На правах рукописи

ФЕДОРКОВА МАРИЯ ВАСИЛЬЕВНА

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДВИЖНОСТЬ РАДИОЦЕЗИЯ В АГРОЦЕНОЗЕ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПЕСЧАНОЙ ПОЧВЕ

Специальности 06.01.04 - агрохимия и
03.01.01 - радиобиология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва, 2013

Работа выполнена на кафедре агроинформатики факультета почвоведения Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель:

доктор биологических наук, профессор Пахненко Екатерина Петровна

Официальные оппоненты:

Егоров Владимир Сергеевич, доктор биологических наук, профессор, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, кафедра агрохимии и биохимии растений, профессор кафедры

Панов Алексей Валерьевич, доктор биологических наук, ГНУ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии Россельхозакадемии, сектор оценки эколого-экономической эффективности реабилитации техногенно загрязненных сельских территорий, заведующий сектором

Ведущая организация:

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт информатизации агрономии и экологии»

Защита состоится «28» мая 2013 года в 15 час. 30 мин. в аудитории М-2 на заседании Диссертационного совета Д 501.002.13 при МГУ имени М.В.Ломоносова на факультете почвоведения по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы д.1 стр.12, МГУ им. М.В.Ломоносова, факультет почвоведения.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Автореферат разослан «___»_____2013 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Зенова Галина Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Интенсификация хозяйственной деятельности человека привела к увеличению числа факторов, оказывающих негативное влияние на окружающую среду. Испытания ядерного оружия, выбросы предприятий ядерно-топливного цикла, а также радиационные аварии (в Уиндскейле (Великобритания), Айдахо (США), ПО «Маяк» (СССР), АЭС Три Майл Айленд (США), на Чернобыльской АЭС (СССР); авария на АЭС Фукусима-1) вызвали увеличение радиационного фона и накопление долгоживущих искусственных радионуклидов в окружающей среде. Почва – основной компонент биосферы, где происходит накопление техногенных радионуклидов и начинается дальнейшая миграция по пищевым цепям.

Изучение миграции искусственных радионуклидов в системе почва-растение началось в 50-60е годы прошлого века (Клечковский, Гулякин, 1958; Алексахин, 1963; Юдинцева, Гулякин, 1968; Павлоцкая, 1974 и др.). После аварии на Чернобыльской АЭС получены новые данные о влиянии свойств радиоактивных выпадений на динамику подвижности радиоактивных изотопов, количественно определены темпы снижения их доступности для растений, выявлена роль почвенно-геохимических факторов в миграции радионуклидов (Санжарова и др., 1996; Круглов, 1997 и др.). На современном этапе исследований формируются новые подходы к описанию процессов сорбции и фиксации радионуклидов в почве, а также к изучению роли корневой системы в процессе поступления радионуклидов в растения (Коноплев, Коноплева, 1999; Zhu, Smolders, 2000; Анисимов и др. 2002; Бондарь и др., 2003).

Одним из наиболее тяжелых последствий аварии на Чернобыльской АЭС явилось радиоактивное загрязнение сельскохозяйственных угодий. Производство и потребление продукции с повышенным содержанием радионуклидов является одним из основных источников внутреннего облучения населения. Несмотря на то, что с момента аварии прошло более 25 лет, в некоторых регионах сохраняется высокий риск производства сельскохозяйственной продукции, не соответствующей санитарно-гигиеническим нормативам. Это обусловлено в значительной степени широким распространением в юго-восточной части РФ дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава, которые характеризуются повышенной подвижностью радионуклидов. Долгоживущий изотоп ^{137}Cs - ведущий радионуклид с точки зрения радиационной опасности на территории, подвергшийся радиоактивному загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС.

Применение органических и минеральных удобрений – традиционный прием сохранения плодородия почвы, одновременно способствующий снижению содержания ^{137}Cs в растениях (Ратников, Жигарева, 2002 и др.). За последнее десятилетие особую актуальность приобрели работы, в которых разрабатываются методические подходы для оценки эффективности удобрений и агромелиорантов, учитывающие такие факторы, как изменение состава почвенного раствора, формы нахождения радионуклида в почве (Агапкина, 2002; Camps et al., 2003; Choi et al., 2005; Белова и др., 2009; Тулина и др., 2010). . Изучение модифицирующего действия удобрений на поведение радионуклидов в почве и в системе почва-растение

позволяет разрабатывать и дополнять теоретическую базу, необходимую для оптимизации применения удобрений на радиоактивно загрязненных территориях.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы являлось изучение факторов, определяющих биологическую подвижность ^{137}Cs в агроценозе при разных системах удобрения дерново-подзолистой песчаной почвы.

Для достижения поставленной цели решали следующие **задачи:**

1. Определить основные агрохимические показатели почвы в условиях длительного применения минеральных и органических удобрений на радиоактивно загрязненной дерново-подзолистой песчаной почве.
2. Сравнить действие и последействие органической, органоминеральной и минеральной системы удобрения на изменение состояния ^{137}Cs в почве.
3. Изучить влияние почвенных свойств на параметры подвижности ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве.
4. Исследовать влияние разных систем удобрения на урожай сельскохозяйственных культур и параметры накопления ^{137}Cs в продукции растениеводства.
5. Оценить влияние на переход ^{137}Cs из почвы в растения таких факторов как, изменение состава почвенного раствора, формы нахождения радионуклида в почве и изменение агрохимических свойств почвы при внесении разных систем удобрения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Через 22 года после аварии на ЧАЭС рациональное применение удобрений на радиоактивно загрязненной дерново-подзолистой песчаной почве является эффективным приемом ее реабилитации.
2. Влияние удобрений на подвижность ^{137}Cs в почве обусловлено изменением агрохимических свойств почвы и состава почвенного раствора.
3. Органические удобрения снижают подвижность радиоцезия в почве в течение 2-3 лет после внесения за счет образования Cs-органических соединений.
4. Максимальный эффект по снижению накопления ^{137}Cs сельскохозяйственными культурами достигается при оптимальном соотношении параметров плодородия в почве.

Научная новизна работы. Результаты диссертации расширяют представления о механизмах действия разных систем удобрения на поведение ^{137}Cs в агроценозе. Определены показатели подвижности ^{137}Cs для дерново-подзолистой песчаной почвы при внесении минеральных удобрений в возрастающих дозах, комбинации минеральных и органических удобрений, а также в случае применения различных видов навоза, соломы, сидерата и их сочетаний. Теоретически обоснована и экспериментально показана возможность образования Cs-органических соединений при внесении органических удобрений. Впервые проведено сравнительное изучение влияния разных систем удобрения на параметры подвижности радиоцезия в системе почва - почвенный раствор - растение.

Дана комплексная оценка эффективности применения разных систем удобрения на радиоактивно загрязненной дерново-подзолистой песчаной почве в отдаленный период после аварии на ЧАЭС. Впервые на основании множественного регрессионного анализа определены оптимальные параметры почвенного плодородия, позволяющие получать растениеводческую продукцию, соответствующую санитарно-гигиеническим нормативам по содержанию ^{137}Cs.

Теоретическое и практическое значение работы. Теоретическую значимость представляют закономерности поведения ^{137}Cs в почве и в системе почва - растение при использовании широкого спектра удобрений и их сочетаний. Описаны

механизмы влияния минеральных и органических удобрений на биологическую подвижность ^{137}Cs.

Для радиоактивно загрязненных дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава разработаны практические рекомендации по оптимизации применения удобрений, предусматривающие повышение почвенного плодородия, увеличение урожая сельскохозяйственных культур и одновременное снижение биологической подвижности ^{137}Cs. Показана важность сбалансированного внесения удобрений для ограничения перехода радиоцезия из почвы в растения.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на международных и всероссийских конференциях, в том числе: на IV Всероссийской конференции «Гуминовые вещества в биосфере», (Москва, 2007), на XVI Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов» (Москва, 2009); III Всероссийской конференции с международным участием «Медико-физиологические проблемы экологии человека» (Ульяновск, 2009); на международной конференции в рамках программы МАГАТЭ «Environmental Modeling for Radiation Safety II» (Вена, Австрия, 2009), научных чтениях, посвященных памяти Я.В. Бочкарева (Рязань, 2009); Международной конференции «Ресурсный потенциал почв - основа продовольственной и экологической безопасности России» (Санкт-Петербург, 2011), Всероссийской научной конференции с международным участием «Почвы России: современное состояние, перспективы изучения и использования», проводимой в рамках VI съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева (Петрозаводск, 2012).

Личный вклад диссертанта в получение научных результатов, выносимых на защиту. Автором проведен отбор образцов с участков полевых опытов, подготовка растительных и почвенных почв к анализу, агрохимический анализ почвы, комплекс радиологических исследований; проведены вегетационный и лабораторный опыт с искусственным внесением радиоцезия. Выполнена статистическая обработка полученных данных и проведен их анализ. Разработан многофакторный подход для оптимизации систем применения удобрений при реабилитации радиоактивно загрязненных дерново-подзолистых песчаных почв Брянской области. Сформулированы основные положения работы и выводы.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, описания объектов и методов исследований, результатов и их обсуждения, выводов, рекомендаций производству, списка литературы и приложения. Работа изложена на ___ страницах, содержит ___ рисунков, ___ таблиц. Список публикаций из ___ наименований, в том числе ___ на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю Е.П. Пахненко за внимание к работе, ценные советы и консультации; а также глубокую признательность коллективам ВНИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии и Новозыбковской опытной станции ВНИИА люпина. Особая признательность Н.И. Санжаровой за оказанную помощь и неизменную поддержку; а также В.Ф. Шаповалову и М.Г. Драганской за помощь в выполнении научных исследований на опытных участках; за консультативную и методическую помощь Н.В. Беловой и Е.П. Пименову.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, ставятся цель и задачи, решаемые в диссертации, обсуждается их научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

***Глава 1.* Обзор литературы**

В первой главе диссертационной работы на основе анализа отечественной и зарубежной литературы рассмотрены факторы, определяющие подвижность радиоизотопа ^{137}Cs в почве и его доступность растениям, а также роль применения удобрений в ограничении поступления радионуклида из почвы в сельскохозяйственную продукцию (Юдинцева, Гулякин, 1968, 1974; Павлоцкая, 1974; Алексахин и др., 1992; Круглов, 1997; Санжарова, 1997; Кузнецов и др., 2001, 2007; Ратников, 2002; Анисимов и др., 2002; Жигарева и др., 2003, 2009; Белова и др, 2009; Absalom et al., 1996; Nisbet, Woodman, 2000 и др.).

Особое внимание уделено освещению вопросов, связанных с влиянием физико-химических свойств почв на поведение радиоцезия в системе почва-растение-удобрение. Отмечено, что современные исследования, рассматривающие влияние удобрений на биологическую подвижность ^{137}Cs можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся работы, где подробно изучаются механизмы влияния отдельно взятых факторов на биологическую подвижность ^{137}Cs (Коноплев, Коноплева, 1999; Агапкина, 2002; Котова, 2002; Суслина, 2004; Smolders et al., 1996; Zhu, Smolders, 2000; Waegneers et al., 2001). Другие исследования, напротив, в основном посвящены изучению накопления ^{137}Cs в продукции при внесении удобрений и не затрагивают поведения радионуклида в почве и системе почва-растение (Белоус, 2001; Шаповалов 2006; Драганская, 2008; Подоляк и др, 2007; Cams et al., 2004; Choi et al., 2005). Отсутствие ясных представлений о механизмах влияния удобрений на биологическую подвижность ^{137}Cs затрудняет прогнозирование поведения данного радионуклида и разработку приемов реабилитации загрязненных территорий.

***Глава 2.* Объекты и методы исследования**

Исследования проводили на радиоактивно загрязненной территории в стационарных полевых опытах Новозыбковской Государственной сельскохозяйственной опытной станции ВНИИА люпина (НГ СОС ВНИИА люпина) с 2007 по 2010 гг. Почва опытов - дерново-слабоподзолистая рыхлопесчаная средне-окультуренная, сформированная на древнеаллювиальной супеси, подстилаемой связным песком.

Полевой опыт 1. Влияние применения разных систем удобрения на биологическую подвижность ^{137}Cs изучали в длительном стационарном опыте НГ СОС ВНИИА люпина «Агрохимическая эффективность комплексного применения органических, минеральных удобрений и средств защиты растений в полевом севообороте в условиях радиоактивного загрязнения», заложенном в 1993 году. Исходные средневзвешенные показатели агрохимической характеристики почвы пахотного слоя: содержание гумуса – 2.40-2.51%;
pH_{H2O} – 6.54-6.55; гидролитическая кислотность – 0.58-0.73 мг-экв/100 г; сумма поглощенных оснований – 7.18-16.88 мг-экв/100 г; содержание подвижных P_2O_5 и K_2O – соответственно 38.5-51.0 и 6.9-11.7 мг на 100 г почвы (Шаповалов, 2006). Плотность загрязнения опытного участка по ^{137}Cs в период исследований составила 323-346 кБк/м^2.

Опыт развернут на четырех полях плодосменного севооборота в 4-х повторностях. Посевная площадь делянок 90 м^2, учетная - 70 м^2. Технология возделывания культур севооборота – общепринятая для зоны.

Для сравнительного изучения выбрали следующие варианты опыта: 1) контроль (без удобрений); 2) навоз КРС 80 т/га; 3) навоз КРС 40 т/га + 1NPK 4) 1NPK-пониженная доза минеральных удобрений 5) 2NPK - оптимальная доза 6) 3NPK – повышенная доза. Чередование культур в севообороте: 1 – картофель, сорт «Темп»; 2 – овес, сорт «Скакун»; люпин на зеленый корм, сорт «Брянский-123»; 4 – озимая рожь, сорт «Пуховчанка» (табл. 1).

Таблица 1.

Схема внесения органических и минеральных удобрений в севообороте на дерново-подзолистой песчаной почве (полевой опыт 1)

Чередование культур в севообороте		Системы удобрений (варианты)					
		Контроль (без удобрений)	Органическая	Органо-минеральная	Минеральная		
					Пониженная 1NPK	Оптимальная 2NPK	Повышенная 3NPK
1	Картофель	-	Навоз 80 т/га	Навоз 40 т/га + $N_{75}P_{30}K_{90}$	$N_{75}P_{30}K_{90}$	$N_{150}P_{60}K_{180}$	$N_{225}P_{90}K_{270}$
2	Овес	-	Последействие навоза 80 т/га на 1-й культуре	Последействие навоза 40 т/га + $N_{55}P_{20}K_{50}$	$N_{55}P_{20}K_{50}$	$N_{110}P_{40}K_{100}$	$N_{220}P_{60}K_{150}$
3	Люпин (занятый пар)	-	Последействие навоза 80 т/га на 2-й культуре	Последействие навоза 40 т/га + $P_{20}K_{40}$	$P_{20}K_{40}$	$P_{40}K_{80}$	$P_{60}K_{120}$
4	Озимая рожь	-	Последействие навоза 80 т/га на 3-й культуре	Последействие навоза 40 т/га + $N_{70}P_{30}K_{60}$	$N_{70}P_{30}K_{60}$	$N_{140}P_{60}K_{90}$	$N_{210}P_{90}K_{180}$

Органические удобрения применяли в виде подстилочного навоза КРС, минеральные удобрения - в виде аммиачной селитры, суперфосфата двойного и хлористого калия.

Время отбора почвенных и растительных проб - август-сентябрь. Масса одного образца почвы 0.7-1.5 кг, масса образов растительности 0.5-0.6 кг – для зерна, около 2.5-5.0 кг для клубней картофеля и 1.0-1.5 кг измельченной зеленой массы люпина.

Полевой опыт 2. Влияние разных видов и сочетаний органических удобрений на поведение радиоцезия в системе почва - растение изучали на базе стационарного многофакторного опыта «Изучение сравнительной эффективности различных систем применения удобрений на песчаной дерново-подзолистой почве», заложенного на Новозыбковской станции в 1997-1999 гг. Агрохимические показатели пахотного слоя почвы перед закладкой опыта: pH $_{KCl}$ – 4.80-6.40; содержание гумуса – 1.33-2.52%; гидролитическая кислотность – 0.70-2.45 мг-экв/100 г; сумма поглощенных оснований – 2.25-11.00 мг-экв/100 г; содержание подвижных P_2O_5 и K_2O – соответственно 30.0-36.0 и 5.1-9.4 мг на 100 г почвы (Драганская, 2002). Плотность загрязнения опытного участка по ^{137}Cs - 312-551 кБк/м^2.

Схема внесения органических удобрений:

1) Контроль

2) Солома озимой ржи, 9.1 т/га

3) Сидерат - зеленая масса редьки масличной, 35 т/га

4) Солома + сидерат.

Фоном вносили два вида навоза КРС – подстилочный и безподстилочный. Доза вносимого подстилочного навоза 80 т/га; бесподстилочного навоза – 100 т/га (по содержанию азота была эквивалентна 80 т/га подстилочного навоза КРС).

В севообороте культуры чередовались следующим образом: 1) картофель; 2) ячмень; 3) сераделла + овес; 4) озимая рожь + редька масличная (пожнивно). В опыте использовали картофель сорта «Темп», ячмень – «Гонор», сераделлу – «Новозыбковская 3587», озимую рожь – «Пуховчанка».

Повторность опыта трехкратная, площадь делянки – 62 $м^2$. Все органические удобрения вносили под первую культуру севооборота. Под три последующие культуры общим фоном вносили минеральные удобрения в виде аммиачной селитры, простого гранулированного суперфосфата и хлористого калия по схеме: N_{90} – под ячмень; $P_{40}K_{90}$ – под сераделлу с овсом и $N_{90}K_{60}$ – под озимую рожь. Минеральные удобрения и навоз вносили весной под перепашку зяби, а солому и сидерат – осенью под зябь.

К концу третьей ротации севооборота (2007 г.) в соответствующих вариантах было внесено на 1 га: 240 т навоза (в эквиваленте подстилочному навозу КРС), 13.6 т соломы озимой ржи и 45 т зеленой массы редьки масличной и минеральных удобрений в количестве $N_{540}P_{120}K_{450}$ д.в. на га.

Почвенные образцы отбирали после уборки соответствующих культур. Масса образца почвы составляла ≈ 1кг, зерна– 0.5-0.7 кг, а клубней картофеля – 2.0-5.0 кг на сырой вес.

Вегетационный опыт. *«Изучение влияния последействия удобрений на трансформацию форм нахождения ^{137}Cs в почве».* Влияние разных видов удобрений и их сочетаний на трансформацию соединений радиоцезия и его элемента-аналога калия изучали в вегетационном опыте. Исследовали также зависимость между соотношением форм нахождения ^{137}Cs и калия в почве и содержанием радионуклида в растении. Для проведения лабораторных испытаний были отобраны образцы пахотного горизонта (глубина 0-20 см) дерново-подзолистой песчаной почвы с делянок многолетнего стационарного опыта (полевой опыт 1) по следующим вариантам: 1) контроль; 2) последействие подстилочного навоза КРС 80 т/га 3) последействие подстилочного навоза КРС 40 т/га + $N_{70}P_{30}K_{60}$; 4) последействие $N_{70}P_{30}K_{60}$.

Масса почвы, отобранной с каждого из вариантов, составила около 20 кг. Предшествующая культура в полевом опыте – картофель. Навоз КРС и вся расчетная доза минеральных удобрений были внесены согласно схеме опыта весной 2007 г. под перепашку зяби.

Почву перед закладкой опыта пропускали через сито d=2 мм и помещали в пластмассовые сосуды с дренажом. Масса почвы в сосуде 4 кг. Влажность почвы поддерживалась на уровне 60% от ПВ. В подготовленную почву высевали семена ячменя сорта «Зазерский-85» в количестве 25 шт. на сосуд. Повторность опыта 4-х кратная.

Модельный опыт. *«Исследование влияния состава почвенного раствора на распределение ^{137}Cs между твердой и жидкой фазой почвы при внесении удобрений».*

Распределение радионуклида между твердой и жидкой фазой почвы, а также качественный и количественный состав почвенного раствора изучали модельном эксперименте при искусственном внесении радионуклида. Почву с делянок (полевой опыт 1), отобранных по аналогичной вегетационному опыту схеме, просевали, равномерно увлажняли до ПВ и вносили раствор хлористого цезия. Вес почвы в сосуде 4 кг, удельная активность по ^{137}Cs – $3.35*10^5$ Бк/к. Для имитации естественных условий в течение 1.5 лет проводилось периодическое увлажнение почвы до 60 % от ПВ и подсушивание.

После инкубации в почву высевали семена ячменя сорта «Зазерский-85». Срок вегетации ячменя - три недели, вес воздушно-сухой почвы в сосуде – 1 кг, число растений в сосуде – 12 шт., повторность опыта 3-х кратная.

В почвенных образцах определяли агрохимические показатели: pH водной и солевой вытяжки (ГОСТ 26483-85) – потенциометрически; гидролитическую кислотность (ГОСТ 26212-91) по методу Каппена; сумму поглощенных оснований (ГОСТ 26487-85) – по Каппену-Гильковицу; подвижные формы фосфора (ГОСТ 26207-91) и обменного калия (ГОСТ 26207-91) определяли в вытяжке Кирсанова: фосфор колориметрически по Дениже, калий – методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии; содержание органического углерода (ГОСТ 26213-91) – колориметрически по методу Тюрина в модификации Никитина.

Формы нахождения ^{137}Cs в почве определяли методом последовательной экстракции, основанном на вытеснении радионуклидов растворами нейтральных солей и кислот различной нормальности (Павлоцкая, 1974). В вытяжках также измеряли содержание обменных катионов Ca, Mg, K методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Концентрацию NH_4^+ измеряли в вытяжке 1M KCl колориметрическим методом (Krom, 1980).

При определении коэффициента распределения (Kd) использовали методику М. Шеппарда (1985). Для выделения почвенного раствора образцы почвы доводили до 60% от ППВ, выдерживали в течение суток в эксикаторе с водой для установления равновесия, затем центрифугировали. В почвенном растворе измеряли также концентрацию катионов Ca, Mg, K методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии, а концентрацию NH_4^+ колориметрически (Krom, 1980).

Измерение удельной активности ^{137}Cs в почве, растительных образцах и почвенных вытяжках проводили гамма-спектрометрческим методом на многоканальном анализаторе IN 1200 (Франция) и Мультирад (Россия) с германиевым детектором GEM-1200 (США). Ошибка измерений составила ±10-12%.

Полученные результаты обработаны с помощью пакета программ Excel 2007 и Statistica 6.0.

Глава 3. Влияние удобрений на показатели подвижности ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве.

Третья глава посвящена изучению влияния длительного применения разных систем удобрения на агрохимические свойства дерново-подзолистой песчаной почвы и состояние в ней радиоцезия через 21-22 года после аварии на ЧАЭС.

3.1 Влияние удобрений на показатели почвенного плодородия. Согласно полученным в 2007-2008 гг. данным значения pH_{H2O} почвы с делянок полевого опыта 1 в среднем повысились на 0.10 единицу pH по сравнению с исходным значением 1993 г., что связано с регулярным известкованием и внесением удобрений (табл. 2). При возрастании дозы NPK кислотность почвы увеличивается, а в варианте с тройной

дозой полного минерального удобрения значения pH $_{H2O}$ и гидролитической кислотности приближаются к исходным значениям (до закладки опыта).

Таблица 2.

Влияние разных систем удобрения на агрохимические свойства дерново-подзолистой песчаной почвы

Вариант/система удобрения		pH $_{H2O}$	Гумус	H $_{гидр.}$	S	ЕКО	P_2O_5	K_2O
			%	мг-экв/100 г			мг /100 г	
Контроль		6.68	1.78	0.78	7.8	8.5	44.3	2.9
Органическая		6.70	2.19	0.66	9.9	8.5	57.9	8.9
Органоминеральная		6.62	1.82	0.75	6.7	7.5	55.6	6.6
Минеральная	1NPK	6.75	2.20	0.69	11.2	11.9	59.2	5.6
	2NPK	6.58	2.15	0.83	7.7	8.5	60.1	7.1
	3NPK	6.49	1.86	0.86	7.5	8.3	59.8	9.0
$НСР_{0,5}$		0.07	0.09	0.04	0.2	0.5	4.1	0.2

Изучение влияния разных видов органических удобрений на кислотно-основные свойства почвы показало, что внесение соломы, сидерата и их сочетаний как на фоне навоза так и без него снижает гидролитическую кислотность и способствует увеличению pH почвы. Причем солома и сидерат в большей степени влияют на эти показатели, чем навоз. Если внесение навоза повысило pH с 6.0 до 6.3, то запашка соломы и сидерата способствовали снижению кислотности почвы до pH 6.6 (табл. 3).

Влияние органической и минеральной систем удобрения на содержание органического вещества в почве было сопоставимо. Если от применения органической системы удобрения содержание гумуса возросло по сравнению с контролем на 0.32%, то от внесения 1 NPK– на 0.30%. Возрастание дозы минеральных удобрений не вызывало дальнейшего увеличения содержания гумуса в почве.

Запашка соломы и внесение навоза раздельно в равной степени повышают накопление гумуса в почве на 0.2-0.4%, сидерат на 1.36%, а совместное их применение - на 1.8% по сравнению с контролем. При сочетании соломы и бесподстилочного навоза содержание гумуса в почве увеличилось на 0.3% по сравнению с безнавозным фоном, а внесение этого вида навоза в вариантах «сидерат» и «сидерат + солома» привело к некоторому снижению содержания гумуса по сравнению с вариантом без навоза. Внесение подстилочного навоза способствовало накоплению гумуса в почве при сочетании с соломой, сидератом, как отдельно так при их совместной запашке.

Применение сидерата как отдельно, так и в сочетании с соломой существенно улучшает катионнообменные свойства исследуемой почвы. Так, величина ЕКО при внесении сидерата возрастает в 2 раза, совместно с соломой – в 1.6 раза; а при его внесении на фоне подстилочного навоза – в 2.5 раза.

Согласно полученным данным на опытном участке, где изучалось действие разных систем удобрения (полевой опыт 1), содержание подвижного фосфора в почве достигало значений порядка 60-70 мг/100 г, что в несколько раз превышает оптимум для питания растений. При этом содержание обменного калия в почве контрольного участка составляло 2.2-3.9 мг/кг, что говорит об очень низкой обеспеченности растений данным элементом питания. Применение минеральных, органических удобрений и их сочетаний способствовало увеличению содержания обменного K_2O в 2-3.5 раза. Однако дисбаланс в соотношении между фосфором и калием в почве был

характерен для всех вариантов опыта, что может негативно влиять на продуктивность сельскохозяйственных культур (Пахненко, 2010).

Согласно данным полевого опыта 2 содержание подвижного P_2O_5 на контроле было ниже по сравнению с участком полевого опыта 1 и составляло в среднем 35.3 мг/ 100 г.

Таблица 3.

Влияние органических удобрений на основные показатели плодородия дерново-подзолистой песчаной почвы

Вариант опыта	pH $_{H2O}$	Гумус, %	ЕКО, мг-экв/100 г почвы	P_2O_5	K_2O
				мг/100 г	
Без внесения навоза					
Контроль	6.03	2.21	6.9	35.3	12.4
Солома	6.02	2.44	7.6	32.8	12.1
Сидерат	6.42	3.57	11.5	37.8	10.7
Солома + сидерат	6.61	4.01	13.5	35.3	10.9
Бесподстилочный навоз					
Контроль	6.10	2.44	7.4	36.5	15.2
Солома	6.24	2.74	7.0	37.5	15.8
Сидерат	6.60	3.62	11.5	43.0	16.7
Солома + сидерат	6.40	3.14	7.8	37.5	17.0
Подстилочный навоз					
Контроль	6.33	2.61	8.3	40.0	13.5
Солома	6.00	2.72	8.0	34.0	16.2
Сидерат	6.32	4.01	11.9	34.0	13.1
Солома + сидерат	6.60	4.42	15.5	38.0	13.2
$НСР_{0,5}$	0.31	0.08	0.5	4.5	1.4

Наиболее значительное увеличение содержания подвижного фосфора в почве (4.7 мг/ 100 г) наблюдается в варианте с внесением подстилочного навоза. Применение сидерата, соломы и их сочетаний по фону навоза уменьшает данный эффект, хотя содержание подвижного фосфора здесь несколько выше, чем в этих же вариантах на фоне без навоза. Внесение соломы отдельно способствует незначительному уменьшению содержания подвижного P_2O_5 – 2.5 мг/100 г по сравнению с контролем, а сидерата - увеличению на такую же величину; при этом совместное применение соломы и зеленого удобрения не вызывает изменения концентрации подвижного фосфора по сравнению с контролем.

Совместное внесение сидерата и соломы по фону бесподстилочного навоза обеспечило наиболее высокий показатель содержания обменного калия в почве - 17.0 мг/100 г K_2O. Однако без навоза этот прием был менее эффективен, что скорее всего связано с выносом калия вегетирующими растениями.

3.2 Формы нахождения ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве при разных системах удобрения. Радиоцезий присутствует в почве в разных формах: обменной, подвижной, прочносвязанной и фиксированной, которые различаются по доступности растениям. Минеральные и органические удобрения, изменяя физико-химические характеристики почвы, оказывают значительное влияние на состояние ^{137}Cs в почве (Ратников, 2002)

Изучение форм нахождения радиоцезия в почве показало, что доля обменного ^{137}Cs (вытяжка 1н. CH_3COONH_4) составила в среднем 9.1%, подвижного радионуклида (вытяжка 1н.HCl) оказалось около 7%, а прочносвязанного (вытяжка 3н. HCl) – 17.5%. Основная часть радиоцезия – 66.4% находилась в фиксированном состоянии.

Внесение минеральных удобрений в дозе 1NPK и 2NPK под картофель, овес и люпин обеспечивает достоверное уменьшение содержания ^{137}Cs в обменной форме ≈ 3% от общего содержания относительно контроля. Применение повышенных доз минеральных удобрений не вызвало заметных изменений содержания радионуклида в обменной форме (рис. 1).

Содержание радионуклида в подвижной форме изменялось в интервале от 5.5% до 8.8% от общего содержания в почве. Применение минеральных удобрений в дозах 1NPK и 2NPK незначительно снижало (около 1%) долю подвижного ^{137}Cs в почве под всеми культурами севооборота.

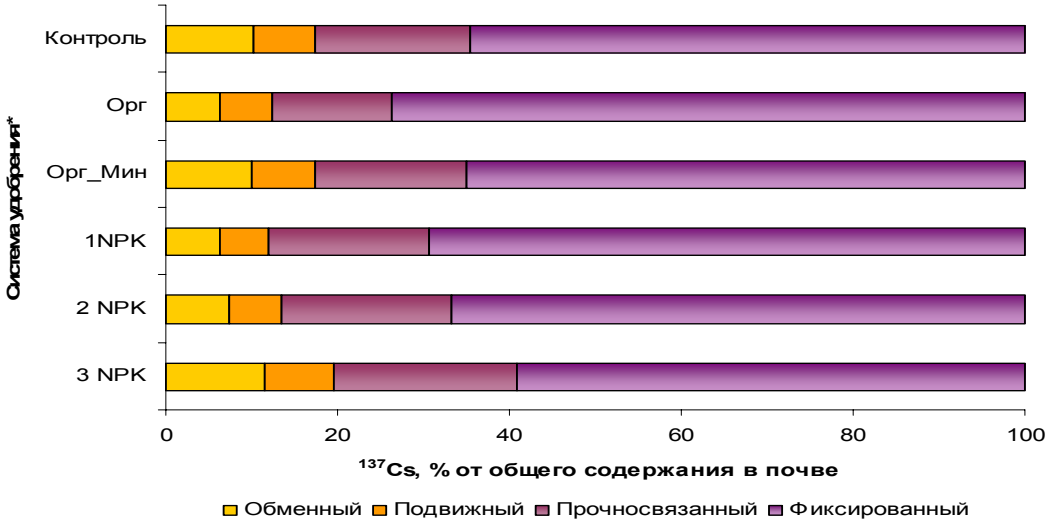

Рис.1 - Влияние систем удобрения на состояние ^{137}Cs в почве.

(в почве под овсом)*

Органические удобрения обладают последействием на содержание обменного и подвижного ^{137}Cs в почве. В первый год после внесения навоза доля обменного радионуклида снизилась в 2 раза по сравнению с контролем, на второй - снижение составило 1.6 раза, третий - 1.2 раза (рис. 2). В почве под завершающей культурой севооборота наблюдалось незначительное повышение доли обменной формы ^{137}Cs (1.8% от общего содержания).

Применение органоминеральной системы удобрения позволило снизить содержание ^{137}Cs в обменной форме в почве под картофелем и люпином на 3.7% и 2.2% соответственно, в почве под зерновыми культурами доля обменного радиоцезия сохранялась на уровне контроля.

При изучении сравнительного действия разных видов органических удобрений и их сочетаний на соотношение форм нахождения радиоцезия замечено, что в ***1-й год после внесения*** органические удобрения и их сочетания оказали неоднозначное влияние на подвижность ^{137}Cs в почве. Доля обменного радионуклида уменьшилась на ≈3% при запашке соломы в чистом виде, а также при внесении сидерата на фоне подстилочного навоза.

Применение соломы и сидерата как раздельно, так и совместно привело к существенному снижению содержания радиоцезия в фиксированном состоянии - на 8.5-12.5% по сравнению с контролем.
Вместе с этим в варианте с совместным внесением соломы и сидерата наблюдается увеличение содержания радионуклида в прочносвязанной форме на 9%.

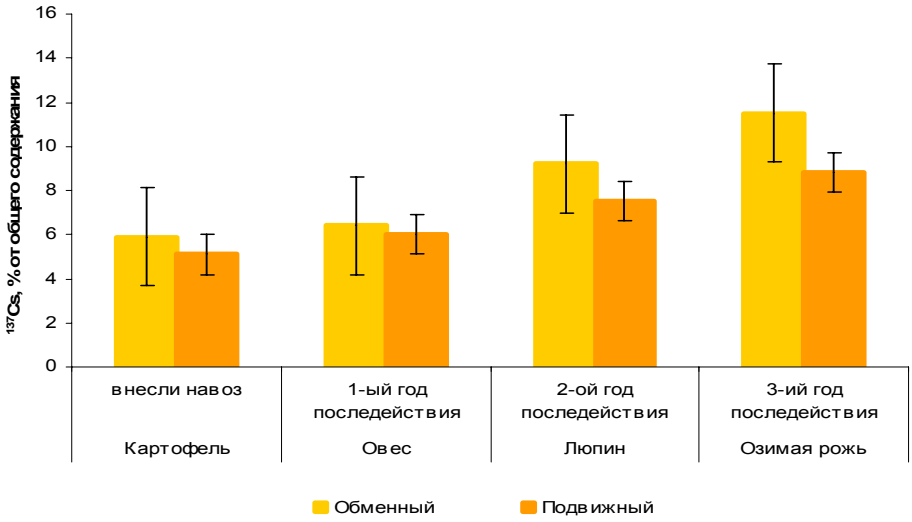

Рис. 2 - Влияние органической системы удобрения на подвижность ^{137}Cs в почве в действии и последействии.

Наибольший эффект по снижению подвижности ^{137}Cs в почве достигается на ***2-ой год после внесения удобрений***, причем данная закономерность прослеживается как на фоне навоза, так и без него. Наиболее заметно (на 5.1%) доля обменного радионуклида уменьшилась при внесении сидерата на фоне подстилочного навоза КРС. При этом содержание подвижного радиоцезия снизилось на 3.6%, а фиксированного - возросло на 13.8% по сравнению с контролем. Применение зеленого удобрения в чистом виде снижало содержание обменного ^{137}Cs на 3.4%, подвижного – на 2.0%, увеличивая долю фиксированного радионуклида на 8.5%. Содержание радиоцезия в обменной форме при внесении соломы снижалось на 3.0 %, на фоне подстилочного навоза нарастало позитивное влияние этого приема. Совместное применение соломы и сидерата вызывало снижение количества обменного радиоцезия в почве на 3.5%, а доля фиксированного ^{137}Cs увеличилась на 9.2% относительно контроля. Подстилочный навоз в качестве фона при совместной и раздельной запашке соломы и сидерата оказался эффективнее в отношении снижения подвижности ^{137}Cs в почве, чем бесподстилочный навоз (рис. 3).

Позитивное влияние органических удобрений и их сочетаний на подвижность радиоцезия в почве ослабевает к ***4-му году после внесения***. Если на 2-ой год после внесения органических удобрений содержание ^{137}Cs в обменной форме было в среднем было меньше 10%, а в фиксированной – около 70%; то к 4-му году доля обменного радионуклида составила 12-15%, фиксированного – 55-60%.

Однако замечено, что подстилочный навоз обеспечивает пролонгированное позитивное действие на снижение содержания обменной и подвижной формы радионуклида в почве при запашке сидерата как отдельно, так и совместно с соломой. Доля обменного ^{137}Cs под их влиянием снижается и на 4-ый год после внесения в среднем на 2.5%, а доля радиоцезия в фиксированном состоянии возрастает на 12.7% по сравнению с контролем.

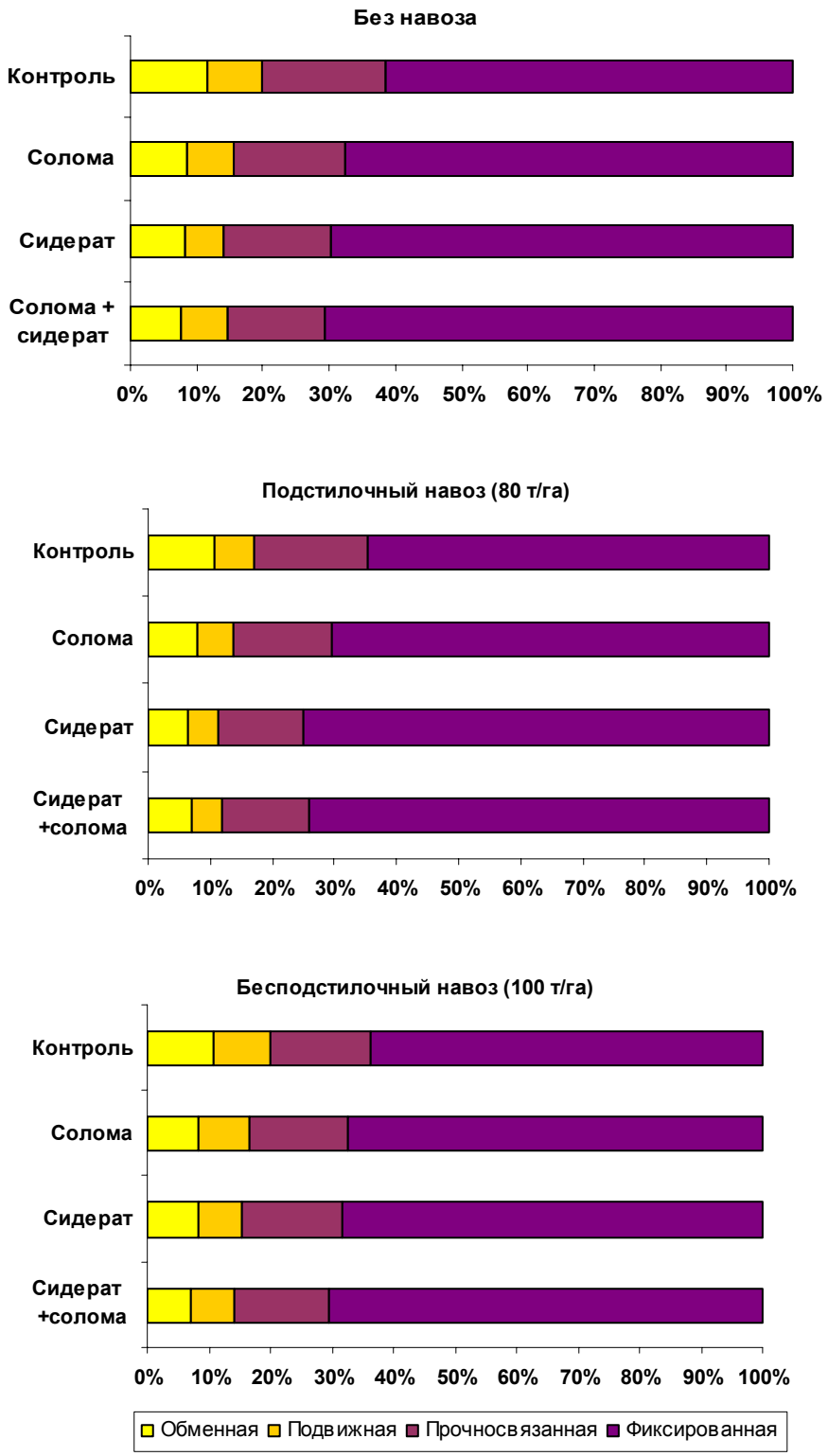

Рис. 3 - Влияние органических удобрений и их сочетаний* на состояние ^{137}Cs в почве.

(на следующий год после внесения)

3.3 Изменение подвижности ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве при длительном внесении органических и минеральных удобрений. Полученные данные свидетельствуют о том, что процесс иммобилизации ^{137}Cs в радиоактивно загрязненной дерново-подзолистой песчаной почве, вовлеченной в сельскохозяйственное использование, продолжается через 20 лет после аварии на ЧАЭС. В период с 2001 по 2007 год подвижность ^{137}Cs в почве снизилась более заметно при использовании органической системы удобрения, чем по другим вариантам опыта. При этом доля обменной и подвижной формы радионуклида достоверно снизилась (дополнительно относительно контроля, т.е. только за счет удобрений) на 5.5%, а доля фиксированной формы возросла на 8.8% (табл. 4).

Таблица 4.

Влияние разных систем удобрения на подвижность радиоцезия в многолетнем опыте (2001-2007 гг.)

Вариант/система удобрения	^{137}Cs в вытяжках из почвы, % от общего содержания							
	Обменная		Подвижная		Прочносвязанная		Фиксированная	
	2001 г	2007 г	2001 г	2007 г	2001 г	2007 г	2001 г	2007 г
Контроль	15.6	10.2	9.5	7.2	24.3	20.0	50.6	62.6
Органическая	14.0	6.4	11.6	6.0	24.4	16.5	50.0	70.6
Органоминеральная	15.5	10.0	11.3	8.0	28.0	16.7	45.4	65.3
1 NPK	13.5	9.1	9.7	8.1	27.6	16.8	49.2	66.0
2 NPK	10.6	7.4	10.5	6.1	24.4	19.8	54.5	66.7
3 NPK	13.0	11.6	13.5	7.9	22.4	21.4	51.2	59.1
$НСР_{0,5}$	1.5	0.9	0.8	0.4	1.9	1.3	2.8	3.1

С возрастанием доз минеральных удобрений, их влияние на подвижность ^{137}Cs в исследуемой почве снижается. Применение одинарной дозы минеральных удобрений увеличивало долю фиксированного радионуклида на 4.8 %, при этом доля прочносвязанного ^{137}Cs заметно снизилась – на 6.5%. Содержание радиоцезия в обменной и подвижной форме практически не изменялось. Применение тройной дозы NPK – за 6 лет снижало долю фиксированного ^{137}Cs на 4.1%, при этом доля обменного радионуклида возросла относительно контроля на такую же величину. Следовательно, внесение повышенных доз минеральных удобрений может замедлять процесс фиксации ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве.

3.4 Состав почвенного раствора и его влияние на подвижность ^{137}Cs в почве. Известно, что возрастание концентрации в почвенном растворе таких катионов, как K^+ и Ca^{2+} способствует снижению подвижности ^{137}Cs в почве и в системе почва-растение. При этом увеличение содержания NH_4^+, напротив, может вызвать десорбцию радиоцезия с поверхности минералов и переход радионуклида в почвенный раствор (Smolders et al., 1996; Waegeneers et al., Анисимов, 2002).

Анализ данных вегетационного и лабораторного опыта показал, что внесение удобрений влияет на состав почвенного раствора, изменяя содержание катионов калия, кальция и аммония, а также их соотношение в почвенном растворе. Концентрация K^+ и Ca^{2+} в почвенном растворе заметно увеличилась в варианте с

применением органических удобрений и составила 0.54 mM для калия и 7.0 mM - для кальция, при значении на контроле 0.12 mM и 3,5 mM соответственно.

Соотношение калия и аммония в почвенном растворе отражает не только особенности их адсорбции ППК, но и влияет на биологическую подвижность ^{137}Cs. Расширение соотношения K^+ к NH_4^+ за счет возрастания концентрации аммония, может привести к увеличению доступности радиоцезия для растений, и напротив увеличение содержания K^+ способствует снижению подвижности ^{137}Cs (Тулина, 2000; Суслина, 2004). Согласно полученным данным, соотношение K^+ к NH_4^+ в почвенном растворе в контроле составило ≈ 2:1, при органической системе удобрений – 3:1, при совместном применении минеральных и органических удобрений 4:1, а при одностороннем внесении минеральных удобрений - 1.5:1.

Для оценки подвижности ^{137}Cs в почве нами были использованы такие параметры, как доля его обменной и подвижной формы, коэффициент распределения ^{137}Cs между твердой и жидкой фазой почвы - Kd, выраженный соотношением удельной активности радионуклида в твердой фазе (Бк/кг) к активности радионуклида в почвенном растворе (Бк/л). Применение минеральной системы удобрения увеличивало Kd в 1.9 раза, органической – в 2.4 раза, а их совместное внесение обеспечило повышение значений данного показателя в 3.7 раза относительно контроля. Доля обменного и подвижного ^{137}Cs в почве снижалась суммарно на 11.2-11.4% в варианте с органической и органоминеральной системой удобрения; а в случае с минеральной - на 2.3% (табл. 5).

Таблица 5.

Содержание, соотношение катионов в почвенном растворе и их влияние на подвижность ^{137}Cs в почве

Вариант	Содержание и соотношение катионов в почвенном растворе				Параметры подвижности ^{137}Cs в почве		
	$[K^+]$	$[NH_4^+]$	$[Ca^{2+}]$	$[K^+]/[NH_4^+]$	Обменный	Подвижный	Kd
	mM (ммоль/л)				% от общего содержания		
Контроль	0.12	0.05	3.5	2:1	18.1	16.7	441
Последействие навоза 80 т/га	0.54	0.16	7.0	3:1	13.0	10.6	1040
Последействие навоза 40 т/га + NPK	0.48	0.11	6.8	4:1	14.1	9.4	1623
NPK	0.32	0.21	5.4	1.5:1	16.4	16.1	844
$НСР_{0.5}$	0.08	0.04	0.3	-	0.03	0.04	36

Корреляционный анализ показал достоверную зависимость между параметрами подвижности ^{137}Cs в почве и содержанием катионов K^+ и Ca^{2+}. При увеличении концентрации калия и кальция в почвенном растворе соответственно снижается доля обменного и подвижного радионуклида, а его сорбция твердой частью почвы увеличивается. Такой эффект может быть связан с явлением межслоевого коллапса кристаллической решетки глинистого минерала при резком увеличении концентрации K^+ и Ca^{2+} в почвенном растворе после внесения удобрений. Таким образом, увеличение концентрации K^+ и Ca^{2+} в почвенном растворе, вызванное применением

удобрений, приводит к снижению подвижности ^{137}Cs в исследуемой почве. Исходя из полученных данных, органическая и органоминеральная система удобрений способствуют снижению подвижности ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве в большей степени, чем минеральная.

3.5 Влияние разных факторов на подвижность ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве при внесении удобрений. По современными представлениям, влияние минеральных удобрений на состояние ^{137}Cs в почве обусловлено действием K^+ и NH_4^+, которые являются основными катионами ППК, конкурирующими с ^{137}Cs за места селективной сорбции (Zhu, Smoldes, 2000; Анисимов и др, 2002; Суслина, 2004). При низкой обеспеченности почвы калием повышение концентрации NH_4^+ в почвенном растворе приводит к увеличению количества обменного ^{137}Cs. Содержание обменного калия в исследуемой почве было невысоким, поэтому внесение повышенных доз минеральных удобрений, а в частности азотных, могло привести к увеличению подвижности радиоцезия в почве, а также замедлить процесс его «старения».

В вариантах с применением органической, органоминеральной систем удобрения, а также при внесении оптимальных доз минеральных туков (2 NPK), количество элементов питания (азота, фосфора и калия) было эквивалентным. Однако данные системы удобрения неодинаково влияют на соотношение форм нахождения ^{137}Cs и процесс закрепления радионуклида в почве, что связано с разными механизмами действия органических и минеральных удобрений. Анализ зависимости между такими показателями как: доля обменной и подвижной формы ^{137}Cs в почве и различными почвенными характеристиками показал, что существует достоверная корреляционная связь между долей обменного радионуклида и содержанием обменных катионов калия и кальция – $r = -0.85$ и $r = -0.94$ соответственно. Такая зависимость не была выявлена для подвижной формы ^{137}Cs. Количество радиоцезия в обменном состоянии коррелировало с содержанием гумуса и емкостью катионного обмена.

Снижение биологической доступности ^{137}Cs при внесении органических удобрений обусловлено как изменением физико-химических характеристик почвы, так и увеличением содержания гумуса. Корреляционный анализ выявил обратную зависимость между содержанием гумуса и обменной формы ^{137}Cs в почве, коэффициент корреляции – 0.81, что позволяет предположить возможность образования комплексных соединений радионуклида с органическими и органо-минеральными веществами почвы, которые значимо влияют на подвижность ^{137}Cs в почве и системе почва-растение (Агапкина, 2002; Илахун, Карпухин, 2008).

Глава 4. Оценка эффективности систем удобрения в условиях радиоактивного загрязнения дерново-подзолистой песчаной почвы.

При оценке эффективности применяемых систем удобрения в условиях радиоактивного загрязнения был использован комплексный подход, учитывающий: а) состояние радионуклида в почве и потенциальную доступность его растениям; б) сохранение и увеличение почвенного плодородия; в) обеспечение оптимальных прибавок урожая сельскохозяйственных культур; г) производство сельскохозяйственной продукции, отвечающей установленным радиологическим нормативам.

4.1 Влияние удобрений на урожай сельскохозяйственных культур и переход ^{137}Cs из почвы в растения. Применение органических удобрений в условиях полевого опыта № 1 повысило урожай клубней картофеля по сравнению с контролем на 50%, зерновых культур – на 28-34%, зеленой массы люпина – на 10%. Совместное внесение навоза и минеральных удобрений обеспечило прибавку урожая клубней картофеля на 76%, зерна овса и озимой ржи – около 130%, зеленой массы люпина – 14% (табл. 6).

Таблица 6.

Влияние системы удобрения на урожай сельскохозяйственных культур и переход ^{137}Cs из почвы в товарную часть урожая, КП=n*10^{-2}

Вариант/система удобрения	Картофель (клубни)		Овес (зерно)		Люпин (зеленая масса)		Озимая рожь (зерно)	
	Урожай (ц/га)	КП ^{137}Cs	Урожай (ц/га)	КП ^{137}Cs	Урожай (ц/га)	КП ^{137}Cs	Урожай (ц/га)	КП ^{137}Cs
Контроль	100	24.9	8.0	11.2	103	126.0	7.1	12.8
Органическая	150	4.6	10.7	7.5	113	94.7	9.1	14.8
Органоминеральная	176	5.2	18.3	7.9	117	48.9	16.4	11.9
1 NPK	138	5.7	16.5	5.6	121	36.2	15.2	7.6
2 NPK	177	3.8	18.6	5.3	127	49.4	20.6	9.3
3 NPK	178	4.0	17.2	7.2	147	69.8	17.6	8.6
$НСР_{0,5}$	9.2	0.4	1.0	0.5	9.3	3.1	1.1	0.8

Влияние органической системы удобрений на переход ^{137}Cs в урожай сельскохозяйственных культур характеризуется четко выраженной динамикой. Внесение органических удобрений существенно снижает переход ^{137}Cs из почвы в растения в первые два года после внесения, в дальнейшем переход радионуклида из почвы в растения увеличивается относительно контроля (рис. 4).

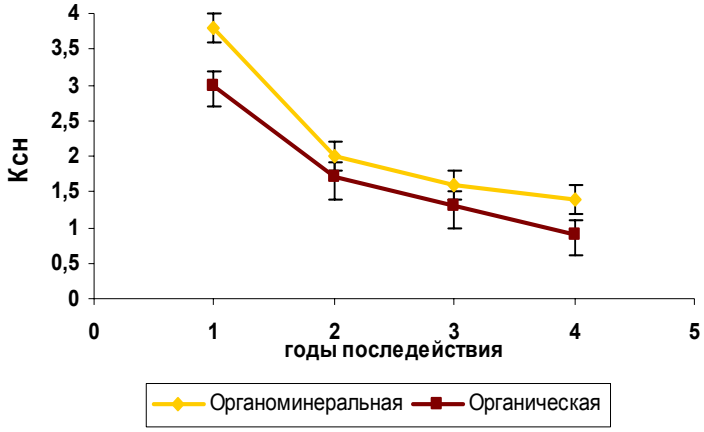

Рис. 4 - Кратность снижения поступления ^{137}Cs в сельскохозяйственную продукцию в зависимости от применения органической и органоминеральной систем удобрения

Максимальная кратность снижения (Ксн) накопления ^{137}Cs, выраженная отношением КП на контроле к КП в варианте, отмечается в первый год после внесения навоза Ксн = 3.0, во второй год этот показатель ≈1.6, в третий год ≈1.3, а на четвертый оказывается меньше единицы. По сравнению с органической, органоминеральная система удобрений дольше сохраняла позитивное влияние на переход радиоцезия из почвы в растения. Так через 4 года после внесения навоза Ксн остается выше единицы, что, в данном случае, объясняется действием минеральных удобрений.

Эффективность органических удобрений в отношении уменьшения накопления ^{137}Cs растениями снижается с увеличением доли обменного радионуклида в почве. Найденные закономерности подтверждают возможность образования соединений радионуклида с органическим веществом удобрений. Такие соединения достаточно прочно закрепляют ^{137}Cs, снижая его переход из почвы в растения. Со временем Cs-органические соединения разрушаются, вызывая увеличение доли обменного радионуклида в почве и его накопление в растениях.

Оптимальным в отношении снижения содержания ^{137}Cs и увеличения урожая сельскохозяйственных культур было применение минеральных удобрений в умеренных дозах (2 NPK). При такой системе удобрения продуктивность картофеля увеличилась на 77%, овса – на 133%, люпина - на 23%, озимой ржи на 190%; при этом накопление ^{137}Cs снижалось в среднем в 6.5, 2.1, 2.6 и 1.4 раза соответственно, по сравнению с контролем.

Эффект «разбавления», проявляющийся в снижении коэффициента перехода ^{137}Cs при увеличении урожая, в данном случае в большей степени был выражен для картофеля (r^2=0.68), несколько слабее - для зерновых культур (r^2=0.54) и практически отсутствует для люпина (r^2=0.28).

В 2008 году содержание ^{137}Cs в клубнях картофеля и в зерне овса в целом по опыту было выше, чем в 2001 и 2007 гг. В 2001 и 2007 гг. зерно овса практически во всех вариантах соответствовало нормативам (СанПиН 2.3.2.1078-01), а в 2008 году экологически безопасная продукция была получена в варианте с органоминеральной системой удобрения и при повышенных дозах минеральных удобрений (табл. 7).

Таблица 7.

Содержание ^{137}Cs в продукции, Бк/кг (2001,2007,2008гг.)

Вариант/год		Контроль	Органическая	Органо-минеральная	1NPK	2NPK	3NPK
Картофель (клубни)	2001	68 ± 6	32 ± 3	31 ± 3	23 ± 2	18 ± 2	23 ± 2
	2007	84 ± 8	34 ± 3	16 ± 2	18 ± 2	12 ± 2	13 ± 2
	2008	131 ± 10	49 ± 4	43 ± 4	54 ± 5	26 ± 3	39 ± 4
Овес (зерно)	2001	71 ± 7	34 ± 3	31 ± 3	45 ± 4	88 ± 8	54 ± 5
	2007	30 ± 3	35 ± 3	29 ± 3	24 ± 2	23 ± 2	26 ± 2
	2008	159 ± 16	92 ± 9	62 ± 6	84 ± 8	103 ± 9	64 ± 6
Люпин (зеленая масса)	2001	237 ± 18	131 ± 10	103 ± 9	133 ± 10	96 ± 8	92 ± 9
	2007	53 ± 5	34 ± 3	39 ± 4	45 ± 4	41 ± 4	46 ± 4
	2008	55 ± 5	38 ± 3	31 ± 3	38 ± 3	42 ± 4	37 ± 4
Озимая рожь (зерно)	2001	113 ± 9	48 ± 4	45 ± 5	41 ± 4	37 ± 3	37 ± 4
	2007	50 ± 5	53 ± 5	43 ± 5	35 ± 3	38 ± 3	34 ± 3
	2008	40 ± 4	35 ± 3	24 ± 2	22 ± 2	22 ± 2	21 ± 2
СанПиН 2.3.2.1078-01: для картофеля – 120 Бк/кг, для зерновых – 70 Бк/кг; ВП 13.5.13106-01 для кормов – 100 Бк/кг. Красным цветом выделены значения, превышающие установленный норматив							

Средняя удельная активность ^{137}Cs в зеленой массе люпина и зерне озимой ржи с 2001 г. снизилась по всем вариантам, включая контроль. Эффект удобрений по снижению накопления ^{137}Cs в клубнях картофеля проявился сильнее всего в 2007 г., в зерне овса - в 2008, а для остальных культур снижался во времени. Таким образом, для люпина и озимой ржи основной вклад в снижение биологической подвижности радиоцезия внесли процессы закрепления радионуклида в почве. Накопление ^{137}Cs картофелем и овсом в большей степени зависело от гидротермических условий

вегетационного периода. Так, засуха в августе 2008 г. снижала урожай овса и картофеля и при этом повышалось содержание радионуклида на единицу биомассы. В меньшей степени неблагоприятные условия отразились на озимой ржи и люпине. Очевидно, что на момент начала засухи в первой декаде августа урожай озимой ржи и зеленой массы люпина был уже сформирован, а неблагоприятные условия пришлись на период уборки.

В условиях полевого опыта 2 применение соломы в сочетании с сидератом по фону бесподстилочного навоза увеличило урожай клубней картофеля на 93%, зерна ячменя на 100%, а озимой ржи – на 53% по сравнению с контролем; содержание ^{137}Cs в продукции снизилось в 3.0; 2.4 и 1.6 раза соответственно (табл. 8).

Таблица 8.

Влияние разных видов органических удобрений и их сочетаний на урожай сельскохозяйственных культур и коэффициент перехода ^{137}Cs в товарную часть урожая, КП = n*10^{-2}

Вариант	Фон	Картофель (клубни)		Ячмень (зерно)		Озимая рожь (зерно)	
		Урожай (ц/га)	КП ^{137}Cs	Урожай (ц/га)	КП ^{137}Cs	Урожай (ц/га)	КП ^{137}Cs
Контроль	без навоза	59.0	20.5	13.0	9.0	23.6	21.5
Солома		72.0	10.7	15.0	6.3	26.3	15.6
Сидерат		90.0	9.5	20.4	9.3	24.9	11.3
Солома+сидерат		96.0	6.1	18.9	6.7	32.0	15.5
Контроль	Подстилочный навоз	79.0	7.2	19.6	5.9	25.1	20.3
Солома		78.0	7.4	20.1	4.7	34.1	14.0
Сидерат		106.0	5.3	25.0	5.5	29.8	11.9
Солома+сидерат		112.0	8.3	24.0	4.9	39.5	13.7
Контроль	Бесподстилочный навоз	72.0	11.6	20.5	6.4	26.5	20.2
Солома		93.0	6.2	23.4	3.8	35.7	13.1
Сидерат		114.0	6.8	26.0	4.5	36.1	13.6
Солома+сидерат		113.0	7.1	14.1	5.1	36.1	15.0
$НСР_{0,5}$		4.3	0.6	1.2	0.4	1.9	1.1

Запашка соломы на удобрение обеспечивает прибавку урожая клубней картофеля на 22% по сравнению с контрольным участком, зерна ячменя – на 15%, зерна озимой ржи – на 11%. Внесение зеленого удобрения оказалось более эффективным в отношении картофеля и ячменя, их продуктивность возросла на 53 и 57% соответственно. На третий год последействия существенный положительный эффект сохраняется только в случае совместного применения соломы и сидерата.

Внесение навоза усиливало положительный эффект от соломы, сидерата и их сочетания. Солома на фоне подстилочного навоза обеспечивала дополнительное увеличение урожая клубней картофеля на 10%, зерна ячменя – на 40%, зерна озимой ржи – на 33% по сравнению с фоном без навоза.

Запашка зеленого удобрения на фоне бесподстилочного навоза привела к увеличению продуктивности картофеля на 39%, озимой ржи – на 47% по сравнению с вариантом без внесения навоза. Сравнительный анализ показал, что внесение в почву подстилочного навоза обеспечивает более высокий уровень продуктивности культур севооборота и заметно больше снижает КП ^{137}Cs из почвы в растения, чем внесение бесподстилочного навоза.

Влияние большинства видов органических удобрений на снижение накопления ^{137}Cs в растениях ослабевает со временем. Максимальное значение Ксн отмечается в первый год применения зеленого удобрения отдельно - 2.47; в сочетании с соломой – 2.16. На второй год после внесения эффект от большинства видов органических удобрений снижается или отсутствует - в случае с внесением сидерата на фоне подстилочного навоза, где (Ксн≈1), а без навоза наблюдается даже обратный эффект - Ксн<1. Наиболее выраженным и пролонгированным действием обладала солома на фоне бесподстилочного навоза, на второй год после внесения величина Ксн составила 2.37, а на третий год последействия – 1.28 (рис. 5).

Внесение разных видов органических удобрений и их сочетаний способствовало получению продукции, отвечающей санитарным нормам. Зерно озимой ржи, полученное в 2007 г., соответствово нормативам в большем числе вариантов, чем в 2001. Наиболее устойчивый эффект по снижению содержания ^{137}Cs в зерне озимой ржи был получен при совместном применении соломы и сидерата на фоне подстилочного навоза (табл. 9).

Таблица 9.

Влияние разных видов органических удобрений и их сочетаний на содержание ^{137}Cs в зерне озимой ржи, Бк/кг (2001, 2007 гг.)

Вариант	2001 год			2007 год		
	Без навоза	Подстилочный навоз	Бесподстилочный навоз	Без навоза	Подстилочный навоз	Бесподстилочный навоз
Контроль	78 ± 6	72 ± 7	84 ± 8	84 ± 8	95 ± 9	77 ± 6
Солома	98 ± 8	73 ± 5	65 ± 4	84± 7	78 ± 7	79 ± 7
Сидерат	82 ±7	76 ± 6	88 ± 8	66 ± 6	79 ± 7	67 ± 6
Сидерат +солома	80 ± 6	64 ± 4	76 ± 6	66 ± 6	61 ± 6	65 ± 5
СанПиН 2.3.2.1078-01: для зерновых 70 Бк/кг. Красным цветом выделены значения, превышающие установленный норматив						

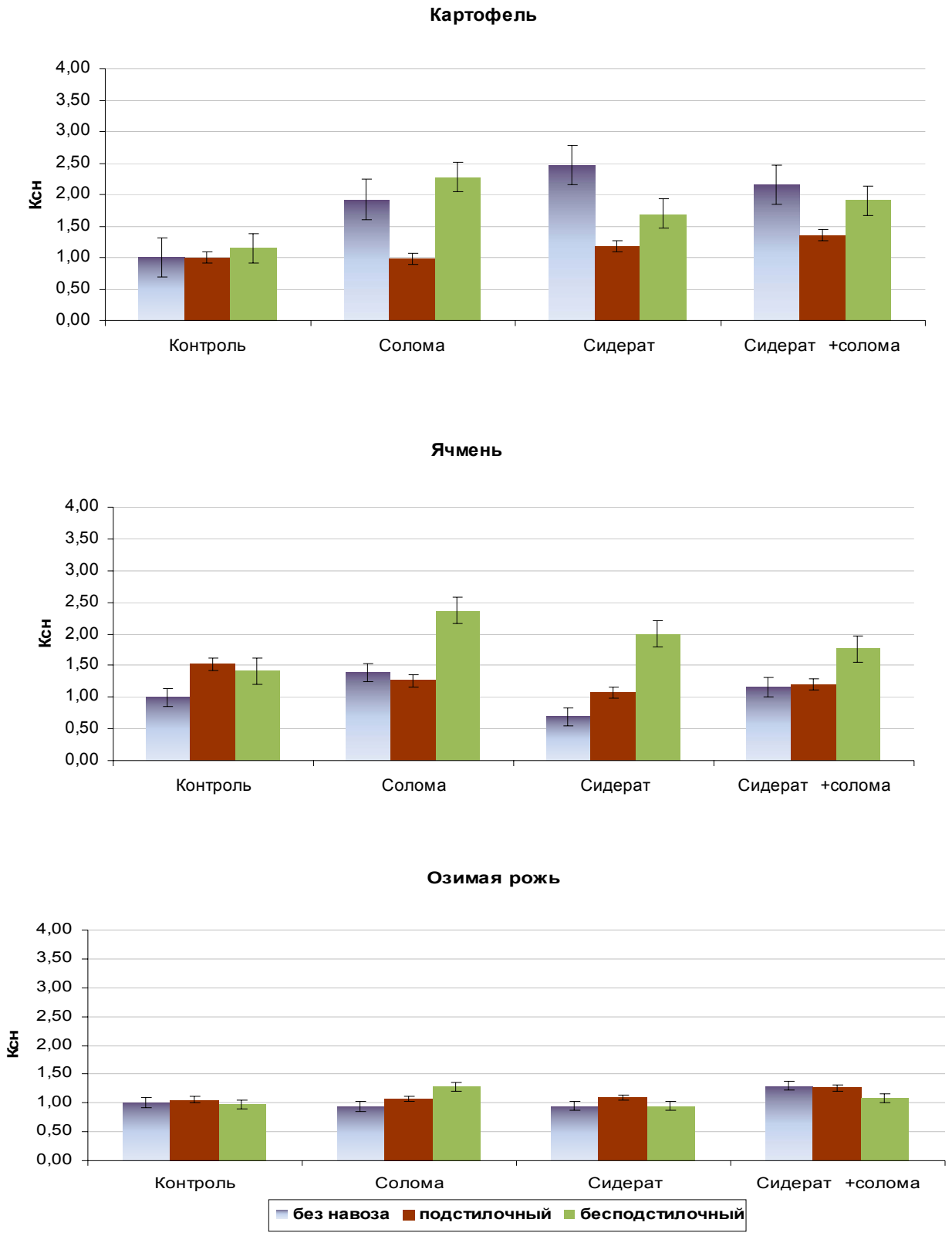

Рис. 5 - Кратность снижения поступления ^{137}Cs в сельскохозяйственную продукцию от применения соломы, сидерата и их сочетания в зависимости от внесения подстилочного и бесподстилочного навоза.

4.2 Оптимальные параметры плодородия почвы для получения нормативно чистой продукции растениеводства. Анализ полученных данных показал, что значимое влияние на КП радиоцезия в большинство культур оказывают такие параметры почвенного плодородия как: содержание обменного калия, подвижного фосфора и гумуса. Воздействие тех или иных агрохимических показателей на переход ^{137}Cs из почвы в разные культуры различалась. Так, обеспеченность элементами питания воздействовала на накопление ^{137}Cs всех культур, колебания значений гидролитической кислотности отразились на содержании радиоцезия в клубнях картофеля, а на переход радионуклида в зерно овса и зеленую массу люпина дополнительно повлияло содержание гумуса. В общем случае по усилению своего влияния на переход радиоцезия из исследуемой почвы в сельскохозяйственные культуры агрохимические показатели располагались в ряд: pH, $H_{гидр}$< Сумма обменных оснований (S)= ЕКО< гумус<фосфор<калий.

Многофакторный регрессионный анализ был затруднен, так как некоторые агрохимические показатели оказались тесно связаны между собой. Уравнение множественной регрессии для полевого опыта № 1 выглядело следующим образом:

$$\mathbf{КП_1 = 3.7\ P_2O_5 - 12.6\ K_2O} \qquad (1) \qquad n=24;\ p<0.05;$$

где $КП_1$ – коэффициент перехода ^{137}Cs из почвы в растения, P_2O_5 – содержание подвижного фосфора мг/100 г; K_2O – содержание обменного калия.

При статистической обработке результатов полевого опыта № 2 содержание подвижного фосфора и обменного калия не вошли в уравнение регрессии, единственным фактором, оказывающим значимое влияние, являлось содержание гумуса:

$$\mathbf{КП_2 = 3.6\ Hum} \qquad (2) \qquad n=18;\ p<0.05;$$

где $КП_2$ – коэффициент перехода ^{137}Cs из почвы в растения, Hum – содержание гумуса в почве, %.

Полученные уравнения можно использовать при определении оптимальных параметров плодородия почвы, обеспечивающих формирование нормативно чистой растениеводческой продукции. Для исследуемой почвы получим, что для формирования урожая возделываемых культур, отвечающих требованиям СанПиН 2.3.2.1078-01 при средней плотности загрязнения по ^{137}Cs = 323±41 кБк/м^2, содержание подвижного фосфора не должно быть выше 40-47мг/100 г при достижении средней обеспеченности почвы по калию – 10-12 мг K_2O на 100 г почвы.

Для получения нормативно чистой продукции при средней плотности загрязнения почвы участка 506±87 кБк/м^2, исходя из уравнения регрессии, содержание гумуса не должно превышать 3.6%. Исходя из результатов полевого опыта 1, увеличение содержания гумуса вызывало снижение значений КП ^{137}Cs в зерно овса. Согласно полученной зависимости (3), минимальное содержание гумуса, обеспечивающее получение нормативно чистой продукции, составляет 1.4%.

$$\mathbf{КП_{овес} = -11.4\ Hum + 30.2} \qquad (3) \qquad n=6;\ p<0.05;$$

где $КП_{овес}$ – коэффициент перехода ^{137}Cs из почвы в зерно овса, Hum – содержание гумуса в почве, %.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что через 22 года после аварии на ЧАЭС рациональное применение удобрений на радиоактивно загрязненных дерново-подзолистых песчаных почвах продолжает являться эффективным приемом реабилитации, которое обеспечивает: повышение плодородия почвы, снижение подвижности ^{137}Cs в почве, увеличение продуктивности и снижение накопления радиоцезия в сельскохозяйственных культурах.

2. Максимальное снижение подвижности ^{137}Cs в почве за период с 2001 по 2007 гг. наблюдалось при внесении подстилочного навоза КРС в дозе 80 т/га (1 раз в 4 года) и минеральных удобрений в диапазоне доз $N_{55-150}P_{20-60}K_{40-180}$ д.в. на га. При органической системе удобрения доля фиксированного радионуклида увеличилась на 8.6%, а при минеральной – на 4.1-4.8% по сравнению с контрольным участком. Длительное систематическое применение повышенных доз азотных и фосфорных удобрений ($N_{225}P_{90}$) замедляет процесс фиксации радиоцезия в дерново-подзолистой песчаной почве.

3. Органические удобрения снижают подвижность радиоцезия в почве в течение 2-3 лет после внесения. При этом совместное применение соломы и сидерата, зеленой массы редьки масличной, пролонгирует действие навоза. Снижение подвижности ^{137}Cs в почве в зависимости от применяемых удобрений и их сочетаний наблюдается в ряду: бесподстилочный навоз < подстилочный навоз < солома < сидерат < сидерат + солома.

4. Анализ данных полевых и вегетационных опытов показал, что действие минеральных и органических удобрений на подвижность ^{137}Cs в почве обусловлено изменением содержания обменных катионов K^+ и Ca^{2+} в почве и в почвенном растворе. При внесении органических удобрений реализуется дополнительный механизм закрепления ^{137}Cs в почве за счет образования комплексных радионуклид-органических соединений.

5. Оптимальный эффект от минеральных удобрений на радиоактивно-загрязненной дерново-подзолистой песчаной почве достигался от их внесения в дозах $N_{110-150}P_{40-60}K_{90-180}$ д.в. на га. При этом продуктивность картофеля, возрастает на 77%, овса и озимой ржи – на 133-190%, а люпина – на 29-30%; содержание ^{137}Cs в продукции снижается в среднем в 2-6 раз по сравнению с контролем.

6. Получены уравнения множественной линейной регрессии, которые позволили установить оптимальные параметры почвенного плодородия исследуемой почвы, обеспечивающие формирование нормативно чистой растениеводческой продукции (СанПиН 2.3.2.1078-01): гумус 1.4- 3.6%, подвижный фосфор не выше 47мг/100 г, обменный калий – 10-12 мг/100 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

1. Для сохранения и повышения плодородия почвы, увеличения продуктивности возделываемых культур, а также снижения содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства рекомендуется применять минеральные удобрения в дозах $N_{110-150}$ д.в на га и K_{90-180} д.в. на га, с учетом требований отдельных культур, при регулярном (один раз в два-три года) внесении навоза.

2. Для усиления влияния последействия органических удобрений на снижение перехода ^{137}Cs из дерново-подзолистой песчаной почвы в сельскохозяйственные культуры рекомендуется применение соломы в сочетании с сидератом по фону подстилочного навоза.

3. В связи с повышенным содержанием подвижного фосфора в дерново-подзолистой песчаной почве рекомендуется обеспечить мониторинг его содержания, а также сократить дозы ежегодного внесения фосфорных удобрений и регулировать соотношение доступного калия и фосфора в агроценозе.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Белова Н.В., Санжарова Н.И., Воробьева Л.А., Моисеенко Ф.В., Шишулина М.В. (Федоркова М.В.) Влияние калийных удобрений на транслокацию ^{137}Cs в растения из дерново-подзолистой песчаной почвы // Агрохимия. - 2009. - №11. - С. 50-56
2. Федоркова М.В., Белова Н.В., Санжарова Н.И. Динамика биологической подвижности ^{137}Cs при применении различных видов органических удобрений на дерново-подзолистой песчаной почве // Агрохимический вестник. - 2012. - №1. С.18-21.
3. Федоркова М.В., Пахненко Е.П., Санжарова Н.И. Формы химического взаимодействия радиоактивного стронция с органическим веществом различных типов почв // Вестник Московского университета. Секция 17. Почвоведение – 2012. - №3.- С. 27-30.

В сборниках статей и материалов конференций:

4. Шишулина М.В. (Федоркова М.В.), Санжарова Н.И., Пахненко Е.П. Взаимодействие радиоактивного стронция с органическим веществом различных типов почв // Труды IV Всероссийской конференции «Гуминовые вещества в биосфере», Москва 2007 г.- С.118-120.
5. Шишулина М.В. (Федоркова М.В.); Белова Н.В.; Санжарова Н.И.; Шаповалов В.Ф.; Пахненко Е.П. Параметры биологической подвижности ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве при применении различных систем удобрений // Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства / Рязань. - 2009; в.8. - С. 186-189
6. Шишулина М.В. (Федоркова М.В.) Накопление ^{137}Cs сельскохозяйственными культурами из дерново-подзолистой песчаной почвы при применении различных систем удобрений // Тезисы докладов XVI Международной конференции студентов и

аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов», Москва, 13-18 апреля 2009. С. 175-176
7. Шишулина М.В.(Федоркова М.В.); Белова Н.В.; Санжарова Н.И.; Шаповалов В.Ф.; Пахненко Е.П. Влияние применения различных систем удобрений на биологическую подвижность ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве // Тезисы докладов III Всероссийской конференции с международным участием «Медико-физиологические проблемы экологии человека», Ульяновск, 2009 г. С.335-336
8. Федоркова М.В.; Пахненко Е.П.; Санжарова Н.И. Динамика параметров биологической подвижности ^{137}Cs при применении различных систем удобрения (на примере дерново-подзолистой песчаной почвы, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС) // Материалы международной конференции «Ресурсный потенциал почв - основа продовольственной и экологической безопасности России», Санкт-Петербург, 1-4 марта 2011 г. – С. 126-128.
9. Пахненко Е.П., Федоркова М.В., Белова Н.В., Шаповалов В.Ф. Факторы, определяющие подвижность радиоцезия в дерново-подзолистой песчаной почве при применении различных систем удобрения (в отдаленный период после аварии на ЧАЭС) // Материалы докладов VI съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева. Всероссийская с международным участием научная конференция «Почвы России: современное состояние, перспективы изучения и использования» Петрозаводск - Москва, 13-18 августа 2012 г. - С. 279-280.