

Лекция №12

РЕКУЛЬТИВАЦИЯ ЗЕМЕЛЬ, ПОДВЕРЖЕННЫХ РАДИОАКТИВНОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ

- 1 Причины загрязнения и поведение радионуклидов в почве.
- 2 Мероприятия по снижению поступления радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию.
- 3 Технологии реабилитации земель, загрязненных радионуклидами..

Вопрос 1

Широкое использование ядерной энергии в различных отраслях народного хозяйства влечет за собой появление строго контролируемого количества радиоактивных веществ в биосфере.

Понятие «радиоактивность» означает способность к самопроизвольному распаду атомных ядер с излучением энергии. Вещество, имеющее в своем составе атомы радиоактивных изотопов, называется радиоактивным. Химический элемент, обладающий свойствами радиоактивности, обычно называют радиоизотопом и чаще всего – *радионуклидом*. В зависимости от скорости распада радиоизотопы условно подразделяются на *коротко живущие* (часы и сутки), *среднеживущие* (до года) и *долгоживущие* (годы и десятилетия). Степень опасности загрязнения сельскохозяйственных угодий радионуклидами определяется, прежде всего, тем, какие из них находятся в почвенном покрове. Основным фактором, определяющим поведение радионуклидов в почвах, биологическую подвижность их в системе почва – растение и способность к мигрированию по кормовым и пищевым цепочкам являются их физико-химические свойства. С точки зрения источников происхождения радионуклидов, возможности появления в окружающей среде их подразделяют в основном на четыре группы:

1. Продукты деления тяжелых ядер урана и плутония, так называемые радиоактивные продукты деления (^{90}Sr , ^{89}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{106}Ru , ^{147}pm и др.).
2. Радионуклиды наведенной активности (^{65}Zn , ^{54}Mn , ^{56}Fe , ^{60}Co , ^{115}Cd и др.).
3. Естественные радионуклиды, постоянно находящиеся в почве (радионуклиды семейства урана, тория и актиния).
4. Трансурановые элементы, образующиеся в процессе ядерных реакций (плутоний, калифорний, кюрий и др.).

Одна из основных ядерных реакций – *реакция деления тяжелых ядер урана и плутония, которая используется в ядерных реакторах* и при применении энергии атома в энергетике. При реакции деления образуется большое количество радиоактивных продуктов деления. Первоначальная смесь продуктов деления содержит более 200 изотопов 35 химических элементов. Образующиеся радионуклиды относятся к химическим элементам, находящимся в средней части Периодической системы Д. И. Менделеева, причем наибольший выход их наблюдается в интервале значений массового числа от 85 до 106 и от 129 до 150.

У более 2/3 изотопов период полураспада менее одного дня и поэтому они практически не представляют опасности в загрязнении почвенно-растительного покрова. Среднеживущие радиоактивные продукты деления (^{144}Ce , ^{106}Ru , ^{147}pm и др.) не представляют большой опасности для загрязнения растениеводческой и животноводческой продукции, так как коэффициент накопления их невысок, и, кроме того, при поступлении из почвы в растения они в основном задерживаются в корневой системе (99 % общего количества в растении). С течением времени в смеси продуктов деления начинают преобладать долгоживущие радионуклиды, в частности, ^{90}Sr (период полураспада 28 лет) и ^{137}Cs (период полураспада 30 лет). Через 2,5–3 года уровень радиоактивности в смеси в основном определяется этими радионуклидами, по-

сколькo коротко живущие радионуклиды к этому времени практически распадаются, а активность радионуклидов со средним полураспадом сильно уменьшается.

Группа элементов наведенной активности образуется в результате ядерных реакций, при взаимодействии нейтронов с ядрами стабильных элементов. Например, если почва будет подвергнута сильному облучению, то содержащиеся в почве такие элементы, как ^{65}Zn , ^{54}Mn , ^{56}Fe , ^{59}Fe , ^{60}Co и др., могут частично превращаться в радионуклиды. Большая часть их относится к микроэлементам, что определяет размеры поступления их в растения из почвы и характер распределения по его органам. Так, ^{65}Zn при поступлении из почвы в растения в значительных количествах накапливается в зерне злаковых и зернобобовых культур. Однако необходимо подчеркнуть, что в целом они не представляют большой опасности для загрязнения урожая сельскохозяйственных культур. Это обусловлено, прежде всего, тем, что в большинстве случаев период полураспада их меньше года и, кроме того, возможность появления в окружающей среде в каких-либо значительных количествах невелика.

Естественные радионуклиды (уран, торий, радий) в основном являются долгоживущими, с периодом полураспада до нескольких тысяч лет. Обычно они находятся в очень рассеянном состоянии преимущественно в горных породах и почвах. Основная часть урана, радия и тория в почве находится в необменной, прочносвязанной форме, и размеры перехода их в растения составляют сотые доли от их содержания в почве. Серьезной опасности для загрязнения растений при поступлении из почвы естественные радионуклиды также не представляют.

Трансурановые элементы (плутоний, америций, кюрий и др.), образующиеся при переработке ядерного топлива, также имеют большие периоды полураспада – от нескольких лет (^{241}Pu – 13,2 года) до сотен (^{241}Am – 458 лет) и десятков тысяч лет (^{239}Pu – 24 400 лет). Однако возможность попадания их в почвенный покров незначительна. Кроме того, они практически не поступают из почвы в растения. Трансурановые элементы относятся к радионуклидам очень низкой биологической подвижности.

Источниками радиоактивного загрязнения природной среды и сельскохозяйственных угодий могут быть аварии на ядерных реакторах, а также утечки радиоактивных отходов при нарушении условий их хранения.

Радиационный фон после аварии на ЧАЭС определялся 21 радионуклидом. Основное количество радионуклидов выпало с мелкодисперсными частицами углерода с адсорбированными атомами металлов (конденсационные формы), а также в виде топливных частиц. Более 70 % радионуклидов, выброшенных в атмосферу, в настоящее время прекратили свое существование. Наибольшую опасность для живых организмов представляла группа биологически активных радионуклидов: ^{131}I , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{141}Ce , ^{144}Pr , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{95}Zr , ^{95}Nb . Разнородные по своим дозиметрическим характеристикам эти радионуклиды имеют одну общую особенность: большинство из них являются двойниками, аналогами химических элементов, выполняющих важные биологические функции в живых организмах и растениях.

Особо опасны радиоизотопы с большим периодом полураспада. В составе этой группы находятся такие загрязнители земной поверхности, как ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{241}Am и все изотопы плутония. Наибольшую опасность для человека, животных и растений представляют ^{137}Cs и ^{90}Sr . Они легко включаются в трофические цепи и являются источниками внутреннего и внешнего облучения организмов. Радиоактивные изотопы стронция и цезия являются химическими аналогами кальция и калия. Они отличаются высокой биологической подвижностью и при наличии в почвах интенсивно поступают в растения.

Поведение радионуклидов, их миграция на разных этапах биогеохимического круговорота элементов в природе в значительной степени зависит от физико-химического состояния почвы.

Поглощение радионуклидов почвенно-поглощающим комплексом определяется процессами распределения между двумя основными фазами почвы – твердой и жидкой и осуществляется за счет следующих основных взаимобратимых 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 такие факторы, как физико-химическая характеристика радионуклидов, время и формы нахождения в почве, свойства почвы, погодно-климатические условия, тип растительного покрова.

Важным для сельскохозяйственных угодий является степень влияния форм нахождения радионуклидов на их доступность для усвоения корневыми системами растений.

Из наземных органов радионуклиды поступают в глубинные корни. Благодаря выделительной функции корней радионуклиды попадают в нижележащие почвенные горизонты. Перенос по корням характерен для водорастворимой 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 раствор.

Скорость продвижения радионуклидов по растению зависит от интенсивности транспирации. В жаркую и сухую погоду транспирация 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 трудноподвижные формы. Основное количество радионуклидов концентрируется в корнях. 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.

Распределение радионуклидов в наземных органах растений неравномерное. 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 кожуре 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. В созревших растениях фасоли строн-

ций-90 распределяется следующим образом: в листьях – 53–68 %, стеблях – 15–28 %, створках бобов – 12–25 % и зерне – 7–14 %.

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 от многих факторов: свойств атмосферы, рельефа и вида растительности, свойств почвы, хозяйственной деятельности человека.

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.

Главной задачей сельскохозяйственного производства на загрязненной территории является получение продукции с содержанием радионуклидов в пределах допустимых уровней и дальнейшее возможное снижение радиоактивной нагрузки. Радикальные меры по отселению уже себя исчерпали. Науке и практике неизвестны более эффективные методы снижения коллективной дозы, чем проведение комплексных защитных мероприятий в сельском хозяйстве, направленных на снижение содержания радиоактивных веществ в продуктах питания и, прежде всего, в растениеводческой продукции.

Вопрос 2

Для получения сельскохозяйственной продукции с допустимым содержанием радионуклидов и обеспечения радиационной безопасности работающих на загрязненных радионуклидами территориях необходимо проводить защитные мероприятия, которые подразделяются: на организационные, агротехнические, агрохимические, зооветеринарные, технологические, санитарно-гигиенические и информационные (табл. 1).

Для снижения концентрации радионуклидов в сельскохозяйственных растениях могут быть использованы различные приемы, которые разделяют на две большие группы.

К *первой* группе относятся общепринятые в агропромышленном производстве мероприятия, направленные на увеличение плодородия почвы, повышение урожайности и одновременно способствующие уменьшению перехода радиоактивных веществ из почвы в растения.

К ним относятся: внесение органических удобрений (навоз, компосты и др.); внесение минеральных удобрений (N, P, K, микроудобрения); известкование почвы; агротехнические приемы по уходу за растениями и др.; подбор культур и сортов, которые в силу своих биологических особенностей способны в меньших количествах накапливать радионуклиды.

Таблица 1. Система защитных мероприятий, применяемых в условиях радиоактивного загрязнения территорий [15]

Защитные мероприятия	Содержание защитных мероприятий
Организационные	– инвентаризация угодий по плотности загрязнения радионуклидами и составление карт; – прогноз содержания радионуклидов в продукции растениеводства, кормопроизводства и животноводства; – инвентаризация угодий в соответствии с результатами прогноза и определение угодий, на которых возможно выращивание культур для различных целей: продовольственные, производство кормов, получение семенного материала, техническая переработка;

	<ul style="list-style-type: none"> – изменение структуры посевных площадей и севооборотов; – переспециализация отраслей животноводства; – исключение угодий из хозяйственного пользования; – организация радиационного контроля продукции; – оценка эффективности мероприятий
Агротехнические	<ul style="list-style-type: none"> – коренное и поверхностное улучшение сенокосов и пастбищ; – гидромелиорация (осушение и оптимизация водного режима); – предотвращение вторичного загрязнения
Агрохимические	<ul style="list-style-type: none"> – известкование кислых почв; – внесение органических удобрений; – внесение повышенных доз фосфорных и калийных удобрений; – оптимизация азотного питания растений на основе почвенно-растительной диагностики; – внесение микроудобрений; – снижение пестицидной нагрузки
Технологические	<ul style="list-style-type: none"> – промывка и первичная очистка убранной плодоовощной и технической продукции; – переработка продукции с целью снижения в ней концентрации радионуклидов
Санитарно-гигиенические	<ul style="list-style-type: none"> – соблюдение санитарно-гигиенических и других требований, установленных действующим в республике законодательством; – обеспечение дополнительным комплектом спецодежды
Информационные	<ul style="list-style-type: none"> – 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; – подготовка и повышение квалификации специалистов сельского хозяйства; – наглядные пособия, публикации, школы, обучение

Ко *второй* группе относятся специальные приемы, применение которых наряду с уменьшением поступления радионуклидов в растения иногда приводит к определенному уменьшению урожайности растений и некоторому снижению плодородия почвы. Это использование природных минералов (цеолиты, бентонит и др.), применение нетрадиционных химических препаратов промышленного производства (гумекс, ферроцин и др.).

Действие различных мероприятий, применяемых в земледелии для снижения накопления радионуклидов в растениях, основывается главным образом на их влиянии на свойства почв. При этом агротехнические приемы направлены на изменение распределения радионуклидов в почвенном профиле, агрохимические – приводят к изменению кислотности почв, увеличению сорбционной способности или концентрации конкурентных ионов. Сравнение радиологической эффективности защитных мероприятий проводится по кратности снижения накопления радионуклидов в растениях.

Применение данных технологических приемов на пахотных землях позволяет уменьшить переход загрязнителей из почвы в урожай сельскохозяйственных культур от 1,1 до 10 раз (табл. 2).

Таблица 2. Эффективность агротехнических и агрохимических приемов, обеспечивающих снижение накопления радионуклидов в продукции растениеводства [15]

Технологический прием	Кратность снижения
Обработка почв (вспашка с оборотом пласта, глубокая вспашка)	Снижение накопления в 1,2–5,0 раз
Известкование (в дозе 1,5–2,0 Н ₂)	Снижение накопления в 2,0–4,0 раза
Применение органических удобрений	Снижение накопления в 1,2–2,5 раза
Применение фосфорных удобрений	Снижение накопления для ¹³⁷ Cs в 1,0–1,5 раза; для ⁹⁰ Sr – в 1,2–3,5 раза
Применение калийных удобрений	Снижение накопления для ¹³⁷ Cs в 1,5–3,5 раза; для ⁹⁰ Sr – в 1,2–1,5 раза
Оптимизация доз применения азотных удобрений	Превышенные оптимальных доз ведет к росту накопления в растениях в 1,2–2,5 раза
Применение природных сорбентов (цеолиты, глины и др.)	Эффект нестабилен – как отсутствие эффекта или снижение накопления радионуклидов в 1,2–3,0 раза
Подбор видов и сортов культур с минимальными уровнями накопления	Снижение накопления в зависимости от вида до 30 раз, от сорта – до 7 раз

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.

Известкование кислых почв. Известкование кислых почв направлено не только на ограничение поступления радионуклидов в растениеводческую продукцию, но и на повышение плодородия почв и урожая.

Минимальное накопление радионуклидов в растениеводческой продукции, при соблюдении прочих равных условий возделывания сельскохозяйственных культур, происходит при оптимальной реакции почвенной среды. В этой связи основной целью известкования на землях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, является нейтрализация кислотности почвы и насыщение ее поглощающего комплекса кальцием и магнием.

Оптимальные показатели кислотности (рН) колеблются в значительных пределах и зависят от типа и гранулометрического состава почвы, обеспеченности ее гумусом и набора культур в севооборотах. На основе исследований, проведенных в Беларуси, определены оптимальные значения рН_{KCl} для дерново-подзолистых почв. В зависимости от гранулометрического состава почв эти значения составляют: для глинистых и суглинистых – 6,0–6,7; для супесчаных – 5,8–6,2; для песчаных – 5,6–5,8. Для торфяно-болотных и минеральных почв сенокосов и пастбищ оптимальные значения рН_{KCl} составляют соответственно 5,0–5,3 и 5,8–6,2. Достижение оптимальных параметров кислотности осуществляется известкованием нуждающихся почв. Дозы извести дифференцируются по типам почв, гранулометрическому составу, степени их кислотности и плотности загрязнения ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. На минеральных землях с плотностью загрязнения ¹³⁷Cs 5,0 Ки/км² (185 кБк/м²) и ⁹⁰Sr 0,3 Ки/км² (11 кБк/м²) и на торфяных почвах с плотностью загрязнения ¹³⁷Cs > 1,0 Ки/км² (37 кБк/м²) и ⁹⁰Sr > 0,15 Ки/км² (5,5 кБк/м²) предусматривается дополнительное внесение извести с целью ускоренного доведения рН почв до оптимальных значений. На дерново-подзолистые супесчаные почвы с рН 5,6–6,0 и плотностью загрязнения ¹³⁷Cs 1–5 Ки/км² (37–185 кБк/м²) дополнительное выделение извести предусматривается для поддержания оптимального диапазона кислотности. Все почвы I–II групп кислотности подлежат первоочередному известкованию в связи с высоким переходом радионуклидов в растения.

Эффект снижения поступления радионуклидов в урожай от известкования в дозах, рассчитанных по полной гидролитической кислотности, колеблется в пределах 1,5–3 раза, в зависимости от гранулометрического состава и степени кислотности почв, обеспеченности их гумусом и других свойств, а также биологических особенностей культур.

Органические удобрения. В целях поддержания почвенного плодородия, направленного на обеспечение стабильного урожая сельскохозяйственных культур, на загрязненных радионуклидами землях необходимо задействовать все имеющиеся источники обогащения почв органическим веществом. Внесение органических удобрений должно обеспечить бездефицитный, а в лучшем случае положительный баланс гумуса в почвах.

На загрязненных радионуклидами землях рекомендуются те же дозы навоза и компостов под сельскохозяйственные культуры, что и на чистых почвах.

За послеаварийный период изучено действие большого набора мелиорантов (цеолиты, бентонит, глинистый мергель, трепел, лигносульфаты, гуминовые препараты, сапропели и т. д.) на снижение перехода радионуклидов из почвы в сельскохозяйственные культуры. Наиболее эффективными мелиорантами в условиях радиоактивного загрязнения являются сапропели – отложения пресноводных водоемов. Внесение 60 т/га кремнеземистого сапропеля позволило снизить накопление ^{137}Cs в зерне ячменя на 50 % и в сене однолетних трав на 35 %. Снижение накопления ^{90}Sr менее заметно – на 18 и 12 % соответственно, однако при этом существенно (на 6,5 ц/га) повысился урожай зерна ячменя.

Изучение влияния сапропеля на урожай кормовых культур в динамике показало, что внесение высоких доз этого удобрения (90–100 т/га) дает высокую прибавку урожая в течение длительного времени. Наиболее отзывчивы к внесению сапропелей кормовая свекла и люпин, кратность снижения перехода ^{137}Cs в урожай которых достигала 3,9 и 4,5 раза соответственно по сравнению с контролем.

Чем беднее почва элементами минерального питания и гумусом, тем эффективнее действие сапропеля. Наличие в сапропелях органического вещества и минеральных макро- и микроэлементов, биологически активных веществ позволяет рассматривать их как ценное сырье для дальнейшего приготовления органического удобрения комплексного действия.

Ограничивающим фактором широкого применения сапропелей является высокая стоимость затрат на транспортировку.

Минеральные удобрения. Важным приемом, ограничивающим поступление радиоцезия из почвы в растения, является применение калийных удобрений. Эффективность приема обусловлена как антагонизмом цезия и калия в почве, так и позитивным влиянием калия на величину урожая сельскохозяйственных культур, особенно на дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почвах, бедных этим элементом.

Наиболее эффективной дозой на дерново-подзолистой почве следует считать количество калия, эквивалентное 12,5 % емкости поглощения. Меньшее поглощение ^{137}Cs в растениях под влиянием калия объясняется антагонизмом ионов ^{137}Cs и калия на первой стадии их поступления в корень, т. е. в процессе сорбции на поверхности корневой системы. При переходе ^{137}Cs из почвы в растения происходит сильная дискриминация его по отношению к калию, т. е. ^{137}Cs поступает из почвы в растения значительно медленнее калия.

Калийные удобрения являются наиболее эффективным средством повышения урожая, плодородия почв и снижения загрязнения радионуклидами растениеводческой продукции.

О влиянии фосфорных удобрений на накопление радионуклидов в урожае сложилось неоднозначное мнение. В ряде случаев отмечено повышение уровня загрязнения продукции растениеводства ^{137}Cs . Однако имеются данные о положительном воздействии фосфорных удобрений на уменьшение поступления радионуклидов из почвы в растения, особенно на почвах с низким содержанием подвижных фосфатов.

Учитывая дефицит фосфорных удобрений и их высокую стоимость, для ведения земледелия на загрязненной территории рекомендовано обеспечить минимум фосфорных удобрений, необходимый для сбалансированного питания сельскохозяйственных культур с учетом

содержания подвижных фосфатов в почве. Рекомендуется постепенное повышение содержания фосфора до оптимального уровня с приоритетом по степени загрязнения земель радионуклидами. На почвах с высоким содержанием подвижных фосфатов (более 250 мг Р₂О₅ на кг почвы на минеральных и 1000 мг/кг на торфяно-болотных почвах) фосфорные удобрения не вносятся до очередного цикла агрохимического обследования.

В комплексе радиоэкологических контрмер важная роль отводится регулированию азотного питания растений. В литературе высказываются разные мнения относительно влияния азотных удобрений на поступление радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию. При недостатке доступного азота в почве сильно снижается урожай, а концентрация радионуклидов в продукции несколько повышается.

Вопрос 3

Основой реабилитации является обеспечение максимально возможной эффективности защитных мероприятий на основании принципа оптимизации их применения по радиологическим и экономическим критериям. В основе стратегии реабилитации загрязненных сельскохозяйственных земель лежат два главных положения.

Первое – охрана здоровья человека путем снижения радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции и, как следствие, доз внутреннего облучения.

Второе – возвращение к традиционным способам ведения сельского хозяйства.

Эффект от реабилитационных мероприятий может изменяться в широких пределах и зависит как от социально-экономических, так и радиологических факторов. Решение задачи оптимизации обуславливает необходимость адресного применения защитных мероприятий на основании анализа риск – выгода.

Оценка эффективности реабилитационных мероприятий в сельском хозяйстве включает следующие этапы:

- обоснование необходимости реабилитации сельскохозяйственных земель;
- классификация сельскохозяйственных земель в рамках отдельных коллективных, фермерских или частных хозяйств по степени потребности в реабилитации;
- определение перечня наиболее эффективных защитных мероприятий;
- разработка стратегий реабилитации и оценка их эффективности.

Основными критериями при обосновании необходимости реабилитации сельскохозяйственных земель является превышение санитарно-гигиенических нормативов в производимой продукции и (или) превышение дозовых нагрузок на сельское население и сельскохозяйственных работников.

Наиболее эффективные защитные мероприятия на первом этапе выбираются на основании радиологического критерия – снижения накопления радионуклидов в сельскохозяйственной продукции после их применения. В последующем в качестве критерия может быть использовано снижение доз внутреннего облучения человека после применения защитных мероприятий или снижение коллективных доз.

Разработка стратегий применения защитных мероприятий при реабилитации сельскохозяйственных земель проводится на основании принципа оптимизации, т. е. эффективность реабилитации оценивается на основании следующих критериев: радиологических, экономических и комплексных. Классификация хозяйств по потребности в объемах и видах защитных мероприятий является основой для разработки адресных стратегий реабилитации.

Технологии ведения растениеводства на загрязненных территориях. Основой получения продукции растениеводства, соответствующей санитарно-гигиеническим нормативам, в условиях радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных земель является внедрение научно-обоснованной системы земледелия, которая включает комплекс организационных, агротехнических, мелиоративных мероприятий, усовершенствованных технологий возделывания культур.

Используются следующие приемы и способы снижения поступления радионуклидов в продукцию растениеводства:

- рациональное использование земель с учетом показателей почвенного плодородия и уровня их загрязнения радионуклидами;
- подбор видов и сортов культур с минимально возможными уровнями загрязнения;
- использование специальных технологических элементов при обработке почв;
- известкование кислых почв и внесение органических удобрений;
- применение повышенных доз фосфорно-калийных удобрений;
- использование средств защиты от болезней, вредителей и сорняков.

Одним из обязательных условий ведения растениеводства в условиях радиоактивного загрязнения является соблюдение требований технологических регламентов возделывания культур, которые в Беларуси представлены в «Отраслевых регламентах сельскохозяйственных культур».

Комплекс технологических приемов возделывания сельскохозяйственных культур включает размещение их по лучшим предшественникам, соблюдение сроков выполнения технологических операций, систему обработки почв и применения удобрений, подбор высокоурожайных сортов и т. п. Технологии возделывания сельскохозяйственных культур на радиоактивно загрязненных землях должны, с одной стороны, обеспечивать повышение почвенного плодородия и получение высоких урожаев, а с другой – производство продукции с содержанием радионуклидов, соответствующим санитарно-гигиеническим нормативам.

Осушение кормовых угодий. На осушенных территориях поступление радионуклидов в травостой зависит от положения уровня грунтовых вод (УГВ). Для большинства торфяных, торфяно- и торфянисто-глеевых почв минимальное поглощение растениями ^{137}Cs и ^{90}Sr 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 – снижает переход радионуклидов в 1,5–2,0 раза (табл. 3).

Таблица 3. Рекомендуемые диапазоны колебания уровней грунтовых вод для почв, загрязненных радионуклидами [9]

Типы почв	Диапазоны колебания УГВ, м
Торфяные почвы, сформировавшиеся на тростниковых и осоковых отложениях и осоковых торфах, со степенью разложения 40–45 %	0,9–1,2
То же, на гипсово-осоковых торфах со степенью разложения 35–40 %	0,8–1,1
То же, на древесных торфах со степенью разложения 45–55 %	0,7–1,0
Торфяно-глеевые почвы, подстилаемые песками с глубины 0,4–0,5 м	0,9–1,2
То же, при наличии на контакте торфа с песками оглеенной прослойки	0,7–1,0
Дерново-подзолистые песчаные почвы	0,8–1,1
Дерново-подзолистые супесчаные почвы	0,9–1,3
Дерново-подзолистые легкие суглинистые почвы	1,0–1,4
Дерново-подзолистые пылеватые суглинки	0,9–1,2

На территории с плотностью загрязнения ^{137}Cs более 185 кБк/м^2 в случае, когда при переустройстве осушительно-увлажнительных систем не обеспечивается регулирование УГВ,

проводится замена затворов ковшового и коробчатого типов на более совершенные. Существующая регулирующая сеть углубляется, если не обеспечивается требуемая норма осушения. Открытая мелиоративная сеть должна периодически окашиваться и подчищаться. Своевременно должна производиться промывка и ремонт закрытого дренажа.

На осушенных пойменных землях для снижения перехода радионуклидов в травы целесообразно устройство летних самотечных польдеров при соответствующем культуртехническом их обустройстве, засыпке вымоин и понижений.

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

Известкование кислых почв является одним из наиболее эффективных приемов снижения накопления радионуклидов в травостоях. Первоочередному известкованию подлежат почвы I–II групп кислотности. Наиболее эффективно послойное внесение извести: ½ нормы под основную обработку почвы и ½ нормы – под дискование (разделка пласта после вспашки).

При известковании повышается эффективность минеральных удобрений и возрастает продуктивность сенокосов и пастбищ. Наиболее надежным приемом снижения содержания радионуклидов в травостое при коренной агромелиорации пойменного луга служит известкование и внесение минеральных удобрений в дозе $N_{120}P_{90}K_{180}$. Такая технология позволяет получать за два укоса 530–550 ц/га зеленой массы с содержанием ^{137}Cs 180–190 Бк/кг. Содержание протеина в зеленой массе составляет 24–27 г/кг, каротина – 5,5–5,8 мг/кг. Качество кормов как по питательности, так и по содержанию радионуклидов можно регулировать при дробном внесении известковых материалов и минеральных удобрений в качестве подкормок при скашивании или скармливании травостоя.

В качестве специального приема на радиоактивно загрязненных кормовых угодьях рекомендуется использовать *природные мелиоранты* (пальгорскитовые глины, цеолиты, бентонит, вермикулит). При первичном загрязнении кормовых угодий радиоактивными веществами в качестве специального приема применяют *глинование* – внесение мелиорантов на поверхность загрязненной почвы и дернины (табл. 4).

Таблица 4. Примерные дозы извести при коренном улучшении лугов на дерново-подзолистых почвах с содержанием гумуса не более 3 % (т/га)

Гранулометрический состав почв	рН солевой вытяжки				
	4,5 и ниже	4,6	4,8	5,2	5,5
Супесчаные и легкосуглинистые	5,5	5,5	4,0	3,0	2,5
Средне- и тяжелосуглинистые	7,5	6,5	6,0	5,0	4,0

Подбор трав и травосмесей. Рекомендуется высевать травосмеси с преобладанием злаковых трав, которые накапливают в 1,5–3,0 раза меньше радионуклидов, чем бобовые культуры. Способы специальных обработок дернины и почвы (разрушение дернины дискованием, вспашка обычным и двухъярусным плугами, применение раундапа) и замена естественного травостоя сеяным злаковым понижают содержание ^{137}Cs в зеленой массе трав в 1,5–6,0 раз. При повторном применении коренного улучшения кормовых угодий его эффективность уменьшается примерно в 1,5–2,0 раза.

Луговые экосистемы характеризуются значительным разнообразием, что необходимо учитывать при разработке технологий создания культурных сенокосов и пастбищ. Луговые

экосистемы обычно подразделяют на четыре типа: суходольные, пойменные, низинные и болотные.

Суходольные луга расположены на повышенных дренированных равнинах и склонах разной крутизны, сформировавшиеся при периодически промывном, десуктивно-выпотном водном режиме. Грунтовые воды залегают на значительной глубине. В зоне аварии на ЧАЭС почвенный покров представлен дерново-подзолистыми песчаными, супесчаными или суглинистыми почвами.

Пойменные луга характерны для территорий, периодически затапливаемых на срок до 30 дней. Их формирование обусловлено паводковым водным режимом. Грунтовые воды находятся на глубине 0,5–2,5 м и ниже. Почвы аллювиальные, большей частью плодородные. При коренном улучшении пойменных лугов при первичной обработке почвы доза внесения азотных удобрений – 40–90 кг д. в. на 1 га. По традиционной технологии при перезалужении пойменных угодий вносят минеральные удобрения в дозе $N_{120-180}P_{90-120}K_{120-180}$, если в дальнейшем планируется пастбищное использование сеяных трав, а при сенокосном использовании – $N_{120-180}P_{90-120}K_{180-270}$. Для снижения накопления ^{137}Cs в травостое на пойменных лугах рекомендуется внесение сбалансированного минерального удобрения при соотношении N:P:K 2–3:1:2–3. Дозы фосфорных удобрений рекомендуется ограничить 60 кг/га д. в. Дозы калийных удобрений выше 180 кг/га д. в. не рекомендуются. Оптимальной дозой, отвечающей экологическим и экономическим требованиям, является $N_{180}P_{60}K_{180}$. На пойменных лугах, где не проводится коренное улучшение, хорошие результаты дает поверхностное известкование.

В зоне аварии на ЧАЭС преобладающими типами почв на пойменных лугах являются: пойменная аллювиальная, пойменная дерновая, торфяно-глебовая.

Пойменные луга предпочтительно использовать в качестве сенокосов. Пастбищное использование пойменных лугов на почвах с избыточным увлажнением исключается.

Низинные луга расположены в плоских понижениях на водоразделах, в долинах рек, у подножия склонов и т. д. Водный режим от умеренного до избыточного; грунтовые воды устойчивые и служат постоянным источником увлажнения почв.

Болотные луга расположены в более глубоких понижениях на водоразделах, по окраинам озер, притеррасным частям пойм рек. Водный режим – водонасыщенный или периодически водонасыщенный. Грунтовые воды залегают на глубине 0,5–1,5 м и часто выходят на поверхность. Лугово-болотные, торфянистые и торфяные почвы подлежат обязательному осушению.

В адаптивном земледелии при организации севооборотов принципиальным является формирование однородных по почвенно-ландшафтным и радиационно-экологическим условиям полей и рабочих участков, введение на каждом из них биологически правильного чередования культур по схемам, обеспечивающим получение ежегодного максимального экономического эффекта. Рабочие участки формируются на основе неоднородностей почвенного покрова с одинаковой или близкой к этому производительной способностью по отношению к отдельно взятым сельскохозяйственным культурам.

Группировка структур почвенного покрова пахотных земель по степени их пригодности для возделывания отдельных групп культур является основой для определения оптимальной структуры посевов и формирования севооборотов. Принципы построения и требования, предъявляемые к севооборотам, подходы к проектированию севооборотов, формированию полей, установлению типов севооборотов и удельного веса культур в них, а также схемы севооборотов должны быть адаптированы к условиям загрязнения пахотных земель радионуклидами.

Возделывание сельскохозяйственных культур в соответствии с законодательством Республики Беларусь разрешено на землях с плотностью загрязнения почв ^{137}Cs не более 40 Ки/км² и ^{90}Sr не более 3 Ки/км².

Подбор культур по величине накопления радионуклидов в зависимости от плотности загрязнения почв является основой для определения оптимальной структуры посевов и формирования севооборотов.

Тип севооборота для неоднородностей почвенного покрова устанавливается по соотношению величин коэффициентов контрастности каждой из культур.

Земли с преобладанием загрязненных радионуклидами автоморфных почв. Пахотные земли с преобладанием автоморфных по увлажнению почв предпочтительны, особенно на суглинистых и супесчаных на моренных суглинках почвах, для размещения наиболее ценных и требовательных сельскохозяйственных культур, таких как озимая и яровая пшеница, ячмень, горох, картофель, кормовые корнеплоды, кукуруза. Возделывание на данных землях многолетних бобовых трав или смеси их со злаковыми культурами должно практиковаться с целью поддержания плодородия почвы по таким важным показателям, как содержание органического вещества и накопление биологического азота.

Земли с преобладанием загрязненных радионуклидами полугидроморфных почв. Выбор вариантов использования земель с преобладанием полугидроморфных почв (временно избыточно увлажненных, глееватых и глеевых) ограничен, с одной стороны, более высоким по сравнению с автоморфными почвами переходом радионуклидов из почвы в растения, а с другой – небольшим набором культур, устойчивых к переувлажнению. При использовании земель с участием полугидроморфных почв осложняется также проведение полевых работ, сокращается период вегетации, что затрудняет возделывание таких культур, как озимая пшеница и тритикале, яровая пшеница и ячмень, картофель, кормовые корнеплоды.

При формировании схем интенсивных плодосменных севооборотов основное внимание уделяется научно обоснованному размещению ведущих культур и срокам возврата их на прежнее место, а период ротации и размер полей должны быть подчинены этой главной задаче с учетом расчлененности территории, степени однородности почвенного покрова, других хозяйственных условий.

В почвозащитных зернотравяных и травяно-зерновых севооборотах состав и порядок чередования культур должны предусматривать, в первую очередь, сохранение почвы от разрушения и восстановление ее плодородия. Это достигается за счет повышения удельного веса многолетних трав, обеспечивающих удлинение периода, в течение которого почва находится под защитой растений и стерни, а также увеличение количества поступающих в почву растительных остатков.

В умеренно эрозионных ландшафтах со слабосмытыми почвами (на склонах до 3°) рекомендуется вводить зернотравяно-пропашные (плодосменные) севообороты с показателями противозерозионной эффективности 0,60–0,77. Пропашные культуры могут занимать здесь до 25 %, зерновые – до 65 и многолетние травы – до 30 %.

Переспециализация хозяйств – также один из вариантов адресной реабилитации, основанной на выборе направления деятельности сельскохозяйственных организаций, расположенных на территории радиоактивного загрязнения. Осуществляется на основе метода составления программ специализации сельскохозяйственного производства, например, переспециализация хозяйства на мясное скотоводство.

Специализация растениеводства на территории радиоактивного загрязнения должна базироваться на применении адаптивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур, обеспечивающих высокую урожайность с минимальными трудовыми и энергетическими затратами. При изменении специализации хозяйства важным звеном в растениеводстве является анализ существующей и разработка новой структуры посевных площадей. Структуру посевных площадей уточняют с учетом потребностей в товарной продукции растениеводства, кормопроизводства и межхозяйственного кооперирования и уровня радиоактивного загрязнения.

Для отрасли растениеводства на загрязненной территории можно выделить несколько основных направлений специализации: семеноводство, кормопроизводство, производство технических культур.

Для отрасли животноводства на загрязненной территории можно выделить несколько основных направлений специализации: молочное, специализированное мясное, выращивание и откорм молодняка КРС, выращивание нетелей, коневодство и свиноводство. При выборе направления специализации хозяйств должны учитываться следующие технологические факторы: уровень радиоактивного загрязнения продукции животноводства; состояние кормовой базы; существующий уровень производства продукции в хозяйстве; обеспеченность кадрами.