 см, максимальный – до 11 см, в биологических тканях – 5-100 микрон, в стекле – $4\cdot 10^{-3}$ см. Энергия альфа-частицы находится в пределах 4-9 МэВ. Можно полностью задержать альфа-излучение листом бумаги. На всю длину пробега альфа-частица может создать от 116000 до 254000 пар ионов.

Удельная ионизация составляет примерно 40 000 пар ионов/см в воздухе, такая же удельная ионизация в организме на пути 1-2 микрона.

После расхода энергии альфа-частица затормаживается, процесс ионизации прекращается. В силу вступают законы, регулирующие процесс образования атомов. Ядра атомов гелия присоединяют 2 электрона и образуется полноценный атом гелия. Этим объясняется факт обязательного присутствия гелия в породах, содержащих радиоактив-

ные вещества.

Из всех типов радиоактивного излучения альфа-излучение наиболее сильно флюоресцирует (светится).

Бета-излучение – это поток бета-частиц, которые являются электронами или позитронами. Несут один элементарный электрический заряд, m_β= 0,000548 а.е.м. Движутся со скоростями близкими к скорости света, т.е. $(0{,}87\text{-}2{,}994)\cdot 10^8$ м/с.

В отличие от α-частиц β-частицы одного и того же радиоактивного элемента обладают различным запасом энергии (от нуля до некоторого максимального значения). Это объясняется тем, что при каждом бета-распаде из атомного ядра вылетают одновременно две частицы: β-частица и нейтрино (ν_e). Энергия, освобождаемая при каждом акте распада, распределяется между β-частицей и нейтрино в различных соотношениях. Поэтому энергия бета-частиц колеблется от десятых и сотых долей МэВ (мягкое β-излучение) до 2-3 МэВ (жесткое излучение).

В связи с тем, что бета-частицы, испускаемые одним и тем же бета-излучателем, обладают различным запасом энергии (от минимума до максимума), то и длина пробега, и количество пар ионов не одинаковы для бета-частиц данного радионуклида. Обычно пробег в воздухе составляет десятки см, иногда несколько метров (до 34 м), в биотканях – до 1 см (до 4 см при энергии бета-частиц 8 МэВ).

Бета-излучение обладает значительно меньшим эффектом ионизации, чем альфа-излучение. Так, в воздухе на всем своем пути бета-частицы образуют от 1000 до 25 500 пар ионов. В среднем на весь путь в воздухе, или 50-100 пар ионов на 1см пути. Степень ионизации зависит от скорости частицы, чем меньше скорость, тем больше ионизация. Причина этого заключается в том, что бета-частицы большой энергии пролетают мимо атомов слишком быстро и не успевают вызвать такой же сильный эффект, как медленные бета-частицы.

Так как бета-частицы обладают очень малой массой, то при столкновении с атомами и молекулами они легко отклоняются от своего первоначального направления. Такое явление отклонения называют рассеянием. Поэтому определить именно длину пути бета-частиц, а не пробег, очень трудно, так как она слишком извилиста.

При потере энергии электрон захватывается либо положительным ионом с образованием нейтрального атома, либо атомом с образованием отрицательного иона.

Гамма-излучение – это поток фотонов (квантов) электромагнитного излучения. Скорость распространения их в вакууме равняется скорости света – $3\cdot 10^8$ м/с. Так как гамма-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 больше длина волны, тем

меньше частота колебаний, и наоборот, т. е. частота колебаний обратно пропорциональна длине волны. Чем меньше длина волны и больше частота колебаний излучения, тем больше его энергия и, следовательно, проникающая способность. Энергия гамма-излучения естественных радиоактивных элементов колеблется от нескольких кэВ до 2-3 МэВ и редко достигает 5-6 МэВ.

Гамма-кванты, не имея заряда и массы покоя, вызывают слабое ионизирующее действие, но обладают большой проникающей способностью. В воздухе они могут проделать путь до 100-150 м. Через организм человека данное излучение проходит без ослабления.

2.2. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом

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

Ионизационные потери — это энергия излучения, растрачиваемая на ионизацию и возбуждение атомов встречного вещества. Если энергии на ионизацию не хватает (34 эВ на ионную пару), то могут возникнуть возбужденные атомы или молекулы.

Ионизационные потери тем больше, чем больше заряд частицы и меньше ее скорость. В конечном счете кинетическая энергия, теряемая заряженными частицами, превращается в тепловую,

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. Заряженная частица приобретает в кулоновском поле ядра ускорение, а заряд, испытывающий ускорение, излучает энергию. 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 альфа-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 альфа-частиц обычно прямолинейны. Это связано с тем, что их масса примерно в 7000 раз больше масс электронов, с которыми они взаимодействуют. Взаимодействуя с электронами среды, альфа-частицы получают импульс, который слишком мал, чтобы заметно отклонить их от прямолинейного пути.

Бета-излучение, обладая электрическим зарядом, во взаимодействии с веществом имеет много общего с альфа-излучением. Для бета-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.

Бета-частицы из-за малой массы сильно отклоняются электростатическим полем взаимодействующих с ними атомов. Поэтому путь движения бета-частиц в веществе очень извилист и их пробег в веществе нельзя характеризовать длиной трека, так как их действительные траектории движения оказываются в 1,5—4 раза больше толщины поглощающего слоя.

Гамма-кванты, также как альфа- и бета-частицы, растрачивают свою энергию в основном за счет взаимодействия с электронами атомов среды. При этом имеют место три основных эффекта взаимодействия гамма-лучей с веществом: фотоэффект, Комптоновское рассеяние и образование электронно-позитронных пар (рис. 2).

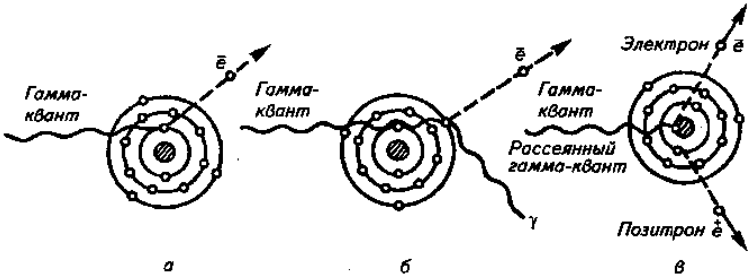


Рис. 2. Виды взаимодействия гамма-излучения с веществом:
а — фотоэлектрическое поглощение; *б*— комптоновский эффект; *в* — образование пар.

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

Комптоновское 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 направ-

ление движения, т. е. рассеиваются. Эффект Комптона возникает, когда поглотитель имеет малый атомный вес, а γ- кванты энергию порядка 0,2 МэВ и более.

Некоторые гамма-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 гамма-кванта. Позитроны, замедляясь веществом, взаимодействуют с электронами среды, давая аннигиляционное гамма-излучение.

От характера взаимодействия излучения с веществом зависит проникающая способность излучения, знать которую необходимо для решения многих задач, таких как выбор метода регистрации излучения, расчет толщины защитных экранов и др.

Ионизирующее действие излучений широко используется для их регистрации.

2.3. Методы регистрации ионизирующих излучений

В настоящее время существует достаточно много методов регистрации ионизирующих излучений. Выбор того или иного метода производится с учетом вида излучения и той информации, которую хотят получать: простое обнаружение излучения, измерение энергии частиц, определение активности и т. д. В соответствии с поставленными задачами выбирают тип измерительных приборов. Для измерения активности и плотности потоков ионизирующих излучений используют радиометры, для определения дозы излучений — дозиметры, для нахождения распределения излучения по определенным параметрам (энергии, заряду, массе) — спектрометры.

Прибор для регистрации ионизирующих излучений состоит из чувствительного элемента — детектора (датчика) и измерительной аппаратуры. В детектор входит вещество, с которым взаимодействуют частицы, и преобразователь эффектов взаимодействия в регистрируемые величины (импульсы, ток, химический осадок и т. д.), которые фиксируются измерительной аппаратурой.

К основным и наиболее часто применяемым методам регистрации относятся следующие: ионизационные, оптические (сцинтилляционные), химические и фотографические.

Ионизационный метод основан на регистрации эффекта ионизации, т. е. на измерении величины заряда ионов, возникающих под действием ионизирующего излучения. Измерить ионизационный эффект можно при помощи электрического поля, которое препятствует рекомбинации ионов и придает им направленное движение к соответствующим электродам.

В качестве детекторов используют ионизационные камеры, пропорциональные счетчики, счетчики Гейгера—Мюллера, полупроводниковые детекторы и др. Эти детекторы, кроме полупроводниковых, представляют собой наполненные газом баллоны с двумя вмонтированными электродами. К электродам подведено напряжение постоянного тока. Детектор включается в электрическую цепь. При прохождении ионизирующей частицы через газовую среду образуются ионы, которые собираются на электродах. Положительные ионы движутся к катоду, отрицательные — к аноду. В электрической цепи образуется ионизационный ток, который регистрируется измерителем тока. По значению этого тока можно судить об интенсивности излучения или отсчитывать число зарегистрированных частиц. Протекание тока наблюдается до тех пор, пока на газ действует излучение. В противном случае ток в цепи не протекает, так как газ является изолятором.

Взаимодействуя с веществом, ядерное излучение наряду с ионизацией производит возбуждение атомов и молекул. Через некоторое время (в зависимости от вещества) возбужденные атомы и молекулы переходят в невозбужденное состояние с выделением энергии во внешнюю среду. У некоторых веществ (сернистый цинк, йодистый натрий, антрацен, стильбен, нафталин и др.) такой переход сопровождается испусканием энергии возбуждения в виде квантов видимого инфракрасного и ультрафиолетового света. Внешне это проявляется в виде вспышек света — сцинтилляций, которые можно зарегистрировать с помощью соответствующих приборов. На регистрации сцинтилляций, возникающих в определенных веществах при облучении их ионизирующими излучениями, и основаны **оптические методы.**

Принцип работы сцинтилляционного детектора следующий: под действием излучений происходит ионизация и возбуждение атомов. При переходе атомов из ионизированных и возбужденных состояний в основное высвечивается энергия в виде вспышки света (сцинтилляции), которая может быть зарегистрирована различными способами. Лучший из них состоит в преобразовании энергии света в электрический сигнал с помощью оптически связанного со сцинтиллятором фотоэлектронного умножителя

В настоящее время известно очень много различных сцинтилляторов – жидких, твердых, газообразных и в виде порошков различной плотности. Это позволяет подобрать необходимый детектор для наиболее эффективной регистрации любого ионизирующего излучения в широком диапазоне энергий.

Химические методы основаны на том, что часть поглощенной энергии излучения переходит в химическую, что вызывает цепь химических превращений. Определение наличия излучения, его интенсивности производится по выходу химических реакций. Например, при облучении водного раствора $FeSO_4$ ионы двухвалентного железа Fe^{2+}

превращаются в ионы трехвалентного железа Fe^{3+}. Одновременно при этом изменяется электрический потенциал и окраска раствора, что можно легко определить соответствующими способами.

Отметим, что при использовании химических методов следует подбирать в качестве детекторов такие вещества, химические изменения в которых пропорциональны дозе или интенсивности ионизирующего излучения

Фотографические методы основаны на способности излучения разлагать галогениды серебра AgCl или AgBr, входящие в состав чувствительных фотоэмульсий, до металлического серебра. В результате такого взаимодействия вдоль трека (следа прохождения) альфа- и бета-частиц выделяются зерна серебра и при проявлении фотопластинки виден след пробега ядерных частиц — почернение. По характеру трека можно определить вид, интенсивность и энергию излучения.

В заключение отметим, что большое разнообразие методов регистрации и детекторов связано с причинами различного характера взаимодействия излучения с веществом и различным пробегом. Поэтому невозможно сконструировать универсальный детектор, который одинаково хорошо регистрировал бы гамма-кванты, альфа- и бета-частицы. Легче всего зарегистрировать проникающее гамма-излучение. Для этого хороши счетчики Гейгера—Мюллера, но более эффектны сцинтилляционные детекторы с кристаллическими сцинтилляторами большой плотности.

Для регистрации бета-излучения применяют жидкие или пластмассовые сцинтилляторы или ионизационные детекторы с очень тонкими стенками. Альфа-излучение из-за малого пробега в веществе регистрировать очень тяжело. В этом случае чаще используют ионизационные методы, но детекторы особых конструкций — открытые газовые или специальные полупроводниковые детекторы.

При регистрации ионизирующих излучений необходимо помнить о требованиях к измеряемым образцам. Особых требований не существует в случае гамма-излучающих образцов. В образцах, которые испускают бета-частицы, регистрация будет происходить только с верхнего тонкого слоя; все остальное бета-излучение поглощается в самом образце, не достигая детектора. Поэтому бета-излучающие образцы должны быть или очень тонкие или бесконечно толстые. Радиометрия альфа-радионуклидов возможна только с очень тонкой пленки, В этом случае перед измерением необходимо провести радиохимическую* обработку образца; его предварительно сжигают, растворяют, выделяют альфа-излучающий радионуклид, который осаждают на подложку тонким слоем.

Также отметим, что активность определяют, регистрируя радиоактивное излучение, которое сопровождает распад. Но так как для каждого вида излучения необходим отдельный детектор, активность мож-

но определить только в том случае, когда известен состав радионуклидов в образце и число соответствующих частиц или квантов, которые излучаются при одном акте распада. Например, цезий-137, который распадается, излучая бета-частицу (электрон) и гамма-квант, можно регистрировать как бета-радиометром (с поправкой на эффективность к гамма-излучению), так и гамма-радиометром. При радиометрии стронция-90 необходимо помнить, что данный радионуклид излучает только бета-частицы, причем при распаде образуется иттрий-90, который также испускает бета-частицы, поэтому в образце всегда присутствуют два этих радиоизотопа.

Устройства, предназначенные для преобразования энергии ионизирующих излучений в другие виды энергии, удобные для индикации, последующей регистрации и измерения, называются **детекторами ионизирующего излучения** (от латинского слова "detector" – тот, кто раскрывает, обнаруживает), но детекторы, как правило, это лишь часть комплекса аппаратуры, предназначенной для регистрации излучений. Эффект, создаваемый излучением в детекторе, должен быть преобразован в электрический ток, который может привести в действие электрическое регистрирующее измерительное устройство.

Устройства, предназначенные для регистрации действия ионизирующего излучения на детектор, называются **регистраторами**. Комплекты устройств – детектор и регистратор – называются радиометрами. **Радиометры** – приборы, предназначенные для получения информации об активности нуклидов, плотности потока и потоке ионизирующих частиц или фотонов. Разновидность радиометров представляют собой дозиметры, отградуированные в единицах дозы или мощности излучения. **Дозиметры** – приборы, предназначенные для получения информации об экспозиционной дозе и мощности экспозиционной дозы или (и) об энергии, переносимой ионизирующим излучением или переданной им объекту, находящемуся в поле его действия.

Существует электрофизическая аппаратура, которая позволяет расшифровать в деталях свойства излучения, проходящего через детектор. Приборы, предназначенные для анализа свойств ионизирующих излучений (радионуклидный состав, энергия, вид излучения, др.), называются **анализаторами**. В настоящее время различные типы анализаторов принято называть спектрометрами. **Спектрометры** – приборы, предназначенные для получения информации о спектре распределения ионизирующего излучения по одному или более параметрам, например, по энергии квантов или частиц в потоке излучения.

Иногда регистрация излучения сводится к регистрации следов прохождения отдельных ионизирующих частиц через вещество. По длине следа обычно определяют энергию зарегистрированных частиц, а по виду следа – вид частиц. Такие детекторы принято называть следовыми камерами, а также это могут быть толстослойные фотоэмульсии.

3. ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ, ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

3.1. Понятие о дозе

Результат воздействия ионизирующих излучений на облучаемые объекты заключается в физико-химических или биологических изменениях в этих объектах. Примерами таких изменений могут служить нагрев тела, фотохимическая реакция рентгеновской пленки, изменение биологических показателей живого организма и т.п. Радиационный эффект зависит от физических величин X_i, характеризующих поле излучения или взаимодействие излучения с веществом:

$$\eta = F(X_i)$$

Величины X_i, функционально связанные с радиационным эффектом η, называются дозиметрическими. Целью дозиметрии является измерение, исследование и теоретические расчеты дозиметрических величин для предсказания или оценки радиационного эффекта, в частности, – радиобиологического эффекта.

Система дозиметрических величин формируется как результат развития радиобиологии, дозиметрии и радиационной безопасности. Критерии безопасности в значительной степени определяются обществом, поэтому в разных странах сформировались различные системы дозиметрических величин. Важную роль в унификации этих систем играет Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) – независимая организация, объединяющая экспертов в области биологического действия излучения, дозиметрии и радиационной безопасности. Под влиянием регулярно публикуемых Рекомендаций МКРЗ сформировалась современная система дозиметрических величин.

Доза поглощенная (*D*) – величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу:

$$D = \frac{d\bar{e}}{dm},$$

где $d\bar{e}$ – средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном объеме; dm – масса вещества в этом объеме. В единицах СИ поглощенная доза измеряется в джоулях, деленных на килограмм (Дж·кг$^{-1}$), и имеет специальное название – **грей (Гр)**. Использовавшаяся ранее внесистемная единица **рад** равна 0,01 Гр.

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

$$H_{T,R} = W_R \times D_{T,R}$$

где $D_{T,R}$ – средняя поглощенная доза в органе или ткани; W_R — взвешивающий коэффициент для излучения *R*.

При воздействии различных видов излучения с различными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучения:

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

Единицей эквивалентной дозы является зиверт (Зв).

Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения при расчете эквивалентной дозы (W_R) — используемые в радиационной защите множители поглощенной дозы, учитывающие 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

Доза эффективная (E) — величина воздействия ионизирующего излучения, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения организма человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности.

Она представляет собой сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты:

$$E = \sum_T W_T \times H_T ,$$

где H_T – эквивалентная доза в органе или ткани; W_T – взвешивающий коэффициент для органа или ткани.

Единица эффективной дозы – зиверт (Зв).

Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов при расчете эффективной дозы (W_T) — множители эквивалентной дозы в органах и тканях, используемые в радиационной защите для учета различной чувствительности разных органов и тканей в возникновении стохастических эффектов радиации:

гонады	0,20
костный мозг (красный)	0,12
толстый кишечник	0,12
легкие	0,12
желудок	0,12
мочевой пузырь	0,05
грудная железа	0,05
печень	0,05
пищевод	0,05
щитовидная железа	0,05
кожа	0,01

клетки костных поверхностей	0,01
остальное	0,05*

Мощность дозы – доза излучения за единицу времени (секунда и производные).

4. ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

4.1. Этапы действия ионизирующих излучений на биологические объекты

Изучение действия ионизирующих излучений на биологические объекты началось практически одновременно с их открытием. Актуальность и дальнейшее продолжение изучения действия радиации на организмы обусловлены расширением контактов человека и всего живого с радиационным воздействием. Действие всех видов ионизирующих излучений на живые организмы и их сообщества изучает радиобиология. Фундаментальной задачей радиобиологии является выявление общих закономерностей биологической реакции организма на радиационное воздействие. Решение этой задачи позволит разрабо-

тать пути и методы управления лучевыми реакциями организма, а также найти средства защиты и восстановления организма от воздействия излучений. К настоящему времени в радиобиологии имеется ряд проблем и нерешенных вопросов. Основная проблема — проблема радиочувствительности. Нет однозначного ответа, почему радиочувствительность организмов варьирует в очень широких пределах.

В стадии изучения находятся также такие вопросы, как механизм действия ионизирующих излучений, действие на организм малых доз радиации, особенности действия на организм хронического облучения инкорпорированных радионуклидов, отдаленные последствия облучения, радиационное нарушение иммунитета, радиопротекторная защита организма и др.

Ионизирующие (или ядерные) излучения возникают при распаде ядер радиоактивных элементов. Они невидимы и обнаруживаются по различным явлениям, происходящим при их действии на вещество. Опасность для биологических объектов связана с особенностями, которые присущи только ядерным излучениям. Они обладают высокой энергией, превышающей внутримолекулярную и межмолекулярную энергию связей атомов и молекул, проникают внутрь облучаемого объекта и передают ему свою энергию, вызывая при этом ионизацию и возбуждение атомов и молекул, разрывают химические связи в молекулах, т.е. вызывают радиолиз молекул. При облучении и после облучения формируются различные повреждения, которые проявляются на разных уровнях — от атомного и молекулярного до организменного.

Ионизирующие излучения обладают высокой биологической активностью. Они могут вызывать ионизацию любых химических соединений, биосубстратов, а также радиолиз молекул с образованием активных радикалов, что приводит к возникновению многочисленных и длительных реакций в живых клетках и тканях. Результатом биологического действия радиации является нарушение нормальных биохимических процессов с последующими функциональными и морфологическими изменениями в клетках и тканях.

Все радиобиологические реакции начинаются одинаково, т.е. с формирования молекулярных и клеточных повреждений в результате передачи им энергии излучения, и заканчиваются физиологическими и морфологическими изменениями в облученном организме.

В механизме биологического действия ионизирующих излучений на живые объекты выделяют ряд последовательных этапов, объединенных между собой причинно-следственными связями (табл.1).

Таблица 1. **Этапы действия ионизирующих излучений на биологические объекты**

№ этапа	Явление	Длительность этапа

1	Физико-химический этап (ионизация и возбуждение атомов и молекул)	$10^{-12} – 10^{-8}$ с
2	Химический этап (образование свободных радикалов)	10^{-7} с – несколько часов
3	Биомолекулярный этап (повреждения белков, нуклеиновых кислот и других биомолекул)	10^{-3} с – несколько часов
4	Ранние биологические эффекты (гибель клеток, гибель организма)	Часы– недели
5	Отдаленные биологические эффекты (опухоли, генетические эффекты, гибель организма и т. д.)	Годы – столетия

Таким образом, начальное действие ионизирующих излучений происходит на атомном и молекулярном уровнях, затем, с течением времени, проявляется на клеточном, тканевом, органном и организменном уровнях.

Единой теории, объясняющей механизм действия излучения, нет. В механизме биологического действия ионизирующих излучений на живые объекты условно выделяют два основных этапа. Первый этап – первичное (непосредственное) действие излучения на биохимические процессы, функции и структуры органов и тканей. Второй этап – опосредованное действие, которое обуславливается изменениями, возникающими в организме под влиянием облучения. В результате многочисленных опытов, проведенных при облучении различных молекул, вирусов и бактерий, было предложено два теоретических направления, объясняющих механизм первичного действия ионизирующей радиации: 1) теория прямого действия излучений на молекулы, входящие в состав веществ и клеток; 2) теория косвенного действия.

Прохождение излучения через вещество или молекулы биологического субстрата сопровождается передачей энергии атомам вещества, что вызывает ионизацию и возбуждение атомов. Этот первый этап воздействия излучения характеризует акт прямого взаимодействия. Следовательно, под прямым действием ионизирующих излучений понимают такие изменения, которые возникают в результате поглощения энергии излучения самими молекулами, при этом поражающее действие связано с актом возбуждения и ионизации атомов и молекул. Под косвенным (непрямым) действием понимают изменение молекул клеток в результате взаимодействия их с продуктами радиолиза воды и растворенных в ней веществ, а не в результате поглощения ими энергии излучения.

На основе представления о прямом действии ионизирующих излучений возникла **теория мишени и попаданий**, выдвинутая Дессауэром в 1925 году, а затем дополненная Тимофеевым-Ресовским, Циммером, Ли и другими исследователями. Эта теория объясняла наличие в клетке жизненно важного центра — мишени, попадание в которую одной или нескольких высокоэнергетических частиц излучения может вызвать разрушение и гибель клетки. Попадание в мишень — вероят-

ностное событие. Чем больше доза, тем оно вероятнее; чем меньше доза, тем оно менее вероятно, но по закону случайности попадания оно всегда возможно. В основе этой теории лежат два положения. Первое — принцип попадания — характеризует особенность излучения, которая заключается в дискретности поглощения энергии излучения, т.е. в поглощении порций энергии при случайном попадании в мишень. Второе — принцип мишени — учитывает особенность облучаемого объекта (клетки), т.е. различие в ее ответной реакции на одно и то же попадание. Эта теория приемлема только для простых систем.

Универсальной теорией радиобиологического действия ионизирующего излучения признана **структурно-метаболическая теория** Кузина А.М., предложенная в 1965 году. В основе теории лежит принцип многофакторности в проявлении любой радиобиологической реакции или радиобиологического эффекта. Автор выделил 6 общих принципов: дискретный характер передачи энергии; прямое и косвенное действие излучения; радиобиологические эффекты происходят у всех клеточных структур; генетические и физиологические нарушения передается по наследству; в клетке одновременно происходят процессы повреждения и восстановления; любой радиобиологический эффект развивается во времени. В облученной клетке происходит не только радиолиз (распад), но и синтез (образование) дополнительных высокореакционных продуктов, вызывающих повреждение макромолекул с образованием низкомолекулярных токсических метаболитов. Образование первичных радиотоксинов зависит от поглощенной дозы, времени облучения и носит экспоненциальный характер. После облучения образование радиотоксинов продолжается вследствие повышения активности ферментативных систем окисления, т.е. имеет место механизм биологического усиления начальных процессов.

Поражающий эффект определяется многими параметрами, в том числе наличием кислорода, концентрацией предшественников радиотоксинов, активностью ферментов, радиочувствительностью системы восстановления, концентрацией протекторных (защитных веществ), связью с окружающей средой. В этой теории ведущая роль в радиационном эффекте отводится нарушениям в клеточном ядре и биомембранах. Кузин А. М. ввел понятие о веществах, влияющих на геном клетки, и назвал их триггер-эффекторами. Триггер-эффекторы (хиноны, гормоны и др.), возникающие при облучении клетки, в зависимости от их концентрации могут оказывать депрессивное или репрессивное действие на геном клетки и на биосинтетические процессы.

При прохождении ионизирующих излучений через тканеподобное вещество происходят глубокие и практически необратимые перестройки атомов среды вещества. Судьба ионизированных и возбужденных атомов и молекул, образовавшихся после поглощения ионизирующего излучения, существенно зависит от химического состава и

структуры поглощающей среды. Этапы формирования радиационного поражения клеток и тканей описаны многими схемами.

Например, Бак и Александер выделяют следующие этапы:

1) поглощение энергии ионизирующего излучения;

2) появление ионизированных и электронно-возбужденных молекул;

3) индуцирование изменений в молекулах;

4) развитие биохимических повреждений;

5) формирование субмикроскопических повреждений;

6) проявление видимых повреждений клеток;

7) гибель клетки.

Кузин А.М. в каждом этапе развития радиационно-биохимических процессов рассматривает реализацию определенных реакций, связанных с радиационно-химическими превращениями некоторых молекул в клетке.

Он предложил схему участия первичных радиотоксинов в развитии лучевого поражения организма (рис.3.).

Более 97 % общего состава живых организмов представлено легкими атомами водорода, кислорода, углерода, азота, серы, фосфора. Из этих элементов состоят основные компоненты биологических систем. В тканях животных и растений основная часть поглощенной энергии (70—85%) приходится на воду.

Молекулы воды составляют основу важнейших структур клетки, в воде растворены белки, нуклеиновые кислоты и другие компоненты клетки, которым может передаваться энергия, первоначально поглощенная водой.

Радиационно-химические реакции (радиолиз) молекулы воды хорошо изучены.

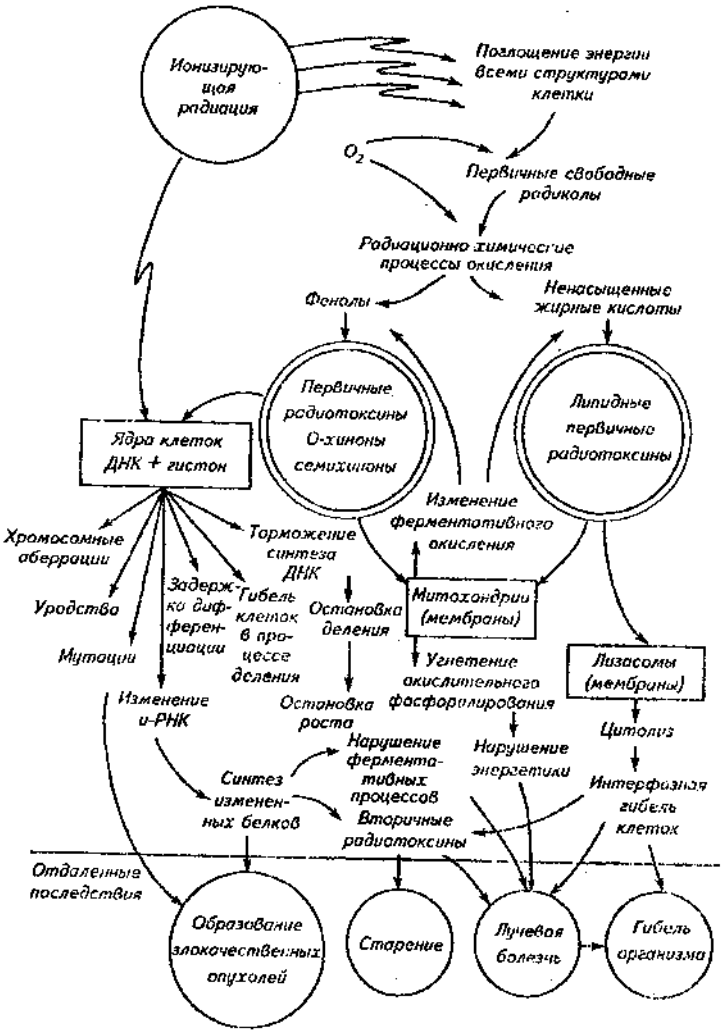


Рис. 3. Схема участия первичных радиотоксинов в развитии лучевого поражения организма.

Первичные продукты радиолиза — свободный электрон и положи-

тельный ион, а также возбужденная молекула воды обладают свойствами, отличающимися от свойств электрически нейтральных молекул. Они распадаются с образованием высокореакционных свободных радикалов водорода (H^o) и радикала гидроксила (OH^o). Свободные радикалы — это электрически нейтральные атомы или молекулы с неспаренным электроном на внешней оболочке. Радикалы в сотни раз активнее молекулы воды, так как имеют тенденцию «спаривать» неспаренный электрон с аналогичным электроном другого радикала. Время существования свободных радикалов составляет $2 \cdot 10^{-7}$ секунды. Радиолиз молекул воды проходит в две стадии. Первая стадия состоит из двух процессов: 1) ионизация и возбуждение молекул; 2) образование свободных радикалов.

В результате ионизации молекулы воды возникает положительно заряженный ион H_2O^+. Образование иона сопровождается потерей молекулой воды электрона, который превращается в гидратированный электрон (e_{ag}). Этот электрон обладает свойствами восстановителя, может соединяться с другой молекулой H_2O с образованием отрицательно заряженного иона H_2O^- или с положительным ионом H_2O^+ с образованием возбужденной молекулы воды H_2O^*. Первый процесс можно представить в виде двух реакций:

$$\gamma \rightarrow H_2O \rightarrow H_2O^+ + \bar{e} \quad \Big| \rightarrow + H_2O \rightarrow H_2O^-$$

$$H_2O^+ + \bar{e} \rightarrow H_2O^*$$

Продолжительность существования ионов и возбужденной молекулы воды составляет $10^{-6} - 10^{-9}$ секунды. Они распадаются с образованием высокореакционных свободных радикалов водорода и гидроксила (H^o и OH^o). Таким образом, первичные свободные радикалы H^o и OH^o образуются из ионов молекулы воды и при диссоциации возбужденной молекулы воды:

$$H_2O^+ \rightarrow H^+ + OH^o$$
$$H_2O^- \rightarrow OH^- + H^o$$
$$H_2O^* \Leftrightarrow H^o + OH^o$$

Гидроксильные радикалы — сильные окислители, а радикал водорода имеет свойство восстановителя.

Во второй стадии происходит взаимодействие свободных радикалов друг с другом, с молекулами воды и с растворенными в воде молекулами различных веществ. Реакции могут идти следующими путями:

$H^o + H^o \rightarrow H_2$ — образование молекул водорода;

$OH^o + OH^o \rightarrow H_2O_2$ — образование перекиси водорода;

$OH^o + H^o \rightarrow H_2O$ — рекомбинация, восстановление воды;

$H_2O + H^o \rightarrow H_2 + OH^o$; $H_2O + OH^o \rightarrow H_2O_2 + H^o$ — образование вторичных радикалов H^o и OH^o;

$RH + OH^o \rightarrow H_2O + R^o$; $RH + H^o \rightarrow H_2 + R^o$ — образование свободных радикалов различных молекул.

Радикалы, образовавшиеся при распаде возбужденной молекулы воды, обладают незначительной энергией, поэтому они не удаляются на большие расстояния друг от друга и подвергаются быстрой рекомбинации. Величины радиационно–химического выхода молекулы воды распределяются следующим образом: $G_{OH^o} = 2{,}6;$ $G_{H^o} = 0{,}4;$ $G_{e^-_{ag}} = 2{,}6$ и небольшое количество H_2 и H_2O_2. Выход измеряется числом образовавшихся или распавшихся молекул на 100 Эв поглощенной энергии излучения.

Взаимодействие свободных радикалов с органическими и неорганическими веществами идет по типу окислительно-восстановительных реакций и составляет эффект непрямого (косвенного) действия радиации. Величина прямого и непрямого действия ионизирующего излучения в первичных радиобиологических эффектах различных систем неодинакова. В абсолютно чистых сухих веществах преобладает прямое, а в слаборастворенных – косвенное действие. В клетках животных примерно 45% поглощенной энергии излучения действует непосредственно на молекулярные структуры – прямое действие.

При наличии в среде растворенного кислорода образуются гидропероксиды, первичным звеном которых является гидропероксидный радикал (HO_2^o), возникающий в результате реакции:

$$H^o + O_2 \rightarrow HO_2^o$$

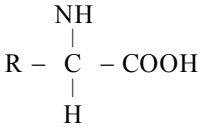
Гидропероксиды могут взаимодействовать между собой, образуя пероксиды водорода (H_2O_2) и высшие пероксиды (H_2O_4), которые обладают высокой токсичностью. В клетке эти соединения разлагаются ферментом каталазой на воду и кислород.

При облучении водных растворов биологически важных молекул ионизирующей радиацией с низким значением ЛПЭ радикалы и другие активные формы радиолиза воды возникают на расстоянии друг от друга. Это способствует вступлению их в реакции с другими растворенными молекулами. Когда излучение характеризуется высоким значением ЛПЭ, в плотном треке происходит радикал–радикальное взаимодействие, т.е. участие радикалов в реакциях с молекулами растворимых веществ становится менее существенным.

Радиационно-химические превращения молекул обычно исследуются в одно-и двухкомпонентных системах. В клетке сосредоточены во взаимосвязи друг с другом молекулы самых разнообразных веществ, и развитие радиационно-химических реакций подчиняется закономерностям, свойственным сложным многокомпонентным системам. Реакции, наблюдающиеся в модельных системах, не всегда близки к реальной ситуации в облученной клетке. Полное описание радиационно-химических процессов в клетке и ткани представляет сложную задачу с многими нерешенными вопросами. Поэтому необходимо ограничиваться упрощенным подходом, обращая внимание на повреждение молекул, выполняющих наиболее важные функции в жизнедеятельности клетки. Биологически важные макромолекулы — нуклеиновые кислоты, белки, липиды, углеводы – образуют основные структурные единицы клетки — хромосомы, биомембраны, полиферментные системы, клеточные оболочки. Повреждение биологически важных молекул обуславливается радиационно-химическими превращениями (повреждениями) мономерных единиц, из которых они состоят. Степень нарушения функций макромолекулы зависит от выполняемой ею роли в клетке, степени уникальности, возможности ее замены из "резервных" молекул или синтеза новой идентичной макромолекулы.

Существенное значение для понимания процессов, которые происходят в клетках живых организмов при облучении, имеет изучение действия излучения на органические вещества. Экспериментально доказано, что под действием излучений разрываются связи в органических молекулах и они диссоциируют на отдельные фрагменты, т.е. происходит их деструкция с образованием ионов или свободных радикалов. На растворенные в воде вещества действие излучений может быть прямое, в результате чего возникают органические ионы и свободные радикалы, и косвенное, приводящее к образованию свободных органических радикалов и органических перекисей при взаимодействии продуктов радиолиза воды (H^o, OH^o, H_2, и H_2O_2) с органическими молекулами. Облучение водных растворов органических веществ может вызывать реакции димеризации и полимеризации органических соединений.

Наибольшую часть всех органических соединений в любом организме составляют белки, к основной функции которых относится ферментативный катализ. В состав белков входят 20 аминокислот. Молекулы большинства аминокислот имеют общую структуру:



Остаток R может иметь различное строение, что определяет специ-

фичность свойств каждой аминокислоты и ее радиочувствительность. Набор аминокислот, их количество и последовательность расположения в белковой молекуле определяет первичную структуру белка. Аминокислоты при помощи пептидных связей (–CO–NH–) соединяются друг с другом, образуя каркас белковой молекулы. Атомы пептидных группировок располагаются в одной плоскости. Функциональные группы аминокислот (NH_2, COOH, OH, SH, S–S и т.д.), расположенные в боковых отростках пептидной цепи, могут взаимодействовать между собой и с другими органическими соединениями, образуя сложные белки.

При действии ионизирующих излучений на белковые молекулы индуцируются изменения в аминокислотных остатках, образующих макромолекулу белка. Наиболее общими радиационно-химическими реакциями аминокислот являются следующие процессы:

1) дезаминирование, сопровождающееся разрывом связи C–N и образованием аминогрупп;

2) декарбоксилирование с разрывом связи C–C и образованием карбоксильных групп;

3) дегидрирование, при котором происходит расщепление связей C– H и N– H и образование различных групп.

Различия в строении остатка R обуславливают специфику радиолиза каждой аминокислоты. С усложнением структуры молекулы аминокислоты и увеличением длины углеродной цепи возрастает частота разрывов и увеличивается количество продуктов радиолиза, т.е. возрастает радиочувствительность.

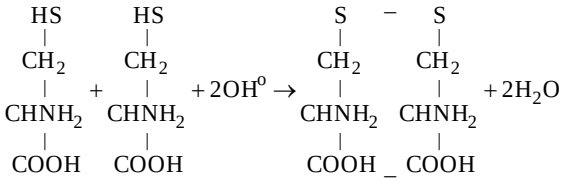
Установлено, что аминокислоты при облучении разлагаются преимущественно с отщеплением аммиака, т.е. происходит реакция дезаминирования. Радиационно-химический выход дезаминирования глицина, аргинина, аланина, лизина в водном растворе колеблется в пределах одной – пяти молекул NH_3 на одну пару ионов. С повышением концентрации раствора, а также дозы облучения выход аммиака возрастает.

Рассмотрим радиолиз раствора глицина, при котором происходит реакция дезаминирования (доза $10^4 – 10^5$ рад). Под действием излучения разрывается связь C–N. Возникающий свободный радикал NH_2^o присоединяет из раствора радикал H^o и превращается в аммиак:

$$NH_2 - CH_2 - COOH \rightarrow \left[NH_2^o + CH_2COOH^o\right] + H^o \rightarrow NH_3 + CH_2COOH^o$$

Среди аминокислот наибольшей радиочувствительностью обладают серосодержащие аминокислоты, у которых радиолиз просходит при меньших дозах. Хорошо изучен радиолиз цистеина — самой радиочувствительной из аминокислот. Под влиянием двух свободных ра-

дикалов OH^o сульфгидрильные группы двух молекул цистеина окисляются (отщепляется водород) и между двумя атомами серы замыкается связь с образованием молекулы цистина:



Изучение действия излучения на белки позволяет выделить основные реакции повреждения белковой молекулы: отщепление водорода по связи С–Н от углеродного атома с образованием белкового радикала; расщепление белка с образованием амида и карбонильного соединения; нарушение и разрыв первичной структуры, сопровождающиеся образованием низкомолекулярных фрагментов и полимеризацией молекулы белка; денатурация — специфическая реакция белков на облучение, при которой белок переходит в нерастворимую форму без изменения химического состава; радиационно–химические нарушения аминокислот; инактивация ферментов, т.е. потеря способности ферментов регулировать процессы обмена веществ. В состав белков входят также наиболее радиочувствительные серосодержащие и ароматические аминокислоты. В водных растворах существенную роль в радиационных превращениях белковых молекул играют продукты радиолиза воды – радикал OH^o и гидратированный электрон e^-_{aq}. Свободнорадикальные образования могут локализовываться в определенных местах молекулы. Через промежуточные соединения, возникающие по центрам локализации свободнорадикальных соединений, белки расщепляются с образованием фрагментов белковых молекул. С участием свободных радикалов, локализованных в разных участках белковой молекулы, могут происходить процессы полимеризации и возникать ковалентные сшивки белков с молекулой ДНК. Облучение вызывает нарушение конформационного состояния, что приводит к ослаблению способности белка регулировать самосборку надмолекулярных структур. Хорошо изучена реакция на облучение водных растворов ферментов, катализирующих разложение нуклеиновых кислот и белков. Причинами инактивации могут быть изменения пространственной конфигурации фермента, развертывание белковой глобулы, а также изменение аминокислотного состава в результате повреждения поверхностных участков фермента. Образование продуктов радиолиза белковых молекул в живых клетках, облученных дозами, близкими к полулетальным, обычно невелико. Прямое повреждение белковых молекул, по-видимому, не имеет решающего значения для жизнеспособ-

ности клеток, так как в клетке много одинаковых молекул и возможен синтез новой идентичной белковой молекулы.

Липиды находятся в клетке в довольно больших количествах и включаются в мембранную систему клетки. Радиолиз липидов сопровождается накоплением продуктов радиационно-химического превращения ненасыщенных жирных кислот, которые входят в состав липидов. Среди этих продуктов имеются перекиси и гидроперекиси — липидные перекиси. Выходы липидных перекисей могут составлять несколько сотен молекул на 100 эВ поглощенной энергии. Возникающие при этом нестабильные радикалы претерпевают ряд превращений, взаимодействуя с неповрежденными молекулами, друг с другом и с кислородом. В последней реакции образуется активный перекисный радикал, который, реагируя с исходной карбоновой кислотой, приводит к образованию гидроперекиси и нового перекисного радикала. Этой реакцией начинается цепной процесс окисления липидов, для продолжения которого необходимо наличие в среде кислорода. Конечными продуктами радиолиза жирных кислот являются карбонильные соединения, альдегиды, кетоны, спирты, углекислый газ. В живой клетке цепная реакция окисления липидов невозможна, потому что происходят одновременно другие реакции, препятствующие этому процессу.

Углеводы представлены в природе моносахаридами (4–8 атомов углерода) и полисахаридами (более 8 атомов углерода). Радиолиз моносахаридов сопровождается образованием дезоксисахаридов, дезоксикетосоединений, млоидиальдегида (МДА). Облучение полисахаридов вызывает разрыв углеродных связей и нарушение структуры, изменение физико-химических свойств, деполимеризацию, т.е. образование более простых молекул.

При радиолизе других органических молекул происходит нарушение их структуры в результате разрыва связей С–С, С–Н и связей углерода с функциональными группами С–R. Возникают радикалы различных типов. Среди продуктов появляются не только фрагменты углеводородной цепочки, но и продукты превращения функциональных групп. Например, при радиолизе спиртов, эфиров и кетонов образуется водород (реакция дегидрирования), при радиолизе органических кислот – двуокись углерода (реакция декарбоксилирования), при радиолизе аминов – аммиак (реакция дезаминирования). Происходят также реакции синтеза, т.е. образование более сложных молекул в результате полимеризации простых молекул и функциональных групп.

Действие ионизирующих излучений на нуклеиновые кислоты – ДНК, разные формы РНК и на их аналоги исследовано обстоятельно. Исследованиями доказано, что в развитии лучевого поражения клетки особо важное место принадлежит молекулярным повреждениям компонентов генетически важных молекул, в частности ДНК, входящей в

состав хромосом. Определяющая роль повреждения ДНК основывается на том, что гигантские молекулы ДНК в гаплоидном наборе хромосом не повторяют друг друга, представляя собой уникальную структуру клетки. Поэтому исследование радиационно-химических повреждений молекул нуклеиновых кислот приобрело большое значение в раскрытии механизмов радиобиологических явлений.

Облучение ДНК в водных растворах и сухих препаратах вызывает в первую очередь радиолиз ее структурных единиц: оснований, нуклиотидов, углеводной части, а также молекулы. К основным радиационно-химическим реакциям оснований относят дезаминирование пуриновых оснований (аденина и гуанина) и цитозина, образование пиримидиновых и пуриновых радикалов при разрыве пиримидинового или имидазольного кольца, образование гидроперикисных радикалов, образование в водных растворах кетильных радикалов при участии радикалов H^o и OH^o. Повреждение оснований ДНК клетки может быть причиной генных мутаций организма.

Сведений о радиационно–химических изменениях нуклеозидов, нуклеотидов и нуклеиновых кислот значительно меньше. Однако они позволяют сделать вывод о том, что в основаниях, облученных в составе этих трех структурных единиц, происходят качественно те же изменения, что и в основаниях, облученных в свободном виде. Установлено, что выходы реакций оснований, входящих в состав молекулы ДНК, меньше, чем при облучении их в свободном состоянии. Это связано с тем, что часть продуктов радиолиза воды (в основном радикале OH^o) расходуется в конкурирующих реакциях с углеводной частью. Выходы разложения пиримидиновых оснований превышают выходы разложения пуриновых.

У дезоксирибозы, входящей в состав ДНК, облучение приводит к образованию дезоксирибозилрадикалов, которые возникают чаще всего при взаимодействии радикала OH^o с одним из атомов водорода дезоксирибозы. Эти радикалы претерпевают реакции дегидратации и гидролиза с образованием окислительных и восстановительных продуктов. В результате изменений в углеводной части происходит разрыв полинуклеотидных связей, сопровождающийся выделением свободных оснований. Связь $3'PO_4$ более радиочувствительна, чем связь $5'PO_4$. При действии продуктов радиолиза воды на углеродные атомы, не связанные с фосфорной группой, возникают неустойчивые соединения – лабильные фосфатные эфиры, которые, подвергаясь гидролизу, образуют дополнительное количество фосфорной кислоты.

Облучение растворов ДНК вызывает структурное изменение молекулы ДНК. Целостность “скелета” ДНК, или первичной структуры, определяется межуглеродными связями $C_3' – C_4'$; $C_4' – C_5'$ и фосфорными связями $C_5' – OPO – C_3'$. Разрушение любой из этих связей приводит к одиночному (однонитевому) разрыву нуклеотидной цепи.

Одиночные разрывы обнаруживают по уменьшению молекулярного веса одиночных нитей ДНК, а также по концентрации выделившегося фосфата, по выходу МДА (млоидиальдегида). По мере накопления одиночных разрывов (при увеличении дозы облучения) расстояние между ними в комплиментарных цепях уменьшается и возникают двойные разрывы, приводящие к уменьшению молекулярного веса ДНК. Количество двойных разрывов накапливается пропорционально квадрату дозы облучения. При облучении ДНК редкоионизирующим излучением соотношение между двойными и одиночными разрывами составляет от 1:20 до 1:50. Оно снижается с увеличением плотности ионизации.

Изменения во вторичной структуре молекулы проявляются в виде разрывов водородных связей между комплиментарными основаниями, что вызывает частичную денатурацию молекулы ДНК. Выход разрывов водородных связей рассчитывается по доле оснований, оставшихся спаренными в ДНК после облучения. Все разрывы молекулы ДНК разделяются на две группы: первичные, которые происходят в момент облучения под действием излучения, и пострадиационные, которые происходят после облучения, в результате радиационно-химических реакций молекулы ДНК с другими молекулами и свободными радикалами. На рисунке приведены схемы структурно-радиационных повреждений молекулы ДНК. На рис 4. указаны места в молекуле ДНК, где наиболее легко реализуется поглощенная энергия после миграции по молекуле.

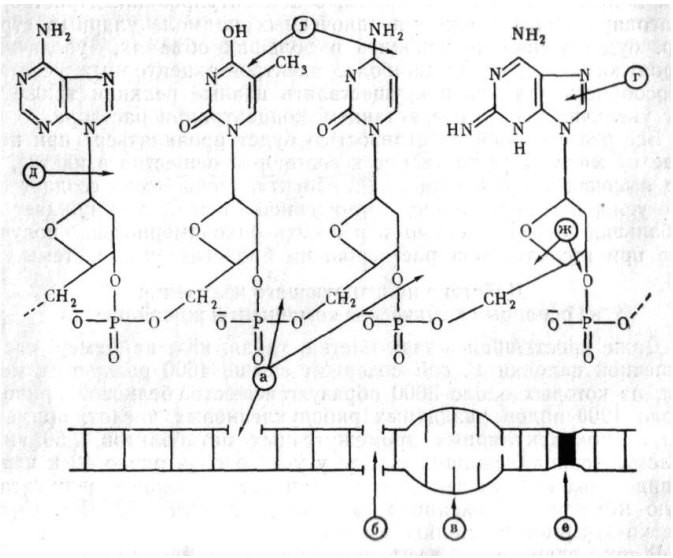


Рис.4. Основные радиационно-химические повреждения молекулы ДНК

Обозначения: а) одиночные разрывы; б) двойные разрывы; в) частичная денатурация молекулы в результате распада *n* водородных мостиков; г) радиационные изменения оснований; д) отщепление оснований; е) образование сшивок; ж) распад дезоксирибозы.

При облучении сухой ДНК и ДНК, содержащей небольшое количество воды, было обнаружено увеличение ее молекулярного веса и зафиксировано образование разветвленных структур. Облученная в вакууме ДНК теряет растворимость. Эти факты объясняются образованием ковалентных сшивок (слипание нитей) в молекуле ДНК при облучении. Присутствие воды увеличивает образование сшивок, а наличие кислорода препятствует этому процессу. Известны сшивки нескольких типов: продольные (между поврежденными основаниями), поперечные (между двумя нитями ДНК) и сшивки между нитями ДНК и молекулами белка. Возникновение сшивок является результатом образования ковалентных связей 3-х типов: между двумя реакционно–способными концами полимерной цепи, между поврежденными основаниями и между поврежденными основаниями и сахарофосфатными остатками. Однако механизм образования и молекулярная природа сшивок не выяснены до конца.

Выход повреждений ДНК при облучении клеток дозами, вызывающими репродуктивную гибель клеток, т.е. потерю способности

клеток к делению, незначителен. Однако и при очень малом выходе повреждений могут нарушаться структура и функции этих молекул в клетке. ДНК клетки, как объект радиобиологических реакций, существенно отличается от ДНК простых радиобиологических систем. В составе хромосом ДНК находится в виде двойной незамкнутой спирали. В митахондриях, пластидах и в клетках прокариот (клетки без ядер) ДНК представлена в виде двойной цепочки, замкнутой в кольцо. Клеточная (ядерная) ДНК хранит генетическую информацию клетки в виде генетического кода. Генетический код – это последовательность чередования нуклеотидов в молекуле ДНК, которая определяет порядок расположения аминокислот в белке. Облучение ДНК может привести к нарушению генетического кода и к появлению генных мутаций.

К настоящему времени доказано, что при облучении хромосомной ДНК клеток наблюдаются следующие первичные реакции: окисление пиримидиновых оснований и распад пуриновых оснований, обратимые и необратимые разрывы водородных связей, конфигурационные изменения надмолекулярных структур ДНК, внутри- и межмолекулярные сшивки полимерных цепей. В живых клетках ДНК связана с белками – гистонами, образуя самый сложный комплекс – хроматин, куда входят ДНК, РНК и белковые компоненты. Синтез ДНК и его задержка совпадают с этими же процессами у гистонов. Элементарная хромосомная нить образована спиралью ДНК, скрепленной гистонами. Облучение вызывает образование сшивок ДНК–белок. Главную роль в образовании сшивок играют продукты радиолиза пиримидиновых оснований (пиримидиновые и перекисные радикалы) и меньшую роль – продукты повреждения пуриновых оснований. При облучении клеток однонитевые разрывы вызывают потерю способности молекулы скручиваться в спираль и структура молекулы становится кольцевой. Двунитевые разрывы вызывают переход кольцевой структуры в линейную. Повреждения сахарофосфатных связей приводят к возникновению поперечных ковалентных сшивок ДНК–ДНК. При облучении клетки повышается активация ферментов ДНК–аз, которые вызывают деполимеризацию ДНК. Разрушение ядерных и цитоплазматических мембран при облучении создает условия для ферментативного повреждения молекулы ДНК. В клетке имеет место дистанционное действие на ДНК радиотоксинов – стабильных продуктов радиолиза клеточных и межклеточных молекул.

Следует отметить, что реакции, связанные с потерями и модификациями оснований, так же как и разрывы фосфороэфирных и межуглеродных связей, неспецифичны для ионизирующего излучения, так как выход многих продуктов этих реакций наблюдается при воздействии некоторых химических и физических факторов, клеточных ферментов типа эндо- и экзонуклеаз, ультрафиолетового излучения.

РНК, представленная в клетке несколькими формами (матричная, рибосомальная, транспортная), относится к массовым молекулярным структурам клетки, т.е. формы повторяются или содержатся в нескольких копиях, и, в отличие от ДНК, могут синтезироваться в требуемом количестве в клетке. Поэтому их радиационное повреждение менее значимо при лучевом поражении клетки. В основном, типы радиационного повреждения молекул РНК такие же, как и молекулы ДНК.

Клетка – элементарная биологическая система, способная к размножению. В живой клетке, как в отрегулированной биологической системе, изменение в какой-либо её части отражается на функционировании всей клетки.

Морфологические изменения в клетках обнаруживаются не сразу после облучения, а через некоторое время, которое неодинаково для разных клеток. Видимые изменения – это результат многочисленных сложных процессов в обмене веществ и невидимых изменений клеточных структур. **При облучении клеток наблюдаются следующие морфологические изменения: увеличение размеров клеток, увеличение ядер, образование двухядерных и трехядерных клеток, дробление ядер, изменение формы клеток, многополюсные митозы, увеличение объема хромосом, слипание хромосом, образование фрагментов хромосом, которые могут вызывать гибель клеток.**

Согласно правилу французских ученых Бергонье и Трибондо радиационная гибель клеток прямо пропорциональна интенсивности их деления и обратно пропорциональна уровню их дифференциации, т.е. делящиеся и молодые клетки очень чувствительны к облучению. К таким клеткам у растений относятся клетки меристем, обеспечивающие рост растений на протяжении всей жизни, а у животных и человека – клетки органов кроветворения: костного мозга и лимфатических желез. Эта закономерность явилась основой для радиотерапии злокачественных опухолей. Известно, что раковые клетки быстрее делятся, обладают меньшим уровнем дифференциации, чем клетки основной здоровой ткани, поэтому они менее радиоустойчивы, чем здоровые клетки.

Радиобиологические эффекты клеток зависят от дозы облучения, вида и энергии излучения, а также от типа, стадии жизненного цикла, возраста, функций клетки и других факторов. Облучение клетки вызывает: 1) повреждение клеточной мембраны, что приводит к усилению притока и оттока различных веществ в клетку и из клетки; 2) изменение консистенции цитоплазмы (коагуляция, разжижение); 3) нарушение структурных компонентов цитоплазмы; 4) повреждение ядерной мембраны и ядерных компонентов; 5) нарушение синтеза различных веществ и процессов обмена веществ в клетке; 6) гибель клетки.

В клетке критическим местом радиационного поражения является ядро, которое более радиочувствительно, чем цитоплазма, так как в

нем находятся жизненно важные структуры – хромосомы и ДНК. Многие критерии радиационного поражения клетки (число хромосомных аберраций в первом митозе, митотическая активность, интенсивность синтеза ДНК) тесно связаны с функциями ядра. При оценке радиочувствительности клеток имеют значение такие показатели, как объем ядра, число хромосом и плоидность, объем интерфазных хромосом, содержание ДНК в ядре, а также функциональное состояние ее генетических структур (фаза клеточного цикла, обводненность, защищенность ДНК белками), наличие в клетке веществ, обладающих радиопротекторными свойствами, способность клеток к репарации.

Радиобиологические эффекты в клетке зависят от стадии её жизненного цикла в момент облучения. Многие радиационные повреждения легко переносятся клеткой и быстро восстанавливаются. Такие клеточные реакции называются физиологическими эффектами облучения. Они протекают в ближайшие сроки после облучения. **Наиболее универсальная реакция делящихся клеток на облучение – временная задержка деления клеток или радиационное блокирование митоза.** Реакция изучена на разных объектах in vivo и in vitro для нормальных и опухолевых клеток.

Задержка деления наблюдается у всех клеток облученной популяции и находится в прямой зависимости от дозы. Блокирование первого пострадиационного митоза наблюдается в диапазоне доз до 10 Гр. Время задержки неодинаково у различных клеток. Для большинства клеток оно составляет примерно один час на один грей и зависит от стадии клеточного цикла в момент облучения. Наиболее длительна задержка деления при облучении клетки в S–фазе (синтез ДНК) и G_2–фазе (постсинтетический период ДНК). Самое короткое время задержки при облучении в митозе, когда большинство клеток находится в делении, которое заканчивается без остановки.

Механизм радиационной задержки деления окончательно не выяснен. Существует несколько точек зрения: 1) нарушение синтеза ДНК; 2) повреждение хромосом; 3) повреждение внутриклеточных структур, регулирующих деление; 4) накопление веществ, задерживающих деление клетки; 5) повреждение веществ, стимулирующих митоз; 6) нарушение механизма клеточного веретена и изменение его ориентации в анафазе; 7) нарушение клеточной и ядерной мембран; 8) защитно-приспособительная реакция клеток, подобная ответу на многие внешние факторы.

Радиочувствительность клеток в разных фазах жизненного цикла неодинакова. Наиболее радиочувствительны клетки, находящиеся в конце G_1-фазы (предсинтетический период ДНК) и в начале S-фазы (синтез ДНК). Синтез ДНК – уникальное событие в клетке, после которого клетка перестает существовать, дав начало двум дочерним клеткам. Синтез ДНК осуществляется по матричному механизму, т.е.

находящиеся в ядре молекулы ДНК являются матрицами, на которых воспроизводится копия их структуры, что приводит по окончанию синтеза к удвоению количества ДНК в клетке и идентичности вновь синтезируемой ДНК дочерних клеток матричной ДНК материнской клетки. Синтез ДНК связан с такими важнейшими радиационными эффектами, как задержка деления клеток, нарушение передачи наследственной информации, появление мутаций. Синтез ДНК – очень радиочувствительная реакция. В зависимости от дозы облучения реакция замедляется или вообще прекращается. Синтез ДНК может нарушаться на следующих этапах: 1) обменные реакции, приводящие к синтезу трифосфатов четырех нуклеотидов; 2) начало синтеза ДНК, связанного с освобождением молекулы ДНК от белков и раскручиванием цепи, присоединением ДНК-полимеразы; 3) синтез ДНК; 4) радиационное угнетение синтеза ряда ферментов, ответственных за синтез ДНК; 5) изменение в надмолекулярной организации хроматина и на других этапах. Косвенно на синтез ДНК могут оказывать влияние радиотоксины, которые всегда возникают в облученных клетках.

Наиболее важным проявлением действия излучения на клетки является подавление способности клеток к неограниченному размножению, что называется **репродуктивной (пролиферативной), или митотической гибелью клетки**. Неделящиеся клетки не всегда имеют признаки видимых повреждений и живут некоторое время после облучения. Видимая гибель клеток происходит в процессе первого пострадиационного деления, т.е. в первом митозе, а также во втором, третьем и четвертом митозах. Основной причиной гибели клеток являются структурные повреждения ДНК, которые обнаруживаются цитологическими методами в виде хромосомных аберраций. В репродуктивной гибели клеток основную роль играют такие хромосомные аберрации, как делеции (образование фрагментов хромосом) и транслокации (межхромосомные обмены).

Делеции бывают концевые и внутренние. При концевых делециях образуются ацентрические фрагменты (без центромеры) в результате повреждения одного или двух плечей хромосомы и кольцевая хромосома, которая образуется при замыкании двух поврежденных плечей в кольцо. Кольцевые хромосомы могут делиться в анафазе, распрямляться, переплетаться и образовывать петли. Они регистрируются только во время первого пострадиационного митоза, затем теряются с частотой 50% на деление. При внутренних делециях в результате двойного разрыва хромосомы выпадает её фрагмент. Оставшиеся части хромосомы соединяются и имеют укороченные размеры. Фрагменты хромосом остаются в цитоплазме и образуют микроядра в одной из дочерних клеток. Образование фрагментов приводит к потере генетической информации клеток. Потеря фрагментов не всегда приводит к гибели клеток в первых митозах. Гибель происходит в более

поздних митозах.

Межхромосомные обмены могут быть симметричные (между гомологичными участками хромосом) и асимметричные (между негомологичными участками хромосом). Завершенные симметричные обмены не вызывают потерь генетического материала, не препятствуют делению клеток. В результате асимметричных обменов образуются: 1) дицентрические мосты, представляющие собой тяж (фрагмент) из хромосомного материала в области экватора между двумя дочерними клетками при делении материнской клетки; 2) кольцевые хромосомы; 3) микроядра из фрагментов. Мосты препятствуют нормальному расхождению хромосомного материала к полюсам клетки и делению клеток в анафазе, что приводит к гибели клетки. Завершенные асимметричные обмены, или реципрокные транслокации, являются источниками генетических нарушений, которые накапливаются в клетках и передаются из поколения в поколение, создавая "генетический груз" популяции и способствуя появлению мутаций.

Структурные аберрации хроматидного типа возникают во время удвоения и после удвоения хромосом. Аберрации могут захватывать одну хроматиду, обе хроматиды или часть её поперечного сечения. Для хроматидных аберраций характерны разнообразные межхроматидные обмены и более высокая степень незавершенности обменов.

Облучение клеток в очень высоких дозах вызывает прекращение метаболизма и гибель клеток. Эта форма инактивации клеток называется **интерфазная гибель**. Она наступает в первые часы после облучения, при этом наблюдается пикноз и фрагментация ядра, изменение формы ядерной и клеточной поверхности, фрагментация хромосом. При интерфазной гибели клеток происходит: 1) повышение или подавление аэробного гликолиза; 2) снижение содержания АТФ; 3) нарушение реакции окислительного фосфолирования; 4) накопление субстратов цикла Кребса и аминокислот; 5) усиление процессов повреждения оснований в молекулах нуклеиновых кислот; 6) изменение активности ферментов; 7) нарушение барьерных и регуляторных функций мембран. Для интерфазно гибнущих клеток характерно с увеличением дозы постепенное увеличение повреждений и наличие пороговой дозы облучения, после которой повреждения не зависят от дозы, так как не происходит их репарация и все клетки погибают.

Радиочувствительность ткани пропорциональна пролиферативной активности и обратно пропорциональна дифференцированности составляющих ее клеток. Пролиферативная активность – это интенсивность деления. Дифференцированность – разнородность клеток по структуре, функциям и фазам развития. Ткани представляют собой многоклеточные системы. В основе устойчивости многоклеточной системы к облучению и другим факторам лежит гетерогенность отдельных клеток. Клетки тканей имеют разные скорости прохождения

фаз развития, причем изменение продолжительности клеточного цикла происходит чаще за счет G_1-фазы (предсинтетический период ДНК) и реже – G_2-фазы (постсинтетический период ДНК). Асинхронность деления и повышенная вероятность нахождения клеток в G_1-фазе придает клеточной популяции высокую устойчивость к действию радиации и другим неблагоприятным факторам. Дополнительным фактором устойчивости тканей является включение в клеточную популяцию покоящихся клеток (G_o–клетки). Гетерогенность – общебиологическое явление, которое проявляется от популяций одноклеточных водорослей до меристем высших сосудистых растений. Наиболее радиочувствительные ткани растений — меристемы, или образовательные ткани, которые постоянно делятся и обеспечивают рост растений на протяжении всей их жизни. Радиобиологические эффекты или радиационное поражение растений связаны в первую очередь с повреждением меристем. Облучение растений в начальных этапах онтогенеза вызывает морфологические аномалии первых органов и замедление роста. Облучение в последующих этапах развития – нарушения воспроизводительной системы и отклонения в формировании семян. В зависимости от активности деления ткани меристемы различаются по радиочувствительности. Максимальная радиочувствительность у апикальной меристемы стебля, радиационное повреждение которой приводит к снятию апикального доминирования, что вызывает усиленное ветвление и кущение растений. Облучение меристем междоузлий приводит к уменьшению высоты растений. В течение онтогенеза имеются периоды повышенной активности меристематических зон, поэтому радиационные повреждения растения закономерно изменяются по степени радиобиологического эффекта и по спектру аномалий развития. Реакции растений на действие гамма– и рентгеновского излучения проявляются в виде активации или подавления ростовых процессов. Внешние признаки лучевого поражения наблюдаются в виде морфологических аномалий (или морфозов) органов: корня, стебля, листа, цветка, плода, семени. Характерные радиоморфозы растений при облучении – опухоли различных органов. В обычных условиях клетки меристем имеют постоянный клеточный поток. Под клеточным потоком понимают частоту прохождения клеток через любую фазу клеточного цикла. Под действием радиации часть клеток не вступает в деление, у части клеток задерживается деление, поэтому клеточный поток ослабевает. Меристема обладает очень гибкой и эффективной системой регуляции клеточных потоков в обычных условиях и при восстановительных процессах после ее повреждения. У облученных меристем может происходить восстановление структуры клеточной популяции и нормализация клеточного потока. В этом процессе участвуют 3 вида клеток: 1) клетки, сохранившие способность к делению; 2) клетки, прошедшие период восстановления; 3) клетки, находящиеся в покое. Этот процесс

называется репопуляция. Доля необратимых лучевых поражений клеток и тканей варьирует в зависимости от условий облучения от 8 до 30% общего количества повреждений. Восстановление или репарация – это общебиологическое явление, которое начинается на молекулярном уровне и заканчивается на популяционном или биоценозном.

Известно, что причиной гибели клеток являются молекулярные повреждения ДНК, вызывающие однонитевые и двойные разрывы молекулы. Поэтому репарация клеток сводится к репарации ДНК. Выделяют 3 вида репарации ДНК: 1) дорепликативная; 2) репликативная; 3) пострепликативная. Дорепликативная репарация однонитевых разрывов может осуществляться двумя нитями: восстановление разрывов и экспозиция (вырезание) поврежденных оснований при участии ферментов (ДНК-лигазы, эндонуклиды и ДНК-полимеразы). Эксцизия сопровождается удалением поврежденного основания с участком ДНК и последующей его заменой таким же основанием, поэтому синтез ДНК происходит на восстановленной матрице. Предлагается существование 3-х типов репарации однонитевых разрывов: медленная (до 1 часа), быстрая (до 10 мин) и сверхбыстрая (до 2 мин). Для репарации двойных разрывов ДНК необходимо наличие поврежденных участков в гомоложной нити, по подобию которых формируется временные комплексы для восстановления поврежденных участков. При репликативной репарации повреждения восстанавливаются в зоне роста цепи ДНК. Восстановленная ДНК не всегда идентична исходной ДНК, поэтому сохранения измененной структуры ДНК в поколениях клеток является причиной отдаленных последствий. Пострепликативная репарация не всегда сопровождается полным восстановлением, поэтому дочерние нити могут иметь пробелы. Однако клетки сохраняют жизнеспособность несмотря на наличие дефектов. Выделяют одноэтапную репарацию ДНК, когда некоторые типы оснований восстанавливаются под влиянием специальных ферментов. Нарушения ДНК, возникающие в ходе репарации ДНК, называют ошибочной репарацией, в результате которой формируются вторичные повреждения структуры ДНК или остаются не восстановленными дефекты. Установлено, что при повреждении ДНК в облученных клетках возникают генные продукты, которых в норме нет в клетках. Эти продукты ускоряют репарацию и повышают радиоустойчивость клеток, что может иметь значение при адаптации к хроническому облучению.

4.2. Радиочувствительность сельскохозяйственных растений, животных и человека

Причины и механизмы, определяющие естественную радиочувствительность биологических объектов, пока полностью не раскрыты, но многие аспекты хорошо изучены. Например, факторы, влияющие на радиоустойчивость растений по классификации Гродзинского Д.М.,

разделяются на 3 группы. К первой группе отнесены факторы, обусловленные филогенезом вида, которые нельзя модифицировать: анатомическое строение растений, размер семян, объем клеточных ядер и хромосом, число хромосом и плоидность. Во вторую группу входят факторы, характеризующие функциональное состояние отдельных структур клетки и физиологическое состояние генома: этап онтогенеза, содержание сульфгидрильных групп (SH-групп), наличие антиоксидантов и макроэргов, способность к пострадиационному восстановлению. Третью группу факторов представляют факторы внешней среды, такие как погодно-климатические условия и условия минерального питания растений. Радиобиологические эффекты растений и животных имеют ряд сходных реакций, таких как наличие критических (наиболее радиочувствительных) клеток, тканей и органов, одинаковые типы хромосомных аберраций, потеря контроля над обменом веществ, образование соматических и генетических мутаций, трансформация клеток, радиационный канцерогенез (опухоли органов).

Реакции живых организмов на ядерное излучение весьма многообразны и определяются параметрами излучения и особенностями организма. Отношение организма к ионизирующему излучению характеризуется радиочувствительностью и радиоустойчивостью (радиорезистентностью). Эти два термина взаимосвязаны и с разных сторон отражают одно и то же явление – если организм обладает высокой радиочувствительностью, то он характеризуется низкой радиоустойчивостью, и наоборот.

Радиочувствительность — способность организма реагировать на малые дозы радиации, которая проявляется через нелетальные радиобиологические эффекты в организме. Радиоустойчивость — способность организма переносить высокие уровни облучения (летальные и полулетальные дозы). Чем меньше дозы, вызывающие нелетальные радиобиологические эффекты, тем выше радиочувствительность организма. Чем больше доза, вызывающая гибель организма, тем выше его радиоустойчивость.

Для характеристики радиочувствительности растений используются следующие критерии: лабораторная и полевая всхожесть, длинна корней у проростков, высота растений, число сформировавшихся органов, цветков и семян, масса растения, количество и масса семян на одном растении, выживаемость растений, а также выход хромосомных аберраций в мета– и анафазе.

Радиочувствительность оценивается летальной и полулетальной дозами. Летальная доза – $ЛД_{100}$ (или $ЛД_{100/30}$) – это минимальная доза облучения, вызывающая смерть 100% облученных организмов в течение 30 дней. Соответственно ей определяется полулетальная доза $ЛД_{50}$ (или $ЛД_{50/30}$) – минимальная доза облучения, вызывающая смерть 50% облученных организмов в течение 30 дней. Величины $ЛД_{50}$ в природе

различаются довольно значительно даже в пределах одного вида.

В настоящее время имеются сведения о радиочувствительности более чем 2000 растений, принадлежащих к разным семействам, родам и видам. Однако радиочувствительность оценена у семян – стадии онтогенеза растения, в которой оно находится в состоянии глубокого вынужденного покоя и поэтому обладает высокой устойчивостью к ионизирующим излучениям и ко всем повреждающим факторам.

При прорастании семян их радиочувствительность возрастает в 15–20 раз, потому что прорастание сопровождается активным делением клеток, а делящиеся клетки более чувствительны к облучению, чем клетки, находящиеся в стадии покоя. Кроме этого обязательным условием для прорастания семян является наличие воды. Высокая обводненность объектов при облучении способствует гораздо большему выходу свободных радикалов (H^o и OH^o), что усиливает радиационное поражение.

В мире низших растений и организмов самой высокой радиоустойчивостью обладают микроорганизмы, грибы и лишайники. Некоторые виды микроорганизмов выдерживают облучение в дозах 10^4 – 10^5 Гр. Среди древесных растений менее радиоустойчивы хвойные породы. После аварии на ЧАЭС в хвойных лесах, находящихся в 30-километровой зоне от АЭС, наблюдался широкий спектр морфологических аномалий вегетативных и генеративных органов, частота появления и степень тяжести которых зависели от дозы облучения.

В определенном диапазоне доз (5–20 Гр) ядерные излучения обладают стимулирующим действием. Радиостимуляция обнаружена у всех биологических объектов, начиная с одноклеточных и кончая растениями и животными. Впервые эффект радиационной стимуляции был получен на растениях в 1898 году. Облучение семян вызывает активацию многих процессов обмена: усиливается синтез нуклеиновых кислот, белков, гормонов, повышается активность некоторых ферментов, изменяется проницаемость мембран, увеличивается поступление в растения питательных веществ и т.д. Одним из важнейших механизмов общего стимулирующего действия излучения является образование неспецифических веществ хиноидной природы, которым А. М. Кузин дал название триггер–эффекторы. Хиноны образуются из полифенолов в результате радиационно-химических реакций окисления и активации полифенолоксидаз. При облучении высокими дозами хиноны возникают в растительных объектах в больших концентрациях и оказывают угнетающее действие на их развитие. В малых концентрациях (10^{-7}–10^{-8} М) эти вещества действуют как стимуляторы. Проникая в ядра клеток, они соединяются с гистонами и тем самым снимают неспецифическую блокаду генома этими белками, т.е. происходит дерепрессия (активация) определенной группы генов. Начинается усиленный синтез информационных РНК, белков, ферментов, фитогормо-

нов, индуцирующих метаболические процессы. Это в свою очередь существенно сокращает фазы клеточного цикла на ранних стадиях развития. Стимулирующий эффект облучения обнаружен не только при облучении семян, но и при облучении клубней, луковиц, черенков, корневищ, усов. Повышенный уровень триггер-эффекторов вызывает дерепрессию (перевод в активное состояние) генома не только у клеток верхушечной точки роста, но и в боковых почках, что приводит к интенсивному росту и увеличению числа боковых побегов. Таким образом, образование неспецифических триггер-эффекторов хиноидной природы составляет один из важнейших механизмов общего стимулирующего действия излучения. Облучение семян различных культур стимулирующими дозами перед посевом приводит к повышению урожая на 10–25% и к улучшению его качества, т.е. к повышению содержания белка, сахара, крахмала, витаминов, аминокислот и других веществ, которые сформировались у растений различных видов в процессе эволюции. Стимуляция картофеля происходит при облучении клубней в дозах 0,5–5,0 Гр за 2–6 суток до посадки, при этом возрастает урожайность на 18–25% и увеличивается содержание крахмала на 15%. Гамма-облучение черенков или подвоя виноградной лозы увеличивает выход полноценных прививок на 11–34%. При этом отмечается интенсивное деление клеток в камбиальном слое на месте срастания подвоя с привоем, что способствует более быстрому срастанию тканей привоя с подвоем. Облучение может снимать тканевую несовместимость подвоя с привоем. Гамма-стимуляция применяется при выгонке зеленных культур, для ускорения развития и цветения луковичных и цветочных растений и при разведении редких и лекарственных растений.

Наибольший интерес в мире животных представляют млекопитающие. Известно, что млекопитающие (человек и животные) обладают наибольшей чувствительностью к облучению по сравнению с птицами, рыбами, земноводными и др. (табл.2). Причины разной радиочувствительности организмов пока неизвестны. Однако общая тенденция такова: начиная от зародыша до половозрелого состояния радиочувствительность организма и его органов постепенно понижается, в среднем возрасте стабилизируется и к старости вновь понижается.

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.

К первой, наиболее чувствительной к излучениям группе, относятся красный костный мозг, половые железы, селезенка, лимфоидная ткань. Стволовые клетки этих тканей полностью погибают при дозе облучения 10 Гр. Морфологически регистрируемые изменения в них

возникают при облучении дозой 0,25 Гр.

Таблица 2. **Радиочувствительность живых организмов**

Вид	$ЛД_{50}$, Гр	$Лд_{100}$, Гр
Млекопитающие:		
овца	1,5–4,0	5,5–7,5
крупный рогатый скот	1,6–5,5	6,5
человек	2,5–5,5	4,0–6,0
обезьяна	2,5–6,0	8,0
свинья	2,5–3,0	4,5
лошадь	3,5–4,0	5,0–6,5
собака	2,0–3,5	4,0–5,0
мышь	4,6–7,5	7,0
кошка	5,0–7,5	8,0
птицы, рыбы	8,0–20,0	15,0–18,0
насекомые	10,0–100,0	–
змеи	80,0–200,0	–

Ко второй, более резистентной к излучениям группе, относятся пищеварительный тракт, печень, органы дыхания, органы выделения, органы зрения, мышечная ткань. Клетки этих тканей выдерживают дозу облучения до 40 Гр.

К третьей группе относятся нервная ткань, кожные покровы, хрящевая и костная ткань, которые выдерживают дозу облучения до 80 – 100 Гр.

Наиболее радиочувствительные органы и системы называются критическими. С их поражением связана гибель организма в определенные сроки после облучения. Клетки критических органов имеют короткий жизненный цикл и высокие темпы обновления (за одну минуту отмирают и вновь образуются десятки и сотни тысяч клеток). Большую скорость обновления имеют кроветворная система и желудочно-кишечный тракт. Центральная нервная система состоит из высокодифференцированных клеток, которые после отмирания не восстанавливаются.

К кроветворным органам относятся костный мозг, лимфатическая ткань, селезенка, вилочковая железа (тимус). Нарушение процессов кроветворения в этих органах наступает очень рано – непосредственно в ходе лучевого воздействия, а дальнейшее развитие и проявление нарушений носят фазовый характер, что связано с разной радиочувствительностью клеток и с процессами восстановления в клетках.

Самый высокорадиочувствительный орган – костный мозг, при общем облучении он поражается в первую очередь. При внешнем облучении животных дозами $ЛД_{50/30}$ и выше прекращается митоз клеток, появляются дегенеративные формы некоторых видов клеток, в крови снижается количество эритроцитов. К ранним изменениям костного мозга при внешнем облучении относятся также уменьшение незрелых форм красной и белой фракции, тромбоцитов и увеличение гранулоци-

тов. Установлено, что костный мозг обладает достаточно большой способностью к регенерации (т. е. к восстановлению), которая при среднелетальных дозах наступает через 4–7 суток, и к концу 4-й недели картина костного мозга или структура крови становится близкой к нормальной. При летальных и сверхлетальных дозах радиации нормальное содержание клеток не восстанавливается и происходит аплазия костного мозга.

Радиационное воздействие на лимфотическую ткань приводит к раннему разрушению лимфобластов и лимфоцитов в самой ткани и лимфоцитов в периферической крови. Полулетальные и летальные дозы облучения вызывают нарушения структуры ткани, различные изменения лимфоузлов и других лимфоидных образований.

Облучение полулетальной дозой селезенки приводит к прекращению митоза и гибели части лимфоцитов. В результате разрушения клеточных элементов орган уменьшается в размере и массе.

Клетки вилочковой железы – тимоциты (лимфоциты) – погибают практически все в течение первых суток. Восстановление клеток до исходного уровня происходит за счет единичных неповрежденных клеток.

У разных млекопитающих после облучения в высоких дозах наблюдаются примерно одинаковые скорости исчезновения клеток крови. Межвидовые различия этой реакции зависят от резерва стволовых клеток красного костного мозга, количество которых связано с общей массой тела. Приблизительные значения $ЛД_{50}$ для костно-мозгового синдрома у мелких животных составляют 5–8 Гр, а у более крупных — 2–3 Гр.

Характерной реакцией организма на лучевое воздействие является изменение количества лейкоцитов: в первые минуты и часы наблюдается незначительное уменьшение; через 6–8 часов – увеличение на 10–15% от исходного уровня; через 24 часа – резкое снижение от исходного уровня. Степень и фазность изменения количества лейкоцитов находятся в прямой зависимости от дозы, а также от вида животных. Время восстановления количества лейкоцитов до нормы составляет 2–3 месяца.

Облучение млекопитающих полулетальными дозами приводит к изменению количества эритроцитов. В первые сутки увеличиваются количество клеток и содержание гемоглобина в крови на 10–15%, затем на 15–20-е сутки содержание снижается в 2–3 и более раз от нормы. Параллельно с количественными нарушениями происходят морфологические и биохимические нарушения: увеличение размеров клеток, пикноз ядер и вакуолизация цитоплазмы, а также образуются двуядерные клетки и клетки аномальных форм. Эритроциты восстанавливаются до нормального количества за 2–5 месяцев.

По радиочувствительности тромбоциты занимают промежуточное

положение между лейкоцитами и эритроцитами. Облучение дозой $ЛД_{50}$ приводит к резкому снижению количества тромбоцитов в первые сутки. Появляются клетки с различными аномалиями: двуядерные, с непропорциональными размерами ядра и цитоплазмы. В организме нарушаются такие процессы, как поглощение протромбина, свертываемость крови, рекальцификация плазмы и другие. Восстановление тромбоцитов наблюдается на 35–45 день после облучения.

Наиболее радиочувствительными клетками крови являются лимфоциты. Регистрируемое уменьшение содержания лимфоцитов отмечается при облучении дозой 0,6 Гр. При облучении дозой $ЛД_{50/30}$ наибольшее снижение наблюдается через 1–3 суток. Для этого периода характерны морфологические изменения клеток, нарушение соотношения малых форм, появление двуядерных клеток, зернистость и вакуолизация ядра и протоплазмы, изменение активности ферментов. Фазность изменения, характерная для лейкоцитов, у лимфоцитов отсутствует.

Наряду со значительными изменениями в структуре крови и кроветворных органах отмечаются структурные изменения стенок кровеносных сосудов, особенно капилляров. Это сопровождается различными кровоизлияниями (точечные и разлитые) и кровотечениями (наружные и внутренние).

Все органы пищеварения проявляют функциональные и морфологические реакции на облучение. По степени радиочувствительности они распределяются следующим образом: тонкий кишечник, слюнные железы, желудок, прямая и ободочная кишки, поджелудочная железа, печень. Наибольшая чувствительность у железистого эпителия и эпителия ворсинок. Облучение приводит к прекращению деления и отмиранию клеток, к оголению клеток ворсинок и крипт, что сопровождается выходом плазмы крови в кишечник, а также приводит к снижению барьерно-иммунной функции кишечной стенки, в результате чего микрофлора кишечника попадает в организм и вызывает токсикоз и бактериемию. Лучевое поражение проявляется через тошноту, рвоту, понос. Большие дозы лучевого воздействия угнетают секрецию желудочных желез, что приводит к морфологическим изменениям – кровоизлияниям, катарам, язвам, рубцовым стенозам, свищам. Нормализуется функциональное состояние желудочно-кишечного тракта в разные сроки, доходящие до нескольких месяцев.

Половые железы млекопитающих реагируют на облучение, в принципе, однотипно. Основное видовое отличие – величина повреждающей дозы, которая тесно связана с видовой радиочувствительностью организмов. При действии радиации на половые железы сильнее повреждается генеративная функция и менее нарушается их гормональная деятельность. Степень постлучевых изменений в половых железах зависит, в основном, от дозы и способа облучения. Половые клетки семенников по радиочувствительности располагаются в следующем

убывающем порядке: спермиогонии, спермиоциты, спермиды, зрелые спермии. Гистологическое исследование выявляет многочисленные кровоизлияния в паренхиму железы, в просветах семенных канальцев – скопление некротических клеток, единичные измененные спермиогонии и спермиоциты. Сперматогенез восстанавливается за счет выживших спермиогоний через несколько месяцев, но при этом отмечается большое количество дефектных спермиев, а в паренхиме семенников – развитие склеротических процессов. У молодых неполовозрелых животных семенники и яичники более чувствительны к облучению, чем у половозрелых. По степени уменьшения радиочувствительности клетки функционирующего яичника располагаются в следующем порядке: ооциты II порядка в зрелых фолликулах, ооциты I порядка, зрелые яйцеклетки, эпителий вторичных и первичных фолликулов, желтое тело, покровный эпителий. Радиационное повреждение яичников одинаково у всех животных: вначале повреждаются и погибают наиболее радиочувствительные клетки, происходит деструкция эпителия, фиброзное разрастание соединительной ткани яичника, нарушение половых циклов, гормональные отклонения. Восстановление функций яичников идет очень медленно.

Таким образом, внешнее облучение растений и млекопитающих приводит к формированию у них различных радиационных эффектов.

Биологическое действие инкорпорированных радионуклидов, или радионуклидов, находящихся внутри организма, в принципе не отличается от действия внешних источников ионизирующего излучения. Независимо от того, где находятся радионуклиды, их ядра постоянно распадаются с выделением ионизирующего излучения, которое взаимодействует с атомами и молекулами веществ или клеток, что приводит к различным физическим и химическим реакциям и к формированию радиобиологических эффектов широкого спектра.

При проведении экспериментов радионуклиды вводятся в организм путем инъекций и с кормом. При радиоактивном загрязнении территории радионуклиды поступают в организм животных и человека через легкие при вдыхании загрязненного воздуха, через пищеварительный тракт с кормом и водой, через кожу, слизистые оболочки и раны. Длительное нахождение животных и человека на территории, загрязненной радионуклидами, приводит к хроническому внешнему и внутреннему облучению всего организма и его органов. При этом со временем наибольшую опасность представляет внутреннее облучение. Основное количество радионуклидов (до 95–99%) поступает в организм животных с кормом, в организм человека – с продуктами питания животного и растительного происхождения. Основным дозообразующим продуктом является молоко, а также лесные продукты питания.

Биологическое действие радионуклидов определяется физическими (вид и энергия излучения, доза, период полураспада) и биологически-

ми (тип распределения в организме, путь и скорость выведения из организма) свойствами радионуклидов, а также видовой, возрастной и индивидуальной радиочувствительностью организма.

Специфичность действия инкорпорированных радионуклидов связана со следующими особенностями: неравномерное распределение в организме; концентрация в отдельных органах и тканях, которая вызывает их непрерывное облучение и облучение соседних органов и крови невысокими дозами; длительный период облучения тканей с возрастанием дозы во времени; способность переноситься с током крови, облучая при этом кровь и другие органы; большое разнообразие радиобиологических эффектов; специфические отдаленные последствия. Радиобиологические эффекты и отдаленные последствия, в конечном итоге, проявляются на организменном уровне в виде различных заболеваний органов и систем.

Хорошо изучено радиационное действие инкорпорированных радионуклидов при искусственном введении. Характер поражения и интенсивность его развития зависят, в основном, от дозы и длительности поступления в организм.

При поступлении радионуклидов с пищей (кормом) в организме одновременно происходят следующие процессы: всасывание из желудочно-кишечного тракта и поступление их в кровь, переход радионуклидов из крови в ткани и накопление в тканях, выведение из организма ранее и вновь поступивших радионуклидов. В начале поступления происходит интенсивная концентрация радионуклидов в органах и тканях. По мере накопления радионуклидов усиливаются процессы их выведения из организма до равновесного состояния, когда количество поступившего радионуклида будет равно количеству выводимого. Равновесие быстрее устанавливается в мышцах и позднее в скелете. Скорость выведения зависит от природы радионуклида, а также от вида, возраста, физиологического состояния животного и других факторов. Из организма наиболее быстро выводятся радионуклиды из тканей, где высокая скорость обмена веществ. На выведение влияет состояние радионуклидов в тканях (свободное или связанное) и тип ткани (мышечная, печеночная, костная). Из организма быстрее выводятся свободные радионуклиды – йод-131, рутений-106, теллур-132, цезий-137. Радионуклиды, связанные с тканевыми белками и находящиеся в коллоидном состоянии, такие, как лантан-140, церий-144, выводятся медленнее. Стронций-90, иттрий-90, барий-140 включаются непосредственно в костную ткань, замещая в ней кальций, поэтому выводятся очень медленно. Среди искусственных радионуклидов, появившихся в окружающей среде в результате антропогенной деятельности человека, наибольшую опасность для млекопитающих представляют йод-131, стронций-90 и цезий-137, которые при поступлении в организм включаются в процессы обмена веществ. Эффективный пе-

риод полувыведения йода-131 составляет около 2–3 недель, цезия-137 – около 2–3 месяцев, а стронция-90 – до 3-х и более лет.

При попадании йода-131 в организм он полностью всасывается в кровь и около 60% его откладывается в щитовидной железе. Йод-131 накапливается в мышцах, печени, почках, яичниках. Токсическое действие йода-131 проявляется прежде всего в поражении щитовидной железы (разрушение ткани, различные опухоли, рак). Возникают существенные изменения в нервной (центральной и периферический отдел) и эндокринной системах, в кроветворных органах, а также в легких (бронхиты и пневмонии), печени (жировые перерождения), почках (морфологические и функциональные изменения), органах размножения, эндокринных железах и в других органах. Установлено, что структурные и функциональные изменения в органах могут быть связаны с нарушениями эндокринной регуляции, возникающими в результате поражения щитовидной железы, т.е. имеет место косвенное действие радиации, когда поражение одного органа, вырабатывающего гормоны, вызывает нарушения в деятельности других органов и систем.

Особенностью действия стронция-90 является то, что он неравномерно концентрируется в скелете, остается там длительное время, постоянно облучая ткани, поэтому в костной ткани и костном мозге происходят основные радиобиологические эффекты. В организме стронций-90 связывается с белками сыворотки крови (до 40%) и, являясь химическим аналогом кальция, входит в состав костной ткани. Высокая концентрация стронция-90 наблюдается в почках, печени, легких. Патологические процессы в скелете при поражении сторонцием-90 развиваются медленно, начиная с угнетения процессов остеогенеза, разрушения сосудов, изменения костного вещества, появления нетипичных костных образований и кончая возникновением злокачественных костных опухолей или сарком. Изменения в кроветворных органах и структуре крови наблюдаются в первые часы, сутки и в течение 3–5 лет после поступления сторонция-90 в организм. Серьезные морфологические и функциональные изменения происходят в желудочно-кишечном тракте, в функционировании сердечно-сосудистой системы, желез внутренней секреции – гипофиза, надпочечников, щитовидной, половых и др., а также в органах зрения и лимфоидных органах.

В органах и мышечной ткани около 90% поступившего цезия-137 находится в свободном состоянии, что обуславливает высокую скорость обмена и выведения его из организма. Цезий-137 концентрируется в мышцах и внутренних органах и сравнительно равномерно распределяется по организму. Биологическое действие цезия-137 изучено менее, чем стронция-90 и йода-131. Установлено, что поражающие эффекты цезия-137 менее значимы для организма, чем йода-131 и стронция-90. Нахождение этих трех радионуклидов в организме сни-

жает иммунобиологические и защитные свойства организма и может вызывать развитие лучевой болезни, имеющей симптомы, наблюдаемые при общем внешнем облучении.

В настоящее время имеет значение ряд нерешенных вопросов, таких как действие разных радионуклидов и совместное их действие в ранние и отдаленные сроки, предельно допустимое поступление радионуклидов в организм, зависимость поражающего эффекта от дозы для ранних и отдаленных последствий, а также связь отдельных радиобиологических реакций с общественно-значимыми процессами: продолжительностью жизни, функциями воспроизводства, работоспособностью. Не установлен дозовый порог или минимальная доза, ниже которой облучение ионизирующим излучением не вызывает мутаций у животных и человека. Однако определена доза, которая повышает частоту возникновения мутаций в два раза по сравнению с естественными мутациями. Удваивающая доза радиации для млекопитающих находится в пределах от 0,03 до 1,5 Гр.

Радиобиологические эффекты человека изучались при облучении персонала и населения в результате различных радиационных аварий. Последствия Чернобыльской аварии оцениваются по полученным и ожидаемым дозам. Ориентировочной дозой является годовая эффективная эквивалентная доза, которая в Республике Беларусь не должна превышать 1мЗв в год. В Беларуси около 2 млн. человек проживает в зонах радиоактивного загрязнения (1–40 Ки/км^2), из них более 300 тыс. человек проживает на территории, где эта доза превышает 1мЗв в год. Доказано, что нарушения в состоянии здоровья зависят от полученной дозы, возраста, индивидуальных особенностей, концентрации радионуклидов в организме. Наиболее радиочувствительная часть населения – дети и беременные женщины. Медицинское обследование детей, подвергшихся облучению, через 10 лет после аварии выявило прогрессивный рост заболеваемости по всем классам хронических неспецифических болезней бронхолегочной, сердечно-сосудистой, пищеварительной, эндокринной и иммунной систем. Заболеваемость щитовидной железы с окончательным диагнозом «рак» возросла в 20 раз, эндокринной системы – в 4,5 раза, органов кроветворения – в 4 раза, органов дыхания – в 2,5 раза, органов зрения – в 1,6 раза, желудка – в 2,5 раза. Частота возникновения новообразований органов возросла в 2,4 раза. Анализ состояния здоровья беременных женщин показал, что с 1991 по 1994 год в 5 раз увеличилась анемия, в 3 раза возросла заболеваемость мочеполовой системы, патологии сердечно-сосудистой системы возросли в 1,8 раза, гормональные нарушения – в 6,3 раза, аномалии родовой деятельности и преждевременные роды – в 1,7 раза, в 2,2 раза увеличилась заболеваемость новорожденных детей, врожденные пороки развития возросли в 1,5 раза. Младенческая смертность, возросшая после 1986 года, начиная с 1992 года постепенно

снижается.

У взрослого населения облучение дало широкий спектр различных нарушений морфологии и функционирования жизненно важных органов и систем. Установлены сходства и различия радиационного поражения животных и человека. Характерными реакциями организма человека на облучение являются образование злокачественных опухолей, лейкозы, болезни щитовидной железы. Наиболее часто злокачественные опухоли регистрируются в легких, желудке, молочной железе, почках, прямой кишке, матке и яичниках, щитовидной и поджелудочной железах, мочевом пузыре, гортани и на коже. Главные патологии у мужчин – опухоли органов пищеварения и дыхания, у женщин – опухоли органов пищеварения, молочной железы, матки и яичников. За 10 лет у мужчин злокачественные образования увеличились на 26,2%, у женщин – на 28,6%. Лейкозы и заболеваемость раком щитовидной железы возросли соответственно в 2–3 раза. Рост злокачественных новообразований в республике продолжается.

Повреждение генома половых клеток определяют по частоте хромосомных болезней, которые отражают частоту мутаций в клетках. Частота естественных (спонтанных) генетических мутаций в популяции человека составляет 10,65% (врожденные уродства, многофакторные нерегулярно наследуемые болезни и др.).

Оценку генетического риска и прогноз последствий действия радиации на человека проводят путем экстраполяции данных, полученных на животных. Наибольшее внимание заслуживают мутации, которые проходят через «сито» мейоза и передаются по наследству из поколения в поколение. Эти генетические нарушения представляют наибольшую опасность для будущего человечества. К ним относят генные мутации, а из множества хромосомных аберраций – реципрокные транслокации. Реципрокные транслокации – это взаимные обмены участками негомологичных хромосом. Обмены полные или завершенные, поэтому количество генов не изменяется, а изменяется порядок чередования их в ДНК. Такие обмены не вызывают гибели клеток, передаются из поколения в поколение и проявляются в определенных условиях. Наличие мутаций выявляют на определенных локусах (участках) нескольких хромосом (чаще на 7 хромосомах). Генетические эффекты в половых клетках самцов оценивают на частоте индуцированных реципрокных транслокаций, доминантных летальных мутаций, рецессивных мутаций и по частоте аномальных головок спермиев. Генетические эффекты женских половых клеток изучены в меньшей степени. Установлена высокая способность ооцетов к репарации, ранняя гибель наиболее радиочувствительных и высоко коммуникабельных ооцетов. Частота генетических мутаций, по опытам некоторых исследователей, в ооцетах выше, чем в спермагониях, по опытам других – примерно одинакова. В опытах на мышах установлено, что с

увеличением пострадиационного периода вероятность передачи потомству генетических нарушений у самцов не снижается, а у самок, начиная с 3-го помета после облучения, частота мутаций резко падает. Исследованиями радиационной генетики выявлен ряд закономерностей действия радиации на половые клетки млекопитающих: различная радиочувствительность стадий половых циклов и половых клеток, зависимость радиобиологических эффектов от дозы, мощности дозы и способа облучения, высокая радиочувствительность первичных половых клеток и всех половых клеток ранних периодов развития организма, сохранение мутаций в течение репродуктивного периода и передача мутационных изменений по наследству, а также возможность модификации (изменения) генетического эффекта. Причины различной радиочувствительности половых клеток окончательно не выявлены. Однако установлено, что генетическая радиочувствительность половых клеток не связана с радиочувствительностью этих клеток, определяемой по критерию выживаемости.

К настоящему времени доказано прямое влияние ионизирующего излучения на зародыш, плод и течение беременности. В период внутриутробного развития реакции на облучение и их последствия в сильной степени зависят от стадии развития, что объясняется разной радиочувствительностью тканей и систем. Выделяют 3 периода внутриутробного развития: 1) зародышевый (до имплантации); 2) период основного органогенеза; 3) плодный период. У млекопитающих и человека наиболее радиочувствителен период основного органогенеза. Облучение в этот период вызывает различные уродства, аномалии развития и внутриутробную гибель. Облучение в эмбриональный период вызывает уродства органов и около 70–80% гибель зародышей. Радиочувствительность в плодный период значительно ниже, однако увеличивается процент смертности после рождения. У плода, облученного в этот период, часто развивается острая лучевая болезнь, в результате чего у новорожденного замедляется рост, развитие, отмечается анемия, лейкопения, кровоизлияния и другие патологии. Одна из главных причин гибели плодов и новорожденных – нарушение кроветворения.

Эмбрион обладает способностью к восстановлению, регенерации и перестройке. Эмбрион содержит активные фагоциты, которые поглощают и устраняют продукты клеточного распада и поврежденные клетки. Места удаления клеток заполняются неповрежденными первоначальными клетками, из которых дифференцируются нормальные органы и ткани. Такой зародыш имеет меньшую массу и уменьшенные отдельные органы. Отдельные клетки зародыша накапливают повреждения, которые могут проявляться через несколько лет после облучения у взрослого.

Период наибольшей радиочувствительности эмбриона человека растянут во времени. Он начинается с зачатия и заканчивается на 38

дне беременности. В этот период формируются зачатки всех органов, поэтому облучение вызывает различные аномалии в развитии зародыша в виде различных уродств всех органов. Облучение через 40 дней после зачатия уродств не вызывает.

Облучение беременных женщин при взрыве атомных бомб в Японии сопровождалось 50%-ной внутриутробной гибелью, гибелью при рождении и гибелью младенцев. Облучение в первой половине беременности вызывало рождение детей с задержкой роста, уменьшенными размерами органов, пороком сердца, нарушениями воспроизводительной системы, микроэнцефалией, с болезнью Дауна и другими отклонениями. Облучение во второй половине беременности сопровождалось снижением иммунинета и смертностью. У выживших детей в возрасте старше одного года в 25% случаев проявлялась умственная отсталость. Исследованиями американских ученых доказано, что прямое действие радиации на развитие плода составляет 95%. Опосредованное действие, т.е. через организм матери, составляет 5%. Изменения в зародыше возникают через 2 часа после облучения, т.е. раньше проявления лучевого синдрома у матери.

Общее облучение организма человека разными дозами приводит к развитию радиационных синдромов: костно-мозгового (1–10 Гр), желудочно-кишечного (10–100 Гр) и церебрального (более 100 Гр) в результате поражения органов и систем.

При воздействии разных доз облучения у людей могут наблюдаться следующие радиационные эффекты: **соматические (нестохастические)** – непосредственные телесные повреждения организма, возникающие вскоре после воздействия облучения; **соматико-стохастические** – последствия, которые выявляются на больших группах людей в более отдаленные периоды после облучения. Ими могут быть развитие опухолей разных органов и тканей, лейкозы, сокращение общей продолжительности жизни людей; **генетические** – проявляются в виде возникновения хромосомных аберраций, доминантных генных мутаций.

Соматические нестохастические эффекты проявляются в форме острой лучевой болезни, хронической лучевой болезни, местных радиационных поражений, а также лучевых поражений, которые вызываются инкорпорированными радионуклидами и комбинированными радиационными поражениями.

Острая лучевая болезнь (ОЛБ) – это общее заболевание организма, которое развивается после однократного или многократного облучения на протяжении небольшого промежутка времени (до 4 суток). Развитие ОЛБ отмечается после облучения всего организма гамма-излучением или потоком нейтронов в условиях военных конфликтов или в мирное время в результате радиационных аварий дозой 1 Гр и более. В зависимости от дозы облучения выделяют четыре степени

тяжести острой лучевой болезни: легкую (1–2 Гр), средней тяжести (2–4 Гр), тяжелую (4–6 Гр) и крайне тяжелую (свыше 6 Гр). ОЛБ – циклическое заболевание, для которого характерны четыре периода течения болезни. Первый – первичная общая реакция на облучение. Второй (латентный) период – это период мнимого благополучия, при котором после первичной реакции в результате мобилизации всех резервов организма отмечается значительное улучшение состояния. Третий период характеризуется разгаром болезни, при котором проявляются многие клинические симптомы: кровоточивость тканей, снижение числа лейкоцитов, тромбоцитов, высокая температура, расстройство желудка и другие симптомы. Четвертый период – это период разрешения болезни, который заканчивается выздоровлением или смертельным исходом. Длительность периода составляет от 2–3-х недель (смертельный исход) до 3–4-х месяцев (выздоровление и реабилитация).

Хроническая лучевая болезнь (ХЛБ) – это заболевание всего организма, которое развивается при длительном, многоразовом облучении людей малыми дозами. Первые признаки заболевания отмечаются при суммарном облучении в дозах 0,7 – 1,5 Гр и мощности излучения 0,001 –0,005 Гр в сутки. ХЛБ может возникать как в мирное время в условиях радиоактивного загрязнения территории, так и во время военных конфликтов при применении ядерного оружия. Для ХЛБ характерно постепенное развитие и продолжительный период нарастания нарушения функций организма. Обычно болезнь развивается через 3 – 5 лет от начала облучения, симптомы болезни прогрессируют постепенно.

Легкая степень ХЛБ отмечается у лиц с накопленной дозой облучения до 1,5 Гр. Симптомы: быстро наступающее утомление, головные боли, слабость, нарушение сна, снижение артериального давления. В крови отмечается снижение гемоглобина, уменьшение количества лейкоцитов и тромбоцитов. После длительного лечения (7 – 8 недель) может наступить полное выздоровление.

ХЛБ средней тяжести характеризуется усилением симптомов, характерных для ХЛБ легкой степени. Резко снижается работоспособность, появляются сердечные боли, значительно ухудшается состав крови, появляется кровоточивость десен и слизистой оболочки носа. Снижается сопротивляемость организма к инфекциям. Болезнь развивается при накопленной дозе до 2 – 2,5 Гр. При этом происходит длительная или полная потеря трудоспособности.

Третья, тяжелая степень ХЛБ, характеризуется тяжелым состоянием больных. Болезнь развивается при накопленной дозе облучения свыше 2,5 Гр. Заболевание часто заканчивается смертью по причине гематологических или инфекционных осложнений.

Изменения, которые возникают в организме под действием ионизирующих излучений через 5–20 и более лет, относятся к отдаленным последствиям. Особенностью заболеваний, относящихся к отдаленным

последствиям, является то, что они возникают как после локального, так и после внутреннего и внешнего облучения, а также от факторов внешней среды и генетических факторов.

Различают неопухолевые и опухолевые формы отдаленных последствий. К неопухолевым формам относятся три вида патологических процессов: гипопластические состояния, склеротические процессы и дисгормональные состояния.

Гипопластические состояния возникают при длительном накоплении достаточно высоких доз излучения (3–10 Гр) и развиваются в кроветворных органах, органах пищеварения, дыхания, коже и др. Они проявляются в виде анемии, лейкопении, атрофии слизистой оболочки желудка и кишечника, различных гастритов, атрофии половых желез и бесплодия. Эти болезни трудно поддаются лечению и плохо восстанавливаются. Склеротические процессы характеризуются обширным и ранним повреждением сосудистой сети облученных органов, развитием очаговых или диффузных разрастаний соединительной ткани на месте погибших паренхиматозных клеток, разнообразием восстановительных процессов с появлением полиплоидных клеток. Морфологически они проявляются такими процессами, как цирроз печени, нефросклероз, хронические лучевые дерматиты, атеросклероз, лучевые катаракты, некрозы костной ткани, поражения нервной системы и другими изменениями. Дисгормональные состояния проявляются в форме ожирения, поражения надпочечников и развития сосудистого нефросклероза, новообразований в паращитовидной, щитовидной и поджелудочной железах. У женщин развиваются кистозные изменения яичников, нарушения секреторной и гармональной функций, приводящие к сдвигам в половых циклах и изменениям в слизистой оболочке матки и молочных желез. Опухолевые формы отдаленных последствий чаще возникают при облучении инкорпорированными альфа- и бета-излучающими радионуклидами. Они обычно развиваются в критических органах, которые являются местами концентрации радионуклидов.

Радиобиологические эффекты, которые проявляются непосредственно у облученной особи, относят к стохастическим или соматическим эффектам. Эффекты возникают в результате мутаций и других нарушений в соматических клетках различных органов и тканей и проявляются в виде опухолей, лейкозов, сокращения продолжительности жизни и других болезней. Мутации, которые возникают в генах и хромосомах половых клеток и проявляются у потомков облученных особей, относят к генетическим эффектам. Доминантные генные мутации проявляются у потомков первого поколения. Рецессивные генные мутации передаются из поколения в поколение, проявляются первый раз только у правнуков в том случае, когда рецессивный ген имеется в половых клетках отца и матери. Генетическое действие ионизирующих

излучений у млекопитающих выявляется только при облучении малыми и полулетальными дозами. Облучение высокими дозами радиации животных вызывает бесплодие или гибель, поэтому генетический эффект нельзя определить. К генетическим эффектам относят внутриутробную гибель плода, выкидыши, преждевременные роды, разнообразные уродства развития, несовместимые с жизнью. Следует отметить, что опасность генетических эффектов для сельскохозяйственных животных можно значительно снизить путем постоянно производимых отборов и подбора пар для спаривания. В природе повышенный радиационный фон рассматривается рядом ученых как дополнительный фактор, влияющий на темпы и формы эволюции диких животных, растений и других организмов. Здесь действует естественный отбор, который уничтожает наиболее радиочувствительные особи из популяции, в результате чего формируются более радиоустойчивые популяции. Генетические эффекты в популяции зависят от общего числа первоначально мутированных генов. Небольшая доза, полученная всей популяцией, вызывает большие генетические изменения, чем высокая доза, полученная частью популяции. При хроническом облучении популяции общее число мутаций непрерывно увеличивается до тех пор, пока не наступит равновесие между скоростью возникновения новых мутаций и гибелью носителей мутаций до воспроизведения. Равновесие устанавливается после многих поколений.

К отдаленным последствиям облучения человека в настоящее время относят злокачественные опухоли, лейкозы, катаракту (помутнение хрусталика, вызывающее слепоту), нарушение эндокринного равновесия, нарушение эмбрионального развития, стерильность, ускорение старения, сокращение продолжительности жизни.

Механизмы отдаленных последствий облучения не изучены. На клеточном уровне основу отдаленных патологий составляют три типа нарушений, которые возникают в результате непосредственного действия радиации: клеточная гибель, накопление наследственных нарушений в половых клетках, накопление повреждений в соматических клетках.

Биологическое действие ионизирующих излучений проявляется на всех уровнях, начиная с атомного и молекулярного и кончая организменным. В природе нет объектов, устойчивых к действию радиации, выделяются только наиболее радиоустойчивые и радиочувствительные клетки, ткани, органы и организмы.

Облучение вызывает развитие радиационных синдромов у растений и млекопитающих, острую и хроническую лучевую болезнь человека, а также формирует отдаленные последствия облучения, которые проявляются спустя десять и более лет после общего (внешнего и внутреннего) и локального облучения в виде неопухолевых и опухолевых форм и различных мутаций в соматических и половых клетках.

5. ОСНОВЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

5.1. Законодательство Республики Беларусь по обеспечению радиационной безопасности населения

Основными документами, регламентирующими воздействие ионизирующих излучений на население являются: Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000), Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений (ОСП-2002), а также следующие Законы Республики Беларусь: “О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС” (1991), “О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС” (1991), “О радиационной безопасности населения” (1998), а также ряд концепций: Концепция проживания населения в загрязненных радионуклидами районах и развития находящихся в них населенных пунктов (1998), Концепция проживания на загрязненных радионуклидами территориях в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС (1990), Концепция защитных мер в восстановительный период для населения, проживающего на территории Республики Беларусь, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате Чернобыльской аварии (1995), Концепция защиты населения Республики Беларусь при радиационных авариях на АЭС (1993) и др.

Согласно этим документам для населения **средняя эффективная доза дополнительного внешнего и внутреннего облучения за календарный год не должна превышать 1 мЗв (0,1 бэр)** или эффективная доза за период жизни (70 лет) - 70 мЗв (7 бэр). Эта доза не включает в себя дозы, создаваемые естественным радиационным фоном, а также дозы, получаемые гражданами при медицинских процедурах.

5.2. Концепция защиты населения Республики Беларусь при радиационных авариях на АЭС

В Республике Беларусь в настоящее время нет атомных электростанций и других объектов ядерно-энергетического цикла. Вместе с тем, в приграничных районах сопредельных с республикой государств (Россия, Украина, Литва) функционируют, в частности, Смоленская, Чернобыльская, Ровенская, Игналинская 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.

Настоящая концепция содержит основные принципы защиты населения. Она разработана с учетом рекомендаций международных организаций, опыта ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС и сложившейся в республике послеаварийной радиоэкологиче-

ской ситуации. Ее положения основаны на современных представлениях о действии ионизирующего излучения на организм человека и на международных стандартах в области радиационной защиты.

Цель концепции – обоснование мероприятий, предотвращающих возникновение детерминистских (нестохастических) и ограничение риска стохастических эффектов у населения.

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.

Концепция предусматривает защитные мероприятия на период первых 10-дней от аварии. Последующие мероприятия по защите населения регламентируются законами РБ “О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС”, “О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на ЧАЭС”, а также другими нормативными документами.

Все официальные документы, касающиеся мероприятий по защите населения и планов их реализации, не должны противоречить настоящей концепции.

Основным критерием для принятия решения о мерах защиты является индивидуальная доза облучения, прогнозируемая от начала аварии до момента завершения формирования радиоактивного следа, составляющего в среднем 10 суток.

При мощности экспозиционной дозы (МЭД), превышающей ее значение для данной местности на 20 мкР/час, ограничивается пребывание людей на открытой местности, осуществляется герметизация жилых и служебных помещений (уплотнение дверей и окон, отключение вентсистем при отсутствии фильтров), начинается йодная профилактика и вводится запрет на употребление молока и листовых овощей.

При мощности экспозиционной дозы равной 2,5 мР/час мероприятия по защите населения заключаются в исключении пребывания на открытой местности, прекращении работы ДДУ, школ и учебных заведений, прекращении всех видов деятельности, кроме необходимой для жизнеобеспечения населения.

При необходимости пребывания вне помещения – защита кожных покровов и органов дыхания.

Эвакуация детей и беременных женщин осуществляется при ожидаемой дозе 10 мЗв за 10 суток после аварии. Решение об эвакуации

принимается, если мощность экспозиционной дозы составляет 5 мР/час.

Эвакуация остального населения осуществляется при ожидаемой дозе 50 мЗв за 10 суток после аварии. Решение об эвакуации принимается, если МЭД составляет 25 мР/час.

Эвакуация детей и беременных женщин осуществляется при ожидаемой дозе на щитовидную железу равной 200 мЗв.

Эвакуация остального населения осуществляется при ожидаемой дозе на щитовидную железу равной 500 мЗв.

На территории Беларуси устанавливаются две зоны первоочередных защитных мероприятий.

Первая в радиусе 30 км от Игналинской и Чернобыльской АЭС – зона возможной эвакуации. В случае аварии на этих 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.

Эвакуация населения должна проводиться за пределы 100 км зоны.

Концепция рекомендована и утверждена Национальной комиссией по радиационной защите населения Республики Беларусь от 30 марта 1993 года, протокол №12; одобрена решением коллегии Министерства здравоохранения 26 апреля (протокол №6).

5.3. Принципы и критерии радиационной безопасности

Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000) (далее – Нормы), применяются для обеспечения безопасности человека во всех условиях воздействия на него ионизирующего излучения искусственного или природного происхождения. Требования и нормативы, установленные Нормами, являются обязательными для всех юридических лиц, независимо от их подчиненности и форм собственности, а также для местных распорядительных и исполнительных органов, граждан Республики Беларусь, иностранных граждан и лиц без гражданства, проживающих на территории Республики Беларусь.

Согласно Нормам сформулированы принципы радиационной безопасности:

- непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения человека от всех источников излучения (принцип нормирования);
- запрещение всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением (принцип обоснования);

- поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения (принцип оптимизации).

Нормы распространяются на следующие виды воздействия ионизирующего излучения на человека: в условиях нормальной эксплуатации техногенных источников излучения; в результате радиационной аварии; от природных источников излучения; при медицинском облучении.

Требования норм не распространяются на космическое излучение на поверхности Земли и внутренне облучение человека, создаваемое природным калием, на которое практически невозможно влиять.

В Нормах установлены требования к ограничению техногенного облучения в контролируемых условиях, защите от природного облучения в производственных условиях, ограничению облучения населения в нормальных условиях, по ограничению облучения населения в условиях радиационной аварии. Также приводятся значения допустимых уровней радиационного воздействия в различных ситуациях.

Нормами установлены **категории облучаемых лиц**: персонал и все население, включая лица из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности. Для категории облучаемых лиц установлены три класса нормативов:

- основные пределы доз (ПД);
- допустимые уровни многофакторного воздействия (для одного радионуклида, пути поступления или одного вида внешнего облучения), являющиеся производными от основных пределов доз:
- пределы годового поступления (ПГП), допустимые среднегодовые объемные активности (ДОА), среднегодовые удельные активности (ДУА) и др.
- контрольные уровни (дозы, уровни, активности, плотности потоков и др.). Их значения должны учитывать достигнутый в организации уровень радиационной безопасности и обеспечивать условия, при которых радиационное воздействие будет ниже допустимого.

Согласно Нормам **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.**

Главной целью радиационной безопасности является охрана здоровья населения, включая персонал, от вредного воздействия ионизирующего излучения путем соблюдения основных принципов и норм радиационной безопасности без необоснованных ограничений полезной деятельности при использовании излучения в различных областях хозяйства, в науке и медицине.

Основу системы радиационной безопасности, сформулированной в данных Нормах, составляют современные международные научные

рекомендации, опыт стран, достигших высокого уровня радиационной защиты населения, и отечественный опыт.

Ионизирующая радиация при воздействии на организм человека может вызвать два вида эффектов, которые клинической медициной относятся к болезням: детерминированные пороговые эффекты (лучевая болезнь, лучевой дерматит, лучевая катаракта, лучевое бесплодие, аномалии в развитии плода и др.) и стохастические (вероятностные) беспороговые эффекты (злокачественные опухоли, лейкозы, наследственные болезни).

Нормы радиационной безопасности относятся только к ионизирующему излучению, и в них учтено, что ионизирующее излучение является одним из множества источников риска для здоровья человека и что риски, связанные с воздействием излучения, не должны соотноситься только с выгодами от его использования, но их следует сопоставлять и с рисками нерадиационного происхождения.

5.4. Внешнее и внутреннее облучение человека

Любые объекты на нашей планете, живые и неживые, искусственные и естественные, органические и неорганические, находятся под постоянным воздействием ионизирующих излучений. Ионизирующее излучение может двумя путями оказывать воздействие на человека и животных. Первый путь – внешнее облучение, второй - внутреннее.

Внешнее облучение происходит от источников, расположенных вне организма. 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.

Доза внешнего облучения формируется, главным образом, за счет воздействия гамма-излучения. Альфа- и бета-излучения не вносят существенного вклада в общее внешнее облучение живых организмов, так как они, в основном, поглощаются воздухом или эпидермисом кожи. Радиационное поражение кожных покровов бета-излучением возможно, в основном, при нахождении на открытом пространстве в момент выпадения радиоактивных продуктов ядерного взрыва или других радиоактивных осадков.

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.

Отметим, что в настоящее время на территории РБ дополнительное внешнее облучение в связи с аварией на ЧАЭС обусловлено, в основном, присутствием цезия-137 в окружающей среде.

Мероприятия по защите от внешнего облучения при радиационных авариях включают укрытие населения в помещениях и убежищах в первые дни после радиационной аварии, удаление верхнего загрязненного радионуклидами слоя почвы после прекращения радиоактивных выпадений, отселение и др.

Внутреннее облучение — это облучение организма от находящихся внутри него радиоактивных веществ.

Основным источником поступления радионуклидов в организм являются продукты питания (около 97%), в меньшей степени вода (около 2%) и воздух. По степени биологического действия ионизирующие излучения располагаются в следующий убывающий ряд: α, β, γ, что обусловлено их различной ионизирующей способностью.

В первоначальный период (первые 1,5-2 месяца) после радиационной аварии дополнительное как внешнее, так и внутреннее облучение населения обусловлено, главным образом, радионуклидами йода. Йод попадает в организм с воздухом и пищей. Из легких и желудочно-кишечного тракта с кровью он распределяется по всем органам и тканям. Но уже через несколько часов большая часть йода оказывается в щитовидной железе. Значительно уменьшить облучение щитовидной железы можно заполнив ее стабильным йодом (йодная профилактика). Для этого необходимо немедленно принимать препараты, содержащие стабильный йод: йодид калия (ежедневно по 1 таблетке после еды в течение недели), спиртовой раствор йода (3 раза в день после еды 1-2 капли на полстакана воды или молока детям до 2-х лет, остальным 3-5 капель). При этом следует помнить, что передозировка стабильного йода вызывает побочные эффекты.

После распада короткоживущих радионуклидов дополнительное внутреннее облучение населения, главным образом, происходит радионуклидами цезия и стронция.

Для ограничения внутреннего облучения населения республики начиная с 1986 устанавливаются нормативы предельного содержания радионуклидов в продуктах питания. Они периодически пересматриваются в сторону ужесточения требований. С целью дальнейшего снижения доз внутреннего облучения населения Республики Беларусь в 1999 году введены Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99) взамен действовавших РДУ-96.

6. РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

6.1. Источники ионизирующих излучений и загрязнения окружающей среды

Радиоактивность и сопутствующие ей ионизирующие излучения существовали на Земле задолго до зарождения на ней жизни и присутствовали в космосе до возникновения самой Земли. Все существующие источники радиационного фона делят на 2 основные группы: естественные и искусственные. Основную часть облучения население Земного шара получает от естественных источников радиации (до 78%). Большинство из них таковы, что избежать облучения от них просто невозможно.

В биосфере Земли содержится свыше 80 радионуклидов естественного происхождения. Радиоактивными являются все встречающиеся в природе элементы с $Z > 83$. **Естественные источники ионизирующего излучения** можно разделить на две категории: космическое излучение и излучение естественных радиоактивных элементов (земная радиация).

Космическое излучение — это поток частиц и лучей, непрерывно падающих на земную поверхность как из космического пространства (первичное), так и из атмосферы Земли, в результате взаимодействия первичного космического излучения с атмосферой (вторичное). К первичным космическим излучениям относятся те излучения, которые попадают в земную атмосферу из космического пространства и состоят, в основном, из протонов (92%), альфа-частиц (7%), ядер лития, бериллия, углерода, азота, кислорода и других элементов. Вторичные космические излучения состоят из мезонов (70%), электронов и позитронов (26%), небольшого числа первичных протонов (0,05%), остальное составляет гамма-излучение и быстрые нейтроны. Энергия первичного космического излучения очень велика (в среднем, 10^4 МэВ), поэтому оно губительно для всего живого. Атмосфера служит своеобразным щитом, предохраняющим биологические объекты от воздействия космических частиц. Космический фон зависит лишь от высоты местности и практически постоянен на всей территории нашей республики.

Естественные радиоактивные элементы распространены на Земле в ничтожных количествах и содержатся в твердых породах земной коры, в воздухе, в воде, а также в растительных и животных организмах. Они вошли в состав Земли с самого ее образования. Их можно разделить на две категории: первичные и космогенные. Первичные подразделяются на две группы. Первая группа включает 43 радионуклида трех семейств (рядов) радиоактивных элементов: 1. семейство

урана-238, родоначальником которого является ^{238}U ($T_{1/2}$ = $4{,}51 \cdot 10^9$ лет); 2. семейство урана-235, родоначальником которого является ^{235}U ($T_{1/2}$ = $7{,}13 \cdot 10^8$ лет); 3. семейство тория, родоначальником которого является ^{232}Th ($T_{1/2}$ = $1{,}41 \cdot 10^{10}$ лет).. Радиоактивные семейства - цепочки элементов, самопроизвольно образующихся один из другого в результате радиоактивного распада. Конечными продуктами распада в каждом семействе является свинец, соответственно семействам ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb. Радионуклиды этой группы называют также тяжелыми естественными радионуклидами. В природе ранее существовало четвертое радиоактивное семейство нептуния – ряд ^{237}Np ($T_{1/2}$ = $2{,}14 \cdot 10^6$ лет), все члены которого в естественных условиях уже распались.

Вторая группа первичных радионуклидов состоит из 24 долгоживущих (период полураспада от $1{,}3 \cdot 10^9$ до $1{,}4 \cdot 10^{21}$ лет) радиоактивных изотопов таких химических элементов, как K, Ca, Rb, Sn и др.

В облучении человека и других организмов заметную роль играет калий-40 и радиоактивный газ радон, который состоит из нескольких изотопов (Rn-220, Rn-222 и др.). В природном калии содержится 0,0118% радиоактивного K-40. Изотопы радона являются промежуточными продуктами в рядах распада урана и тория. Согласно оценке Научного Комитета по действию атомной радиации (НКДАР) ООН, радон вместе со своими дочерними продуктами радиоактивного распада ответственен примерно за 3/4 годовой индивидуальной эффективной эквивалентной дозы облучения, получаемой населением планеты от земных источников радиации. Большую часть этой дозы человек получает с вдыхаемым воздухом, особенно в непроветриваемом и подвальном помещениях.

Космогенные радионуклиды образуются, в основном, в атмосфере в результате взаимодействия космического излучения (нейтронов, протонов и др.) с ядрами атомов O, N, Ar, а затем поступают на земную поверхность с атмосферными осадками. В среднем между процессом образования и радиоактивным распадом этих нуклидов установилось равновесие и запас их в биосфере держится на одном уровне, испытывая лишь изменения, связанные с вариациями скорости образования. Эта группа представлена 20 радионуклидами с периодами полураспада от 37,3 мин (^{38}Cl) до $7{,}4 \cdot 10^5$ лет (^{26}Al). Наиболее значимые в радиологическом плане радионуклиды этой группы – ^{3}H, ^{7}Be, ^{14}C, ^{22}Na, ^{24}Na, ^{26}Al. К этому перечню можно было бы отнести космогенные изотопы ^{32}P, ^{35}S, ^{54}Mn, ^{59}Ni, несколько изотопов кобальта и железа, однако содержание их в природе незначительно, и они не играют большой роли в биосферных процессах.

Радионуклиды искусственного происхождения образуются в результате деятельности человека по использованию атомной энергии, испытаний и применения ядерного оружия, ядерного синтеза с помощью специальных установок и источников излучений, т. д.

Широкомасштабное загрязнение биосферы радионуклидами началось 16 июня 1945 года со взрыва первой в истории человечества атомной бомбы в США. 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.

С развитием атомной энергетики мы приобрели новый, чрезвычайно опасный фактор загрязнения окружающей среды - техногенные радиоактивные элементы, которые поступают в биосферу либо “вполне легально”, под маркой радиоактивных отходов, либо в результате аварийных ситуаций на атомных реакторах. Чернобыльской катастрофе предшествовали три крупные радиационные аварии (в СССР, Великобритании и США).

К искусственным источникам относится также промышленное производство, связанное с радиоактивными элементами, медицинское оборудование, имеющее источники ионизирующих излучений (например, рентгеновские установки).

Искусственные радионуклиды получают и используют в таких количествах, что возникающее при этом излучение имеет интенсивность, в миллионы раз превосходящую интенсивность естественных источников излучения. Искусственные радионуклиды по различным причинам попадают в окружающую среду, повышая тем самым радиационный фон. Кроме того, они включаются в биологические системы и поступают непосредственно в организм животных и человека. Все это создают опасность для нормальной жизнедеятельности организмов.

6.2. Радиационная обстановка до и после аварии на ЧАЭС

Естественный радиационный фон представляет собой ионизирующее излучение, действующее на человека на поверхности земли от природных источников космического и земного происхождения.

В Беларуси естественный радиационный фон находится в пределах 0,020 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 республике – 1 мЗв в год.

Технологически измененный естественный радиационный фон представляет собой ионизирующее излучение от природных источников, претерпевших определенные изменения в результате деятельности человека, например, излучение от естественных радионуклидов, поступающих в биосферу вместе с извлеченными на поверхность Земли из ее недр полезными ископаемыми, в результате поступления в окружающую среду продуктов сгорания органического топлива.

Искусственный радиационный фон обусловлен радиоактивно-

стью продуктов ядерных взрывов, отходами ядерной энергетики и радиационных аварий.

Еще до аварии на Чернобыльской АЭС геологи и геохимики республики 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.

Начиная с 1945 года было проведено большое число взрывов атомных и термоядерных бомб в различных частях земного шара. В результате этого продукты ядерных взрывов (в том числе Cs-137 и Sr-90) распространились через атмосферу по всей земной поверхности. Было установлено, что максимальная поверхностная плотность загрязнения Cs-137 и Sr-90 наблюдается в широтном поясе 50-60^{o} северной широты и составляет 100-175 и 54-95 мКи/км^{2} соответственно.

26 апреля 1986 года на 4-ом блоке Чернобыльской АЭС последовали один за другим два взрыва, которые разрушили перекрытия, сорвали крышу со здания реактора, открыв его активную зону и выбросив в атмосферу большое количество уранового топлива, трансурановых элементов, продуктов деления, бетон, графит. Возник пожар. Радиоактивные вещества достигли высоты 1,8 км и начали перемещаться с воздушными потоками в северо-западном и северном направлении через западные и центральные районы Беларуси.

Во внешнюю среду поступило радиоактивных веществ общей активностью около 10 ЭБк (1Э=10^{18}), в том числе 6,3 ЭБк радиоактивных благородных газов. Было выброшено 50-60 % йода и 30-35 % цезия, содержащихся в реакторе. По некоторым оценкам величина выброса считается более высокой.

Формирование радиоактивного загрязнения Беларуси началось сразу же после взрыва реактора. 27-28 апреля 1986 года 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 на 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 года в совокупности с до-

ждями, особенно в конце апреля и начале мая, определили масштабность радиоактивного загрязнения территории Беларуси. Около 2/3 радиоактивных веществ в результате сухого и влажного осаждения выпали на ее территории.

Радиоактивные выбросы привели к значительному загрязнению местности, населенных пунктов, водоемов. Загрязнение территории Беларуси свыше 37кБк/м^2 по цезию-137 составило 23 % от всей площади республики. Для сравнения, для Украины оно составляет 5 %, России - 0,6 %. Это свидетельствует о более сложных и тяжелых последствиях чернобыльской катастрофы для Беларуси по сравнению с Россией и Украиной. Основные массивы загрязненных радионуклидами пахотных земель и луговых угодий сосредоточены в Гомельской (58%) и Могилевской (27%) областях. В Брестской, Гродненской и Минской областях их доля от общей площади загрязненных сельскохозяйственных угодий в республике составляет соответственно 6, 5 и 5 %.

Повышение радиоактивности в результате катастрофы на ЧАЭС зарегистрировано на расстоянии десятка тысяч километров. Основной вклад в загрязнение природной среды и формирование дозовых нагрузок на население оказали цезий-137 (период полураспада 30 лет), стронций-90 (29 лет), плутоний-238 (88 лет), плутоний-239 ($2{,}4 \times 10^4$ лет), плутоний-240 (6537 лет), плутоний-241 (14,4 года), цезий-134 (2 года), церий-144 (284 суток), рутений-106 (368 суток), йод-131,-132,-133,-135 (до 8 суток), лантан-140 (40 часов), нептуний-239 (2 суток), барий-140 (13 суток), молибден-99 (66 часов), стронций-89 (50 суток) и еще около 20 радионуклидов с короткими периодами полураспада.

В первоначальный после катастрофы период значительное повышение мощности экспозиционной дозы гамма-излучения регистрировалось практически по всей территории Беларуси. Уровни радиоактивного загрязнения короткоживущими радионуклидами йода во многих регионах республики были настолько велики, что вызванное ими облучение получило название “йодный удар”. Загрязнение территории радиоактивным йодом привело к большим дозам облучения щитовидной железы у людей, что вызвало в последующем значительное увеличение ее патологии.

В настоящее время радиоэкологическая обстановка в пострадавших регионах Беларуси определяется долгоживущими радионуклидами: цезием-137, стронцием-90, плутонием-238,239,240,241 и америцием-241.

По состоянию на январь 2001 года, площадь загрязнения республики цезием-137 с уровнем выше 37 кБк/м^2 составляла около 44000 км^2 или 21% всей территории. Особенностью этого загрязнения является то, что оно имеет неравномерный “пятнистый” характер.

Загрязнение территории республики стронцием-90 носит более локальный характер. Уровни загрязнения почвы этим радионуклидом

выше 5,5 кБк/м^2 были обнаружены на площади 21000 км^2 в Гомельской и Могилевской областях, что составило 10% от территории Беларуси.

Загрязнение почвы изотопами плутония с плотностью более 0,37 кБк/м^2 охватывает около 4000 км^2, или почти 2% площади республики.

За счет естественного распада плутония-241 отмечается рост удельной активности америция-241, который является более опасным с радиологической точки зрения.

6.3. Территория радиоактивного загрязнения, зонирование территории

Территория радиоактивного загрязнения – это часть земель Республики Беларусь независимо от того, в чьем пользовании, владении или распоряжении они находятся, на которых в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС возникло долговременное загрязнение окружающей среды радиоактивными веществами с плотностью загрязнения радионуклидами цезия-137 либо стронция-90 или плутония-238, 239, 240, 241 соответственно 1,0; 0,15; 0,01 Ки/км^2 и более, а также иные территории, на которых среднегодовая эффективная эквивалентная доза облучения населения может превысить (над естественным и техногенным фоном) 1,0 мЗв (0,1бэр) в год, и земли, на которых невозможно получение чистой продукции.

В соответствии со статьей 4 Закона “О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению после катастрофы на Чернобыльской АЭС” территория Республики Беларусь разделена на зоны в зависимости от радиоактивного загрязнения почв радионуклидами и величины среднегодовой эффективной дозы (табл. 3).

Радионуклиды из почвы поступают в воду, воздух, а также включаются в биологические циклы миграции, создавая тем самым множественность источников внешнего и внутреннего облучения населения.

Т а б л и ц а 3. **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		
		Cs-137	Sr-90	Pu-238, -240
Зона проживания с периодич. радиац. контролем	< 1	37-185	5,55-18,5	0,37-0,74
--“-- с правом на отселение	< 5 > 1	185-555	18,5-74	0,74-1,85
--“--последующего отселения	> 5	555-1840	74-111	1,85-3,7
--“--первоочеред. отселения		> 1840	> 111	> 3,7
--“--отчуждения (эвакуации)	территория вокруг ЧАЭС, с которой в 1986 году было эвакуировано население			

В 2001 г. в республике имелось 9134,0 тыс. га сельскохозяйственных угодий. Из них на 7951,9 тыс. га содержание цезия-137 было менее 37 кБк/м^2 (1 Ки/км^2). Количество сельскохозяйственных угодий, загрязненных цезием-137 с плотностью более 37 кБк/м^2, составляло 1182,1 тыс. га (табл. 4 и 5).

Т а б л и ц а 4. **Загрязнение радионуклидами цезия-137 сельхозугодий по состоянию на 1 января 2002 года**

Область	Загрязнено				
	Всего,	в том числе с уровнем загрязнения территории в кБк/м^2, тыс. га			
	тыс. га	37-185	185-555	555-1480	> 1480
РБ	1182,1	844,9	296,4	40,5	0,3
Брестская	96,8	94,8	6,0	0,1	-
Витебская	0,4	0,4	-	-	-
Гомельская	655,9	445,6	184,3	25,7	0,3
Гродненская	34,8	34,4	0,4	-	-
Минская	61,0	58,3	2,7	0,02	-
Могилевская	329,1	211,4	103,0	14,7	-

В табл. 5. приведены данные об изменении радиационной обстановки на сельскохозяйственных угодьях Беларуси с течением времени.

Т а б л и ц а 5. **Загрязненность сельскохозяйственных угодий, цезием-137 (тыс. га)**

Год обследования	Наличие с.-х. угодий	Площадь загрязнения с.-х. угодий, кБк/м^2					
		< 37	> 37	37-185	185-555	555-1480	> 1480
1992	7839,7	6466,3	1373,4	937,6	361,8	72,0	2,0
1996	7756,9	6428,5	1328,4	909,5	345,8	72,0	1,1
1999	7719,0	6421,0	1298,0	940,8	307,0	49,2	1,0
2002	9134,0	7951,9	1182,1	844,9	296,4	40,5	0,3

Прогноз загрязнения почвы цезием-137 показывает, что за счет его естественного распада уровни загрязнения снизятся до значений менее 37 кБк/м^2 приблизительно через 300 лет после катастрофы, кроме 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС и локальных пятен.

7. ПОВЕДЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

7.1. Миграция радионуклидов в биосфере и в сфере сельскохозяйственного производства

Пути миграции радиоактивных выбросов 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. 5).

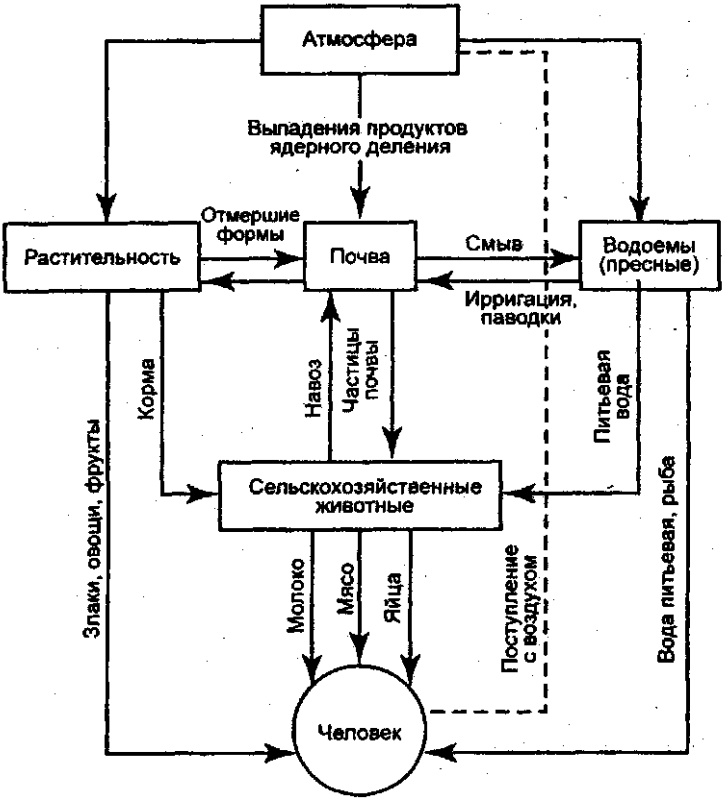


Рис 5. Схема миграции радионуклидов по биологическим цепям.

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. Значительная их доля поступает в организм человека по двум пищевым цепям: почва–растение–человек и почва–растение (корм)–животное (продукция животноводства) –человек.

7.2. Поведение радионуклидов в почве

Радионуклиды, поступившие в почву, не изменяют физико-химического состава почвы и с течением времени распределяются в 30-ти сантиметровом слое. В почве радионуклиды включаются в различные процессы, среди которых наибольшее значение имеют сорбция и миграция. Радионуклиды вступают в физико-химические реакции взаимодействия с почвенным поглощающим комплексом (ППК), усваиваются почвенными микроорганизмами, образуют нерастворимые и растворимые в почвенном растворе соли и коллоидные соединения, что сопровождается трансформацией форм их соединений, изменением миграционной подвижности и биологической доступности для корневых систем растений. **Поглощение радионуклидов ППК определяется процессами распределения между двумя основными фазами почвы — твердой и жидкой и осуществляется за счет следующих основных взаимообратимых процессов.**

1. Сорбция ↔ десорбция. Сорбция — это поглощение радионуклидов твердыми частицами почвы из почвенного раствора. Десорбция — это выделение или переход радионуклидов из частиц в почвенный раствор. Поглощение радионуклидов поверхностным слоем частиц называется адсорбцией.

2. Осаждение ↔ растворение. Осаждение — это образование труднорастворимых и нерастворимых соединений радионуклидов. Растворение — это переход радионуклидов в почвенный раствор из соединений.

3. Коагуляция ↔ пептизация. Коагуляция — это образование крупных коллоидных соединений в дисперсных системах. Пептизация — это распад крупных и сложных соединений на мелкие и простые.

На подвижность радионуклидов в почве оказывают влияние ряд таких факторов как физико-химическая характеристика радионуклидов, время и формы нахождения в почве, свойства почвы, погодно-климатические условия, тип растительного покрова.

Среди физико-химических характеристик наибольшее влияние на

поведение радионуклидов в почве оказывают свойства радиоактивных выпадений и равномерность распределения их в почве, степень дисперсности и растворимость выпадений, атомная масса и величина заряда иона радионуклида, способность радионуклида образовывать комплексные и нерастворимые соединения, а также способность радионуклидов к изоморфному замещению элементов в почвенных минералах. Радионуклиды, поступившие в почву в водорастворимой форме и в составе тонкодисперсных радиоактивных частиц, активно и быстро включаются в почвенные процессы. При этом одновалентные ионы радиоцезия вступают в ионно-обменные реакции с ионами глинистых частиц почвенно-поглощающего комплекса, где прочно фиксируются, изоморфно замещая калий в кристаллических решетках. Ионы двухвалентного стронция-90 практически не участвуют в таких ионно-обменных реакциях, поэтому стронций-90 не поглощается ППК и находится в почве в подвижном состоянии.

Из свойств почвы наибольшее влияние на сорбцию оказывают агрохимические показатели (кислотность почвенного раствора, емкость поглощения и состав обменных катионов, содержание органического вещества), а также минералогический и гранулометрический состав почвы. Определяющую роль при взаимодействии радионуклидов с почвой играет поглотительная способность почвы, т.е. способность почвенных частиц поглощать ионы химических элементов из почвенного раствора и удерживать их в связанном состоянии. Гедройц К.К. выделил 5 видов поглотительной способности почв: 1) механическая поглотительная способность, т.е. механическое поглощение радиоактивных частиц порами и капиллярами почвы; 2) биологическая поглотительная способность, т.е. избирательное поглощение радионуклидов фауной и микроорганизмами; 3) физическая поглотительная способность, т.е. поглощение из почвенного раствора поверхностью частиц молекул воды и ионов щелочных элементов; 4) химическая поглотительная способность, т.е. образование в результате химических реакций труднорастворимых и нерастворимых в воде соединений; 5) физико-химическая или обменная поглотительная способность, т.е. способность почвенных коллоидов поглощать катионы из раствора в обмен на эквивалентное количество катионов коллоидов. Коллоиды — это сложные минеральные, органические и органоминеральные соединения. В большинстве почв преобладают минеральные коллоиды, на долю которых приходится 85–90% их общей массы. К ним относятся глинистые минералы (монтмориллонит, каолинит, галлуазит, гидрослюда, иллит, вермикулит и др.), гидрооксиды железа, алюминия, марганца, кремния и их комплексные соли. Основное свойство коллоидов — способность к поглощению веществ из раствора в виде ионов и молекул. Поглощенные ионы и молекулы могут обмениваться на другие ионы и молекулы, находящиеся в почвенном растворе, т.е. коллоиды

обеспечивают поглотительную и обменную способность почв. Большая удельная поверхность и наличие двойного слоя ионов на внешней части, которые способны к эквивалентному обмену, придают коллоидам высокую реакционную активность. В зависимости от заряда ионов коллоиды разделяются на три группы: 1) отрицательно заряженные (глинистые минералы, гидрооксиды кремния и марганца, гумусовые кислоты, органоминеральные коллоиды); 2) положительно заряженные (гидрооксиды железа и алюминия); 3) амфолитоиды, которые в кислой среде имеют положительный заряд, а в щелочной – отрицательный. Отрицательный заряд глинистых минералов возникает в результате изоморфных (неэквивалентных) замещений ионов.

Обменное поглощение оказывает основное влияние на поведение радионуклидов в почве. Процессы обменного поглощения происходят на поверхности частиц. Обменной поглотительной способностью обладает тонкодисперсная фракция или почвенно-поглощающий комплекс. Обменное поглощение радионуклидов подчиняется основным закономерностям ионного обмена. Характер взаимодействия радионуклидов с ППК можно представить схемой обменной реакции:

$$\text{ППК-M} + \text{m} \leftrightarrow \text{ППК-m} + \text{M},$$

где ППК – почвенно-поглощающий комплекс; M – ионы элементов ППК; m – ионы радионуклидов.

Эта реакция обратима, т.е. после поглощения катиона радионуклида почвенно-поглощающим комплексом он может снова вытесняться в почвенный раствор из ППК. Реакция обмена происходит до установления равновесия, которое может смещаться при изменении состава катионов почвенного раствора. Изменение концентрации ионов почвы может существенно влиять на распределение ионов радионуклидов в почве (например, при внесении минеральных удобрений). Однако изменение концентрации радионуклидов практически не влияет на распределение ионов ППК.

Фракции почв различаются размерами частиц, физическими и химическими свойствами и минералогическим составом. Выделяют три основные фракции почвы: 1) фракция мелкого песка и крупной пыли; 2) фракция средней и мелкой пыли; 3) илистая фракция. Во второй и третьей фракции, куда входят слюды, гидрослюды и минералы монтмориллонитовой и каолинитовой группы, повышенное содержание кальция, магния и калия. Гранулометрический состав определяет поглотительную способность почвы, которая зависит от дисперсности почвенных частиц. С уменьшением размера частиц почвенных фракций сорбция ими Cs-137 повышается. Почвы с большим содержанием высокодисперсных частиц (размером от 0,2 до 0,001 мкм) имеют высокую емкость поглощения, высокое содержание оксидов железа, алюминия, марганца, гумуса и обменных катионов Ca^{2+}, Mg^{2+} и K^{+}. Сорбционная поверхность частиц увеличивается от грубых фракций к

тонким, т.е. у песчаной фракции она минимальная, у илистой фракции — максимальная. Установлено, что более 90% радионуклидов поглощается илистой фракцией, т.е. глинами, гидрослюдами и слюдами. Почвы тяжелого гранулометрического состава обладают более высоким содержанием мелкодисперсных фракций по сравнению с почвами легкого гранулометрического состава. Поэтому поглощенные радионуклиды в 2-5 раз сильнее закрепляются на тяжелых почвах. Cs-137 сорбируется в 10–20 сильнее, чем Sr-90. В Республике Беларусь более 50% загрязненных земель составляют почвы легкого гранулометрического состава, где преобладают кварц и полевые шпаты, поэтому эти почвы имеют низкую емкость поглощения, низкое содержание вторичных глинистых минералов. Для этих почв характерна повышенная гидроморфность. Эти свойства обеспечивают слабую сорбцию радионуклидов, хорошую растворимость и высокое поступление их в растения.

Сорбция радионуклидов на торфяных почвах зависит от окультуренности и степени минерализации торфа. Минерализацию оценивают по зольности почвы, т.е. по содержанию в ней оксидов железа, алюминия и кремния. Чем больше в золе SiO_2, тем выше зольность. Известно, что SiO_2 и алюминий входят в состав монтмориллонита, каолинита и гидрослюд, содержание которых в торфяных почвах очень низкое. Торфяно-болотные почвы имеют повышенную влажность, высокую кислотность почвенного раствора, что препятствует прочной сорбции радионуклидов. При высокой минерализации (зольность 70%) возрастает сорбция и уменьшается содержание обменных и водорастворимых форм до 5–10 раз. Сорбция радионуклидов на торфяно-болотных почвах в 10 раз меньше, чем на минеральных почвах. Известно, что чем больше мощность торфяного слоя, тем выше содержание водорастворимых и обменных форм радионуклидов.

Высокая сорбция мелкодисперсных фракций почвы связана не только с большой удельной поверхностью глинистых частиц и с их отрицательным зарядом, но и с особенностями их минералогического состава. Минеральная часть почвы составляет от 50% до 97% массы почвы. Первичные минералы представлены крупными песчаными частицами. Вторичные минералы преобладают в илистой фракции в виде глин и коллоидов. Максимальная сорбция радионуклидов происходит минералами группы монтмориллонита и группы гидрослюд. Минимальная сорбция у минералов группы каолинита и группы слюд. Поглощение радионуклидов из почвенного раствора минералами группы монтмориллонита составляет 92-99%, группы гидрослюд – 80-88%, группы слюд – 71-87%, группы каолинита – 40-68%, группы кальцита, кварца и полевых шпатов – 10-50%. Вторичные минералы относятся к алюмосиликатам и имеют следующие химические формы: $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot n\ H_2O$ – монтмориллонит, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ – каолинит,

$KAl_2[(SiAl)_4\ O_{10}](OH)_2 \cdot n\ H_2O$ – гидромусковит. Они находятся в почве в виде кристаллов от нескольких микрометров до десятых и сотых долей микрометра, благодаря чему имеют большую поверхность и высокую поглотительную способность. Монтмориллонитовые глины высокодисперсны, обладают высокой набухаемостью, липкостью и вязкостью. В дерново-подзолистых почвах и черноземах, сформированных на суглинках, преобладают минералы монтмориллонитовой группы. Различие в поглощении и закреплении радионуклидов связано с различиями в строении кристаллических решеток минералов. Кристаллическая решетка минералов построена из кремнекислородных тетраэдров (атомы кремния и кислорода) и алюмогидроксильных октаэдров (атомы алюминия, кислорода и водорода), которые располагаются слоями и формируют кристаллическую решетку или пакет, состоящий из 2-х или 3-х слоев, между которыми имеются свободные межпакетные пространства. У каолинита кристаллическая решетка образована двумя слоями, расстояние между которыми составляет 0,715 нм, у монтмориллонита – трехслойная решетка, с расстоянием между слоями от 0,94 до 2,14 нм. Известно, что чем больше слоев и чем больше межпакетное расстояние, тем глубже проникают обменные ионы вглубь решетки и тем сильнее они закрепляются в ней, поэтому сорбционная способность у минералов группы монтмориллонита выше, чем у минералов группы каолинита. Частицы глинистых минералов имеют отрицательный заряд. Возникновение отрицательного заряда связано с изоморфным замещением в тетраэдрах и октаэдрах. В минералах часть 4-х валентных ионов Si^{4+} тетраэдров может быть изоморфно, т.е. неэквивалентно, замещена 3-х валентными ионами Al^{3+} почвенного раствора. Аналогично в октаэдрах часть 3-х валентных ионов Al^{3+} может быть замещена 2-х валентными ионами Mg^{2+}. Возникший отрицательный заряд частицы компенсируется соответствующим количеством одновалентных катионов почвенного раствора, такими как K^+, Na^+, реже Ca^{2+}, которые способны к диссоциации (к выходу из частиц) и эквивалентному обмену на любые одновалентные и двухвалентные катионы почвенного раствора, в том числе и на одновалентные ионы радионуклидов. При этом катионы, компенсирующие отрицательный заряд, могут оставаться на поверхности коллоида или проникать в межпакетные пространства кристаллической решетки, где прочно закрепляются и не участвуют в обменных реакциях. Поэтому считают, что Cs-137 поглощается кристаллической решеткой глинистых минералов по типу изоморфного замещения калия в кристаллической решетке минералов. Участие Cs-137 в кристаллохимических реакциях с вхождением его в межпакетное пространство кристаллических решеток вторичных глинистых минералов является характерной особенностью поведения цезия-137 в почве. Большое межпакетное пространство у минералов группы монтмориллонита способствует

поглощению катионов, компенсирующих отрицательный заряд, не только на внешней поверхности, но и в межпакетных пространствах, поэтому у минералов этой группы высокая поглотительная способность. У минералов группы каолинита расстояние между пакетами меньше, поэтому межпакетная связь прочнее, обменное поглощение катионов происходит только на внешней поверхности, поэтому у них менее прочная сорбция. У гидрослюд обменные ионы Mg^{2+} расположены в межпакетных пространствах решеток. При набухании гидрослюд (когда почва влажная) обменные ионы почвенного раствора проникают в межпакетное пространство и вступают в обменные реакции с ионами магния. При низкой влажности почвы гидрослюды теряют воду, межпакетные пространства сокращаются, ионы почвенного раствора не включаются в обменные реакции с ионами Mg^{2+} и не закрепляются в решетке, а остаются в почвенном растворе.

Общее количество катионов, которое может быть вытеснено из почвы, называется емкостью поглощения или емкостью катионного обмена, которая зависит от минералогического и гранулометрического состава почвы, а также от содержания гумуса. Органическая часть почвы обладает более высокой поглотительной способностью, чем минеральная, однако, в мелкодисперсной фракции преобладают минеральные коллоиды. Общее содержание поглощенных катионов оснований (кроме водорода и алюминия) называется суммой обменных оснований, на долю которых в черноземах приходится 80–90%. В дерново-подзолистых почвах 50% и более приходится на ионы водорода и алюминия. Установлено, что чем больше емкость катионного обмена и сумма обменных оснований, тем прочнее сорбция радионуклидов, поэтому максимальная сорбция у черноземов.

Каждая почва в естественном состоянии содержит определенное количество обменно-поглощенных катионов Ca^{2+}, H^{+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, NH_4^{+}, Al^{3+}, чаще преобладают K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Al^{3+} и H^{+}, поэтому почвы могут быть кислыми или щелочными. Различные почвы имеют закономерное сочетание основных почвенных показателей. Например, черноземы характеризуются повышенным содержанием физической глины, ила, гумуса, обменных катионов, большой емкостью поглощения, преобладанием минералов монтмориллонитовой группы, а дерново-подзолистые, наоборот, отличаются невысоким содержанием питательных веществ, незначительной емкостью обмена, низким pH, малым содержанием гумуса. Поэтому более прочно радионуклиды закрепляются в черноземах и слабее всего в дерново-подзолистых песчаных и торфяно-болотных почвах. Установлено, что во всех типах почв Cs-137 фиксируется более прочно, чем Sr-90.

Кислотность почвы зависит от концентрации в почвенном растворе ионов H^{+} и Al^{3+}. Ионы H^{+} обладают высокой способностью к замещению поглощенных в ППК ионов химических элементов, в том числе

и ионов радионуклидов. В почвах с кислой реакцией раствора происходит неполная адсорбция радионуклидов ППК и возрастает их подвижность. Разные ионы оказывают разное влияние на сорбцию радионуклидов. По влиянию на сорбцию Sr-90 они располагаются в следующий убывающий ряд: $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^{+} > NH_4^{+} > Na^{+}$. Двух– и трехвалентные ионы располагаются в ряд: $Al^{3+} > Fe^{3+} > Ba^{2+}$, таким образом, чем больше в почве двух– и трехвалентных ионов, тем больше сорбция Sr-90. На сорбцию цезия-137 значительно влияют одновалентные катионы, это указывает на необратимый характер сорбции. По влиянию на сорбцию цезия-137 катионы располагаются в убывающий ряд: $K^{+} > NH_4^{+} > Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^{+}$. Анионы PO_4^{3-}, SO_4^{2-} и CO_3^{2-} увеличивают сорбцию Sr-90, образуя с ним нерастворимые фосфаты, карбонаты и сульфаты. Эти анионы незначительно усиливают сорбцию цезия-137.

Чем выше насыщенность почвы основаниями, тем меньше кислотность и выше буферность почвы. Буферность – это способность почв противостоять изменению реакции почвенного раствора при появлении в нем ионов H^{+} и OH^{-}. Высокой буферностью обладают тяжелые черноземные почвы.

Известно, что чем больше в почве органических веществ, тем выше сорбция. Лучшими сорбентами являются фульвокислоты и гуминовые кислоты. Фульвокислоты образуют комплексы с тяжелыми металлами и радионуклидами анионного характера, которые хорошо растворимы. Фульвокислоты образуют также комплексы, содержащие кальций, железо и алюминий, которые находятся в почве в растворимом и нерастворимом состоянии. Гуминовые кислоты имеют высокую емкость катионного обмена (500-700 мг-экв./100г органического вещества) и обладают хелотирующей способностью, т.е. связывают тяжелые металлы и радионуклиды. Установлено, что 1г гуминовой кислоты при pH=5-6 сорбирует 34 мг свинца, 350 мг ртути, 29 мг цезия, 17 мг стронция и ряд других элементов. С гуминовыми кислотами цезий и стронций образуют гуматы и гуматные комплексы, которые плохо растворимы. Комплексы радионуклидов с гуминовыми кислотами в 1,5–3 раза прочнее, чем с фульвокислотами. Органическое вещество в почве образует стойкие комплексы с трансурановыми элементами, кроме этого трансурановые элементы могут образовывать с органическим веществом мобильные соединения хелатного типа. Большой запас органического вещества содержится на торфяно-болотных почвах, где примерно 20% Cs-137 соединяется с гуминовыми кислотами, а Sr-90 соединяется преимущественно с наиболее подвижными фульвокислотами.

Сорбция радионуклидов в почве зависит от плотности и ботанического состава растительного покрова. На естественных травянистых фитоценозах радионуклиды поглощены в верхнем дернинном слое. В

лесных ценозах радионуклиды непрочно поглощаются лесной подстилкой, из которой быстро мигрируют в верхние слои минеральной почвы, где прочно фиксируются. На сорбцию радионуклидов в естественных ценозах влияет интенсивность отмирания наземной массы и минерализация органического вещества, а также содержание и состав микроорганизмов, участвующих в разложении органического вещества. Микроорганизмы накапливают в своих клетках радионуклиды, которые после их гибели вновь поступают в почву и почвенный раствор.

Прочность сорбции радионуклидов возрастает в ряду почв: дерново-подзолистые супесчаные > дерново-подзолистые суглинистые > и черноземные. В этом ряду почв возрастает дисперсность частиц, содержание глинистых минералов, органического вещества и катионов кальция и калия.

Наибольшее влияние среди погодно-климатических условий оказывают сумма положительных температур и продолжительность сезона положительных температур, годовое количество осадков и их распределение по сезонам года. Чем выше температура и чем больше выпадает осадков в весенне-летний период, тем ниже сорбция радионуклидов.

Большинство катионов, в том числе и радионуклидов, прочнее поглощаются слабощелочными почвами аридной зоны и слабее поглощаются кислыми почвами гумидной зоны, т.е. сорбция зависит от природно-климатической зональности.

Таким образом, чем выше плодородие почвы, тем прочнее сорбция радионуклидов.

Радионуклиды в почве находятся в очень малых концентрациях и в различных формах. Например, при плотности загрязнения почвы 1 Ки/км^2 массовая концентрация цезия-137 составляет $3{,}9 \cdot 10^{-12}$ %, а стронция-90 – $2{,}4 \cdot 10^{-12}$ %. Поэтому они, попадая в почву, не изменяют ее основные агрохимические свойства. При поступлении в растения имеет значение не общее содержание радионуклидов в почве, а формы их нахождения в почве, от которых зависит их подвижность и доступность для корневой системы. По подвижности в почвах радионуклиды разделяются на 4 группы: 1) сильноподвижные (иод, сера и др.); 2) подвижные (натрий, рубидий, стронций, рутений и др.); 3) малоподвижные (церий, железо, цирконий, цезий и др.); 4) практически неподвижные (цинк, кобальт и др.).

Степень подвижности радионуклидов в почве оценивается воздействием на нее различными растворами химических соединений. Легкодоступные для растений формы радионуклидов извлекаются водой (водорастворимая форма) и одномолярным (1М) раствором уксуснокислого аммония (обменная форма). Подвижные радионуклиды, извлекаемые 1М раствором соляной кислоты, только частично могут поглощаться растениями и являются для них потенциально доступным

резервом. Фиксированные формы радионуклидов недоступны растениям и освобождаются лишь при обработке почвы 1М раствором соляной кислоты (слабофиксированные формы) и 6М раствором соляной кислоты (прочнофиксированные формы).

Формы нахождения радионуклидов в почве непостоянны, т.е. они изменяются с течением времени. При длительном пребывании радионуклидов в почве на перераспределение их форм оказывают влияние сорбционные процессы радионуклидов в почве. В первые годы после аварии радионуклиды Cs-137 и Sr-90 находились преимущественно в водорастворимой и обменной формах, т.е. в формах доступных для поглощения корнями растений. Степень окисления цезия равна 1^+, в почвенном растворе он присутствует в виде катиона. Цезий-137 имеет наибольший радиус среди других одновалентных катионов, поэтому он адсорбируется глинистыми минералами прочнее, чем его химический аналог калий. Исследования показали, что доступность радиоцезия существенно уменьшается во времени вследствие процессов фиксации его почвой. За период 1987 по 1994 год доля фиксированной формы Cs-137 увеличилась более, чем в 2 раза и составляла 70-84% общего содержания. Для Sr-90, наоборот, характерно преобладание легкодоступных для растений форм, которые составляли 53-87% от общего содержания и имели тенденцию к повышению во времени. Стронций-90 имеет степень окисления 2^+, в почвенном растворе он находится в виде катионов. Растворимость бикарбоната стронция выше, чем бикарбоната кальция, поэтому в почве стронций более подвижен, чем кальций.

В последние годы нет значительных изменений в перераспределении форм нахождения радионуклидов в почве, т.е установилось динамическое равновесие форм. Таким образом, более 90% Cs-137 находится в фиксированной форме. Более 80% Sr-90 находится в водорастворимой и обменной формах. Следует отметить, что со временем происходит разрушение или деструкция "горячих" частиц, содержащих цезий, стронций и плутоний. После выхода из частиц цезий-137 быстро связывается глинистыми минералами верхних слоев почвы и переходит в фиксированную форму. Стронций-90 не фиксируется глинистыми минералами и входит в состав почвенного раствора в подвижном состоянии, увеличивая процентное содержание водорастворимой и обменной форм.

Церий и рутений мало подвижны в почве. Поведение плутония в почве подобно поведению естественного радиоактивного тория. Около 80% плутония находится в аморфной форме, т.е. плутоний входит в состав аморфных соединений, покрывающих в виде пленок минеральные частицы. Остальные 20% плутония находится в обменной (около 14%), подвижной (4,5%) и водорастворимой (1%) формах. Наиболее растворимы и подвижны соединения плутония, в которых он находит-

ся в степени окисления 5^+ и 6^+. Установлено, что гидрооксиды америция и кюрия более растворимы и подвижны в почве, чем гидрооксиды плутония.

Подвижность радионуклидов в почве зависит и от режима увлажнения почв. Например, на переувлажненных песчаных и торфяных почвах в Наровлянском и Лельчицком районах Гомельской области высокая степень загрязнения травяных кормов наблюдается даже при относительно низких плотностях загрязнения радионуклидами.

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, во-первых, изменяет их распределение в корнеобитаемом слое; во-вторых, приводит к снижению уровня радиации над поверхностью почвы; в-третьих, приводит к уменьшению интенсивности выдувания и вымывания радионуклидов; в-четвертых, создает возможность загрязнения грунтовых вод радионуклидами. Интенсивность вертикальной миграции зависит от свойств почвы, от свойств радионуклидов, от вида биоценоза и других факторов. Вертикальная миграция осуществляется при следующих процессах: 1) конвективный перенос с током воды (конвекция); 2) диффузия свободных и адсорбированных ионов; 3) механический перенос на частицах почвы; 4) перенос на коллоидных частицах (лессиваж); 5) перенос по корневым системам растений.

Эти процессы неравнозначны при вертикальной миграции, наиболее значимы конвекция и диффузия. Конвекция — это перенос радионуклидов восходящими и нисходящими потоками пара или жидкости. Конвекция приводит к перемещению и увеличению максимальной концентрации радионуклидов в нижележащих профильных слоях. Диффузия — это самопроизвольное выравнивание концентрации радионуклидов при соприкосновении с частицами почвы. Диффузия вызывает расширение зоны нахождения радионуклидов с одновременным уменьшением максимальной концентрации. Конвекция и диффузия тесно связаны с поглощением и прочностью закрепления радионуклидов твердой фазой почвы. Чем прочнее сорбция радионуклидов в почве, тем слабее эти два процесса. Конвекция и диффузия характерны для водорастворимой и, частично, для обменной форм радионуклидов в почве. Механический перенос происходит в результате роющей деятельности почвенной фауны, деятельности человека при вспашке и рыхлении почвы, а также с током воды и пыли по трещинам и разломам почвы. Механический перенос характерен для всех форм радионуклидов.

В одной и той же почве разные радионуклиды имеют разную скорость миграции и разные коэффициенты миграции. Коэффициенты

миграции Cs-137 на 1–2 порядка ниже, чем коэффициент миграции Sr-90. По величине коэффициента миграции Sr-90 почвы располагаются в следующий убывающий ряд: дерново-подзолистая песчаная > дерново-подзолистая суглинистая > торфяно-болотная > чернозем. Убывающий ряд почв по величине коэффициента миграции Cs-137: торфяно-болотные > дерново-подзолистая песчаная > дерново-подзолистая суглинистая > чернозем. Миграция зависит от гидроморфности почвы. Максимальная миграция радионуклидов на дерново-глеевых, дерново-торфянисто глеевых и торфяно-болотных почвах, где стронций мигрирует интенсивнее, чем цезий. Основная масса радионуклидов (до 90%) на необрабатываемых почвах находится в верхнем 0–5 сантиметровом слое (суглинистые почвы) или в 0–10 сантиметровом слое (супесчаные почвы). Миграция на автоморфных почвах достигает 15–20 см, на увлажненных – более 30 см. Миграция по профилю почвы происходит очень медленно, поэтому в ближайшие 30 лет самоочищения корнеобитаемого слоя почвы за счет миграции не произойдет. На пахотных почвах радионуклиды равномерно перемешаны в пахотном слое (0–25 см). В подпахотном горизонте концентрация радионуклидов менее 1% от общего содержания радионуклидов в слое 0–30 см. Содержание Cs-137 и Sr-90 в почве уменьшается только в результате естественного радиоактивного распада, который не зависит от внешних условий, а также за счет выноса радионуклидов растительностью. За счет радиоактивного распада почва ежегодно очищается от Sr-90 и Cs-137 соответственно на 2,2 и 2,1%.

Для оценки перспективы ведения сельскохозяйственного производства необходимо знать динамику самоочищения почв за счет миграции радионуклидов за пределы корнеобитаемого слоя. При прогнозе радиационной обстановки используется период полуочищения корнеобитаемого слоя почвы, т.е. время, за которое первоначальное содержание радионуклидов в корнеобитаемом слое уменьшится в два раза. Период полуочищения почв в ближней зоне (до 30 км от ЧАЭС) и дальней (250 км и более от ЧАЭС) для цезия-137 составляет соответственно 24-27 и 10-17 лет. Для стронция-90 период полуочищения для ближней и дальней зон меньше в 1,5–3 раза и составляет 7–12 лет.

Перенос радионуклидов по корневым системам растений зависит от глубины проникновения и густоты корней в почве, от физико-химических свойств радионуклидов, от биологических особенностей растений и состава фитоценоза. Из наземных органов радионуклиды поступают в глубинные корни. Благодаря выделительной функции корней радионуклиды попадают в нижележащие почвенные горизонты. Перенос по корням характерен для водо-растворимой и обменной форм. При отмирании наземной массы и при срезе растений радионуклиды с корнями остаются в почве на глубине расположения корней, при разложении которых радионуклиды поступают в почвенный рас-

твор. С коллоидными частицами мигрируют все формы радионуклидов.

Таким образом, легкий гранулометрический состав, повышенная кислотность почвенного раствора, избыточная увлажненность почвы и отсутствие глинистых минералов в почве способствуют интенсивности вертикальной миграции по профилю почвы.

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, погодно-климатическиие 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. Максимальная миграция радионуклидов с ветром наблюдается в весенне-летний период. На минеральных почвах миграция начинается при скорости ветра 3–6 м/с, на осушенных торфяниках — 8–9 м/с. Мерой ветрового переноса радионуклидов служит коэффициент ветрового подъема, который определяется как отношение концентрации радионуклида в воздухе на высоте 1м к плотности поверхностного загрязнения почвы. Ветровой перенос имеет значение при вторичном загрязнении растительности, где его размеры могут составлять более 10% от общего содержания радионуклидов в растительности. Перенос радионуклидов с пылью зависит от ландшафта, т.е. от наклона земной поверхности. Максимальное накопление радионуклидов происходит в местах, где резко уменьшается скорость ветра. Эти места находятся в низинах, впадинах, на подветренных сторонах склонов, около лесов и строений, где содержание цезия-137 в почве в два и более раз больше.

На Полесье 50% площади подвержено ветровой эрозии, в результате которой теряется до 3-5 т земли с 1 га. На Полесье возможны пыльные бури, при которых дальность переноса радионуклидов возрастает. Ветровая эрозия более интенсивна на осушенных торфяниках и песчаных почвах при выращивании однолетних и пропашных культур. На эрозированных полях различия в загрязнении пахотного горизонта цезием-137 составляют 1,5–3 раза.

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. Миграция взвесей илистых и глинистых частиц, содержащих

радионуклиды в поглощенном состоянии, называется твердым стоком. Стоки радионуклидов в речные системы составляют несколько процентов в год от общего запаса их на площади водосбора. Твердый сток наиболее значим на легких пахотных землях и в местах с высокой скоростью потоков поверхностных вод, т.е. на склонах. Большую роль в миграции радионуклидов играет тип и увлажненность почвы водораздела. Дерново-подзолистые супесчаные и песчаные почвы водоразделов имеют высокую подвижность радионуклидов, поэтому в стоке с этих почв высокая концентрация радионуклидов, которые выносятся в пойму, где их содержание в почве может быть в 2-3 раза выше, чем в почве водораздела. Водоразделы, сложенные черноземом, прочнее поглощают радионуклиды, поэтому стоки с них содержат мало радионуклидов, в результате чего в почвах поймы концентрация радионуклидов ниже, чем в почвах водораздела. Миграционная способность стронция-90 в 10 и более раз выше, чем цезия-137. Это связано с тем, что стронций находится в почве преимущественно в водорастворимой форме и в виде комплексов с органическим веществом. С поверхностными и грунтовыми водами радионуклиды выносятся в реки и мигрируют по течению рек до впадения в моря. В результате этого происходит очистка почвы водосбора и вторичное загрязнение водных систем радионуклидами.

Сток радионуклидов в пониженные участки рельефа повышает там их концентрацию, поэтому на полях с неровным рельефом загрязнение почвы радионуклидами неравномерное и изменяется в 1,5-3 раза. На склонах рельефа водная эрозия вызывает вторичное загрязнение почвы радионуклидами, в результате смыва их в среднюю и нижнюю часть склона. Смыв радионуклидов происходит, в основном, с твердыми взвесями. Интенсивность смыва на склонах с дерниной в 100 раз ниже, чем на голых склонах. Смыв радионуклидов возрастает при выращивании на склонах пропашных культур.

Анализ дождевого и талого стока показал, что смыв радионуклидов с талым стоком на порядок меньше, чем смыв с дождевым, что связано с температурным режимом.

Радионуклиды ^{3}H, ^{14}C, ^{129}I мигрируют в виде летучих соединений на большие расстояния. Они переносятся из почвы, воды и растений в атмосферу. Их миграция зависит от дыхания и фотосинтеза растений, от разложения органических остатков и от окислительно-восстановительных реакций.

7.3. Поступление радионуклидов в растения

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 — аэральный путь поступления и через корневую систему — корневой путь поступления. Аэральное поступление наиболее значимое при радиоактивном загрязнении воздушной среды сразу после радиационного инцидента. При попадании радионуклидов в почву преобладает корневой путь поступления.

При аэральном загрязнении на наземные органы растений оседают радиоактивные аэрозоли, оплавленные силикатные и карбонатные частицы грунта, частицы топлива, высокорадиоактивные "горячие" частицы, входящие в состав "сухого" и "мокрого" выпадения. Осевшие на растения радиоактивные выпадения слабо закрепляются в наземных органах, потому что одновременно с осаждением происходят полевые потери радиоактивности. Степень удержания радиоактивных выпадений растительностью оценивается по величине первичного удержания, которое выражается отношением количества радиоактивных частиц, осевших на растения, к общему количеству радиоактивных частиц, выпавших на данную площадь.

Первичное удержание и последующие процессы потерь радиоактивности зависят от многих факторов, в том числе от размера частиц и вида выпадений, площади удерживающей поверхности и плотности растительного покрова, морфологии растений и типа травостоя, урожайности наземной массы, метеоусловий во время и после выпадения радиоактивных осадков и др.

Максимальные потери радиоактивности при ветреной и дождливой погоде. Мелкие частицы и водорастворимые формы закрепляются в 4-7 раз прочнее, чем крупные и твердые нерастворимые частицы. Потери радиоактивности растениями, обусловленные всеми факторами, кроме радиоактивного распада, называются полевыми потерями радиоактивности. Скорость удаления радиоактивных веществ с растительного покрова характеризует период полупотерь, т.е. время, за которое смывается дождем и сдувается ветром 50% активности. Максимальные потери радиоактивности происходят в первые 2-3 суток, а всего за 7 суток она снижается на 70-90%. Потери фиксированных радионуклидов мало зависят от погодных условий и определяются свойствами радионуклидов и биологическими особенностями растений. Период полупотерь для слабозакрепленной фракции йода-131 составляет 14 суток, цезия-137 – 14 суток, для стронция-90 – 5 сут., а для прочнозакрепленной фракции этих радионуклидов – соответственно 27, 90 и 70 суток

На поверхности листьев радионуклиды могут находиться в свободном или сорбированном состоянии. Сорбция зависит от температуры и влажности воздуха и листьев, морфологии листьев, солевого состава и

кислотности осадков, вида радионуклида и его формы.

Основными механизмами аэрального поступления радионуклидов являются ионно-обменные реакции и диффузия. Водорастворимые формы поступают с водой через цитоплазму в клетки основной ткани, через стенки клеток и межклеточники, через клетки, расположенные над поверхностью жилок, через устьица. Чем толще кутикула, тем слабее происходит диффузия и ионно-обменные реакции. Поступление через устьица усиливается на свету, когда они открываются при дыхании. На растительности естественных луговых ценозов радионуклиды задерживаются в нижней части растений и в верхнем слое дернины. Здесь происходит дополнительное поступление радионуклидов через основание стебля и через поверхностные корни, поэтому растительность естественных лугов загрязняется радионуклидами сильнее, чем растительность окультуренных кормовых угодий.

После проникновения в листья часть радионуклидов остается в листьях, а часть разносится по растению и концентрируется в других органах. Продвижение радионуклидов по растению зависит от физико-химических свойств радионуклидов и в меньшей степени от биологических особенностей растений. Наиболее активно продвигается по растению радиоцезий, являющийся аналогом калия, а стронций, рутений и церий концентрируются в листьях в небольших количествах. Переход этих радионуклидов из листьев в генеративные органы в десятки раз меньше, чем цезия.

Радионуклиды, осевшие на почву в составе различных выпадений, могут подниматься ветром или дождем и оседать на растительность. Это явление называется вторичным радиоактивным загрязнением растений, интенсивность которого оценивается по величине коэффициента ветрового подъема, определяемого как отношение концентрации радионуклида в воздухе на высоте 1 м к плотности поверхностного загрязнения почвы. Его величина зависит, в основном, от свойств атмосферы (плотности, турбулентности, температуры, давления, влажности, скорости движения воздуха над поверхностью почвы), от свойств почвы (гранулометрического и минералогического состава, влажности, плотности, структуры), от хозяйственной деятельности человека (обработка почвы, выпас скота, автомобильное движение), а также от рельефа и вида растительности. Вторичное загрязнение растительности происходит при пыльных бурях, при горении торфяников, лесов и сжигании послеуборочных остатков.

Кроме ветрового переноса причиной вторичного загрязнения может быть забрызгивание грязью нижних частей растений во время выпадения сильных дождей. Максимальная высота подъема частиц от земли около 40 см, поэтому такое загрязнение наиболее значимо для низкорослых видов растений. Вклад вторичного загрязнения в общее загрязнение может составлять 30% и более. Значительное вторичное

загрязнение товарной части овощных и листовых культур радионуклидами происходит в период образования и роста плодов и листьев, злаковых культур – в фазах колошения, цветения и молочной спелости. Практически не загрязняется зерно бобовых и крестоцветных культур, кукурузы, так как оно защищено створками бобов, стручков и листьями, а также клубни и корнеплоды, защищенные почвой.

Механизм усвоения радионуклидов корнями растений подобен усвоению необходимых элементов питания. Основными механизмами усвоения радионуклидов являются ионно-обменные реакции и диффузия. Главное отличие состоит в том, что радионуклиды находятся в почве в предельно низких концентрациях, а элементы питания – в более высоких концентрациях. Основное количество радионуклидов извлекается корнями из почвенного раствора, а также из почвенно-поглощающего комплекса, с частицами которого тесно контактируют корневые волоски, или зона поглощения корня. Поглощение ионов корнями и продвижение их вверх по растению происходит в три стадии. В первой стадии происходит адсорбция ионов мембранами поглощающих клеток корней. Адсорбция носит обменный и необменный характер. Обменными ионами растений являются H^+ и CO_3^{2-}, которые образуются при диссоциации углекислоты, выделяемой при дыхании. Ион H^+ из цитоплазмы проходит с корневыми выделениями через мембрану и вступает в обмен преимущественно с одновалентными ионами почвенного раствора и частиц, где могут находиться радионуклиды. В результате этого обмена ионы радионуклидов поступают в цитоплазму клеток корневых волосков. Механизм поступления цезия-137 и стронция-90 в корневую систему растений изучен недостаточно полно. На первом этапе усвоения радионуклидов важную роль играет катионно-обменная емкость корней, т.е. содержание обменных катионов, которая зависит от содержания в мембране клеток корня пектина и веществ белковой природы. Виды растений с высокой катионно–обменной емкостью корней поглощают из почвенного раствора больше катионов кальция, чем катионов других одновалентных элементов. Катионно–обменная емкость корней у злаковых культур составляет 10–23 мг-экв./100 г сухих корней, у бобовых — 40–60 мг-экв./100 г сухих корней. Этим можно объяснить повышенную способность бобовых культур к накоплению кальция и его химического аналога стронция. Существует прямая связь между скоростью поступления цезия-137 и величиной катионно-обменной емкости корней. Например, при добавлении в опытный раствор ионов калия и кальция катионно-обменная емкость стенок клеток может повышаться в результате ее насыщения этими катионами, поэтому адсорбция ионов цезия и стронция на клеточные стенки практически не происходит. При высокой концентрации калия в растворе ионы калия поступают преимущественно по калиевым каналам, поэтому поступление цезия значительно снижается, т.е. проис-

ходит дискриминация цезия относительно калия. У всех культур дефицит обменного калия в почве приводит к увеличению коэффициента накопления цезия у ячменя до 20 раз, у ржи до 30 раз и у пшеницы до 40 раз. При поступлении стронция практически отсутствует дискриминация кальцием. Известно, что дефицит ионов калия в растворе повышает также поступление стронция в корни. В корни растений цезия поступает больше, чем стронция. Установлено, что ионы стабильных и радиоактивных элементов могут вступать в реакцию взаимодействия с компонентами мембран с образованием различных соединений. В связанном состоянии в составе этих соединений, которые называются веществами–переносчиками, ионы поступают в цитоплазму, где комплекс распадается с образованием иона и вещества-переносчика. Ион мигрирует дальше по растению и включается в обмен веществ. Вещество-переносчик вновь возвращается к мембране и присоединяет новый ион. Во второй стадии происходит проникновение ионов в проводящие ткани, т.е. трахеиды и сосуды ксилемы. В третьей стадии происходит восходящее движение ионов по сосудам ксилемы с ксилемным соком в клетки и ткани наземных органов. В состав ксилемного сока входит вода, органические и неорганические вещества, элементы питания и другие соединения. Ксилемный сок перемещается по растению за счет корневого давления и транспирации. При транспирации вода испаряется, а все вещества, в том числе и радионуклиды, остаются в клетках и тканях наземных органов. Скорость продвижения радионуклидов по растению зависит от интенсивности транспирации. В жаркую и сухую погоду транспирации усиливается, поэтому может повышаться содержание радионуклидов в наземной части растений. Ионный обмен между клеточной оболочкой корневого волоска и почвенными частицами происходит труднее, чем обмен ионами из почвенного раствора. При низкой концентрации радионуклидов в почве они поступают в растения в результате ионно-обменных реакций. При высокой концентрации радионуклидов в почве основным механизмом поступления является диффузия, поэтому поступление радионуклидов может значительно возрастать.

Из корней цезий, как одновалентный элемент, выводится быстрее, чем стронций, который может связываться в корнях в труднодоступные формы. Таким образом, радионуклиды распределяются в органах растений неравномерно. Основное количество радионуклидов концентрируется в корнях. Распределение в наземных органах растений неравномерное. Например, в созревших растениях фасоли Sr-90 распределяется следующим образом: в листьях 53-68%, стеблях 15-28%, створках бобов 12-25% и зерне 7-14%.

Для оценки поступления радионуклидов из почвы в растения используют различные показатели. Наиболее часто используются коэффициенты перехода (Кп), а также коэффициенты накопления или ко-

эффициенты 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.

Иногда используют коэффициент биологического поглощения, который показывает отношение концентрации радионуклида в золе растений к концентрации радионуклида в почве. Скорость миграции радионуклидов в цепи почва–растение зависит от содержания их изотопных и неизотопных носителей. Концентрация неизотопных носителей в почве значительно выше, чем изотопных. Для оценки переноса радиоактивного элемента относительно его стабильного носителя в радиоэкологических цепях используют коэффициент дискриминации, который показывает изменение соотношения радионуклида и его химического аналога при миграции по биологическим цепям, который определяется по формуле:

$$КД = \frac{(C_{Cs^{137}} / C_K)растение}{(C_{Cs^{137}} / C_K)почва},$$

где С – концентрация цезия-137 или калия в почве и растении.

Дискриминация цезия по отношению к калию наиболее значима в цепи почва–растение, дискриминация стронция по отношению к кальцию наиболее значима в цепи корм – животное.

Величина накопления радионуклидов зависит от следующих основных показателей: 1) свойств радионуклидов и форм нахождения их в почве; 2) физико-химических параметров почвы; 3) биологических особенностей растений; 4) агротехники возделывания; 5) погодно-климатических условий.

Поступление и распределение радионуклидов по растению определяется их свойствами и участием в процессах обмена веществ. Из водного раствора ионы одновалентных радионуклидов поглощаются интенсивнее, чем ионы двух- и трехвалентных радионуклидов. Известно, что ^{60}Co, ^{106}Ru и ^{144}Ce поглощаются в 10 раз меньше, чем цезий и стронций. Из почвенных частиц одновалентные ионы поглощаются незначительно, потому что они прочнее фиксируются. При поступлении из водного раствора коэффициент накопления Cs-137 значительно выше, чем Sr-90. При поступлении из почвенно-поглощающего комплекса коэффициент накопления цезия-137 намного меньше, чем стронция-90. Это связано с более прочной сорбцией цезия-137 минеральной частью почвенно-поглощающего комплекса. В наземную часть растений ионы низких валентностей переносятся активнее и в

больших количествах, чем ионы высоких валентностей, которые до 90-99% концентрируются в корнях. Из поступивших в корни цезия-137 и стронция-90 в корнях остается 20-40%, а 60-80% переносится в наземные органы, где они распределяются неравномерно. Обнаружено сходство в поглощении и продвижении по растению цезия-137 и калия, стронция-90 и кальция, а также радиоцезия и стабильного цезия, радиостронция и стабильного стронция. Различие обусловлено неодинаковыми формами нахождения радионуклидов в почвах. Большинство радионуклидов наведенной активности являются биологически важными микроэлементами, которые накапливаются преимущественно в корнях, кроме ^{65}Zn и ^{54}Mn, которые накапливаются в наземной части и репродуктивных органах, где Кн по культурам изменяются до 10 раз. Трансурановые радионуклиды имеют очень низкие коэффициенты накопления ($n \cdot 10^{-2} – 10^{-10}$), т.к. у них ограничено поступление в корни и перенос из них в вегетативные органы. Накопление снижается в ряду: нептуний > америций > кюрий > плутоний.

Поступление радионуклидов зависит от времени и форм нахождения в почве, от концентрации доступных форм в корнеобитаемом слое. После аварии на ЧАЭС наиболее интенсивно поступление цезия происходило в первые 2 года. К концу 5-го года содержание обменного цезия в почве уменьшилось в 3 и более раз и вышло на стационарный уровень. Таким образом, со временем уменьшается содержание доступных для растений форм цезия-137 и снижается его поступление в растения. Подвижность и доступность стронция-90 практически не изменяется со временем, поэтому он находится в водорастворимой и обменной формах, которые хорошо доступны для корневого усвоения.

Среди почвенных характеристик наибольшее влияние оказывают гранулометрический и минералогический состав, агрохимические показатели почвы и режим увлажнения почвы. Гранулометрический состав влияет на сорбцию радионуклидов, которая зависит от степени дисперсности частиц. Чем больше в почве глинистых частиц, тем прочнее сорбция радионуклидов и тем меньше коэффициенты накопления радионуклидов растениями. На почвах тяжелого гранулометрического состава с высоким содержанием глин радионуклиды накапливаются в растениях в меньших количествах, чем на почвах легкого состава. Основное влияние на накопление радионуклидов оказывает илистая фракция, в состав которой входят глинистые минералы группы монтмориллонита, гидрослюд и слюд. В зависимости от типа почвы при одинаковой плотности загрязнения их Cs-137 и Sr-90 коэффициенты пропорциональности для этих радионуклидов могут различаться до 2-х и более раз. Например, Кп цезия-137 для картофеля на дерново-подзолистой песчаной почве составляет 0,08, а на дерново-подзолистой суглинистой – 0,03. Для стронция-90 коэффициенты пропорциональности на этих почвах составляют соответственно 0,33 и

0,17. Коэффициенты накопления радионуклидов на разных типах почв при одинаковой плотности поверхностной загрязненности могут различаться в 10–20 раз, а иногда до 100 раз. Цезий-137 менее доступен для растений, что связано с его необменной сорбцией в кристаллических решетках глинистых минералов. Коэффициенты накопления цезия-137 и стронция-90 на черноземных почвах соответственно в 20 и 10 раз ниже, чем на дерново-подзолистых почвах. Это связано с тем, что у черноземов богатый почвенно-поглощающий комплекс, насыщенный физической глиной, илом, гумусом и обменными катионами, что обеспечивает высокую емкость поглощения этой почвы и, следовательно, меньшее поступление радионуклидов в растения. На более тяжелых почвах Sr-90 накапливается в растениях в 5–10 раз интенсивнее, чем Cs-137. На Полесье преобладают супесчаные легкие дерново-подзолистые и торфяно-болотные почвы. Коэффициенты перехода цезия-137 в растения здесь в 4–5 раз выше, чем в других районах Беларуси. Накопление Cs-137 и Sr-90 в растениях одних и тех же культур здесь практически не отличаются, т.е. Кп цезия-137 примерно равны Кп стронция-90, потому что при дефиците глинистых минералов Cs-137 находится в этих почвах в водорастворимой и обменной форме Накопление радионуклидов на торфяно-болотных почвах зависит от окультуренности почвы, минерализации и состава золы почвы, толщины торфяного слоя, ботанического состава торфообразующих растений, кислотности почвенного раствора и наличия обменных катионов, влажности почвы, глубины залегания и минерализации грунтовых вод. Изучены закономерности накопления радионуклидов на торфяно-болотных почвах Брагинского и Хойникского массивов. Более высокая зольность почв, повышенное содержание карбонатов, минералов илистой фракции, а также более низкая влажность почвы Брагинского массива способствуют меньшему накоплению радионуклидов в растениях, чем на почвах Хойникского массива. С увеличением мощности торфяного слоя возрастает поступление цезия и стронция в растительность, т.к. снижается зольность почвы.

Особенности накопления радионуклидов растениями на разных типах почвы следует учитывать при производстве сельскохозяйственной продукции.

Доказано, что все агрохимические показатели почвы, способствующие повышению сорбции радионуклидов почвой, снижают их поступление в растения. Большинство агрохимических показателей почвы тесно связаны между собой, поэтому степень действия каждого отдельного свойства зависит от влияния всего комплекса. Наиболее существенное влияние на поступление Cs-137 в растения на дерново-подзолистых почвах оказывает содержание обменных катионов K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} и гумуса, которые определяют емкость катионного обмена и кислотность почвы. Установлена отрицательная зависимость между

коэффициентом перехода в растения Cs-137 и содержанием в почве обменного калия (K_2O). Обменный калий оказывает конкурентное влияние на поступление цезия-137, т.е. чем больше обменного калия в почве, тем меньше поступление цезия-137. Известно, что чем больше в ППК обменного калия, тем быстрее происходит закрепление цезия-137 в ППК и уменьшение его коэффициента перехода в растения. Коэффициент перехода цезия в растения при низком содержании обменного калия (K_2O = 40-80 мг/кг почвы), может уменьшаться всего на 20-60%, а при высоком содержании K_2O может снижаться до 70%. Насыщение дерново-подзолистой почвы обменным калием выше оптимального уровня (300 мг/кг почвы) не сопровождается снижением поступления цезия-137 в растения. Для торфяно-болотных почв оптимальный уровень содержания в почве обменного калия не должен превышать 1000 мг/кг почвы. Чем больше в почве обменного калия, тем меньше коэффициента накопления стронция-90. Однако эта зависимость менее выражена, чем для коэффициента накопления цезия-137.

Установлена отрицательная зависимость между содержанием обменного кальция, уровнем кислотности почвенного раствора и поступлением в растения стронция-90. Чем больше в почве обменного кальция и чем меньше кислотность почвенного раствора, тем меньше коэффициенты перехода стронция-90 в растения. Эта закономерность проявляется и при поступлении цезия-137 в растения, но связь менее сильная. По мере повышения содержания обменного кальция с 550 до 2000 мг CaO на кг почвы Кп Cs-137 и Sr-90 снижается в 1,5–2 раза. Изменение кислотности почвенного раствора от кислого интервала (pH = 4,5–5,0) к нейтральному (pH = 6,5–7,0) снижает переход стронция-90 в растения в 2-3 раза. Дальнейшее насыщение почвы свободными карбонатами кальция сдвигает pH в щелочной диапазон, однако это не сопровождается уменьшением коэффициента перехода. На карбонатных почвах коэффициент накопления стронция-90 снижается до 3-х раз, потому что происходит необменная фиксация Sr-90 с образованием карбонатных солей. На этих почвах Кп Cs-137 увеличивается до 4-х раз, т.к. здесь Cs-137 связывается водорастворимыми органическими соединениями, которые легко его освобождают в виде доступных ионов. Установлено, что чем больше насыщенность почвы обменными основаниями, тем меньше коэффициент перехода Cs-137 и Sr-90 в растения.

Торфяно-болотные почвы бедны по содержанию калия, кальция и магния. Как правило, это кислые почвы, поэтому Кп Cs-137 и Sr-90 на этих почвах в 5–20 раз больше, чем на дерново-подзолистых.

На переход цезия и стронция в растения оказывает влияние органическое вещество почвы. Гумусовые кислоты, особенно гуминовая кислота, образуют сложные комплексы с радионуклидами или гуматы, поэтому из органических комплексов доступность стронция снижается

в 2–4 раза, а цезия – в 1,5 раза. Повышенная биологическая доступность радионуклидов на торфяно-болотных почвах связана со способностью органического вещества фиксировать ионы радионуклидов на поверхности органических коллоидов, поэтому не обеспечивается прочная сорбция радионуклидов и увеличивается их доступность растениями. Кроме этого на торфяно-болотных почвах повышена кислотность почвенного раствора, что обеспечивает хорошую растворимость солей радионуклидов и их доступность растениям.

Таким образом, показатели почвенного плодородия могут оказывать существенное влияние на накопление радионуклидов всеми сельскохозяйственными культурами. Установлено, что минимальный переход Cs-137 и Sr-90 в растения наблюдается на почвах с оптимальными параметрами их агрохимических характеристик.

Большое влияние на накопление радионуклидов растениями оказывает режим увлажнения почв. Сведения по влиянию влажности почвы на поступление радионуклидов в растения неоднозначны. Известно, что количество катионов цезия и стронция, вытесняемых из почвы в раствор, возрастает с увеличением влажности. Это связано со сложным характером взаимовлияния влажности, свойств почвы и биологических особенностей растений на процессы миграции радионуклидов в цепи почва–растения. С увеличением влажности почвы возрастает доля водорастворимого и обменного Sr-90 и доля обменного Cs-137, поэтому возрастают коэффициенты перехода и содержание этих радионуклидов в растительности. Установлено, что переход радиоцезия в многолетние травы повышается в 10-27 раз на гидроморфных дерново-глеевых и дерново-подзолисто-глеевых почвах по сравнению с автоморфными и временно-избыточно увлажняемыми разновидностями этих почв.

На накопление радионуклидов растениями оказывают влияние различные биологические особенности растений, среди которых выделяют эволюционное происхождение растений или филогенез. Растения, имеющие раннее происхождение, накапливают больше радионуклидов, чем растения, возникшие в поздние периоды. По накоплению радионуклидов отделы флоры располагаются в следующем убывающем порядке: лишайники > мхи > папоротники > голосеменные > покрытосеменные. Различия по накоплению радионуклидов выявлены в пределах классов, семейств и видов. Межвидовые различия могут достигать до 5–100 и более раз. Содержание цезия-137 в расчете на сухое вещество отдельных культур может различаться до 50 раз, а накопление стронция-90 - до 30 раз при одинаковой плотности загрязнения почвы. Сортовые различия в накоплении радионуклидов значительно меньше (до 1,5–3 раз), но их также необходимо учитывать при подборе культур для возделывания в условиях радиоактивного загрязнения. По накоплению радионуклидов в товарной части культуры располагаются в

следующем убывающем порядке: корнеплоды, бобовые, картофель, крупяные, зерновые и овощные культуры. По накоплению стронция-90 выделяют сильнонакапливающие культуры (бобовые), средненакапливающие культуры (крупяные) и слабонакапливающие культуры (зерновые). Бобовые культуры накапливают радионуклиды в 2-10 раз больше, чем зерновые. Известно, что сорта интенсивного типа для формирования урожая требуют много калия. При дефиците калия в почве его недостаток может восполняться за счет цезия. Установлено, что озимые зерновые культуры и раннеспелые яровые культуры накапливают меньше радионуклидов, потому что они формируют высокую урожайность растительной массы, на которую распределяются поступившие в растение радионуклиды, т.е. происходит биологическое разбавление радионуклидов.

Высокие коэффициенты накопления радионуклидов у многолетних трав естественных фитоценозов, видовой состав которых зависит от типа и влажности почвы, при этом видовые различия в пределах одной экосистемы достигают 15-30 раз. Осоковые и осоко-злаковые ценозы, произрастающие на постоянно переувлажненных почвах, накапливают цезий-137 в 100 и более раз больше, чем злаковые ценозы. Высокие коэффициенты накопления характерны для разнотравья всех фитоценозов.

Накопление радионуклидов зависит от типа минерального питания, т.е. от потребности культур в калии, кальции и других элементах питания. Калиелюбивые культуры (свекла, картофель, овес, капуста) накапливают больше цезия, а кальциелюбивые культуры (люпин, люцерна, клевер, горох) накапливают больше стронция.

Значительное влияние на накопление радионуклидов оказывает онтогенез или фаза развития растений. Максимальное накопление наблюдается в ранних фазах развития, когда происходит интенсивный рост, сопровождающийся активным всасыванием питательных веществ, радионуклидов и переносом их в наземные органы. Например, у зерновых культур максимальное накопление в наземной массе происходит в фазе кущения и в фазе выход в трубку. В фазах молочной и восковой спелости происходит отток питательных веществ и радионуклидов из листьев в зерно, где содержание цезия может возрастать до 4-х раз.

В органах растений радионуклиды распределяются неравномерно. Известно, что 90–99% рутения, церия и кобальта концентрируется в корнях. Концентрация цезия и стронция в корнях может составлять 20–40%, а 60–80% этих радионуклидов поступает в наземные органы, где они распределяются неравномерно. Около 80% радионуклидов оседает в листьях и стеблях. Наименьшая концентрация радионуклидов отмечается в генеративных органах, т.е. в семенах, при максимальном накоплении в оболочках, кроющих чешуях, створках бобов и

стручков. В корнеплодах высокое накопление радионуклидов в головке, в кожице и в сердцевине. В клубнях картофеля максимальное накопление в кожуре. Следует отметить, что при одинаковой плотности загрязнения почвы в картофеле содержание цезия-137 и стронция-90 значительно ниже, чем в корнеплодах. Это связано с тем, что клубень – это видоизмененный побег, в который питательные вещества и радионуклиды поступают из наземных органов. Корнеплод – это видоизмененный корень, активно поглощающий и накапливающий радионуклиды.

Накопление радионуклидов зависит от места расположения, типа и мощности корневой системы. Растения с мочковатой и корневищной корневой системой, расположенной в верхних слоях почвы, накапливают больше радионуклидов, чем растения со стержневой системой, которая проникает в более глубокие и «чистые» почвенные горизонты.

Из климатических условий наибольшее влияние на поступление радионуклидов оказывают годовое количество осадков, их распределение по месяцам и сумма положительных температур. Максимальное поступление радионуклидов наблюдается при оптимальной температуре и оптимальной влажности, которые обеспечивают интенсивный рост и развитие растений.

Кроме свойств радионуклидов, почвенных характеристик и биологических особенностей растений на накопление радионуклидов значительное влияние оказывает технология возделывания культур, т.е. система обработки почвы, внесение извести, минеральных и органических удобрений.

7.4. Накопление радионуклидов растительностью

лесных фитоценозов

Значительное количество радиоактивных выбросов в зонах загрязнения аккумулировали лесные массивы, которые оказались природным барьером на пути распространения радиоактивных аэрозолей. Общая площадь загрязнения лесов в Беларуси составляет 17198 тыс.га или 25,6%.

В лесных экосистемах миграция, распределение и накопление радионуклидов имеют свои особенности. В начальный период после выпадения радиоактивных веществ преобладает миграция "сверху - вниз", т.е. перемещение радионуклидов из крон под полог леса. Через некоторое время основная масса радионуклидов концентрируется

в верхней органической части или в подстилке. Затем начинается миграция из подстилки в минеральные слои почвы. Продолжительность этого процесса в хвойных лесах 3-5 лет, в лиственных — 1 год. На миграцию радионуклидов вглубь по профилю почвы влияют следующие факторы:

– плотность загрязнения лесного массива (с увеличением плотности загрязнения миграция возрастает);

– химические свойства радионуклидов (интенсивность миграции стронция-90 значительно выше, чем цезия-137, так как стронций-90 находится в более подвижных формах);

– толщина и степень сформированности лесной подстилки (в более старых лесах с мощной и хорошо минерализованной подстилкой миграция замедляется, в молодых лесах с плохо разложившейся подстилкой идет активнее);

– состав и возраст насаждений (в лиственных лесах происходит ежегодный сброс листьев и быстрая минерализация опада, сопровождающаяся высвобождением радионуклидов из опада и перемещением их в верхние слои почвы);

– гранулометрический состав почвы (в лесах, произрастающих на песчаных и торфяных почвах, миграция интенсивнее);

– режим увлажнения (на гидроморфных почвах с хорошим торфяным слоем идет активная миграция из подстилки в минеральные слои почвы).

За время, прошедшее после катастрофы на ЧАЭС, радионуклиды опустились в глубь почвы максимум до 30-35 см. Основная часть их (45-95%) в почве находится в фиксированной форме в нижних слоях подстилки и в верхних минеральных слоях почвы (1– 5см). На гидроморфных почвах преобладают обменная и подвижная формы Cs-137 и Sr-90.

В древесную растительность радионуклиды поступают двумя путями – через вегетирующие органы – аэральный путь и через корни – корневой путь. При аэральном пути поступления оказывает влияние количество выпавших радиоактивных осадков, размер радиоактивных частиц, форма выпадения и свойства радионуклидов, распределение радионуклидов в кроне деревьев, биологические особенности растений, фаза развития растений, сезон года.

Поступление радионуклидов из почвы зависит от плотности загрязнения леса и форм нахождения радионуклидов в почве, почвенных и климатических условий, места произрастания, типа и структуры биоценоза, биологических особенностей и возраста леса.

В лесном фитоценозе максимальная концентрация радионуклидов у растительности нижнего яруса (лишайники, мхи, грибы), минимальная – у растительности древесного верхнего яруса. Травянистые виды – кустарники, подлесок и подрост занимают промежуточное положение. Большинство радионуклидов концентрируется в корнях и слабо

переходит в наземную часть, за исключением цезия и стронция. По накоплению древесными растениями цезия-137 в древесине установлен следующий убывающий ряд: осина, береза, сосна, ель, дуб, ольха. По накоплению стронция-90 — осина, береза, ольха, ель, сосна, дуб. Установлено, что береза поглощает из почвы цезия-137 в 2-18 раз, а стронция-90 в 13 раз больше, чем сосна. У деревьев максимальное количество радионуклидов сосредоточено в коре, минимальное — в древесине. Степень накопления в древесине зависит от ее строения. Больше радионуклидов накапливают деревья с заболонной древесиной (осина, береза), меньшее накопление у деревьев с ядровой древесиной (дуб, сосна). Концентрация радионуклидов снижается от периферии к центру ствола.

Грибы, лишайники и мхи накапливают радионуклиды на 1-2 порядка больше, чем их концентрация в почве. По накоплению цезия-137 в плодовых телах грибы разделяются на 4 группы:

– слабонакапливающие (опенок осенний);

– средненакапливающие (подберезовик, белый гриб, лисичка, рядовка);

– сильнонакапливающие (груздь черный, сыроежки всех видов);

– аккумуляторы радиоцезия (гриб польский, масленок, волнушка).

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

По накоплению радиоцезия лесные ягоды располагаются в следующем убывающем порядке: черника, голубика, брусника, клюква, земляника. В ягодах концентрация радионуклидов в 2-3 раза меньше, чем в стеблях и листьях.

Сбор грибов, ягод, заготовка лекарственного сырья разрешены в лесах при плотности загрязнения до 2 Ки/км^2. Рубка леса производится в зоне загрязнения до 15 Ки/км^2 по традиционным технологиям, а в зоне 15-40 Ки/км^2 по специальным технологиям. В зоне свыше 40 Ки/км^2 рубку не производят.

При отмирании травянистой и древесной растительности радионуклиды возвращаются в почву и включаются в процессы миграции.

7.5. Пути поступления и особенности распределения радионуклидов в организме животных и птицы

Основными источниками поступления радионуклидов в организм животных являются корм, вода, почва, радиоактивные частицы, аэрозоли.

Радионуклиды поступают в организм животных через пищеварительный тракт с кормом и водой, через легкие с загрязненным воздухом, через поверхность кожи, через слизистые оболочки и раны. При радиационных инцидентах основное количество радионуклидов по-

ступает через легкие, кожу и слизистые оболочки. Газообразные радионуклиды быстро всасываются с поверхности легких в кровь и разносятся по организму. Частицы размером 0,5-1 мкм задерживаются на 90% в легких, где всасываются в кровь. Часть частиц поглощается в легких макровагами и надолго остается в легочной ткани. Более крупные частицы оседают в верхних дыхательных путях. Из легких быстро всасываются в кровь хорошо растворимые соединения щелочных и щелочно-земельных элементов. Поступления через кожу может составлять 0,13-2,1%, при этом максимальное поступление у щелочных элементов, инертных газов, галогенов, а также у водорастворимых и жирорастворимых соединений. Через слизистые оболочки раны поступает менее 1% радионуклидов.

В настоящее время 95-98% радионуклидов поступает через желудочно-кишечный тракт с кормами и водой. Поступление зависит от характера кормопроизводства хозяйства (вид и набор кормов, содержание радионуклидов в корма или суточная активность рациона, от продуктивности и окультуренности кормовых угодий, а также от способа содержания животных, при этом минимальное поступление при стойловом содержании животных с кормлением скошенным зеленым кормом окультуренных угодий.

При выпасе скота одновременно с травой поступают радиоактивные частицы, почвенный грунт и отмершие части растений, содержащие радионуклиды. В организм крупного рогатого скота может поступать 300-600 г почвы. С водой поступление радионуклидов на несколько порядков ниже, чем с кормом.

В желудочно-кишечный тракт с кормом и почвой радионуклиды поступают в различных формах: 1) ионы, входящие в состав травянистого корма; 2) аэрозоли, адсорбированные на поверхности растений; 3) структурные и химические соединения, входящие в состав кормов; 4) силикатные и карбонатные частицы различной растворимости и др. Радионуклиды, попавшие в организм с кормом, включаются в основные процессы обмена веществ, т.е. всасывание в кровь, транспорт с кровью по организму, поступление и накопление в органах и тканях организма и выведение из организма. Основное место всасывания радионуклидов — кишечник, отделы которого по интенсивности всасывания располагаются в убывающем порядке: подвздошная < ободочная < тощая < двенадцатиперсная кишка. В подвздошной кишке поглощается более 50% радионуклидов. Цезий и стронций всасываются, в основном, в тонком отделе кишечника, а у жвачных животных дополнительно в преджелудке. Всасывание радионуклидов осуществляется через мембраны клеток кишечника. Мембрана имеет определенную структуру и состав, обеспечивающие избирательный и неравномерный характер поглощения. Механизм всасывания радионуклидов объясняет мембранная гипотеза, согласно которой всасывание разделяется на

активное и пассивное и зависит от величины ионного потенциала, т.е. от заряда и радиуса иона. При активном всасывании выделяют активный транспорт, ускоренную диффузию и пиноцитоз.

Активный транспорт, или активный перенос, идет против градиента концентрации с использованием энергии АТФ при участии ферментов АТФ-аз, которые присоединяют ионы натрия, водорода, цезия, кальция, железа, церия и выносят их в кровь. Ускоренная диффузия идет по градиенту концентрации с участием специальных белков-переносчиков. Пиноцитоз осуществляется с помощью клеток, поглощающих радионуклиды путем обволакивания и переносящих их через стенки кишечника в кровь. При пассивном всасывании радионуклиды избирательно проникают через мембрану и поры клеток подобно макро- и микроэлементам по градиенту концентрации. Интенсивно поступают в кровь те ионы, у которых ионный радиус меньше радиуса пор клеток кишечника.

Интенсивность всасывания количественно оценивается коэффициентом всасывания, который определяется как отношение количества радионуклида, перешедшего в кровь к количеству радионуклида, поступившего с рационом. На всасывание радионуклидов оказывает влияние форма и физико-химические свойства радионуклидов, физиологическое состояние животных, количество корма и другие менее значимые факторы. Известно, что водорастворимые формы, одновалентные ионы всасываются активно. Хорошо всасываются радионуклиды относящиеся к элементам I группы таблицы Менделеева (щелочные), элементы VII группы (галогены), элементы II группы (щелочноземельные), кроме бария. Величина всасывания натрия-22, цезия-137 и йода-131 может составлять у крупного рогатого скота 100%, а стронция-90 — 40-60% и бария-140 —15%. Трансурановые и редкоземельные элементы образуют в кишечнике плохорастворимые комплексы, поэтому всасывание слабое и составляет от 0,001 до 2,3%. Чем больше массовое число элемента, тем меньше коэффициент всасывания. По скорости всасывания радионуклиды располагаются в убывающем порядке: $^{131}I > ^{137}Cs > ^{45}Ca > ^{90}Sr > ^{65}Zr > ^{60}Co > ^{59}Fe > ^{54}Mn > ^{140}Ba > ^{106}Ru > ^{144}Ce > ^{90}Y > ^{239}Pu$.

На величину и скорость всасывания влияет концентрация радионуклидов в корме (прямая связь) и количество поступивших радионуклидов (чем больше видовой состав радионуклидов, тем меньше всасывается каждый отдельный радионуклид.

Из физиологических особенностей животных наибольшее влияние на всасывание оказывает строение пищеварительного тракта (у животных с однокамерным желудком всасывание выше, чем у животных с четырехкамерным желудком); возраст животных (у молодых животных интенсивный обмен веществ и высокая проницаемость мембран клеток кишечника, поэтому всасывание радионуклидов в 2-10 раз вы-

ше, чем у старых животных); масса животных (у мелких животных активный обмен веществ и активное всасывание радионуклидов с последующим распределением на меньшую массу); режимы организма (подвижные, активные животные имеют большие коэффициенты всасывания, чем пассивные); продолжительность контакта радионуклидов с клетками желудочно-кишечного тракта и скорость переваримости корма, чем быстрее переваривается корм и чем меньше времени он находится в ЖКТ, тем меньше всасывание); степень заполненности ЖКТ кормом до поступления радионуклидов (натощак всасывание в 2-5 раз выше). На всасывание радионуклидов влияет качество корма, особенно содержание в кормах клетчатки, которая хорошо поглощает радионуклиды, снижая их всасывание, а также содержание калия, кальция, микроэлементов, витаминов и веществ, связывающих радионуклиды в трудно доступные соединения. В звене клетки кишечника – кровь имеет место дискриминация стронция относительно кальция. При дефиците усвояемого кальция активно всасывается стронций. Всасывание стронция-90 в кишечнике уменьшается в 1,5–5 и более раз при введении в рацион трикальцийфосфата, а также кормового мела или доломитовой муки. Препараты на основе ферроцина содержат обменные катионы алюминия, которые вступают в ионно-обменные реакции с одновалентными ионами, особенно активно с ионами цезия. Благодаря этим реакциям цезий связывается в коллоидные соединения и значительно меньше всасывается. Известно, что 1г ферроцина связывает $9{,}7 \cdot 10^{10}$ Бк. Цезий поглощается ферроцином в 1000 раз сильнее, чем натрий и в 100 раз сильнее, чем калий, поэтому введение ферроцина, с одной стороны, уменьшает всасывание цезия-137 и переход его в мясо в 2–5 раз, а в молоко – в 5-7 раз, а с другой стороны, – не уменьшает в организме содержание натрия и калия и не разрушает процессы обмена веществ в организме. Поступившие в кровь радионуклиды разносятся по организму, откладываются в органах и выводятся из организма.

Поведение всосавшихся в кровь радионуклидов зависит от физико-химических свойств радионуклидов и их биологического значения для организма, возраста и физиологического состояния животных, кратности и длительности поступления радионуклидов в организм. Радионуклиды I группы периодической системы, относящиеся к щелочным элементам, т.е. натрий, калий, цезий не связываются с белками крови, мышц, печени, почек, поэтому 90 и более процентов их находится в свободном состоянии. В связи с этим для них характерна высокая скорость обмена в организме и сравнительно равномерное распределение. Цезий-137 накапливается преимущественно в мышечной ткани и во внутренних органах.

Радионуклиды II группы периодической системы, относящиеся к щелочно-земельным элементам, т.е. кальций, барий, стронций связы-

ваются в организме с белками крови и тканей. Кальций связывается в 2 раза больше, чем стронций. Установлено, что кальций и стронций связываются с альбуминами, иттрий и церий – с глобулинами. Естественные комплексообразователи организма – молочная, глутаминовая и лимонная кислоты – легко «отрывают» стронций от белка, образуя со стронцием комплексы. В тканях под действием ферментов или фосфатных анионов (PO_4^{-3}) комплексы разрушаются, при этом возникают свободные катионы стронция и фосфаты стронция, которые включаются в процессы формирования костной ткани. По химическому составу кость – это фосфат кальция с примесью ионов магния, натрия, карбоната кальция. Костные кристаллы очень мелкие. Они окружены органическим веществом – каллогеном и слоем воды, через который происходит обмен между ионами поверхности кристалла и внеклеточной жидкостью организма. Чем шире этот слой (например, у молодых животных), тем больше скорость обмена ионами и тем больше накопление стронция в кости. Стронций вначале накапливается в каллогене, откуда путем диффузии переходит в кристаллы, т.е. в костную ткань. Максимальная концентрация стронция в губчатых и компактных костях, минимальная – в трубчатых, с разницей в 1,7-2,6 раз. Кальций может вытеснять стронций из каллогена, т.е. имеет место дискриминация, что следует помнить при составлении рациона кормления животных. Накопление стронция-90 в мышечной ткани и внутренних органах в сотни раз ниже, чем в костной ткани, потому что его отложению в мышечной ткани препятствует молочная кислота. По способности связываться с белками крови и тканей радионуклиды образуют следующий ряд: $^{22}Na = {}^{137}Cs = {}^{40}K < {}^{90}Sr < {}^{45}Ca < {}^{90}Y = {}^{144}Ce$.

В отличие от стронция-90 и цезия-137 йод-131 относится к короткоживущим радионуклидам ($T_{1/2}$=8,06 сут). По прочности связи с белками организма йод-131 превосходит все радионуклиды. Более 70% поступившего йода-131 связывается с белками крови и с тиреоидными гормонами, причем в крови йод-131 связывается с эритроцитами. Плутоний и америций связываются с белками крови и органов и откладываются в скелете, печени, селезенке, семенниках и надпочечниках.

Всасывание ^{144}Ce и ^{106}Ru – очень слабое, т.к. они связываются почти полностью с белками, поэтому отложение в органах и тканях незначительное. Радионуклиды нейтронной активации (^{59}Fe, ^{60}Co, ^{65}Zn) активно всасываются и накапливаются в паренхиматозных органах, тканях и скелете, при этом максимальное количество откладывается в печени.

По типу распределения в организме радионуклиды разделяются на 4 основные группы: 1-я группа – равномерный – элементы 1 группы периодической системы: водород, литий, натрий, калий, рубидий, цезий, рутений; 2-я группа – скелетный (остеотропный) – щелочноземельные элементы: бериллий, кальций, стронций, барий, радий цирко-

ний, иттрий; 3-я группа – печеночный: лантан, церий, плутоний, марганец, торий; 4-я группа – почечный: висмут, сурьма, мышьяк, уран. В особую группу с тиреотропным типом распределения выделяют йод, астат, бром.

При длительном (хроническом) поступлении радионуклидов в организм животных с кормом сначала происходит интенсивное накопление, а затем, по мере насыщения радионуклидами тканей, постепенно замедляется до наступления равновесия между поступающими в организм радионуклидами и радионуклидами, выводимыми из организма, при этом содержание радионуклидов стабилизируется. Равновесие может нарушаться при изменении содержания радионуклидов в корме.

Например, увеличение содержания радионуклидов в корме приводит к возрастанию накопления радионуклидов до установления нового равновесия, но на более высоком уровне. Снижение содержания радионуклидов в корме способствует выведению их из организма и уменьшению накопления.

Эти особенности учитываются при откорме животных в условиях радиоактивного загрязнения кормовых угодий.

Время установления равновесия зависит от свойств радионуклида, интенсивности обмена веществ, вида, возраста и физиологического состояния животных. В мышечной ткани и внутренних органах равновесия для цезия-137 устанавливается у крупного рогатого скота в интервале времени между 60-ми и 150-ми сутками.

Установлено, что радионуклиды из организма стельных самок переходят через плаценту к развивающимся эмбриону и плоду. Плацента свободно пропускает калий и цезий, однако кальций проникает в 3-12 раз активнее, чем стронций. Распределение радионуклидов по организму плода в утробе самки подобно распределению по организму взрослого животного.

Неотъемлемым процессом поведения радионуклидов в организме является процесс выведения через желудочно-кишечный тракт и почки с калом и мочой, а также в меньшем количестве через легкие и кожу. У стельных и лактирующих животных часть радионуклидов выводится с плодом и молоком.

Время, в течение которого исходное количество радионуклида уменьшится в два раза, называется **эффективным периодом полувыведения ($T_{эфф}$.).**

Уменьшение концентрации радионуклидов происходит за счет 2-х основных факторов – это радиоактивный распад и обмен веществ.

Эффективный период полувыведения определяют по формуле:

$$T_{эфф} = \frac{T_{физ.} \times T_{биол}}{T_{физ.} + T_{биол}},$$

где $T_{физ}$ – физические процессы, обусловленные радиоактивным распадом, т.е. период полураспада радионуклида – время, за которое количество радионуклида за счет распада ядер уменьшится в два раза; $T_{биол.}$ – физиологические процессы, обусловленные обменом веществ, т.е. биологический период полувыведения – время, за которое выводится половина поступившего количества радионуклида.

Эффективный период полувыведения короткоживущих радионуклидов определяется периодом полураспада, долгоживущих – биологическим периодом полувыведения.

Радионуклиды быстро выводятся из тканей с высокой скоростью обмена веществ, т.е. из мышечной ткани. Водорастворимые и свободные радионуклиды, которые хорошо всасываются в кровь (натрий, цезий, калий, йод), выводятся через почки.

Радионуклиды, которые плохо всасываются кальций, стронций, барий, церий, кобальт, выводятся через желудочно-кишечный тракт. Эффективный период полувыведения цезия-137 из мышечной ткани КРС составляет 20-30 суток, причем 35% цезия-137 выводится через 3 суток.

Остеотропные радионуклиды выводятся очень медленно. Для выведения радионуклидов используют различные методы, ускоряющие выведение из первичных мест поступления, а также методы, способствующие выведению радионуклидов из органов и тканей организма.

7.6. Переход радионуклидов из кормов в молоко и мясо

Поступление радионуклидов с кормом - основной источник радионуклидов для сельскохозяйственных животных, тогда как ингаляционный и перкутанный пути играют, как правило, незначительную роль.

Количественным показателем, характеризующим переход радионуклидов из рациона животных в 1 кг продукции, является **коэффициент перехода:**

$$K_n = \frac{A_{прод} \cdot 100}{A_{рац}},$$

где $A_{прод.}$ - содержание радионуклида в продуктах животноводства, Бк/кг; $A_{рац.}$ - суммарное содержание радионуклида в суточном рационе животных, Бк.

Для изучения распределения радионуклидов в органах и тканях крупного рогатого скота в 1992-1993 гг. в белорусском научно-исследовательском и конструкторско-технологическом институте мясной и молочной промышленности (БелНИКТИ ММП) исследовали 60 проб из 4 туш, поступивших на мясокомбинат из Буда-Кошелевского, Добрушского и Чечерского районов Гомельской области. В табл. 6

приведены результаты определения удельной массовой активности цезия-137 и стронция-90 в органах и тканях коров из совхозов «Звезда» и «Сож» Чечерского района.

Как видно из табл.6 цезий-137 сравнительно равномерно распределяется по органам и тканям. Если концентрацию его в мышечной ткани принять за 100%, то в языке она составит 94-103%, почках 67-84%, печени 29-59%. Однако содержание цезия-137 во внутренних органах, крови и костях животных изменяется в значительных пределах в зависимости от уровня содержания радионуклида во всем организме.

Т а б л и ц а 6**. Содержание радионуклидов в органах и тканях крупного рогатого скота, Бк/кг**

Органы и ткани	Радионуклиды	
	Cs-137	Sr-90
Мышечная ткань	1700* / 214	<0,1 / 1,2
Язык	1600 / 220	0,9 / 0,2
Почки	1140 / 180	0,7 / 0,3
Сердце	1040 / 180	0,4 / 0,1
Пищевод	460 / 126	2,0 / 0,4
Селезенка	630 / 120	0,3 / 1,2
Печень	490 / 127	1,1 / 0,7
Калтык	590 / 115	7,0 / 5,1
Легкие	430 / 100	0,9 / 0,3
Мозги	211 / 83	2,1 / 0,6
Вымя	313 / 65	0,8 / 0,4
Трахея	59 / 60	4,5 / 0,7
Кровь	132 / 21	0,6 / <0,4
Кости пластинчатые	300 / 20	1269 / 247
Кости трубчатые	63 / <1	746 / 96

* - числитель – совхоз «Звезда», знаменатель – совхоз «Сож» Чечерского района, 1993 г.

Накопление стронция-90 идет преимущественно в костях, причем кости пластинчатые содержат его в 1,7-2,6 раза больше, чем трубчатые. В мягких тканях содержание стронция-90 незначительно, не-

сколько больше его в калтыке.

Отложение радионуклидов в организме связано со свойствами радионуклида, уровнем и полноценностью кормления животных, видом животных, их возрастом и физиологическим состоянием. По отложению Sr-90 в скелете сельскохозяйственных животных можно расположить в следующий возрастающий ряд: крупный рогатый скот (КРС) < козы < овцы < свиньи <куры. Отложение Cs-137 в организме также наиболее интенсивно происходит у кур, а меньше всего у КРС. Установлено снижение поглощения радионуклидов в желудочно-кишечном тракте взрослых и старых животных. Это объясняется более слабой проницаемостью мембран кишечной стенки и меньшей потребностью взрослого организма в минеральных веществах.

У высокопродуктивных животных коэффициент перехода радионуклидов из кормов в организм, как правило, ниже, чем у низкопродуктивных. Существенное влияние на величину коэффициента перехода оказывает сбалансированность рационов кормления животных по основным и, особенно, минеральным элементам питания.

На основании обобщения экспериментального материла последних лет установлены коэффициенты перехода радионуклидов из суточного рациона в продукцию животноводства (табл.7).

Таблица 7**. Коэффициенты перехода ($К_п$) радионуклидов из суточного рациона в продукцию животноводства (в % на 1 кг продукта)**

Вид продукции	Радионуклиды	
	цезий-137	стронций-90
Молоко коровье	0,62	0,14
в т.ч.: стойловый период	0,48	0,14
пастбищный период	0,74	0,14
Говядина	4	0,04
Свинина	25	0,10
Баранина	15	0,10
Мясо кур	450	0,20
Яйцо	3,5	3,20

Из табл. 7 видно, что цезий-137 более интенсивно переходит из кормов в молоко и мясо по сравнению со стронцием-90.

Установлена связь между содержанием клетчатки в загрязненном рационе коров при стойловом содержании и переходом цезия-137 в молоко. Так, с увеличением содержания клетчатки в рационе от 1,3-1,8 до 3,1 кг/сутки отмечается уменьшение коэффициента перехода Cs-137 от 0,9 до 0,6.

8. АГРОПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО В УСЛОВИЯХ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

8.1. Общие принципы организации агропромышленного производства

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

В целях ограничения доз внутреннего облучения населения Минздравом Республики Беларусь установлены предельно-допустимые уровни содержания радионуклидов в продуктах питания. Постановлением Минздрава №16 от 26 апреля 1999 года введены "Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в пищевых продуктах и питьевой воде" (РДУ-99). Эти нормативы периодически пересматриваются в сторону снижения. На основании РДУ для пищевых продуктов и результатов исследований, полученных научно-исследовательскими институтами Академии аграрных наук, участвующими в реализации государственной программы "Сельхозрадиология", разрабатываются и утверждаются Минсельхозпродом "Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в сельскохозяйственном сырье и кормах".

Хозяйственная деятельность на загрязненных радионуклидами территориях регламентируется Законами Республики Беларусь "О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС" и "О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС". **Согласно этим законам, в сельскохозяйственном обороте могут находиться земли с плотностью загрязнения Cs-137 до 1480 кБк/м^2 (40 Ки/км^2) и Sr-90 – до 111 кБк/м^2 (3 Ки/км^2).** Территории с превы-

шением этих уровней подлежат выводу из оборота. В настоящее время сельскохозяйственное производство ведется на 1,1 млн.га, загрязненных Cs-137, из которых 0,2 млн.га одновременно загрязнено Sr-90.

За послеаварийный период было выведено из оборота 265 тыс. га сельскохозяйственных угодий, на которых невозможно получать нормативно-чистую продукцию. Сельскохозяйственное производство в этих условиях осуществляется в соответствии со следующими рекомендациями научных учреждений республики: "Руководство по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 1997–2000 гг." (Минск, 1997), "Правила ведения агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2002–2005 гг." (Минск, 2002), "Рекомендации по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь (Минск, 2003)", "Применение органических удобрений на загрязненных радионуклидами почвах (Минск, 2004), "Методические указания по производству зерна на продовольственные цели в соответствии с республиканскими допустимыми уровнями содержания стронция-90" (Минск, 2004) и др..

Для получения сельскохозяйственной продукции с допустимым содержанием радионуклидов и обеспечения радиационной безопасности работающих на загрязненных радионуклидами территориях проводятся защитные мероприятия (контрмеры). Контрмеры подразделяются на следующие группы: организационные, агротехнические, агрохимические, зооветеринарные, технологические, санитарно-гигиенические, информационные.

Организационные мероприятия предусматривают:

– инвентаризацию угодий по плотности загрязнения радионуклидами и составление картограмм;

– прогноз содержания радионуклидов в урожае и продукции животноводства;

– инвентаризацию сельхозугодий в соответствии с результатами прогноза и определение площадей, где возможно выращивание культур для использования на продовольственные цели, для производства кормов, для получения семенного материала и т.д.;

– изменение структуры посевных площадей и севооборотов;

– переспециализацию отраслей животноводства;

– исключение угодий из хозяйственного использования или перевод выведенных из землепользования угодий в хозяйственный оборот;

– оценку эффективности защитных мероприятий и уровня загрязнения урожая после их проведения;

– организацию радиационного контроля продукции.

Агротехнические приемы предусматривают:

– увеличение доли площадей под культуры с низким уровнем нако-

пления радионуклидов;

– коренное и поверхностное улучшение сенокосов и пастбищ;

– предотвращение вторичного загрязнения почв и поверхностного загрязнения растениеводческой продукции за счет выполнения комплекса противоэрозионных мероприятий;

– оптимизацию водного режима (осушение).

Агрохимические мероприятия предусматривают оптимизацию физико-химического режима почв посредством:

– известкования кислых почв;

– внесения органических удобрений;

– внесения повышенных доз фосфорных и калийных удобрений;

– регулирования азотного питания растений;

– применения микроудобрений;

– применения средств защиты растений.

Технологические приемы включают:

– промывку и первичную очистку убранной плодоовощной и технической продукции;

– переработку полученной продукции с целью снижения в ней концентрации радионуклидов.

Зооветеринарные мероприятия включают:

– специальную систему кормления животных с применением специальных кормовых добавок;

– двухстадийный откорм животных перед отправкой на мясокомбинат;

– раздельный выпас скота для производства цельного молока и молока сырья;

– постоянный контроль за иммунологическим и гормональным статусом, состоянием обмена веществ, воспроизводительной функцией, проявлением и течением острых и хронических болезней сельскохозяйственных животных.

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 по снижению перехода радионуклидов в возделываемые культуры и готовую продукцию;

– научные исследования;

– подготовку и повышение квалификации специалистов сельского

хозяйства.

8.2. Мероприятия по уменьшению содержания радионуклидов в продукции растениеводства

8.2.1. Инвентаризация сельскохозяйственных угодий по плотности загрязнения радионуклидами

Радиологическое обследование сельхозугодий проводится специалистами областных проектно-изыскательских станций химизации сельского хозяйства (ОПИСХ) в соответствии с Методикой крупномасштабного агрохимического и радиологического исследования почв сельскохозяйственных угодий Республики Беларусь (Минск, 2001). 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.

8.2.2. Прогноз содержания радионуклидов в урожае

Прогноз — это предварительный расчет содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в будущем урожае. Прогноз загрязнения радионуклидами продукции растениеводства позволяет заблаговременно планировать набор культур для возделывания на загрязненных радионуклидами угодьях, размещение их по полям севооборотов и отдельным участкам с учетом различного использования получаемой продукции (продовольственные цели, фураж, промышленная переработка и т.д.). На основе прогноза осуществляется раздельный выпас дойных коров и откормочного молодняка, а также заготовка кормов.

Для прогноза используются усредненные значения коэффициентов перехода радионуклидов (Кп) из почвы в урожай. (Кп — это отношение удельной активности растениеводческой продукции в Бк/кг к плотности загрязнения почвы в кБк/м^2), дифференцированные в зависимости от типа и разновидности почв, культуры, содержания подвижного калия в почве и ее кислотности, а также результаты агрохимического и радиологического обследования почв, представленные в виде агрохимических паспортов полей и совмещенных картограмм загрязнения почв цезием-137 и стронцием-90.

Нормативные значения коэффициентов перехода приведены в приложениях Правил ведения агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь (Минск, 2002) и Рекомендаций по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь (Минск, 2003). Значения Кп получены путем обработки ре-

зультатов многолетних полевых опытов, а также анализов растительных и почвенных образцов, взятых на производственных посевах по единой методике.

Расчет уровня загрязнения продукции производится по формуле:

$$УА = Кп \cdot П \cdot 37,$$

где УА – удельная активность продукции, Бк/кг; Кп – коэффициент перехода в продукцию Cs-137 в зависимости от обеспеченности почв калием или коэффициент перехода Sr-90 в зависимости от кислотности; П – плотность загрязнения почв, Ки/км^2; 37 – коэффициент пересчета нКи/кг в Бк/кг.

Пример расчета: необходимо определить уровень удельной активности сена многолетних злаковых трав по Cs-137 на дерново-подзолистых супесчаных почвах. Плотность загрязнения почвы Cs-137 равна 10 Ки/км^2, содержание подвижного калия 150 мг/кг почвы. В прилож. 3 находим значение коэффициента перехода Cs-137 в сено многолетних злаковых трав при обеспеченности почв калием 150 мг/кг, который равен 0,67. Прогнозируемое загрязнение сена составит:

$$0{,}67 \cdot 10 \cdot 37 = 248 \text{ Бк/кг}.$$

Сопоставляя полученную величину с нормативной (прилож.2), представляющей предельно-допустимое содержание Cs-137 в сене многолетних злаковых трав, определяем возможность использования сена.

Аналогичным образом производятся расчеты для прогноза содержания Sr-90 в сельскохозяйственных культурах, при этом учитывается степень кислотности почвы. Значения Кп приведены в прилож. 5 и 6.

8.2.3. Ограничения по плотности загрязнения почв при возделывании различных сельскохозяйственных культур

Предельно допустимая плотность загрязнения 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. Например, необходимо определить предельно допустимую плотность загрязнения дерново-подзолистых супесчаных почв радиоцезием, при которой содержание Cs-137 в сене многолетних злаковых трав не будет превышать допустимые нормы для производства цельного молока. Обеспеченность почв подвижным калием составляет 120 мг/кг почвы. Значение коэффициента перехода Cs-137 в сено многолетних злаковых трав при данном содержании калия в почве равно 1,59 (прилож. 3). Допустимое содержание Cs-137 в сене для производства цельного молока составляет 1300 Бк/кг (прилож. 2). Предельно допустимая плотность загрязнения почв, исходя из расчета (1300:1,59:37), составит 22 Ки/км^2.

Расчеты ограничения плотности загрязнения почв цезием-137 и стронцием-90 для возделывания картофеля с допустимым содержанием радионуклидов приведены в табл.8 и 9.

Таблица 8. **Ограничения плотности загрязнения дерново-подзолистых почв Cs-137 для получения картофеля в пределах норм РДУ-99 в зависимости от обеспеченности почв обменным калием, Ки/км^2**

Разновидность	Содержание подвижных форм K_2O в почве, мг/кг				
	менее 80	80-140	141-200	201-300	более 301
Суглинистые	31	40	40	40	40
Супесчаные	- *	36	40	40	40
Песчаные	17	27	40	40	40

* отсутствует нормативное значение Кп при содержании подвижных форм калия в почве менее 80 мг/кг (прилож.3) и поэтому не рассчитано значение соответствующего показателя.

Как видно из табл. 8, содержание цезия-137 в клубнях картофеля не будет превышать допустимых уровней на всех используемых в сельскохозяйственном обороте дерново-подзолистых почвах при содержании подвижного калия более 140 мг/кг почвы. Ограничения плотности загрязнения почв цезием-137 имеются для суглинистых почв с его содержанием менее 80 мг/кг почвы, для песчаных и супесчаных почв с содержанием менее 140 мг/кг почвы.

При содержании подвижного калия менее 140 мг/кг на почвах любого гранулометрического состава выращивание картофеля без дополнительных доз минеральных удобрений является нецелесообразным, т.к. содержание цезия-137 в клубнях может превышать установленные пределы.

Ограничения при возделывании картофеля могут быть обусловлены и уровнем загрязнения почв стронцием-90.

Результаты прогнозирования (табл. 9) свидетельствуют, что при уровне кислотности почв 6,1–7,0 продовольственный картофель с допустимым содержанием Sr-90 можно получать на суглинистых и супесчаных почвах при плотности загрязнения радиостронцием менее 0,8 Ки/км^2 (30 кБк/м^2), песчаных – 0,4 Ки/км^2 (15 кБк/м^2).

Таблица 9. **Ограничения плотности загрязнения дерново-подзолистых почв Sr-90 для получения картофеля в пределах норм РДУ-99 в зависимости от уровня кислотности почв, Ки/км^2**

Разновидность	Уровень кислотности почвы, pH_{KCl}					
	менее 4,5	4,6-5,0	5,1-5,5	5,6-6,0	6,1-7,0	более 7,0
Суглинистые	0,28	0,37	0,48	0,67	0,77	0,83
Супесчаные	0,25	0,33	0,40	0,56	0,77	0,77
Песчаные	0,13	0,31	0,21	0,29	0,38	0,38

При более низких значениях pH ужесточаются ограничения по плотности загрязнения их стронцием-90.

8.2.4. Система обработки почв в условиях радиоактивного загрязнения

Специальная система обработки почв в зоне радиоактивного загрязнения направлена на снижение накопления радионуклидов в урожае, уменьшение эрозионных процессов, снижение времени воздействия излучения на работающих в поле.

Глубокая вспашка возможна на вновь осваиваемых землях с мощным гумусовым слоем. Выполняется плантажными, болотными или специальными одноярусными плугами с предплужниками (ПБН-3-50А, ПНУ-4-40), а также ярусными плугами (ПСН-4-40, ПНЯ-4-42). На минеральных почвах верхний слой (8–10 см) укладывается прослойкой по дну борозды глубиной 27–40 см, а чистый от радионуклидов слой перемещается поверх его без оборота (ПСН-4-40) или с оборотом (ПНУ-4-40, ПНЯ-4-42). По пласту многолетних трав для проведения такой вспашки необходима предварительная разделка дернины, лучше всего фрезерование (ФН-1,8) на глубину слоя загрязнения. Схема такой вспашки может быть использована на вновь осваиваемых землях и на глубоко залежных торфяниках с выполненной на них после аварии неглубокой обработкой, т.е. когда радионуклиды распределены в слое 0–25 см. Но при этом должна быть увеличена до 50–60 см общая глубина вспашки (ПТН-0,9). Специальная глубокая вспашка – мероприятие разовое и последующие обработки проводятся таким образом, чтобы их глубина была меньше глубины расположения заделанного загрязненного слоя.

Традиционная отвальная система обработки почвы совершенствуется в направлении максимально возможного совмещения операций основной и дополнительных обработок, а также применения новых высокопроизводительных машин, таких как лущильники ЛАГ-10(15), бороны БДТ-7(10), культиваторы чизельные КЧН (КЧП)-5.4, комбинированные агрегаты финишной обработки АКШ-7.2(3.6), особенно на землях со средне- и тяжелосуглинистыми почвами.

В качестве орудий дополнительной (в т.ч. и финишной) обработки почвы могут использоваться специализированные машины ППР-2.3, ПВР-3.5 (2.7; 2.3) или машины общего назначения – кольчатошпоровые катки типа ККШ, зубовые бороны. Составляются комбинированные пахотные агрегаты при помощи унифицированного приспособления ППМ-7. Под зерновые, однолетние травы рекомендуется применение неглубокой (10–14 см) обработки чизельными культиваторами с последующим применением предпосевной обработки. Лучшим вариантом является выполнение обработки за один, максимум два прохода комбинированными почвозащитными агрегатами АЧУ-2.8, АКП-3.9Б.

При высокой плотности загрязнения радионуклидами 15–40Ки/км^2

по Cs-137 и 1–3 Ки/км^2 по Sr-90 рекомендуется комбинированная система обработки почвы. Она включает чередование минимальных обработок с ярусной отвальной вспашкой 1–2 раза в севообороте при одновременной заделке органических удобрений и сидератов. Глубина ярусной вспашки не должна превышать мощности пахотного горизонта. Для этой цели разработан комбинированный агрегат АКЯ-4-42.

Первичную обработку дернины при коренном улучшении сенокосов осуществляют тяжелыми дисками в два-три следа. Слабозадерненные луга пашут обычными плугами на глубину 18–20 см, а сильнозадерненные и луга на торфяно-болотных почвах – кустарниково-болотным плугом на глубину 30–35 см.

На сенокосах и пастбищах, где после чернобыльской катастрофы было проведено перезалужение с закрыванием дернины на дно борозды, при повторном перезалужении вспашка недопустима. Следует проводить поверхностное фрезерование и прикатывание с посевом агрегатом АПР-2.6 или обновлять травостой путем подсева трав в дернину фрезерной сеялкой МТД-3.

На переувлажненных почвах тяжелого гранулометрического состава перед посевом трав необходимо предварительно разделать дернину чизельными орудиями или профрезеровать ее.

Для оптимизации агрофизических условий в корнеобитаемом слое и улучшения режима питания растений на сенокосах и пастбищах с переувлажненными почвами тяжелого гранулометрического состава рекомендуется не реже одного раза в пять лет проводить подпахотное рыхление. Минимальное нарушение целостности дернины и поверхности достигается плугами-рыхлителями типа ПРПВ-5-51.

Система обработки почвы на загрязненных радионуклидами землях, подверженных водной и ветровой эрозии, дифференцируется по агротехнологическим группам земель в зависимости от степени их эрозионной опасности.

На слабоэродированных землях с величиной смыва почвы до 2 т/га и дефляцией 1–3 т/га в год (I-я группа) в интенсивных зернопропашных и плодосменных севооборотах основная обработка почвы такая же, как и на неэродированных почвах.

На эродированных землях с величиной смыва почвы 2–5 т/га в год (II-я группа) рекомендуется применять комбинированные отвально-безотвальные способы основной обработки, выполняемые контурно. Безотвальные поверхностная, чизельная и плоскорезная обработки проводятся в севооборотах под озимые и яровые зерновые культуры. После стерневого предшественника чизельную обработку следует проводить за два прохода: первая – на глубину 14–15 см, вторая — на глубину пахотного слоя при прорастании семян малолетних сорняков, появлении «шилец» пырея и розеток осота. Плоскорезная обработка почвы выполняется на глубину пахотного слоя или на 3–4 см глубже.

В качестве дополнительного противоэрозионного приема под пропашные культуры рекомендуется вспашка с рыхлением подпахотного горизонта 1 раз в 3–4 года на глубину 35–40 см.

На эродированных дефлированных землях с величиной смыва и дефляции почв более 5 т/га в год (земли III-й, IV-й, V-й групп), на которых вводятся почвозащитные зерно-травяные и травяно-зерновые севообороты, следует проводить безотвальные разноглубинные обработки (контурно). Отвальная вспашка проводится только после многолетних трав. Как дополнительный противоэрозионный прием рекомендуется предзимнее щелевание зяби, озимых культур и многолетних трав на глубину 45–50 см при промерзании почвы не глубже 3–5 см. На склонах, крутизной до 3°, расстояние между щелями 5–8 м, на склонах крутизной 3–5° — 3–5 м, более 5° —1,5–3,0 м.

Для безотвальной поверхностной обработки используются дисковые (БДТ-3,0, БДТ-7,0) или плоскорежущие (культиваторы-плоскорезы КПШ-5, КПШ-9, КПЭ-3,8) орудия; для безотвальной чизельной обработки – чизель-культиваторы КЧ-5,1, КЧН-5,4, КЧН-1,8; для поверхностной обработки – комбинированный агрегат, включающий культиватор-глубокорыхлитель-плоскорез (КПГ-2,2, ПГ-3-100, КПГ-250) и борону игольчатую (БИГ-3А). Вспашка с почвоуглублением выполняется плугом с почвоуглубителем или нарезным отвалом, предзимнее щелевание — щелевателями ЩН-2-140, ЩН-40,ЩП-3-70, РЩ-3,5.

Предложенная система обработки почв и применение высокопроизводительных комбинированных агрегатов позволяет снизить на 30–40 % внешнюю дозовую нагрузку на механизаторов наряду со снижением трудозатрат до 50 % и расхода горюче-смазочных материалов на 30–35 %.

8.2.5. Принципы подбора культур и сортов

Различия в коэффициентах накопления радионуклидов различными видами, а также сортами сельскохозяйственных культур следует учитывать при планировании севооборотов с целью получения растениеводческой продукции с наименьшим уровнем радиоактивного загрязнения.

Анализ нормативных коэффициентов перехода цезия-137 и стронция-90 в растениеводческую продукцию, приведенных в Правилах ведения агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь и Рекомендациях по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь, позволяет ранжировать культуры в порядке убывания Cs-137 и Sr-90 в продукции. Для культур установлен следующий убывающий ряд по накоплению Cs-137 **люпин > го-**

рох > вика > рапс > овес > просо > ячмень > пшеница > озимая рожь. При этом накопление Cs-137 в соломе в 2 раза выше, чем в зерне. Наиболее интенсивно радиоцезий накапливает солома овса, далее следуют солома ячменя, пшеницы и озимой ржи. По накоплению Cs-137 в зеленой массе на первом месте стоят многолетние злаковые травы, затем следуют люпин, рапс, многолетние бобово-злаковые смеси, клевер, горох, горохо-овсяная и вико-овсяная смеси, кукуруза. Картофель и кормовая свекла накапливают Cs-137 меньше, чем зеленая масса кукурузы.

Многолетние злаковые травы, произрастающие на окультуренных сенокосно-пастбищных угодьях, ранжируются следующим образом: **костер безостый, тимофеевка, мятлик луговой, ежа сборная, овсяница, райграс пастбищный.**

Осоково-злаковые и особенно осоковые ценозы, произрастающие на естественных лугопастбищных угодьях, приуроченных к постоянно переувлажненным, пониженным элементам рельефа, накапливают Cs-137 в 5–100 раз больше, чем злаковые ценозы, например, из мятлика лугового и ежи сборной.

Убывающий по накоплению Sr-90 ряд культур существенно отличается от такового по Cs-137. По величине накопления Sr-90 в зерне первое место занимает **яровой рапс,** далее следуют в порядке убывания: **люпин > горох > вика > ячмень > яровая пшеница > овес > озимая пшеница и озимая рожь.** Наибольшее количество Sr-90 переходит в солому ячменя, затем следует солома яровой и озимой пшеницы, овса, озимой ржи. По накоплению Sr-90 в зеленой массе культуры располагаются в следующем по убыванию порядке: **клевер > люпин > горох > многолетние злаковые травы на пойменных землях > многолетние злаково-бобовые смеси > вика > рапс яровой > горохо-овсяные и вико-овсяные смеси > травы естественных сенокосов > травы на осушенных землях > травы на пахотных землях > кукуруза.** В корнеплодах кормовой свеклы содержание Sr-90 меньше, чем в зеленой массе кукурузы, а клубнях картофеля меньше, чем в корнеплодах свеклы.

Травы по мере уменьшения поступления Sr-90 ранжируются следующим образом: **разнотравье > осоки > мятлик луговой > ежа сборная**.

Выявлены различия в накоплении радионуклидов, связанные с сортовыми особенностями культур. Сорта интенсивного типа, потребляющие значительные количества питательных веществ, обычно характеризуются и повышенным накоплением радионуклидов. Например, повышенным накоплением радионуклидов отличаются сорта ячменя Селянин, Верас. Сорта картофеля Аксамит, Альтаир, Сантэ, Синтез, Орбита незначительно отличаются по накоплению Cs-137, однако стронция-90 больше всех накапливает сорт Орбита. Обычно ранние и

среднеспелые сорта картофеля накапливают радионуклиды меньше, чем позднеспелые. В 2,5 раза по накоплению Cs-137 различаются сорта моркови и лука, в 1,7 раза – сорта редиса и свеклы столовой. Поэтому при внедрении того или иного сорта необходимо учитывать не только размеры накопления, но и радионуклидный состав загрязнения продукции. **Подбор сортов с минимальным накоплением радионуклидов является экономически выгодным и эффективным способом обеспечения производства продукции в пределах нормативных требований.**

Размещение многолетних трав, зернобобовых и крестоцветных культур затрудняется при увеличении плотности загрязнения Cs-137, особенно на почвах легкого гранулометрического состава и переувлажненных торфяно-болотных землях. На почвах, загрязненных Sr-90, которые, как правило, характеризуются одновременно высокой или средней плотностью загрязнения Cs-137, усиливаются ограничения в размещении кормовых культур.

Размещение корнеплодов по полям севооборота не лимитируется плотностью загрязнения почв радионуклидами. Однако при выращивании на почвах, загрязненных Sr-90 с плотностью выше 1 Ки/км^2, корнеплоды не рекомендуется скармливать дойному стаду для получения цельного молока, но можно использовать при производстве молока как сырья для переработки, а также для всех видов откорма скота на мясо.

Аналогичные требования предъявляются при размещении по полям и использовании на корм кукурузы, высокие урожаи зеленой массы которой можно получать как при чередовании ее с другими культурами в севообороте, так и в бессменных посевах в течение двух-трех лет. Расширение посевов кукурузы при возделывании ее на зерно в южных районах Беларуси позволяет пополнить кормовой баланс на легких почвах, где малопродуктивны многолетние бобовые травы, кроме того, зерно кукурузы меньше накапливает радионуклиды.

Многолетние травы занимают ведущее место в структуре посевов кормовых культур. Содержание радионуклидов в кормах, получаемых с травяных полей, во многом будет определять и уровень радиоактивного загрязнения животноводческой продукции. Исследования последних лет показали, что сокращение на загрязненных угодьях посевов клевера с заменой его на злаковые травостои обосновано только на почвах, загрязненных Sr-90 с плотностью более 1 Ки/км^2 , где зеленая масса и сено клевера непригодны для скармливания дойному стаду, так как клевер накапливает радионуклиды стронция в среднем в 2,5 раза больше, чем злаковые травы. На дерново-подзолистых почвах, загрязненных преимущественно Cs-137, посевы клевера предпочтительны, так как клевера накапливают Cs-137 на 30% меньше, чем многолетние злаковые травы. На дерново-подзолистых почвах с плотно-

стью загрязнения Cs-137 – 5–15 Ки/км^2; Sr-90 – 0,3–1,0 Ки/км^2 наиболее пригодны клеверо-злаковые травосмеси, которые обеспечивают кормовой рацион белком при минимальных дозах азотных удобрений, а на плодородных почвах и без минерального азота. Полное исключение бобового компонента из травосмесей требует для злакового травостоя повышенных доз азота, что усиливает загрязнение растений Cs-137. Злаково-бобовые травосмеси на дерново-подзолистых почвах тяжелого гранулометрического состава гарантируют наибольшую экологическую безопасность, так как азот минеральных удобрений компенсируется биологическим азотом бобового компонента.

На загрязненных торфяно-болотных почвах возможен сев только злаковых травосмесей, так как клевер накапливает здесь примерно в три раза больше радионуклидов цезия и стронция, чем многолетние злаковые травы.

Продуктивность кормового поля будет намного выше, а полученный корм чище при подсеве райграса однолетнего под горохо- или вико-овсяные смеси, высеваемые после уборки озимой ржи на зеленую массу. В этом случае получается три урожая зеленой массы: в мае – озимой ржи, в июне-августе – поукосной культуры (вика–овес), а в сентябре – подпосевного райграса. На почвах с низкой и средней плотностью загрязнения радионуклидами весьма эффективны также поукосные посевы таких однолетних кормовых культур, как редька масличная, рапс яровой, горчица белая.

При подборе и размещении культур в севооборотах необходимо учитывать и общебиологические требования растений к предшественникам и плодородию почв (табл. 10).

Таблица 10. **Чередование культур для различных типов почв в зависимости от плотности загрязнения их радионуклидами**

Чередование культур	Почвы	Плотность загрязнения, Ки/км^2	
		Cs-137	Sr-90
1	2	3	4
Озимая рожь на зерно Картофель, корнеплоды Кукуруза Ячмень с лосевом многолетних трав Клеверо-злаковая травосмесь Овес Крестоцветные на зеленый корм и семена	Суглинистые и супесчаные, подстилаемые мореной	5-15	0,3-1
Озимая рожь на зеленую массу+однолетние травы поукосно Озимая рожь на зерно Картофель, корнеплоды Ячмень Овес Крестоцветные на зеленый корм и семена	Супесчаные	5-15	0,3-1

Озимая рожь на зерна Картофель Овес Однолетние бобово-злаковые травы	Песчаные	5-15	0,3-1
Озимые на зеленую массу + однолетний райграс поукосно Озимая рожь на зерно Картофель, корнеплоды Ячмень с подсевом многолетних трав Многолетние травы Овес Озимый рапс на семена	Суглинистые и супесчаные, подстилаемые мореной	15-40	1-3

Продолжение табл. 10

1	2	3	4
Озимая рожь на зерно Картофель, корнеплоды Ячмень Овес Озимый рапс на семена	Супесчаные	15-40	1-3
Озимая рожь на зерно Картофель Овес Однолетние травы	Песчаные	15-40	1-3

8.2.6. Применение удобрений, известкование кислых почв

Агрономическое значение всех видов удобрений — повышение урожайности на загрязненных радионуклидами землях не меняется, однако здесь они приобретают новое качество, потому что могут как уменьшать поступление радиоактивных веществ из почвы, так и стимулировать поглощение некоторых из них корнями растений. Применение удобрений – один из наиболее широко используемых способов снижения содержания радионуклидов в растениеводческой продукции. Уменьшение уровня загрязнения урожая радионуклидами при внесении удобрений в почву может быть обусловлено следующими причинами:

– увеличением урожайности и тем самым «биологическим разбавлением» содержания радионуклидов на единицу массы урожая;

– повышением количества кальция и калия в почвенном растворе;

– закреплением Sr-90 путем соосаждения с фосфатами при внесении фосфорных удобрений.

На почвах, загрязненных радионуклидами, минеральные удобрения следует применять со значительным преобладанием фосфора и калия над азотом.

Положительное действие калийных удобрений обусловлено как антагонизмом катионов цезия и калия в почвенном растворе, так и значительной прибавкой урожая сельскохозяйственных культур, особенно на бедных калием дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах.

По мере повышения загрязнения почв радионуклидами потребность в дополнительных дозах калия увеличивается. Установлено, что внесение калийных удобрений при сбалансированном азотно-фосфорном питании приводит не только к существенному уменьшению поступления из почвы в растения Cs-137 (в 1,1–2,8 раз), но и Sr-90. Особенно эффективны повышенные дозы калийных удобрений под многолетние травы, корнеплоды и картофель. Например, в опытах на супесчаных почвах совхоза «Ветковский» с плотностью загрязнения Sr-90 11–18,5 кБк/м^2 (0,3–0,5 Ки/км^2) повышение дозы калия со 120 до 180 кг/га сопровождалось снижением накопления Sr-90 в клубнях различных сортов картофеля на 33–57% при одновременном повышении урожая на 20–50 ц/га.

Учитывая сравнительно невысокую стоимость калийных удобрений, рекомендованы повышенные дозы, дифференцированные в зависимости от типов почв и содержания в них обменного калия.

Дозы калийных и фосфорных удобрений для загрязненных радионуклидами земель определяются путем суммирования основных и дополнительных доз удобрений, которые приведены в табл.11 и 12. Значения основных доз этих удобрений определяются типом почв и содержанием K_2O и P_2O_5 в почве. Значения дополнительных доз зависят от плотности загрязнения почв.

Таблица 11. **Дозы калийных удобрений на загрязненных радионуклидами землях**

Почвы	Содержание K_2O, мг/кг почвы	Основные дозы K_2O, кг/га	Дополнительные дозы K_2O (кг/га) при плотности загрязнения, (Ки/км^2)		
			^{137}Cs 1,0-4,9 ^{90}Sr 0,15-0,29	^{137}Cs 5,0-14,9 ^{90}Sr 0,30-1,99	^{37}Cs 15,0-40,0 ^{90}Sr 2,0-3,0
Пашня					
Дерново-подзолистые, дерновые	менее 80	100	50	100	150
	81-140	90	30	60	90
	141-200	80	20	40	60
	201-300	55	15	30	45
	более 300	25	-	-	-
Торфяно-болотные	менее 200	140	40	80	120
	201-400	120	30	60	90
	401-600	100	20	40	60
	601-1000	60	10	20	30
	более 1000	30	-	-	-
Сенокосы и пастбища					

Дерново-подзолистые, дерновые	менее 80	80	40	80	120
	81-140	70	30	60	80
	141-200	60	20	40	60
	201-300	45	15	30	45
	более 300	20	-	-	-
Торфяно-болотные	менее 200	100	40	80	120
	201-400	90	30	60	90
	401-600	80	20	40	60
	601-1000	60	10	20	30
	более 1000	30	-	-	-

В целях предотвращения применения избыточных доз калийных удобрений и ухудшения качества продукции введены ограничения по уровню предельного насыщения почв обменным калием от емкости катионного обмена: для песчаных почв – 3,5%. Супесчаных – 4% и суглинистых – не более 5%. На почвах с избыточным содержанием обменного калия (содержание K_2O более 300 мг/кг на минеральных и 1200 мг/кг на торфяно-болотных) внесение калийных удобрений не предусматривается до очередного агрохимического обследования почв.

Установлено снижение поступления радионуклидов из почвы в растительную продукцию при внесении фосфорных удобрений, особенно на почвах с низким содержанием фосфатов. Учитывая дефицит фосфорных удобрений и их высокую стоимость, рекомендовано на загрязненных территориях обеспечивать минимум фосфорных удобрений, необходимый для сбалансированного питания сельскохозяйственных культур с учетом содержания подвижных фосфатов в почве (табл. 12).

Таблица 12. **Дозы фосфорных удобрений на загрязненных радионуклидами землях**

Почва	Содержание P_2O_5, мг/кг почвы	Основные дозы P_2O_5, кг/га	Дополнительные дозы P_2O_5 (кг/га) при плотности загрязнения, Ки/км^2		
			^{137}Cs 1,0-4,9 ^{90}Sr 0,15-0,29	^{137}Cs 5,0-14,9 ^{90}Sr 0,30-1,99	^{137}Cs15,0-40,(^{90}Sr 2,0-3,0
Пашня					
Дерново-подзолистые, дерновые	менее 60	45	15	30	45
	61-100	40	10	20	30
	101-150	35	5	10	15
	151-250	20	-	5	10
	251-400	10	-	-	-
Торфяно-болотные	менее 200	60	20	40	60
	201-300	45	15	30	45
	301-500	30	10	20	30
	501-800	20	-	5	10
	801-1200	10	-	-	-

Сенокосы и пастбища					
Дерново-подзолистые, дерновые	менеее 60	35	15	30	45
	61-100	30	10	20	30
	101-150	25	5	10	15
	151-250	10	-	5	10
	251-400	-	-	-	10
Торфяно-болотные	менее 200	55	15	30	45
	201-300	40	10	20	30
	301-500	35	5	41	15
	501-800	20	-	5	10
	801-1200	-	-	-	-

Важная роль отводится регулированию азотного питания растений. Недостаток доступного азота в почве приводит к снижению урожая, а повышенные дозы азотных удобрений усиливают накопление радионуклидов в растениях. Расчет доз азотных удобрений проводится исходя из потребности в азоте для формирования планируемого урожая. Для избежания превышения доз азотных удобрений при подкормках озимых и яровых зерновых культур рекомендуется проведение почвенной и растительной диагностики. Предусмотрено ограничение максимально допустимых доз азотных удобрений с учетом биологических особенностей культур (табл. 13).

Таблица 13. **Максимальные дозы азотных удобрений под сельскохозяйственные культуры, возделываемые на минеральных почвах**

Культура	Органические удобрения (фон), т/га	Максимально-допустимая годовая доза азотных удобрений, кг/га д.в.
Картофель	60-70	90
Озимые зерновые	30-40	120
Яровые зерновые	-	90
Сахарная свекла	60-70	120
Кормовая свекла	75	150
Кукуруза	70	150
Многолетние злаковые травы	-	160
Капуста	70	120
Морковь	-	90
Томаты	40	120
Огурцы	120	90
Столовая свекла	40	120
Лук-репка	40	90
Зеленые овощи	40	60

Оптимизации азотного питания растений способствует применение новых медленнодействующих удобрений карбамида и сульфата аммония с добавками гуматов и других биологически активных компонентов, выпускаемых Гродненским ПО "Азот" по совместным разработкам Института почвоведения и агрохимии, Института проблем исполь-

зования природных ресурсов и экологии и Белорусского государственного технологического университета.

Применение новых форм медленнодействующих азотных удобрений позволяет повысить на 20-40 % их окупаемость прибавкой урожая при одновременном уменьшении содержания радионуклидов на 15-30 % и снижении накопления нитратов в картофеле, овощах и кормовых культурах.

Карбамид медленнодействующий с гуматсодержащими добавками рекомендуется к применению на почвах разного гранулометрического состава, но, в первую очередь, на рыхлых почвообразующих породах, под все полевые и овощные культуры, вносится под яровые культуры весной в основную заправку, под озимые и многолетние травы – весной в первую подкормку, под остальные сельскохозяйственные культуры – в виде основного внесения в почву.

Сульфат аммония медленнодействующий рекомендуется под картофель, крестоцветные, однолетние и многолетние травы. Вносится в основную заправку почвы, под многолетние травы – под каждый укос трав.

Комплексное азотно-фосфорно-калийное удобрение марки N:P:K = 5:16:35 с «Гидрогуматом» рекомендуется вносить под озимые зерновые культуры с осени. Весной проводится подкормка только азотными удобрениями.

Комплексное азотно-фосфорно-калийное удобрение марки N:P:K= 16:12:20 с «Феномеланом» рекомендуется для основного внесения в почву под яровые зерновые культуры, картофель, овощные и другие культуры.

К наиболее значимым приемам повышения плодородия почв загрязненных сельскохозяйственных угодий и снижения накопления радионуклидов в продукции относится также применение органических удобрений. Известно, что систематическое применение органических удобрений повышает содержание гумуса, улучшает водно-физические свойства, усиливает микробиологическую активность почв. При внесении органических удобрений повышается эффективность использования минеральных удобрений, возрастает устойчивость сельскохозяйственных культур к неблагоприятным факторам. Все это в комплексе снижает накопление радионуклидов в продукции, повышает урожайность сельскохозяйственных культур и рентабельность производства. Рекомендуемые дозы при возделывании сельскохозяйственных культур в зоне радиоактивного загрязнения приведены в табл.15.

Рекомендуется до 60% заготовленных органических удобрений вносить в весенний период под культуры позднего сева: кукурузу, картофель (частично), однолетние травы, идущие в качестве предшественника под озимые зерновые культуры. До 18% органических удоб-

рений следует внести летом при перезалужении и коренном улучшении сенокосов и пастбищ, а также под озимые, идущие по зерновым предшественникам. Остальную часть органических удобрений необходимо внести с осени под культуры раннего сева: сахарную свеклу, корнеплоды, картофель.

Исследованиями установлено, что с повышением содержания гумуса в почве с 1 до 3% накопление радионуклидов в растениях снижается в 1,5-3,5 раза. Поэтому при ведении сельскохозяйственного производства в условиях радиоактивного загрязнения с целью оптимизации содержания почвенного гумуса и повышения обеспеченности элементами питания растений необходимо задействовать все источники поступления органического вещества в почву – навоз, компосты, торф, солому, зеленые удобрения. В структуре посевных площадей доля бобовых культур и бобово-злаковых травосмесей должна быть в 2 раза выше, чем пропашных культур.

Микроэлементы выполняют важнейшие функции в процессах жизнедеятельности растений и являются необходимым звеном системы удобрения сельскохозяйственных культур. Недостаточное содержание их подвижных форм в почве зачастую является фактором, лимитирующим формирование урожая сельскохозяйственных культур и качества продукции. Прибавка урожая от применения марганцевых, борных и цинковых удобрений достигает 10–15 %, улучшается качество продукции, ее хранение, товарный вид.

Микроудобрения применяются в виде некорневых подкормок. Технологически их внесение совмещается с применением средств защиты растений, регуляторов роста, подкормками азотом. Вносятся опрыскивателями ОТМ-2-3, ОП-2000, S-320 и др.

Микроудобрения необходимо вносить на почвах с pH более 6,0 первой и второй групп обеспеченности микроэлементами. На почвах третьей группы обеспеченности некорневые подкормки проводятся при интенсивных технологиях возделывания культур, ориентированных на получение высокой урожайности и качественной продукции.

Рекомендуемые дозы и сроки некорневых подкормок сельскохозяйственных культур микроэлементами приведены в табл. 14.

Внесение извести является эффективным приемом снижения поступления Cs-137 и Sr-90 из почвы в растения. Минимальное накопление радионуклидов в растениеводческой продукции при прочих равных условиях возделывания сельскохозяйственных культур отмечается при оптимальной реакции почвенной среды. Оптимизация степени кислотности почв на фоне применения минеральных удобрений позволяет повысить урожайность и сократить поступление радионуклидов в основные сельскохозяйственные культуры на 60-80 %.

Таблица 14. **Дозы и сроки некорневых подкормок сельскохозяйственных культур микроэлементами**

Культуры	Микроэлементы	Доза, г/га д.в.	Сроки применения
Озимые и яровые зерновые Многолетние злаковые травы	Марганец	50	Начало выхода в трубку
Зернобобовые	Бор	30-50	Бутонизация
Кормовая свекла		50-100	Смыкание листьев в рядках и междурядьях
Озимый и яровой рапс	Бор Марганец	75-100 50-75	Бутонизация
Кукуруза	Цинк Марганец	50-75 50	6-8 листьев
Семенники многолетних бобовых трав	Бор	50	Бутонизация

Для достижения оптимального уровня кислотности почвы разработаны уточненные дозы извести, дифференцированные по плотности радиоактивного загрязнения и гранулометрическому составу почв (табл.15).

Таблица 15. **Дозы известковых удобрений на загрязненных радионуклидами землях**

Почва	pH_{KCl}	Доза $CaCO_3$ на незагрязненных землях, т/га	Доза $CaCO_3$ на загрязненных землях (т/га) в зависимости от плотности загрязнения почвы, Ки/км^2	
			^{137}Cs 1-5, ^{90}Sr 0,15-0,30	^{90}Cs>5, ^{90}Sr > 0,3
Пашня				
Дерново-подзолистые:				
Суглинистые	<4,5	8,5	8,5	15,0
	4,6-5,0	7,5	7,5	13,0
	5,1-5,5	6,5	6,5	11,0
	5,6-6,0	4,5	4,5	7,0
Супесчаные	<4,5	6,5	6,5	11,5
	4,6-5,0	5,5	5,5	9,5
	5,1-5,5	4,5	4,5	7,0
	5,6-6,0	-	3,0	4,0
Песчаные	<4,5	5,5	5,5	8,5
	4,6-5,0	4,5	4,5	6,5
	5,1-5,5	3,5	3,5	4,5
Торфяно-болотные	<4,0	12,0	19,0	19,0
	4,1-4,5	7,0	11,0	11,0
	4,6-5,0	4,0	6,0	6,0
Улучшенные сенокосы и пастбища				

Суглинистые	<4,5	9,0	9,0	15,5
	4,6-5,0	8,0	8,0	13,5
	5,1-5,5	6,5	6,5	11,5
	5,6-6,0	4,5	4,5	7,5
Супесчаные	<4,5	7,0	7,0	11,5
	4,6-5,0	6,0	6,0	10,0
	5,1-5,5	4,5	4,5	7,5
	5,6-6,0	_	3,5	5,0
Песчаные	<4,5	6,0	6,0	9,0
	4,6-5,0	5,0	5,0	7,0
	5,1-5,5	4,0	4,0	5,0
Торфяно- болотные	<4,0	12,0	19,0	19,0
	4,1-4,5	7,0	11,0	11,0
	4,6-5,0	4,0	6,5	6,5

При плотности загрязнения 37-185 кБк/м^2 (1-5 Ки/км^2) по Cs-137 и 5,55-11,1 кБк/м^2 (0,15-0,3 Ки/км^2) по Sr-90 дозы известковых мелиорантов увеличиваются только на торфяных почвах и дополнительно известкуются рыхлосупесчаные почвы с pH_{KCl} 5,51-5,75, связносупесчаные — с pH_{KCl} 5,51-6,00.

При плотности загрязнения 185-1480 кБк/м^2 (5-40 Ки/км^2) по Cs-137 или 11,1-111 кБк/м^2 (0,3-3,0 Ки/км^2) по Sr-90 дозы известковых удобрений повышаются из расчета доведения реакции почвенной среды до оптимального уровня за один прием.

В случае, когда разовая доза превышает 8 т/га, известь вносится в два приема: 0,5 дозы под вспашку и 0,5 дозы под культивацию. На сенокосах и пастбищах известь вносится под предпосевную культивацию при перезалужении или коренном улучшении.

Первоочередному известкованию подлежат почвы I-й группы кислотности в связи с высоким переходом радионуклидов из почвы в растения.

Работы по известкованию супесчаных почв с pH 5,51–6,0 и торфяно-болотных с pH 5,0 и ниже при плотности загрязнения земель по Cs-137 – 37–185 кБк/м^2 (1–5 Ки/км^2) или 7,4 – 11,1 кБк/м2 (0,2-0,3 Ки/км^2) по Sr-90, а также на всех кислых почвах с плотностью загрязнения 185-1480 кБк/м^2 (5–40 Ки/км^2) по Cs-137 или 11,1–111 кБк/м^2 (0,3-3,0 Ки/км^2) по Sr-90 финансируются за счет бюджетных средств, направляемых на преодоление последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС.

8.2.7. Особенности применения средств защиты в условиях радиоактивного загрязнения

Мероприятия по защите растений от вредителей, болезней и сорняков на угодьях с уровнями радиоактивного загрязнения строятся на

основе ассортимента средств защиты и регламентов их применения, приведенных в "Каталоге пестицидов, разрешенных для применения в Республике Беларусь на 2000-2010 г.г." Республиканской государственной станцией защиты растений.

При формировании ассортимента рекомендованных для применения средств защиты учтены санитарно-гигиенические и экологические характеристики препаратов (острая токсичность, кумулятивные свойства, персистентность в объектах окружающей среды).

Рекомендуемые схемы защиты основных сельскохозяйственных культур для условий радиоактивного загрязнения и удельные затраты в условных единицах при выполнении отдельных технологических приемов для их экономической оценки и систем защиты сельскохозяйственных культур в целом приведены в прилож. 7.

Жесткие требования предъявляются к соблюдению норм расхода, срокам и кратности применения гербицидов (особенно почвенного действия). Это связано с изменением скорости разложения гербицидов в почвах с нейтральной реакцией и значительным насыщением поглощающего комплекса калием и фосфором после проведения защитных агрохимических мероприятий. Например, в почвах с показателем pH_{KCl} выше 6,0 наблюдается снижение скорости разложения зенкора, гербицидов симтриазиновой группы, что может (особенно при завышенных нормах расхода) привести к повреждениям защищаемых культур, а также вызвать эффект фитотоксического воздействия на последующие культуры в севообороте. В итоге, наряду со снижением урожая, повышается уровень его радиоактивного загрязнения.

Целесообразно совмещение технологических операций по защите растений с целью сокращения времени пребывания работников в условиях повышенного радиационного фона и стоимости работ. При совпадении сроков обработок возможно применение баковых смесей гербицидов с инсектицидами на зерновых, инсектицидов с фунгицидами на зерновых и картофеле с учетом физико-химической совместимости препаратов.

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

Несмотря на принимаемые в республике меры (агротехнические, агрохимические и пр.), направленные на уменьшение поступления и накопления радионуклидов сельскохозяйственными растениями, содержание радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в сельскохозяйственной продукции значительно превышает доаврийный уровень, хотя и не превышает нормативных значений (РДУ-99). Дальнейшее снижение содержания радионуклидов цезия и стронция в сельскохозяйст-

венной продукции и продуктах питания может быть достигнуто путем использования следующих технологических приемов:

- промывка и первичная очистка убранной плодоовощной и технической продукции;
- переработка полученной продукции.

Снижение содержания радионуклидов в растениеводческой продукции достигается при использовании таких простых методов, как промывка в проточной воде, очистка от кожуры, удаление кроющих листьев у капусты, отмачивание в воде (табл. 16). Концентрация радионуклидов в продукции уменьшается также при консервировании, засолке, варке, но надо помнить, что радионуклиды переходят в маринад или воду при варке.

Например, огурцы и помидоры достаточно перед использованием промыть. Капусту следует употреблять без верхних 3-4 листьев и кочерыжки. Удаление кроющих листьев снижает загрязнение до 40 раз.

У свеклы, моркови, брюквы, репы, редьки и других корнеплодов обязательно нужно удалять ботву вместе с венчиком на 10-15 мм. Это позволит снизить уровень загрязнения в 15-20 раз. Лук, салат, петрушку, редис и другие овощи тщательно отмывают от частиц почвы. Картофель и корнеплоды необходимо промывать два раза - перед тем как снимать кожуру и после.

При варке картофеля, свеклы, моркови, фасоли нужно сливать отвар после 10-15 минутного кипячения, что позволит удалить из этих овощей от 50 до 90% цезия-137.

Яблоки, груши, сливы, вишни и другие плоды необходимо промывать проточной водой, особенно тщательно возле плодоножек и цветоложа. Ягоды нужно употреблять в пищу после их тщательной промывки в проточной воде.

Таблица 16. **Эффективность некоторых приемов обработки урожая, загрязненного радиоактивными веществами**

Исходная продукция	Способ обработки (готовый продукт)	КО (коэффициент очистки)
Зерно (пшеница, рожь, ячмень, гречиха, пшено и др.)	Отвеивание Отмывание проточной водой Переработка в хлеб, крупы Переработка в спирт	1,5–2,0 1,5–3,0 1,2–2,5 100
Зерно (рис, гречиха, ячмень, овес)	Обрушение, удаление пленок	10—20

Картофель (клубни)	Очистка Варка Переработка в крахмал Переработка в спирт	3–5 2–3 50 100
Соя, рапс, подсолнечник, кукуруза	Переработка на растительное масло	500 (промышленный способ) и 50 (в домашних условиях)
Овощи	Отмывание проточной водой Удаление кроющих листьев (качан), засолка, маринование	3–10 2–5
Сахарная свекла	Переработка на сахар	70–90
Ягоды, фрукты	Переработка на сок Переработка на вино Переработка на варенье	до 100 до 500 100–500

Максимальная очистка от радионуклидов готовой продукции достигается при более 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 сырьё.

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.

8.2.9. 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.

В зависимости от гранулометрического состава и степени увлажнения поступление радионуклидов в растения лугов может изменяться на порядок. Повышение плодородия почв приводит к снижению накопления в травах Cs-137 до 3-4, а Sr-90 – 2-3 раз. Для супесчаных и суглинистых почв оптимальными являются следующие агрохимические показатели: pH 5,8-6,2, содержание подвижных фосфора 120-200, калия — 150-200 мг/кг почвы, содержание гумуса 3-4 %; для торфяных почв pH 5,0-5,3, содержание фосфора и калия не ниже 600–700 мг/кг почвы.

Для закладки культурных пастбищ наиболее пригодны почвы со сравнительно устойчивым увлажнением автоморфные и временно избыточно увлажняемые почвы суглинистого и супесчаного гранулометрического состава, краткопоемные луга, осушенные минеральные и торфяно-болотные почвы. Непригодны заболоченные минеральные и торфяные почвы с неотрегулированным водным режимом

Важная роль в формировании продуктивности сенокосов и пастбищ принадлежит внесению минеральных удобрений.

Для достижения продуктивности 30 ц кормовых единиц с каждого гектара сенокосов, расположенных на минеральных почвах, дозы азотных удобрений должны составлять не менее 120-150 кг/га д.в.; на неминерализованных торфяно-болотных почвах доза азота снижается до 50-60 кг/га д.в. На травостоях, состав которых на 30-40 % представлен бобовым компонентом, дозы азотных удобрений не превышают 30-40 кг/га. При пастбищном использовании азотные удобрения вносят под каждое стравливание по 40 кг/га д.в. или через одно стравливание — по 60-80 кг. При этом следует учитывать, что в первой половине лета отрастание трав идет более интенсивно и эффект более высоких доз азота выражен сильнее.

Уменьшить потребность в азотных удобрениях позволяет посев бобово-злаковых травосмесей. Включение около 40 % клеверного компонента в состав травосмесей равносильно воздействию 90 кг/га азота. Однако сроки использования бобово-злаковых травостоев ограничиваются 2-3 годами.

Дозы фосфорных и калийных удобрений устанавливаются с учетом планируемой продуктивности и обеспеченности почв их подвижными

формами. Подход к определению доз следующий: при низком содержании подвижных форм фосфора и калия в почвах (I и II группы) дозы должны на 20-30 % превышать вынос с урожаем. При содержании их на уровне III-й и IV-й групп обеспеченности внесение фосфорных и калийных удобрений должно примерно равняться выносу, при высоком содержании – составлять 60-70 % выноса. Особое внимание необходимо уделять внесению калийных удобрений на лугах с торфяно-болотными и легкими минеральными почвами, где запасы почвенного калия значительно ниже. Фосфорные удобрения вносятся весной, азотные и калийные – под каждый укос или стравливание в дозе не более 90 кг/га.

Основой рационального использования пастбищных угодий является загонная система пастьбы животных. При такой организации вся площадь выпаса делится на участки, которые стравливаются поочередно. Когда заканчивается полный цикл стравливания, пастьбу начинают повторно с загона, который был стравлен первым. Установлено, что при такой системе примерно на четверть повышается эффективность использования травостоя и создаются более благоприятные условия для повторного отрастания трав. Длительность использования каждого загона не должна превышать 4-5 дней. Максимальный суточный сбор корма крупным рогатым скотом отмечается при травостоях высотой 20-40 см и урожаях 75-150 ц/га зеленой массы. При меньшей урожайности наблюдается более высокий уровень загрязнения трав радионуклидами. Важным моментом является правильное определение начала весеннего стравливания. Высота трав к этому моменту должна достигать 12-15 см.

Для обеспечения высокого качества травяных кормов с меньшим содержанием радионуклидов следует проводить уборку злаковых травосмесей в фазу конца колошения–начала цветения преобладающих видов. Наиболее благоприятная фаза уборки бобовых наступает в фазу конца бутонизации - начала цветения. При таком сроке уборки отмечен наиболее высокий сбор сухого вещества. При более ранних сроках скашивания в травах содержится больше протеина, но вместе с тем наблюдается и более высокое содержание радиоактивных элементов. Запаздывание со сроками уборки приводит к снижению выхода сухого вещества и переваримого протеина, увеличению содержания клетчатки и ухудшению переваримости кормов.

Гидротехническая мелиорация является радикальным способом снижения поступления радионуклидов в растениеводческую продукцию на переувлажненных землях. За счет осушения и проведения культуртехнических мероприятий можно снизить загрязненность продукции в 5-10 раз.

Осушенные земли отличаются от нормально увлажненных тем, что на них поступление радионуклидов в растительную продукцию сильно

зависит от положения уровня грунтовых вод (УГВ). Для большинства торфяных, торфяно- и торфянисто-глеевых почв минимальное поглощение растениями Cs-137 и Sr-90 достигается при положении уровня грунтовых вод на глубине – 90-120 см от поверхности почвы. Подъем УГВ на глубину 40-50 см от поверхности почвы приводит к увеличению поступления радионуклидов в растения в 5-20 раз, а его снижение до 150-200 см – в 1,5-2,0 раза.

На связных минеральных почвах необходимо периодически (через 4-5 лет) производить глубокое, безотвальное рыхление подпахотного слоя почвы и мероприятия по организации поверхностного стока в режимах, исключающих эрозию почвы. Это стимулирует поглощение влаги корнями из подпахотного слоя почвы и снижает поступление радионуклидов в растения на 30-50 %.

В зоне радиоактивного загрязнения должно осуществляться тщательное регулирование водного режима. Проводящая и регулирующая сеть, а также сооружения на ней, должны содержаться в работоспособном состоянии. Открытая мелиоративная сеть должна периодически окашиваться и подчищаться. Также должны своевременно производиться промывка и ремонт закрытого дренажа. Перед очисткой каналов определяется содержание радионуклидов в донных отложениях и на прилегающей к ним местности. Если содержание радионуклидов в илистых отложениях незначительно превышает их содержание в почве на прилегающей местности, тогда очистка сети и разравнивание вынутого грунта осуществляется по обычной технологии. При плотности загрязнения территории Cs-137 более 185 кБк/м^2 и превышении уровня загрязнения донных отложений над загрязнением почвы окружающей местности более, чем на порядок, требуется захоронение вынутого грунта на глубину 0,7-0,8 м вблизи бровок канала.

Большинство осушительно-увлажнительных систем на территории с плотностью загрязнения Cs-137 более 185 кБк/м^2 требует частичного переустройства. В первую очередь должна быть проведена замена затворов ковшового и коробчатого типов на более совершенные, если не обеспечивается регулирование УГВ. Существующая регулирующая сеть также должна быть углублена, если не обеспечивается требуемая норма осушения.

Поскольку кратковременные заполнения поверхности почвы водой в значительной степени увеличивают поступление радионуклидов в растения, на осушенных пойменных землях целесообразно устройство летних самотечных польдеров при соответствующем культуртехническом их обустройстве, засыпке вымоин и понижений.

Радиоактивному загрязнению подверглись поймы рек Припять, Горынь, Уборть, Лань, Днепр, Сож, Друть, Ипуть и др. В республике радиоцезием загрязнено около 250 тыс. га пойменных земель. Среди пойменных почв, подвергшихся загрязнению Cs-137, 69 % развивают-

ся на рыхлом аллювии, 24 % – на связном и 7 % составляют торфяно-болотные пойменные почвы. Наиболее загрязненными являются поймы р. Припять: до 555 кБк/м^2 — 14,5 тыс. га более 555 кБк/м – 31,3 тыс. га; р.Сож соответственно 1,1 и 10,1 тыс. га, р. Ипуть – 1,7 и 7,6 тыс. га.

Переход радионуклидов из почвы в травы пойменного луга заметно выше, чем на водоразделах, что обусловлено генетическими особенностями почв и повышенным увлажнением. Размеры перехода радионуклидов определяются степенью увлажнения почв и их гранулометрическим составом. При переходе от дерновых временно избыточно увлажняемых почв к дерново-глеевым поступление радионуклидов в растения возрастает более чем в 2 раза на связных почвах и более чем в 10 раз на рыхлых. На аллювиальных торфяных почвах отмечен наиболее интенсивный переход радионуклидов в растения.

Установлено, что в засушливые годы величина загрязнения трав ниже, чем во влажные. Причем более четко эти различия проявляются на почвах легкого гранулометрического состава. Например, на суглинистых аллювиальных дерново-глееватых почвах в периоды со значениями гидротермическою коэффициента (ГТК) 1,91 удельная активность трав при плотности загрязнения почв Cs-137 370 кБк/м^2 составила 220 Бк/кг, а при величине ГТК 1,47–101 Бк/кг, т.е. снижалась более чем в два раза. На супесчаном аллювии при таких же величинах ГТК различия в содержании Cs-137 в травах более заметно – соответственно 1326 и 363 Бк/кг.

Длительность затопления пойменных лугов паводковыми водами также отражается на накоплении Cs-137 в травах. При уменьшении количества дней затопления в годы с длительными паводками (40-80 дней) удельная активность трав на супесчаном аллювии существенно снижается – до 4 раз. При сроке затопления до 20 дней и менее влияние этого фактора выражено незначительно.

Переход радионуклидов из почвы в травы пойменного луга в большой степени определяется обеспеченностью элементами питания и их соотношением. Для снижения накопления Cs-137 в травах пойменных лугов рекомендуется внесение сбалансированного минерального удобрения при соотношении азота, фосфора и калия 2-3:1:2-3. При несбалансированном внесении азотные удобрения могут являться причиной увеличения содержания Cs-137 в травах. Дозы фосфорных удобрений рекомендуется ограничить 60 кг/га д. в, так как дальнейшее их увеличение не оказывает существенного положительного влияния ни на продуктивность, ни на снижение уровня загрязнения трав. Увеличение дозы калийных удобрений от 120 до 180 кг/га действующего вещества приводит к уменьшению уровня загрязнения трав радиоцезием на почвах с низкой обеспеченностью калием примерно в 2 раза. Дозы калийных удобрений более 180 кг/га не рекомендуются, так как даже при

дробном внесении приводят к излишнему накоплению калия в растениях и нарушению оптимального соотношения двух- и одновалентных катионов в кормах, что ухудшает их усвоение животными. Оптимальной дозой, отвечающей экологическим и экономическим требованиям, является доза N180P60K180, которая обеспечивает снижение накопления Cs-137 в травах в 4-6 раз, продуктивность луга на уровне 70-80 ц/га сена. На торфяно-болотных почвах предусматривается снижение доз азота до 50-70 кг/га д.в. и повышение доз калия – до 240 кг/га. При этом соотношение NPK должно быть в пределах 1-1,5:1:3-4.

На пойменных лугах, где не проводится коренное улучшение, хорошие результаты дает поверхностное известкование. Рекомендуется на кислых почвах пойм внесение доломитовой муки в дозах 2-3 тонны с периодичностью 3 года.

В поймах рек, где торфяные почвы занимают значительные площади и являются преобладающей почвенной разновидностью (особенно это касается обвалованных участков), эффективным приемом является создание сеяных лугов. При подборе травосмесей следует учитывать длительность затопления пойм, интенсивность накопления радионуклидов разными видами трав и способность их к образованию очеса. Например, при отчуждении на высоте 6 см у мятлика лугового (низовой злак) в приземном слое сохраняется более 50 % массы урожая, у овсяницы луговой (промежуточный злак) – около 40 %, а у тимофеевки луговой (верховой злак) – 29 % массы. На загрязненных радионуклидами пойменных лугах предпочтение следует отдавать верховым злакам, таким как тимофеевка луговая, кострец безостый, райграс высокий, двукисточник тростниковидный и промежуточным — овсяница луговая, ежа сборная.

С учетом биологических особенностей трав, по-разному реагирующих на длительность затопления, на торфяных почвах при возможном их затоплении до 15-20 суток рекомендуется использовать тимофеевку луговую, овсяницу тростниковидную, кострец безостый, а при более длительном затоплении (до 30–40 суток) овсяницу тростниковидную лучше не использовать. Если же длительность затопления превышает 40 суток, рекомендуется посев двукисточника тростниковидного. Предпочтительно пойменные луга использовать в качестве сенокосов. Пастбищное использование пойменных лугов на почвах с избыточным увлажнением следует исключать.

8.3. Мероприятия по уменьшению содержания радионуклидов в продуктах животноводства

Основной задачей ведения животноводства в зонах радиоактивного загрязнения является получение продукции, соответствующей требованиям республиканских допустимых уровней. Проведение защитных

агромелиоративных и зоотехнических мероприятий позволяет значительно снизить производство молока и мяса с превышением допустимых уровней по содержанию Cs-137 и Sr-90. В системе этих мероприятий выделяют 4 группы приемов:

1) производство кормов с допустимым содержанием радионуклидов;

2) двухстадийный откорм животных перед отправкой на мясокомбинат;

3) раздельный выпас скота для производства цельного молока и молока - сырья для переработки на масло;

4) применение специальных кормовых добавок;

5) технологическая и кулинарная переработка продуктов животноводства;

6) перепрофилирование отраслей животноводства.

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 предельнодопустимые уровни (ПДУ) радиоактивного загрязнения различных кормов.

ПДС радионуклидов в рационе определяется из соотношения:

$$ПДС = \frac{РДУ \cdot 100}{Кп},$$

где РДУ – Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде; $К_п$ – 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:

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

где $A_{ПРОД.}$ – активность продукта; $A_{РАЦ.}$ – активность суточного рациона.

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%.

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. 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.

В кристаллической решетке ферроцианидов есть катион аммония (NH^{+}_{4}), который вступает в ионно-обменные реакции с ионами щелочных элементов, в результате которых они необменно поглощаются ферроцианидами с образованием комплексных соединений. По прочности связи с ферроцианидами установлен убывающий ряд: цезий> рубидий>калий> натрий. Цезий связывается ферроцианидом в 1000 раз больше, чем калий. Прочность связи определяется ионным радиусом элемента. Поэтому введение ферроцидов не уменьшает содержание в организме натрия и калия и не нарушает натриво-калевый обмен. 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.

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.

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.

Снизить концентрацию радиоактивных веществ в мясе можно также и при помощи варки, но с обязательным удалением отвара (бульона) после 8–10 минутного кипячения. При такой варке из мяса, а также из печени и легких, в бульон переходит примерно 50% цезия-137, а из костей до 1 %. Это необходимо учитывать при приготовлении первых блюд на мясокостном бульоне.

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.

Радионуклиды цезия и стронция не связаны с жировой фракцией молока. Поэтому наименее загрязненным продуктом при переработке молока является масло, далее следуют сливки, творог и сыр клинковый. Наибольшая концентрация цезия-137 и стронция-90 приходится на сыворотку.

В случае, когда концентрация радионуклидов в молоке не позволяет использовать его в свежем виде для пищевых целей, такое молоко следует перерабатывать на молочные продукты и в первую очередь – на масло.

В процессе сепарирования молока в обрат переходит от 92 до 98% стронция-90; 84-96% йода-131 и 86-99% цезия-137; в сливки – 2-8%; 4-16% и 1-15% соответственно. При переработке сливок в сливочное масло основная часть указанных радионуклидов переходит в пахту и промывные воды. В масле остается менее 1,5% стронция-90; до 3,5% йода-131 и 0,3-2,2% цезия-137. Молочный жир (топленое масло) радионуклидов стронция и цезия практически не содержит.

Таким образом, замена в пищевом рационе молока, содержащего повышенные концентрации радионуклидов, полученными из него продуктами, позволяет более чем в 10 раз снизить вклад 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.

В хозяйствах, расположенных на почвах с плотностью загрязнения Cs-137 15–40 Ки/км^2, 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.

8.4. Радиационный контроль природной среды и сельскохозяйственной продукции

Радиационный контроль на территории Республики Беларусь осуществляется в целях ограничения и минимизации последствий облучения населения республики от загрязнения окружающей среды радиоактивными веществами в результате аварии на Чернобыльской АЭС и выбросов АЭС сопредельных государств. Под **радиационным контролем** понимается комплекс административных, организационно-технических, санитарно-гигиенических мероприятий и правовых мер, направленных на снижение воздействия на население и другие категории облучаемых лиц радиационного фактора. Министерства и ведомства разрабатывают свои положения о радиоактивном контроле, которые пересматриваются не реже одного раза в пять лет с учетом изменений радиационной обстановки в республике. Заключение об уровнях загрязнения радионуклидами продукции, материалов, почв, воды, леса имеют право давать уполномоченные на то организации или их подразделения, которые занимаются радиоэкологическим мониторингом. Координацию работ по контролю за радиоактивным загрязнением природной среды осуществляет Государственный комитет Республики Беларусь по проблемам последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС. Общая оценка радиационной обстановки на территории республики (радиационный мониторинг), методическое руководство возлагается на Белорусское республиканское управление по гидрометеорологии. Ответственность за радиационный контроль в зависимости от объектов радиационного контроля возлагается на соответствующие министерства и ведомства.

Основной задачей радиационного контроля является получение объективных данных по радиационной обстановке. Задача решается путем наблюдения и оценки уровня радиоактивного загрязнения компонентов природы и биологических объектов с целью предупреждения возможных последствий для здоровья человека, а также путем выявления закономерностей пространственно-временной миграции радионуклидов в биологических звеньях и составления прогноза возможных уровней радиоактивного загрязнения.

Контроль за дозами облучения человека (внешними и внутренними) является неотъемлемой частью системы радиационного контроля.

Измеряемыми параметрами объектов радиационного контроля являются следующие:

1) мощность экспозиционной дозы и плотность потока частиц - для внешнего облучения;

2) концентрация радионуклидов в объектах контроля (вода, воздух, почва, продукты питания, организм человека и др.) – для внутреннего облучения.

Оценка в радиационной обстановки производится путем сравнения результатов измерений и расчетов с системой республиканских нормативов:

1) республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия и стронция в пищевых продуктах и питьевой воде; республиканские допустимые уровни содержания Cs-137 и Sr-90 в сельскохозяйственном сырье и кормах; нормативы на содержание Cs-137 в продукции лесного хозяйства; временные допустимые уровни содержания радионуклидов цезия в лекарственно-техническом сырье и другие. Прогноз возможного изменения радиационной обстановки осуществляется на основании первичных данных радиационного мониторинга, тенденций и закономерностей миграции радионуклидов, результатов лабораторных и естественных экспериментов.

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 " О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС."

2. Зона *Б* – территория вероятного радиационного воздействия выбросов АЭС сопредельных государств (30-ти километровые зоны вокруг Игналинской, Смоленской и Чернобыльской АЭС).

3. Зона *В* – остальная территория республики.

В зоне *А* все населенные пункты, хозяйства и предприятия, производящие сырье и продукцию, подразделяются на две группы. В первую группу входят населенные пункты и хозяйства, в которых за по-

следние 2 года не было зарегистрировано превышение допустимых уровней (РДУ) загрязнения радионуклидами заготавливаемой, перерабатываемой и реализуемой продукции. Ко второй группе относятся населенные пункты и хозяйства, в которых отмечаются факты превышения РДУ производимой продукции за последние 2 года.

Частота и объем радиационного контроля определяется ведомственной схемой радиационного контроля, согласованной с Минздравом и Госкомчернобылем (группа *а* 1) и с соответствующими министерствами и ведомствами (группа *а* 2). На всей территории зоны *А* организуется сеть постоянных пунктов радиационного мониторинга объектов окружающей среды по специальным программам. Радиационный контроль осуществляется в три этапа:

1) при производстве продукции;

2) при переработке продукции;

3) при реализации продукции.

На основании данных радиационного контроля и результатов измерения радионуклидов в организме человека осуществляется оценка и прогноз доз облучения для жителей населенных пунктов группы 1 один раз в три года, для группы 2 – ежегодно.

Радиационный контроль в зоне *Б* осуществляется в определенных пунктах контроля, где измеряется мощность экспозиционной дозы и определяется концентрация радионуклидов в воздухе, воде, и атмосферных выпадениях.

В зоне *В* радиационный мониторинг осуществляется в постоянных пунктах наблюдения. Наблюдение за радиоактивным загрязнением воздуха проводится с 1963 г. На 55 станциях измеряется мощность экспозиционной дозы гамма-излучения 1 - 6 раз в сутки. Измерение гамма-излучающих радионуклидов и суммарной бета-активности атмосферных выпадений проводится в 25 метеостанциях, аэрозолей – в 6 метеостанциях (Могилев, Минск, Брест, Гомель, Мозырь, Пинск).

С 1992 осуществляется радиоэкологический мониторинг почвы на реперной сети, который включает 18 полигонов и 181 реперную площадку. Проводится изучение и прогноз вертикальной и горизонтальной миграции радионуклидов Cs-137, Sr-90, изотопов плутония, америция. Миграцию радионуклидов при плотности загрязнения почвы Cs-137 более 1 Ku/км^2 определяют ежегодно, Sr-90, ^{241}Am и изотопов Pu - 1 раз в два года. Если плотность загрязнения почвы менее 1Ки/км^2, то миграцию ^{137}Cs определяют 1 раз в два года, другие радионуклиды 1 раз в три года.

Контроль за радиоактивным загрязнением поверхностных вод и данных отложений ведется на 5 основных реках — Днепр, Сож, Ипуть, Беседь, Припять. С 1986 проводится ежемесячный радиационный контроль по определению суммарной бета-активности, Cs-137 и Sr-90.

Система радиационного контроля в Республике Беларусь представляет собой трехуровневую структуру, состоящую из:

- государственного контроля и надзора;
- ведомственного контроля;
- общественного контроля.

Государственный контроль и надзор осуществляют:

1. Госкомчернобыль (контроль за соблюдением правового режима на территориях радиоактивного загрязнения; общий контроль и координация деятельности министерств и ведомств по осуществлению радиационного контроля; организация подготовки кадров, обеспечивающих деятельность системы радиационного контроля).

2. Санитарно-эпидемиологическая служба Минздрава (государственный надзор за соблюдением всеми структурами Норм радиационной безопасности; Основных санитарных правил работы с радиоактивными веществами и другими источниками радиоактивных излучений; нормативных документов, регламентирующих радиационную безопасность; а так же индивидуальный дозиметрический контроль внешнего облучения критических групп населения и контроль радиоактивного загрязнения сельхозпродукции и продуктов питания, производимых в личных подсобных хозяйствах).

3. Белстандарт (государственный надзор за изменениями радиоактивного загрязнения природной среды, всех видов сырья и продукции, включающий проверку соблюдения метрологических правил и норм, состояния и правильности применения средств и методик выполнения измерения, метрологическую аттестацию методик измерений радионуклидного загрязнения объектов контроля, аккредитацию подразделений контроля и ведение их реестра).

4. Минздрав (оценка и прогноз доз облучения населения для всех зон контроля).

5. Главгидромет (методическое обеспечение и руководство работами по оценке радиационной обстановки; общая оценка радиационной обстановки (радиационный мониторинг) на территории республики).

Ведомственный контроль (Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Министерство жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь, Белкоопсоюз, другие министерства и ведомства, осуществляющие заготовку, переработку и реализацию продукции) осуществляют:

1. Минсельхозпрод (радиационный контроль каждой партии сельскохозяйственного сырья и готовой продукции общественного сектора, фермерских хозяйств в группе 2 зоны *А* и выборочный контроль в группе 1; контроль сырья и продукции общественного сектора зоны *В* - выборочно – один раз в год; контроль продукции, реализуемой на рынках, радиоактивное загрязнение почвы сельскохозяйственных угодий колхозов, совхозов и фермерских хозяйств, торфа, применяе-

мого в качестве удобрений).

2. Белкоопсоюз (контроль продукции, поступающей на заготовительные пункты из зоны *А* группы 2; выборочный контроль продукции, заготавливаемой в других зонах и выдача сертификатов качества на партии готовой продукции).

3. Минлесхоз (контроль лесного фонда, направляемого в разработку в зоне *А*; выдача сертификатов на партии готовой продукции и сырья, заготавливаемых в зоне *А*; контроль даров леса в зоне *А*; контроль на рабочих местах в зоне *А*; оповещение населения о радиационной обстановке в лесах и возможности использования лесной продукции и оформление информации с ней в лесных массивах).

4. Минжилкомхоз (контроль питьевой воды, контроль радиоактивных отходов и отходов дезактивации перед захоронением, контроль объектов жилищно-коммунального хозяйства и их территорий, сточных вод и их осадков на очистных сооружениях, твердых бытовых и зольных отходов).

Общественный контроль (общественные и независимые организации) в дополнение к государственному и ведомственному радиационному контролю в порядке, определенном Госкомчернобылем, может в интересах населения осуществлять независимой контроль продукции и объектов окружающей среды.

На предприятиях организуются подразделения радиационного контроля 3-го и 4-го классов. Руководство подразделением осуществляет начальник подразделения (радиометрист), который прошел специальное обучение по радиометрии и дозиметрии. Подразделения выполняют: отбор проб, первичную обработку, подготовку к измерению; определение объемной (удельной) активности радионуклидов в пищевых продуктах, сельскохозяйственной продукции, воде, почве и объектах внешней среды; отбор проб продукции для проведения анализа по определению содержания стронция.

В республике изданы карты радиационного загрязнения территории и 29 наиболее загрязненных районов Гомельской, Могилевской и Брестской областей. Администрация хозяйств имеет карты радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий, в соответствии с которыми планируется ведение сельскохозяйственного производства. Радиационный контроль осуществляется инженером или техником по охране труда. Текущему контролю подвергаются корма, сельхозпродукция местного производства, спецодежда. Периодическому контролю подвергается территория хозяйства, сельскохозяйственная техника, наружные и внутренние поверхности зданий и сооружений, вентиляционные установки, рабочие места, бытовые помещения, места приема пищи и отдыха.

В системе Минсельхозпрода функционирует 1330 радиологических лабораторий и постов. При Минздраве работает 151 санэпидемстан-

ция, Госкомчернобыле - 267 лабораторий, расположенных в Гомельской (122), Могилевской (68), Брестской (40), Минской (17) областях и городе Минске (20).

8.5. Радиационная безопасность при проведении сельскохозяйственных работ

Министерством здравоохранения Республики Беларусь разработаны и утверждены 3 мая 1993 года «Временные санитарные правила при выполнении работ в животноводстве, растениеводстве, по эксплуатации и ремонту сельскохозяйственной техники на загрязненных радионуклидами территориях». Временные санитарные правила распространяются на все виды сельскохозяйственной деятельности и обязательны для предприятий всех форм собственности (колхозы, совхозы, фермерские хозяйства и прочие объекты сельского хозяйства), расположенных на загрязненных радионуклидами территориях зон последующего отселения и с правом на отселение, где средняя годовая эффективная доза облучения населения может составлять 1 мЗв и более. Ответственность за выполнение санитарных правил возлагается на руководителей сельскохозяйственных предприятий и объектов.

Требования по радиационному контролю. Основные мероприятия, направленные на снижение совместного действия радиации и других вредных факторов, включают информированность работающих о радиационной и производственной обстановке на рабочем месте, соблюдение необходимых санитарно-гигиенических требований, выполнение организационно-технических мероприятий по снижению уровня радиации и вредных производственных факторов на рабочих местах, обучение персонала безопасным методам работы. Организация работ должна обеспечивать непревышение основного дозового предела, установленного действующим в республике законодательством, и исключать всякое необоснованное облучение.

Администрация сельскохозяйственных предприятий и объектов должна иметь карты радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий, в соответствии с которыми планируется ведение сельскохозяйственного производства.

Радиационный контроль осуществляется инженером или техником по охране груда, прошедшим специальную подготовку. В хозяйствах текущему контролю подвергаются корма, сельхозпродукция местного производства, спецодежда (по мере загрязнения) в зависимости от вида работ. Периодическому контролю подвергается территория хозяйства, сельскохозяйственная техника, наружные и внутренние поверхности зданий и сооружений, вентиляционные установки, рабочие места, бытовые помещения, места приема пищи и отдыха. Контроль радиоактивного загрязнения производится в соответствии с действую-

щими методиками и дозиметрической аппаратурой, соответствующей по чувствительности установленным требованиям и имеющей свидетельство о государственной поверке.

При загрязнении сельскохозяйственной техники, транспорта, спецодежды радиоактивными веществами свыше 20 бета-частиц/см^2 в минуту производится их дезактивация. Допуск лиц для участия в полевых работах производится с учетом соответствующего порядка медицинских осмотров после проверки зданий и правил безопасности.

Требования радиационной безопасности в растениеводстве. Вредными радиационными факторами при выполнении работ в растениеводстве являются:

- ионизирующие излучения почвы, растений, машинотракторных агрегатов, загрязненных рабочих мест и обтирочных материалов;
- радионуклиды, содержащиеся в органической и минеральной пыли.

С целью уменьшения дозы облучения механизированные работы следует проводить с использованием техники, удовлетворяющей "Временным требованиям к обеспечению защиты кабин самоходных сельскохозяйственных машин от проникновения в них радиоактивных, химических и других вредных веществ". Места проведения сельскохозяйственных работ (поля, участки, объекты и т.п.) должны быть обследованы на радиоактивное загрязнение с указанием мест отдыха с минимальным уровнем загрязнения. При производстве работ на машинно-тракторных агрегатах не допускается использование рабочих мест вне кабины. Если на поле работает несколько агрегатов, следует избегать взаимного запыления их друг другом.

Во время перерывов в работе отдыхать следует в специально отведенных местах или передвижных пунктах. Чистая питьевая вода для работающих должна находиться в емкостях, защищенных от попадания пыли.

Требования радиационной безопасности в животноводстве. Вредными радиационными факторами при выполнении работ в животноводстве являются:

- ионизирующие излучения от загрязненных почв, кормов, животных, подстилки, навоза, машин и механизмов;
- радионуклиды, содержащиеся в органической и минеральной пыли.

Операции по уходу за животными, приготовлению и раздаче кормов должны быть максимально механизированы. В помещениях по приготовлению кормов оборудование (дробилки, измельчители, дозаторы, смесители) должно быть оснащено респирационными устройствами. По мере накопления пыли на оборудовании и площадках, но не реже одного раза в неделю, должна производиться их влажная уборка.

Во время перерывов в работе отдыхать следует в специальных за-

крытых помещениях, где должны быть созданы условия для приема пищи и находится необходимый запас питьевой воды в емкостях, защищенных от попадания пыли. Воду, используемую для технологических целей, пить запрещено.

Требования радиационной безопасности при эксплуатации техники. Вредными радиационными факторами при эксплуатации техники, выполнении работ по ее ремонту и обслуживанию являются:

- ионизирующее излучение от загрязненных машин и оборудования, рабочих мест, отработанных фильтров, масел и обтирочных материалов;
- радионуклиды, содержащиеся в органической и минеральной ныли.

Отличительной особенностью эксплуатации, ремонта и обслуживания сельскохозяйственной техники является необходимость контроля уровня ее загрязнения и снижение его дезактивационными мероприятиями до допустимых уровней. Контролю подвергаются:

- рабочие места механизаторов в кабине;
- наружные поверхности тракторов и самоходных машин в местах обслуживания;
- прицепные и навесные машины в местах обслуживания и контроля технологического процесса.

Санитарно-гигиенические мероприятия. Для лиц, выполняющих сельскохозяйственные работы в условиях радиоактивного загрязнения территории, предусмотрено приобретение спецодежды и индивидуальных средств защиты согласно Перечню средств индивидуальной зашиты для работников сельскохозяйственных предприятий, расположенных в зонах радиоактивного загрязнения, и Инструкции о порядке обеспечения средствами индивидуальной защиты работников сельскохозяйственных предприятий агропромышленного комплекса, расположенных в зонах радиоактивного загрязнения. Санитарно-бытовые помещения должны быть оборудованы согласно требованиям СНИП 2.09.04-87 «Административные и бытовые здания», «Основных санитарных правил работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП-2002».

Проход в санитарно-бытовые помещения должен быть организован через специальную систему обмыва обуви. В помещении гардеробной должна ежедневно проводиться влажная уборка. Сухая уборка помещений запрещается (кроме вакуумной). Полная уборка с мытьем стен, полов, дверей, шкафов должна проводиться регулярно, но не реже одного раза в месяц.

Руководители и специалисты должны обеспечить условия, чтобы после рабочей смены каждый работник мог тщательно вымыть голову и тело теплой водой с мылом. Не следует использовать для мытья дождевую воду. Необходимо знать, что свежие загрязнения, находящие-

ся на коже 1-2 часа, легко удаляются любым средством. При поздних сроках очистки следует использовать специальный дезактивирующий препарат «Защита».

Прием пищи в полевых условиях должен быть организован с соблюдением правил личной гигиены в передвижных закрытых пунктах питания, оборудованных столами, стульями, умывальниками и другим необходимым инвентарем.

Для перевозки людей к месту работы должны использоваться автобусы или другие транспортные средства с уплотнением дверей и окон, с исправными вентиляционными устройствами. Внутри салона должна производиться ежесменная влажная уборка.

Заключение

Об эффективности защитных мероприятий, а также о необходимости их проведения говорят следующие результаты. Проведение защитных мероприятий в Республике Беларусь таких, как выведение из использования земель, где невозможно получение продукции с нормативным содержанием радионуклидов, исключение из севооборота культур, накапливающих радионуклиды, повсеместное проведение известкования кислых почв и внесение повышенных доз фосфорных и калийных удобрений, залужение и перезалужение сенокосов и пастбищ позволило снизить поступление Cs-137 в продукцию растениеводства в 10-12 раз. За последние пять лет производство молока с превышением допустимого содержания Cs-137 в общественном секторе снизилось в 5,5 раза, в частном – в 1,7 раза, возврат скота с мясокомбинатов уменьшился почти вдвое. Однако следует учитывать, что требования республиканских нормативов по содержанию радионуклидов многократно превышают доаварийный уровень.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

РЕСПУБЛИКАНСКИЕ ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ Cs-137 И Sr-90 В ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТАХ И ПИТЬЕВОЙ ВОДЕ (РДУ-99)

Нормируемые величины для: Cs-137

№ п/п	Наименование продукта	Бк/кг, Бк/л
1.	Вода питьевая	10
2.	Молоко и цельномолочная продукция	100
3.	Молоко сгущенное и концентрированное	200
4.	Творог и творожные изделия	50
5.	Сыры сычужные и плавленые	50
6.	Масло коровье	100
7. 7.1.	Мясо и мясные продукты, в том числе : Говядина, баранина и продукты из них	 500
7.2.	Свинина, птица и продукты из них	180
8.	Картофель	80
9.	Хлеб и хлебобулочные изделия	40
10.	Мука, крупы, сахар	60
11.	Жиры растительные	40
12.	Жиры животные и маргарин	100
13.	Овощи и корнеплоды	100
14.	Фрукты	40
15.	Садовые ягоды	70
16.	Консервированные продукты из овощей, фруктов и ягод	74
17.	Дикорастущие ягоды и консервированные продукты из них	185
18.	Грибы свежие	370
19.	Грибы сушеные	2500

20.	Специализированные продукты детского питания в готовом для употребления виде	37
21.	Прочие продукты питания	370

Для: Sr-90

№ п/п	Наименование продукта	Бк/кг, Бк/л
1.	Вода питьевая	0,37
2.	Молоко и цельномолочная продукция	3,7
3.	Хлеб и хлебобулочные изделия	3,7
4.	Картофель	3,7
5.	Специализированные продукты детского питания в готовом для употребления виде	1,85

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

РЕСПУБЛИКАНСКИЕ ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ЦЕЗИЯ-137 И СТРОНЦИЯ-90 В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ СЫРЬЕ И КОРМАХ (РДУ-99)

Нормируемые величины: 1.1. Для переработки на пищевые цели допускается прием на перерабатывающие предприятия:

Продукция	Содержание, Бк/кг	
	Цезий-137	Стронций-90
Молоко для переработки на:		
сливочное масло	370	18
цельномолочные продукты, сыры и творог	100	3,7
молоко сухое и концентрированное	30	3,7
Мясо:		
говядина, баранина	500	Не нормируется
свинина, птица	180	Не нормируется
Растительное сырьё:		
овощи	100	Не нормируется
фрукты	40	Не нормируется
садовые ягоды	70	Не нормируется
Зерно	90	11
Зерно на детское питание	55	3,7
Прочее сырье	370	Не нормируется

1.2. Прием хранение и использование для посева семян зерновых, зернобобовых, крестоцветных культур, однолетних и многолетних трав разрешается с содержанием цезия-137 до 1850 Бк/кг.

1.3. Прием семян рапса для переработки на продовольственные и технические цели допускается с содержанием цезия-137 до 1500 Бк/кг.

1.4. Для переработки на спирт допускается использования сырья с содержанием цезия-137 до 3700 Бк/кг.

1.5. Допустимые уровни содержания цезия-137 и стронция-90 в основных видах кормов предусмотрены для получения различных видов конечной продукции:

– цельного молока (и молока-сырья для переработки на сыры и творог);
– молока-сырья для переработки на масло;
– мяса говядины и баранины (заключительная стадия откорма).

Виды кормов	Содержание, Бк/кг				
	Цезий-137			Стронций-90	
	Молоко цельное	Молоко сырье для перераб. на масло	Мясо, заключительный откорм	Молоко цельное	Молоко сырье для перераб. на масло
Сено	1300	1850	1300	260	1300
Солома	330	900	700	185	900
Сенаж	500	900	500	100	500
Силос	240	600	240	50	250
Корнеплоды	160	600	300	37	185
Зерно на фураж, комбикорм	180	600	480	100	500
Зеленая масса	165	600	240	37	185
Хвойная, травяная мука, дробина пивная, жом, патока, барда, мясокостная мука	900	-	-	-	-
Мезга, молочные продукты, (обрат)	600	-	-	-	-
Прочие виды кормов	900				

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Коэффициенты перехода Cs-137 (нКи/кг:Ки/км^2 или Бк/кг:кБк/м^2) в продукцию растениеводства в зависимости от обеспеченности дерново-подзолистых почв обменным калием

Культура	Содержание обменного калия, мг/кг почвы				
	Менее 80	81-140	141-200	201-300	Более 300
1	2	3	4	5	6
Дерново-подзолистая супесчаная					
Зерно (влажность14%)					
Овес	0,25	0,08	0,06	0,05	0,04
Озимая рожь	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01
Озимая пшеница	.	-	0,03	0,02	0,01
Яровая пшеница	-	-	0,04	0,02	0,02
Ячмень	0,07	0,06	0,05	0,03	0,03
Люпин	0,61	0,57	0,45	0,4	0,37
Горох	0,55	0,51	0,41	0,31	0,16
Вика	0,30	0,26	0,22	0,16	0,14
Рапс яровой	-	0,25	0,21	0,15	0,13
Просо	-	-	0,11	0,07	0,05
Солома (влажность 20%)					
Овес	0,52	0,12	0,06	0,05	0,03
Озимая рожь	0,09	0,06	0,04	0,04	0,02
Озимая пшеница	-	-	0,09	0,06	0,03
Яровая пшеница	-	-	0,07	0,05	0,02
Ячмень	0,12	0,09	0,05	0,05	0,05
Сено (влажность 16%)					
Клевер	0,95	0,70	0,51	0,41	0,37
Многолет. злак, травы	2,03	1,59	0,67	0,57	0,5
Многолет. злаково-бобовые смеси	1,18	0,89	0,625	0,46	0,43
Естественные сенокосы	3,20	2,10	-	-	-
Многолет.злак.травы на пойменных землях	3,42	2,34	1,98	1,55	1,5
Сенаж (влажность, 55%)					
Клевер	0,48	0,38	0,27	0,22	0,2
Многолет. злак, травы	1,09	0,85	0,36	0,31	0,27
Многолет. злаково-бобовые смеси	0,63	0,48	0,33	0,25	0,23
Естественные сенокосы	1,59	1,07	-	-	-
Многолет.злак.травы на пойменных землях	1,71	1,20	0,95	0,83	0,80
Силос (влажность,75%)					
Клевер	0,31	0,21	0,15	0,12	0,11
Многолет. злак, травы	0,60	0,47	0,20	0,17	0,15
Многолет. злаково-бобовые смеси	0,35	0,26	0,19	0,14	0,13
Горохо-овсяная смесь	0,17	0,11	0,09	0,07	0,07
Викоовсяная смесь	0,14	0,08	0,07	0,06	0,05

Продолжение приложения 3

1	2	3	4	5	6
Естественные сенокосы	0,88	0,60	.	-	-
Многолет.злак.травы на пойменных землях	0,95	0,67	0,53	0,46	0,45
Кукуруза	-	.	0,07	0,06	0,04
Зеленая масса (влажность 82%)					
Клевер	0,21	0,15	0,11	0,09	0,08
Многолет. злак, травы	0,44	0,34	0,14	0,12	0,11
Многолет. злаково-бобовые смеси	0,25	0,19	0,13	0,10	0,09
Горохо-овсяная смесь	0,12	0,08	0,06	0,05	0,05
Вико-овсяная смесь	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03
Естественные сенокосы	0,64	0,43	-	-	-
Злаковые травы на пойменных землях	0,68	0,48	0,38	0,33	0,32
Кукуруза	-	-	0,05	0,04	0,03
Люпин	-	0,22	0,19	0,16	0,14
Рапс яровой	-	0,20	0,17	0,12	0,1
Горох	-	0,13	0,12	0,09	0,09
Картофель, корнеплоды (влажность 78-81г%)					
Картофель	-	0,06	0,04	0,03	0,02
Кормовая свекла	-	-	0,04	0,02	0,02
Дерново-подзолистая суглинистая					
Зерно (влажность 14%)					
Овес	0,18	0,06	0,04	0,04	0,03
Озимая рожь	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
Озимая пшеница	-	-	0,02	0,01	0,01
Яровая пшеница	-	-	0,03	0,01	0,01
Ячмень	0,05	0,04	0,04	0,02	0,02
Люпин	0,43	0,40	0,32	0,28	0,26
Горох	0,39	0,36	0,29	0,22	0,11
Вика	0,21	0,18	0,15	0,11	0,10
Рапс яровой	-	0,18	0,15	0,11	0,09
Просо	-	-	0,08	0,05	0,04
Солома (влажность, 20%)					
Овес	0,36	0,08	0,04	0,04	0,02
Озимая рожь	0,06	0,04	0,03	0,03	0,01
Озимая пшеница	-	-	0,06	0,04	0,02
Яровая пшеница	-	-	0,05	0,04	0,01
Ячмень	0,08	0,06	0,04	0,04	0,04
Сено(влажность16%)					
Клевер	0,62	0,49	0,36	0,29	0,26
Многолет. злак, травы	1,42	1,11	0,47	0,4	0,35
Многолетние злаково-бобовые смеси	0,83	0,62	0,44	0,32	0,3

Продолжение приложения 3

1	2	3	4	5	6
Естественные сенокосы	2,08	1,67	-	-	-
Многолет.злаклравы на пойменных землях	2,70	2,02	1,41	1,13	0,98
Сенаж (влажность55%)					
Клевер	0,34	0,27	0,19	0,15	0,14
Многолет. злак, травы	0,76	0,60	0,25	0,22	0,19
Многолетние злаково-бобовые смеси	0,44	0,34	0,23	0,18	0,16
Естественные сенокосы	1,11	0,89	-	-	-
Многолет.злак.травы на пойменных землях	1,45	1,08	0,76	0,61	0,53
Силос (влажность 75%)					
Клевер	0,18	0,15	0,11	0,08	0,08
Многолет. злак, травы	0,42	0,33	0,14	0,12	0,11
Многолетние злаково-[бобовые смеси	0,25	0,18	0,13	0,10	0,09
Горохо-овсяная смесь	0,12	0,08	0,06	0,05	0,05
Зико-овсяная смесь	0,10	0,06	0,05	0,04	0,04
Естественные сенокосы	0,62	0,50			
Многолет.злак.травы на пойменных землях	0,80	0,60	0,42	0,34	0,29
Кукуруза	-	-	0,06	0,04	0,03
Зеленая масса (влажность 82%)					
Клевер	0,13	0,11	0,08	0,06	0,06
Многолет. злак, травы	0,31	0,24	0,10	0,08	0,08
Многолетние злаково-бобовые смеси	0,18	0,13	0,09	0,07	0,06
Горохо-овсяная смесь	0,08	0,06	0,04	0,04	0,04
Вико-овсяная смесь	0,07	0,04	0,04	0,03	0,02
Естественные сенокосы	0,45	0,36	-	-	-
Злаковые травы на пой-менных землях	0,58	0,43	0^0	0,24	0,21
Кукуруза			0,04	0,03	0,02
Люпин	-	0,15	0,13	0,11	0,1
Рапс яровой	-	0,14	0,12	0,08	0,07
Горох	-	0,09	0,08	0,06	0,06
Картофель, корнеплоды(влажность78-87%)					
Картофель	0,07	0,04	0,03	0,02	0,01
Кормовая свекла	-	-	0,03	0,01	0,01
Дерново-подзолистая песчаная					
Зерно (влажность 14%)					
Овес	0,33	0,10	0,08	0,07	0,05
Озимая рожь	0,05	0,04	0,03	0,03	0,01
Ячмень	0,09	0,08	0,07	0,04	0,04
Люпин	0,79	0,74	0,59	0,52	0,48
Горох	0,72	0,66	0,53	0,40	0,21
Вика	0,39	0,34	0,29	0,21	0,18
Рапс яровой	-	0,33	0,27	0,20	0,17

Продолжение приложения 3

1	2	3	4	5	6
Солома (влажность, 20%)					
Овес	0,68	0,16	0,08	0,07	0,04
Озимая рожь	0,12	0,08	0,05	0,05	0,03
Ячмень	0,16	0,12	0,07	0,07	0,07
Сено (влажность 16%)					
Многолет. злак, травы	3,04	2,57	0,97	0,94	0,84
Многолет. злаково-бобовые смеси	1,53	1,16	0,81\	0,60	0,56
Естественные сенокосы	3,96	2,60	-	-	-
Многолет.злак.травы на поименных землях	4,93	4,42	2,87	2,10	1,91
Сенаж (влажность 55%)					
Многолет. злак, травы	1,63	1,38	0,52	0,5	0,45
Многолет. злаково-бобовые смеси	0,82	0,62	0,43	0,33	0,3
Естественные сенокосы	2,07	1,39	-	-	-
Многолет.злак.травы на поименных землях	2,64	2,37	1,54	1,13	1,02
Силос (влажность 75%)					
Многолет. злак, травы	0,9	0,76	0,29	0,28	0,25
Многолет. злаково-бобовые смеси	0,46	0,34	0,25	0,18	0,17
Горохо-овсяная смесь	0,22	0,14	0,12	0,09	0,09
Вико-овсяная смесь	0,18	0,1	0,09	0,08	0,07
Естественные сенокосы	1,14	0,78	_	_	.
Многолет.злак.травы на пойменных землях	1,47	1,32	0,85	0,63	0,57
Кукуруза		0,1		0,07	0,06
Зеленая масса (влажность 82%)					
Многолет. злак, травы	0,65	0,55	0,21	0,2	0,18
Многолет. злаково-бобовые смеси	0,33	0,25	0,17	0,13	0,12
Горохо-овсяная смесь	0,16	0,1	0,08	0,07	0,07
Вико-овсяная смесь	0,13	0,08	0,07	0,05	0,04
Естественные сенокосы	0,83	0,56	-	-	-
Злаковые травы на пойменных землях	1,06	0,95	0,62	0,45	0,41
Кукуруза	-	0,07	0,07	0,05	0,04
Люпин	-	0,29	0,25		
Рапс яровой	0,29	0,26	0,22	0,16	0,13
Горох		0,17	0,16	0,12	0,12
Картофель, корнеплоды(влажность 78-87%)					
Картофель	0,13	0,08	0,05	0,04	0,03
Кормовая свекла	-	-	0,05	0,03	0,03

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Коэффициенты перехода Cs-137 (нКи/кг:Ки/км^2 или Бк/кг:кБк/м^2) в продукцию растениеводства в зависимости от обеспеченности торфяно-болотных почв обменным калием

Культура	Содержание обменного калия, мг/кг почвы		
	Менее 250	251-500	Более 500
Сено (влажность 16%)			
Травы естественных сено-косов	27,76	17,72	10,60
Многолет. злак, травы	7,99	4,85	3,37
Сенаж (влажность 55%)			
Травы естественных сено-косов	14,84	9,48	5,67
Многолет. злак, травы	4,27	4,16	3,14
Силос (влажность 75%)			
Травы естественных сено-косов	8,26	5,27	3,16
Многолетние злаковые травы	2,38	1,44	1,00
Зеленая масса (влажность 82%)			
Травы естественных сено-косов	5,96	3,80	2,27
Многолетние злаковые травы	1,71	1,04	0,72

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Коэффициенты перехода Sr-90 Ки/кг:Ки/км^2 или Бк/кг:кБк/м^2) в продукцию растениеводства в зависимости от степени кислотности дерново-подзолистых почв

Культура	Уровень кислотности почвы, pH (KCl)					
	Менее 4,5	4,6-5,0	5,1-5,5	5,6 - 6,0	6,1 - 7,0	Более 7,0
1	2	3	4	5	6	7
Дерново-подзолистая супесчаная						
Зерно (влажность 14%)						
Овес	1,79	1,5	1,32	1,29	1,28	1,25
Озимая рожь	1,18	1,04	0,98	0,86	0,86	0,74
Озимая пшеница	-	-	1,46	1,44	ЫЗ	1,13
Яровая пшеница	.	.	1,62	1,50	1,15	1,13
Ячмень	-	1,90	1,79	1,64	1,58	1,46
Люпин	-	5,60	4,35	3,82	3,60	3,52
Горох	-	3,30	2,22	2,06	1,95	1,90
Зика	-	2,97	1,95	1,90	1,87	1,85
³апс яровой	-	7,5	5,8	5,1	4,4	4,4
Солома (влажность 20%)						
Овес	7,23	6,18	4,95	4,59	4,54	4,41
Озимая рожь	6,73	5,83	4,92	4,35	4,33	4,29
Озимая пшеница	-	-	6,57	6,48	5,13	5,09
Яровая пшеница	-	-	7,08	6,56	5,03	4,94
Ячмень	-	7,35	7,05	6,38	5,97	5,62
Сено (влажность 16%)						
Клевер	-	-	32,48	26,09	20,41	15,85

Продолжение приложения 5

1	2	3	4	5	6	7
Многолет. злак, травы	15,28	13,11	10,98	9,06	8,41	6,38
Многолет. злаково-бобовые смеси	-	25,52	21,09	17,55	14,42	11,12
Естественные сенокосы	21,04	15,18	12,77	-	-	-
Многолет.злак.травы га пойменных землях	29,05	26,06	21,95	17,95	17	11,61
Сенаж (влажность 55%)						
Клевер			17,4	13,98	10,93	8,49
Многолет. злак, травы	8,19	7,02	5,88	4,85	4,51	3,42
Многолет. злаково-бобовые смеси	-	13,67	11,3	9,4	7,73	5,96
Естественные сенокосы	11,27	8,13	6,84	-	-	-
Много лет. злак, травы на пойменных землях	15,56	13,96	11,76	9,62	9,11	6,22
Сенаж (влажность 75%)						
Клевер	-	-	9,67	7,76	6,07	4,72
Многолет. злак, травы	4,55	3,90	3,27	2,70	2,50	1,90
Многолет. злаково-бобовые смеси	-	7,60	6,28	5,22	4,29	3,31
Горохо-овсяная смесь	-	6,11	5,17	4,24	3,33	2,22
Вико-овсяная смесь	-	4,69	4,4	3,81	2,75	1,96
Естественные сенокосы	6,26	4,52	3,80	-	-	-
Много лет. злак. травы на пойменных землях	8,65	7,76	6,53	5,34	5,06	3,46
Кукуруза	-	2,74	2,33	2,01	1,14	0,75
Зеленая масса (влажность 82%)						
Клевер	-	-	6,96	5,59	4,37	3,4
Многолет. злак, травы	3,27	2,81	2,35	1,94	1,8	1,37
Многолет. злаково-бобовые смеси		5,47	4,52	3,76	3,09	2,38
Горохо-овсяная смесь	-	4,4	3,72	3,05	2,4	1,6
Вико-овсяная смесь	-	3,38	3,17	2,74	1,98	1,41
Естественные сенокосы	4,51	3,25	2,74	-	-	-
Многолет. злак.травы на пойменных землях	6,23	5,58	4,7	3,85	3,64	2,49
Кукуруза	-	1,97	1,68	1,45	0,82	0,54
Люпин	-	7,98	6,76	5,25	3,85	2,25
Рапс яровой	-	3,9	2,9	2,5	2,2	2,1
Горох	-	7,42	6,33	5,07	3,31	2,16
Вика	-	5,37	5,23	4,45	2,02	1,83
Картофель, корнеплоды (влажность 78-87%)						
Картофель	0,4	0,3	0,25	0,18	0,13	0,13
Кормовая свекла	-	-	1,03	0,72	0,62	0,57
Дерново-подзолистая суглинистая						
Зерно (влажность 14%)						
Овес	1,71	1,35	1,25	1,21	1,18	1,1
Озимая рожь	1,03	0,94	0,87	0,81	0,73	0,64
Озимая пшеница		-	1,2	1,05	0,89	0,78
Яровая пшеница	-	-	1,13	1,05	0,81	0,79
Ячмень		1,45	1,38	1,32	1,28	1,16

Продолжение приложения 5

1	2	3	4	5	6	7
Люпин	-	3,92	3,05	2,67	2,52	2,46
Горох	-	2,31	1,55	1,44	1,37	1,33
Вика	-	2,08	1,37	1,33	1,31	1,3
Рапс яровой		5,25	4,06	3,57	3,08	3,08
Солома (влажность 20%						
Овес	532	5,28	4,92	4,44	4,34	4,2
Озимая рожь	5,89	5,54	4,72	4,24	3,74	3,26
Озимая пшеница	-	-	4,6	4,54	3,59	3,56
Яровая пшеница	-	-	4,96	4,59	3,52	3,46
Ячмень	-	5,8	5,02	4,86	4,74	4,63
Сено (влажность 16%)						
Клевер	-	-	29,22	20,66	15,43	13,4
Многолет. злак, травы	13,9	11,35	9,51	8,57	7,78	5,83
Многолет. злаково-бобовые смеси		22,69	18,77	14,46	11,62	9,61
Картофель, корнеплоды (влажность 78-87%)						
Картофель	0,36	0,27	0,21	0,15	0,13	0,12
Кормовая свекла	-	-	0,88	0,6	0,53	0,52
Дерново-подзолистая песчаная						
Зерно (влажность 14%)						
Овес	2,1	1,65	1,56	1,49	1,4	1,29
Озимая рожь	1,37	1,25	1,17	1,06	0,97	0,69
Ячмень	2,66	2,24	1,89	1,75	1,68	1,62
Люпин		7,28	5,66	4,97	4,68	4,58
Горох		4,29	2,89	2,68	2,54	2,47
Вика		3,86	2,54	2,47	2,43	2,41
Рапс яровой	-	9,75	7,54	6,63	5,72	5,72
Солома (влажность 20%)						
Овес	7,72	6,73	6,01	5,45	5,25	5,09
Озимая рожь	7,41	6,56	5,88	5,28	4,89	4,4
Ячмень	8,91	8,72	7,72	6,78	6,12	5,84
Сено (влажность 16%)						
Многолет. злак, травы	20,51	18,57	16,04	13,16	12,55	8,91
Многолет. злаково-бобовые смеси	-	32,00	28,62	22,15	18,27	13,95
Естественные сенокосы	24,62	20,25	17,72	-	-	-
Иноголет. злак. травы на пойменных землях	37,77	33,88	28,54	23,34	22,1	15,09
Сенаж (влажность 55%)						
Многолет. злак, травы	10,99	9,95	8,59	7,05	6,72	4,77
Многолет. злаково-бобовые смеси	-	17,14	15,33	11,87	9,79	7,47
Естественные сенокосы	13,19	10,85	9,49	-	-	-
Многолет.злак.травы на пойменных землях	20,23	18,15	15,29	12,5	11,84	8,08
Силос (влажность 75%						
Многолет. злак, травы	6,1	5,53	4,77	3,92	3,74	2,65
Многолет. злаково-бобовые смеси	-	9,52	8,52	6,59	5,44	4,15

Продолжение приложения 5

1	2	3	4	5	6	7
Горохо-овсяная смесь	-	7,94	6,72	5,51	4,33	2,89
Вико-овсяная смесь	-	6,1	5,72	4,95	3,58	2,54
Естественные сенокосы	7,33	6,03	5,27	-	-	-
Многолет.злак.травы на пойменных землях	11,24	10,08	8,49	6,95	6,58	4,49
Кукуруза	-	3,56	3,03	2,63	1,49	0,97
Зеленая масса (влажность 82%)						
Многолет. злак, травы	4,4	3,98	3,44	2,82	2,69	1,91
Многолет. злаково-бобовые смеси	-	6,86	6,13	4,75	3,92	2,99
бобовые смеси						
Горохо-овсяная смесь	-	5,72	4,84	3,97	3,12	2,08
Вико-овсяная смесь	-	4,39	4,12	3,56	2,58	1,83
Естественные сенокосы	5,28	4,34	3,8	-	-	-
Многолет.злак.травы на пойменных землях	8,09	7,26	6,12	5	4,74	-
Кукуруза	-	2,56	2,18	1,89	1,07	0,7
Люпин	-	10,37	8,79	6,83	5,01	2,93
Рапс яровой	-	5,07	3,77	3,25	2,86	2,73
Горох	_	9,65	8,23	6,59	4,3	2,81
Вика	-	6,98	6,8	5,79	2,63	2,38
Картофель, корнеплоды (влажность 78-87%)						
Картофель	0,78	0,32	0,47	0,35	0,26	0,26
Кормовая свекла	-	-	1,44	0,97	0,87	0,85

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Коэффициенты перехода Sr-90 (нКи/кг:Ки/км^2 или Бк/кг:кБк/м^2) в продукцию растениеводства в зависимости от степени кислотности торфяно-болотных почв

Культура	РН (KCl)		
	3,9-4,3	4,31-4,7	Более 4,7
Сено (влажность 16%)			
Травы естественных сенокосов	20,0	16,51	14,40
Многолет. злак, травы	16,35	14,55	11,0
Сенаж (влажность 55%)			
Травы естественных сенокосов	10,69	8,83	7,70
Многолет. злак, травы	8,74	7,78	5,88
Силос (влажность 75%)			
Травы естественных сенокосов	5,95	4,91	4,29
Многолет. злак, травы	4,87	4,33	3,27
Зеленая масса (влажность 82%)			
Травы естественных сенокосов	4,28	3,54	3,08
Многолет. злак, травы	3,50	3,12	2,36

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Рекомендуемые системы защиты сельскохозяйственных культур для зоны радиоактивного загрязнения

Сроки проведения защитных мероприятий	Вредный организм	Название препарата, норма расхода	Стоимость защиты у.е/га	Условия и способы проведения защитных мероприятий
1	2	3	4	5
КАРТОФЕЛЬ				
Август-сентябрь (после уборки предшественника)	Пырей ползучий, многолетние сорняки	Глифоган, 360 г/л в.р.,4л/га	42.0	Выполняется при наличии на участке многолетних корневищных и корнеотпрысковых сорняков. Опрыскивание вегетирующих сорняков на участках, идущих под картофель одним из указанных гербицидов. Механические обработки проводятся не ранее, чем через 15-20 дней.
		или		
		Раундап,360г/л в.р., 4 л/га	42.0	
		или		
		Глиалка, 360г/л в.р., 4 л/га	42.0	
По всходам картофеля	Однолетние двудольные и злаковые сорняки	Зенкор, 70% с.п.,0.7 кг/га	22.0	При высоте картофеля не более 1 0 см. К рабочему раствору добавляется хлористый калий, 1 кг/га, азотнокислый кальций, 1 кг/га
		или		
		Титус, 25% с.т.с., 40 г/га	34.0	При высоте сорняков 15-20 см. Уничтожает злаковые и некоторые двудольные сорняки. К рабочему раствору добавляется хлористый калий, 1 кг/га и азотнокислый кальций, 1 кг/га, оксидат торфа, 1 л/га
	Двудольные и злаковые сорняки (в т.ч. пырей)	Зенкор, 70% с.п., 0.2 кг/га+ Титус, 25% с.т.с., 30 г/га	39.6	При высоте злаковых и широколистных сорняков 10-15 см в виде баковой смеси. К рабочему раствору добавляется хлористый калий,1 кг/га, азотнокислый кальций, 1 кг/га, оксидат торфа, 1 л/га

Продолжение приложения 7

1	2	3	4	5
По всходам картофеля	Однолетние злаковые сорняки, пырей	Тарга-супер, 5% к.э., 1л/га	14.5	При высоте злаковых сорняков 10-15 см в виде баковой смеси с хлористым калием, 1 кг/га и азотнокислым кальцием, 1 кг/га
		или		
		Зеллек-супер, 10,6%к.э.,0.5 л/га	18.0	
		или		
		Центурион, 240 г/л, 0.5л/га	-	То же
		или		
		Пантера, 4% к,э.. 1 л/га	-	То же
По всходам картофеля	Болезни картофеля	Ридомил МЦ, 72% с.п., 2.5кг/га Азофос, 50% к.с., 6 л/га,3-х кратная обработка	39.2 24.0	При каждой обработке к рабочим растворам добавляется хлористый калий, 1 кг/га, азотнокислый кальций, 1 кг/га. Интервал между обработками азофосом 10-12 дней
		или		
		Акробат МЦ, 69% с.п., 2 кг/га Азофос, 65% п., 5 кг/га, 3-х кратная обработка	30.0 21.0	То же
По всходам картофеля	Колорадский жук	Банкол, 50% с.п., 0.2 кг/га		Опрыскивание посевов картофеля одним из перечисленных препаратов при заселении жуком более 10% растений и с численностью 20 и более личинок на куст. К рабочим растворам добавляется хлористый калий, 1 кг/га ,азотнокислый кальций, 1 кг/га, оксидат торфа, 1 л/га. При совпадении сроков обработок рекомендуются баковые смеси с фунгицидами.
		или		
		Децис, 2.5% к.э., 0.2 л/га	4.3	
		или		
		Регент, 80% в.г., 0.02 кг/га		
		или		
		Фастак, 10% к.э., 0.1 л/га	3.2	
		или		
		Фьюри, 10% в.р., 0.07 л/га	3.3	

1	2	3	4	5
ЯРОВЫЕ ЗЕРНОВЫЕ				
Август-сентябрь (после уборки предшественника)	Многолетние корневищные и корнеотпрысковые сорняки, пырей	Глифоган, 360 г / л в.р., 4 л/га Раундап, 360 г / л в.р ,4 л / га Глиалка, 360 г / л в.р, 4 л / га	42.0 42.0 42.0	Опрыскивание вегетирующих сорняков одним из перечисленных гербицидов. Норма расхода воды 1 50- 200 л/га. Механические обработки почвы проводятся не ранее чем через 15-20 дней
За 3-5 и более дней до посева	Возбудители болезней	Байтан, 15 % с.п., 2 кг /т Байтан-универсал,19.5% с.п. 2 кг/т Фенорам, 70% с.п., 3 кг /т Раксил, 2 % с.п., 1.5 кг /т Берет 050, 5 % т.л.с., 4 кг / т Витавакс 200, 75 % с.п.,3 кг/ т	43.4* 43.4* 24.0* 17.8* 70.0* 24.0* * у.е / т семян	Протравливание семян одним из указанных препаратов
Фаза кущения	Однолетние двудольные сорняки	Агритокс, 500 г/л в.р.к, 0.7л/га Парднер, 22 % к.э., 0.7 л / га Арелон, 50 % к.с., 1.1 л/ га	2.6 5.0 12.0	К рабочим растворам гербицидов добавляется хлористый калий (1 кг/га), азотнокислый кальций (1кг/га) и оксидат торфа (1 л/га)
Трубкование-появление флаг - листа	Вредители	Фастак, 10 % к.э., 0. 1 л / га Маврик 2 Е, 25 % к.э., 0.2 л/ га Каратэ, 5 % к.э.. 0.15 л /га Шерпа, 25 % к.э. 0.2 л /га Фьюри, 10 % в.р., 0.07 л/га	1.2 2.4 2.2 3.3 1.3	Опрыскивание посевов одним из перечисленных инсектицидов. К рабочим растворам добавляется хлористый калий и азотнокислый кальций (по 1 кг/га)

Флаг-лист - колошение	Болезни (мучнистая роса, пятнистости, ржавчина)	Байлетон, 25 % с.п. , 0.5 кг/га Импакт, 25 % с.п., 0.5 кг / га Тилт, 25 % к.э., 0.5 л /га	12.0 10.8 15.7	К рабочим растворам добавляется хлористый калий (1 кг/га), азотно-кислый кальций (1 кг/га) и оксидат торфа (1 л/га). Возможны баковые смеси с инсектицидами при совпадении сроков обработок

Продолжение приложения 7

1	2	3	4	5
ОЗИМЫЕ ЗЕРНОВЫЕ				
За 5 и более дней до сева	Возбудители болезней	Перечень протравителей и нормы расхода приведены в разделе «Яровые зерновые»		
До всходов	Однолетние широколистные и злаковые сорняки	Рейсер, 25% к.э., 2 л/га	26.4	Опрыскивание почвы до появления всходов зерновых
Фаза кущения(весна)	Однолетние широколистные сорняки	Агритокс, 500 г/л, в.р.к. 1.2 л/га Диален, 40 % в.р., 2 л/га * Парднер, 22 % к.э. 1.5 л/га * 2 М-4Х, 750 г/л, в.р. 1 л/га Арелон, 50 % к.с., 3 л/га **	4.4 7.4 10.6 5.4 32.7	Опрыскивание посевов одним из перечисленных гербицидов. * - При наличии в посевах сорняков, устойчивых к 2,4-Д и 2М-4Х ** -Против злаковых и широколистных сорняков, устойчивых к 2.4-Д и 2 М-4Х
Трубкование-начало колошения	Вредители (пьявица, большая злаковая тля)	Перечень фунгицидов и нормы расхода приведены в разделе «Яровые зерновые»		
Начало трубкования	Болезни (мучнистая роса, пятнистости)	Перечень пестицидов и нормы расхода приведены в разделе «Яровые зерновые»		

СВЕКЛА				
После уборки предшественника	Многолетние корневищные и корнеотпрысковые сорняки, пырей	Глифоган, 36 % в.р., 4 л/га Раундап, 36 % в.р. , 4 л/га Глиалка, 360 г/г в.р., 4 л/га	35.0 43.2 33.2	Осенняя обработка вегетирующих сорняков одним из перечисленных гербицидов. Механические обработки почвы проводятся через 15-20 дней после применения гербицидов

Продолжение приложения 7

1	2	3	4	5
До посева или до всходов свеклы	Однолетние широколистные сорняки	Пирамин ФЛ 43 % к.с., 6 л / га	70.8	
	Однолетние и многолетние злаковые и некоторые широколистные сорняки	Эрадикан 6 Е, 72 % к.э., 5 л / га	24.5	Опрыскивание почвы до посева с заделкой
1-2 настоящих листьев у свеклы	Однолетние широколистные сорняки	Бетанал АМ, 16% к.э, 6 л/га Бетанал - прогресс АМ, 18% к.э. 5 л/га Бурефен ФД, 1 1.16 % к.э., 5 л/га	85.0 93.0 68.2	Опрыскивание посевов одним из перечисленных препаратов
По вегетирующим сорнякам	Однолетние злаковые сорняки, пырей	Зеллек-супер, 10.6 % к.э. 1 л/га Тарга-супер, 5 % к.э., 2 л/га Фюзилад-супер, 12.5 % к.э., 2 л/га	32.0 25.0 22.0	Опрыскивание посевов одним из перечисленных гербицидов при высоте сорняков 10-15 см
КУКУРУЗА				
Осенью после уборки предшественника	Многолетние сорняки, пырей ползучий	Глифоган, 360 г/л в.р,, 4 л/га Раундап, 360 г/л в.р., 4 л/га Глиалка, 360 г/л в.р., 4 л/га	42.0 42.0 42.0	Опрыскивание вегетирующих сорняков одним из указанных гербицидов. Механические обработки проводят не ранее, чем через 1 5-20 дней после опрыскивания
Весной до всходов	Однолетние злаковые	Примэкстра, 50% к.с., 6 л/га Рей-	43.8	Опрыскивание почвы до посева,

	и двудольные сорняки	сер, 25 % к.э., 2 л/га	26.8	одновременно с посевом или до всходов Опрыскивание почвы после сева до всходов
Весной по вегетирующим сорнякам	Однолетние двудольные сорняки в т.ч. устойчивые к 2,4-Д	Диален, 40% в.р., 3 л/га Базагран, 480 г/л, в.р., 4 л/га	12.6 52.8	Опрыскивание посевов в фазе 3-5 листьев кукурузы
Весной по вегетирующим сорнякам	Однолетние двудольные, однолетние злаковые сорняки, пырей	Базис, 75 % в.р.г., 20 г /га Титус, 25 % с.т.с., 40 г/га Милагро, 4 % с.к., 1.5 л/га	46.4 42.8 36.0	Опрыскивание посевов в фазе 2-6 листьев кукурузы при высоте пырея до 20 см

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов А.И, Основы ядерной физики. - М.: Энергоатомиздат,1983.-256с.

2. Аверьянова А.В., Луговский В.П., Русак И.М. Что нужно знать о радиации. – Минск, Вс. шк., 1992.– 237 с.

3. Агеец В.Ю. Система радиологических контрмер в агросфере Беларуси. – Минск, 2001. – 250 с.

5. Анненков Б. Н., Юдинцева Е. В. Основы сельскохозяйственной радиологии. – М.: Агропромиздат, 1991. –287 с.

6. Василенко О.И. Радиационная экология. –М.: Медицина, 2004.– 216 с.

7. Грабовскй Р,И. Курс физики /для с.х. уч. заведений/- М., Вс. шк., 1980. – 607 с.

8. Гродзинский Д.М. Радиобиология растений. - Киев: Наукова думка, 1989. –384 с.

9. Гудков И.Н. Основы общей и сельскохозяйственной радиобиологии. – Киев, 1991. – 328 с.

10. Гулякин И.В., Ю д и н ц е в а Е.В. Сельскохозяйственная радиобиология. – М.: Колос, 1973. – 272 с.

11. Дертингер Г., Юнг Х. Молекулярная радиобиология: Пер. с англ. - М.: Атомиздат, 1973. – 325 с.

12. Иванов В.И. Курс дозиметрии. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 134 с.

13. Ильин Л.А., Кириллов В.Ф., Коренков И.П. Радиационная гигиена: Учебник.– М.: Медицина, 1999. – 384 с.

14. Израэль Ю.А. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 269 с.

15. Коггл Дж. Биологические эффекты радиации: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1986. –184 с.

16. Корнеев Н. А., Сироткин А. Н. Основы радиоэкологии сельскохозяйственных животных. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 208.

17. Корнеев Н. А., Сироткин А. Н., Корнеева Н.В. Снижение радиоактивности в растениях и продуктах животноводства. – М.: Колос, 1977. – 208 с.

18. Кузин А.М. Молекулярная радиобиология клеточного ядра. - М.: Атомиздат, 1973. –215 с.

19. Кузин А.М., Каушанский Д.А. Прикладная радиобиология. - М.: Энерго-атомиздат, 1981. –224 с.

20. Левин В.Е., Хамьянов Л.П. Регистрация ионизирующих излучений. М.: Атомиздат, 1973. – 168 с.

21. Лес, человек, Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / Под общ. ред. В.А. Игнатьева. – Гомель, 1999. – 524 с.

22. Максимов М. Т., Оджагов Г.О. Радиоактивные загрязнения и их измерение. - М.:Энергоатомиздат, 1989 –304 с.

23. Методические указания по производству зерна на продовольственные цели в соответствии с республиканскими допустимыми уровнями содержания стронция-90. – Минск, 2004. – 40 с.

24. Основы сельскохозяйственной экологии / Б.С. Пристер, Н.А. Лощилов, О.Ф. Немец, В.А. Поярков. – Киев: Урожай, 1991. – 472 с.

25. Основы сельскохозяйственной экологии и радиационная безопасность / А.В. Кильчевский, Г.А. Чернуха, Е.П. Воробьева; Под ред. А.В. Кильчевского, Г.А. Чернухи. – Минск: Ураджай, 2001. – 222 с.

26. Правила ведения агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2002–2005 гг. – Минск, 2002. – 74 с.

27. Применение органических удобрений на загрязненных радионуклидами почвах. – Минск, 2004. – 24 с.

28. Радиобиология / Под ред. А.Д. Белова. - М.: Колос, 1999. –384 с.

29. Рекомендации по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 84 с.

30. Рекомендации по созданию и эффективному использованию сенокосов и пастбищ на загрязненных радионуклидами территориях Могилевской области / Могилевский филиал РНИУП «Институт радиологии». – Могилев, 2003. – 60 с.

31. Рачинский В.В. Курс основ ядерной техники в сельском хозяйстве. - М.: Атомиздат, 1978. – 381с.

32. Савельев И.В. Курс общей физики. М.:Наука,1982.- Т.3.– 371 с.

33. Сборник нормативных, методических, организационно–распорядительных документов Республики Беларусь в области радиационного контроля и безопасности. – Минск, 2002. – 374 с.

34. Сироткин А.И., Ильязов Р.Г. Радиоэкология сельскохозяйственных животных. – Казань: «Фэн», 2000.– 384 с.

35. Сельскохозяйственная радиоэкология / Р.М. Алексахин, А.В. Васильев, В.Г. Дикарев; Под ред. Р.М. Алексахина. – М.: Экология, 1992. – 400 с.

36. Хансон К.П., Комар В.Е. Молекулярные механизмы радиационной гибели клеток. - М.: Энергоатомиздат, 1985. –152 с.

37. Экологические, медико-биологические и социально-экономические последствия катастрофы на ЧАЭС в Беларуси / Под ред. Е.Ф. Конопли, И.В. Ролевича. – Минск, 1996. – 280 с.

38. Экологические и радиобиологические последствия Чернобыльской катастрофы для животноводства и пути их преодоления/ Под ред. Р.Г. Ильязова.– Казань: «Фэн», 2002. – 330 с.

39. Элементарный учебник физики /Под ред. ГС. Ландсберга. - М.: Наука, 1986.-Т.3.– 656 с.

40. Юдинцева Е. В., Гулякин И. В. Агрохимия радиоактивных изотопов цезия и стронция. – Минск: Атомиздат. – 321 с.
41. Ярмоненко С.П. Радиобиология человека и животных. - 3-е изд. - М.: Высшая школа, 1988. – 424 с.