

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Курбаков Дмитрий Николаевич

**ОБОСНОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕАБИЛИТАЦИОННЫХ
МЕРОПРИЯТИЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ НА ТЕРРИТОРИЯХ,
ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ**

1.5.15. – Экология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
«Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ)

- Научный руководитель** – *Панов Алексей Валерьевич, доктор биологических наук, профессор РАН*
- Официальный оппонент**
- *Васенёв Иван Иванович, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева*
 - *Ладонин Дмитрий Вадимович, доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры химии почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова*
 - *Лянгузова Ирина Владимировна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук*

Защита диссертации состоится «24» декабря 2024 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.015.3 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, МГУ, д.1, стр.12, биологический факультет, аудитория М-1. Тел: 8(495)–939-24-67.

E-mail: paramonovata@my.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3175>

Автореферат разослан «25» ноября 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета, кандидат биологических наук

_____ / Т.А. Парамонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В Российской Федерации площадь загрязнения почв тяжелыми металлами по данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды составляет более 18 млн. га (Ежегодник загрязнения почв, 2023). Наиболее интенсивно возрастание техногенной нагрузки на объекты окружающей среды, в том числе почвенный покров, наблюдается в зонах воздействия промышленных предприятий. В связи с этим оценка последствий увеличения содержания химических токсикантов в почвах природных и аграрных экосистем является актуальной проблемой экологии и охраны окружающей среды. Решение данной задачи основывается на мониторинге экологического состояния территорий, включая сельскохозяйственные земли, прилегающих к крупным промышленным агломерациям и разработке комплекса эффективных и экономически обоснованных реабилитационных мероприятий (РМ), обеспечивающих производство сельскохозяйственной и пищевой продукции, отвечающей санитарно-гигиеническим нормативам.

В соответствии с Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации (Указ Президента РФ от 21 января 2020 г № 20) «развитие производства сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, которое соответствует установленным экологическим, санитарно-эпидемиологическим, ветеринарным и иным требованиям», является приоритетной народно-хозяйственной задачей.

Степень разработанности проблемы. Изучению закономерностей накопления тяжелых металлов (ТМ) в урожае сельскохозяйственных культур и получению безопасной продукции растениеводства в условиях техногенного загрязнения посвящены исследования отечественных и зарубежных ученых (Зырин, 1973, 1981, 1985; Ковальский, 1974, 1982; Алексеев, 1987; Ковалевский, 1984, 1991; Ильин, 1991; Минеев, 1994, 2015; Черных, 1999; Водяницкий, 2009, 2011; Карпова, 2015; Baker, 1975, 1981; Simon, 1999; Rajcakova, 2006; Rao, 2018; Zhuo, 2019; Kabata-Pendias, 2011 и др.). Определены основные промышленные (металлургия, химия, энергетика и т.д.) и сельскохозяйственные (минеральные удобрения, средства защиты растений, животноводческие комплексы) источники поступления ТМ в

почву и растительность (Добровольский, 1980; Ефремов, 1988; Дричко, 1990; Минеев, 2005).

Разработаны методология и методы оценки экологической обстановки и степени ее опасности в условиях техногенного загрязнения (Глазовская, 1978, 1999; Елпатьевский, 1982; Израэль, 1984; Санжарова, 2019), также предельно допустимые концентрации ТМ в почвах, ветеринарные требования для кормов и санитарно-гигиенические нормативы для пищевых продуктов.

Для выявления возможного негативного воздействия ТМ на агроэкосистемы важной задачей является проведение мониторинга сельскохозяйственных угодий, который обеспечивает объективную оценку токсико-экологической ситуации, выявление тенденций в ее изменении и прогноз, на основании которого принимаются решения по оздоровлению экологической обстановки в сфере сельскохозяйственного производства (Санжарова, 2010; Фокин, 2017).

Для ведения сельскохозяйственного производства на техногенно загрязненных территориях и получения продукции растениеводства, удовлетворяющей санитарно-гигиеническим и ветеринарным требованиям, разработаны и внедрены агротехнические и агрохимические приемы (Обухов, 1995; Прасад, 2003; Алексахин и др., 2004; Минеев, 2004; Можайский, 2012; Копцик, 2014; Карпова, 2015 и др.). Разнообразие экологических ситуаций, вариабельность почвенных параметров, многообразие возделываемых сельскохозяйственных культур, широкий спектр применяемых технологий возделывания определяют необходимость оптимизации ведения сельскохозяйственного производства на техногенно загрязненных территориях (Кирюшин, 2005; Бакалова, 2008; Лукин, 2008).

Цель работы: Оценка агроэкологической обстановки, обоснование и оптимизация реабилитационных мероприятий, обеспечивающих производство безопасной по содержанию ТМ сельскохозяйственной продукции на территориях, прилегающих к предприятиям черной металлургии.

Задачи исследования:

1. Усовершенствование методологического подхода, создание базы данных и разработка системы поддержки принятия решений для оценки эффективности и

обоснования оптимальных реабилитационных мероприятий в сельском хозяйстве на территориях, загрязненных ТМ;

2. Оценка результатов агроэкологического мониторинга в регионах размещения ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (ПАО «НЛМК») и ООО «НЛМК-Калуга» и изучение накопления ТМ в почвах и растениях (кормовые травы, зерновые культуры);

3. Изучение особенностей накопления ТМ в почвах и растениях при использовании различных систем удобрений и их влияния на свойства почв, урожайность и качество продукции растениеводства;

4. Обоснование и оптимизация применения стандартных и реабилитационных технологий при ведении сельского хозяйства в условиях загрязнения почв ТМ в районе воздействия предприятий черной металлургии.

Научная новизна. Усовершенствованы методы оценки экологической и экономической эффективности реабилитационных технологий для производства экологически безопасной продукции на территориях, загрязненных тяжелыми металлами.

Впервые проведена комплексная оценка агроэкологического состояния почвенно-растительного покрова сельскохозяйственных угодий 30-км зоны воздействия ПАО «НЛМК-Липецк», определены критические пути поступления токсикантов в продукцию сельского хозяйства.

Впервые в предпроектный период (2013 г.) и во время эксплуатации ООО «НЛМК-Калуга» получена информация о фоновых и накопленных уровнях содержания тяжелых металлов в почве, растениях и сельскохозяйственной продукции.

Дана оценка влияния многолетнего (20 лет) применения различных видов и доз минеральных удобрений на накопление ТМ в растениях и почвах выщелоченного чернозема. Приведена сравнительная оценка вклада отечественных и импортных минеральных удобрений на поступление ТМ в почвы сельскохозяйственных угодий.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработаны методологические основы и предложены критерии оценки эффективности

технологий, направленных на снижение содержания ТМ в сельскохозяйственной продукции. Усовершенствован методологический подход к оптимизации проведения реабилитационных мероприятий при загрязнении сельскохозяйственных угодий ТМ, включающий комплексную оценку параметров миграции ТМ и систему критериев эффективности реабилитационных технологий.

Разработана система мониторинга экологической обстановки в зоне воздействия выбросов предприятий черной металлургии для оценки опасности накопления ТМ в компонентах агроэкосистем и обоснования необходимости РМ.

Дана сравнительная оценка воздействия двух металлургических предприятий на накопление ТМ в компонентах экосистем в зависимости от объема и технологических особенностей производства.

Создана база данных (БД) и разработана система поддержки принятия решения (СППР) для обоснования наиболее эффективных реабилитационных мероприятий с учетом уровней содержания ТМ в почвах, растениях, свойств почв, нормативных требований к безопасности продукции и экономических критериев.

Объектами исследований являлись компоненты агроэкосистем (почва, растительность), минеральные удобрения, а также атмосферные выпадения и снежный покров территорий в 30-км зоне воздействия металлургического комбината ПАО "НЛМК" (г. Липецк) и ООО "НЛМК-Калуга" (с. Ворсино, Калужской области).

Предмет исследований: параметры миграции и накопления ТМ в основных компонентах агроэкосистем; технологические приемы ведения растениеводства, снижающие накопление ТМ в продукции; методологические подходы к оценке эффективности технологий реабилитации в сельском хозяйстве в условиях загрязнения ТМ.

Методы исследований: классические полевые методы изучения миграции ТМ в системе почва-растение и методы исследования снежного покрова в районах воздействия промышленных предприятий. Лабораторные методы атомно-эмиссионной спектрометрии, агрохимии, анализа химического состава загрязнения снежного покрова.

Методологический подход к оценке эффективности реабилитационных мероприятий включает: критерии оценки эффективности; базу данных; систему поддержки принятия решений по обоснованию и оптимизации применения РМ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оценка экологической ситуации в агроценозах зон воздействия выбросов промышленных предприятий и оптимизация применения реабилитационных мероприятий при загрязнении ТМ выполнена с использованием, усовершенствованных критериев (экологические, нормативные, экономические), разработанного методологического подхода и инструментов информационной поддержки (БД, СППР);

2. В ближней зоне воздействия (до 10 км) выбросов предприятий черной металлургии зарегистрировано повышенное поступление ТМ на почвенно-растительный покров и аккумуляция ТМ в верхних 0-2 и 2-5 см слоях почвы на залежных и природных кормовых угодьях. Превышений ОДК ТМ в почвах пахотных и целинных угодий не наблюдается. Загрязнение урожая сельскохозяйственных культур ТМ происходит преимущественно аэральным путем;

3. Длительное (20 лет) применение различных доз и сочетаний отечественных минеральных удобрений не приводит к значимому изменению содержания ТМ в пахотном слое черноземных почв, но оказывает влияние на баланс элементов питания, агрохимические показатели и накопление ТМ в урожае зерновых культур;

4. Разработан комплекс эффективных реабилитационных мероприятий (организационных и агрохимических), обеспечивающих производство продукции, соответствующей санитарно-гигиеническим и ветеринарным требованиям на угодьях бывшего сельскохозяйственного предприятия ООО «Россия», расположенного в 30 км зоне воздействия ПАО «НЛМК» и снижающий содержание ТМ в продукции растениеводства до 2 раз.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов определяется большим объемом экспериментальных данных, использованием современного аналитического оборудования, применением методов статистического анализа результатов, а также базой данных, содержащей около 4 тысяч записей.

Материалы внедрения. Результаты использованы при подготовке следующих документов: Руководство пользователя «База данных по эффективности реабилитационных технологий в сельском хозяйстве на территориях, загрязненных тяжелыми металлами» (ISBN 978-5-903386-44-4, 2016); Авторские свидетельства о государственной регистрации базы данных №2017620776 от 18.08.2017, №2022623321 от 08.12.2022, № 2023623818 от 27.11.2023.

Апробация работы. Результаты представлены на научных международных, всероссийских и региональных конференциях: Международная научная конференция «Техногенные системы и экологический риск». Обнинск, 2014, 2016, 2017, 2020, 2021, 2023; Москва, 2014; XI Международная научно-практическая конференция «Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс на рубеже веков». Новосибирск, 2015; Международная научная конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность». Севастополь, 2017; XLVI Международные радиозэкологические чтения, посвященным академику ВАСХНИЛ В.М. Ключковскому. Обнинск, 2017; Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы почвоведения, экологии и земледелия». Курск, 2018, 2019, 2020, 2021; Всероссийская научная конференция «Химическое и биологическое загрязнение почв». Пущино, 2018; XIV Международная научно-практическая конференция «Проблемы устойчивого развития и эколого-экономической безопасности регионов». Волгоград, 2019; 23-я международная Пущинская школа-конференция молодых ученых «Биология-наука 21 века», 2019; Международная научная конференция «Плодородие почв России. Состояние территорий и прогнозы». Москва, 2019; Международная научно-практическая конференция «Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве». Обнинск, 2020; XXI Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы экологии и природопользования». Москва, 2020; V Международная конференция «Актуальные научные и научно-технические проблемы обеспечения химической безопасности». Казань, 2020; XV Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы устойчивого развития и эколого-экономической безопасности регионов», Волжский, 2020; I Международная

молодежная конференции «Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве». Обнинск, 2022.

Публикации. По результатам опубликовано 6 статей в журналах, индексируемых Web of Science, Scopus, RSCI и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ.015.3 по специальности 1.5.15 – Экология.

В работе [1] вклад автора составил 0,6 печатных листа (п.л.) из 0,9 п.л.; в работе [2] 0,6 п.л. из 1,1 п.л.; в работе [3] 0,4 п.л. из 1,0 п.л.; в работе [4] 0,6 п.л. из 0,9 п.л.; в работе [5] 0,6 п.л. из 0,9 п.л.; в работе [6] 0,5 п.л. из 0,8 п.л.

Личное участие автора. Автор принимал участие во всех этапах исследования: разработка методологии; определение цели и задач исследования; проведение полевых и лабораторных работ; обработка, анализ и интерпретации данных; создание компьютерных средств поддержки принятия решения; формулирование основных положений и выводов; подготовка 6 научных статей, 1 коллективной монографии; лично сделал доклад на 22 научных конференциях.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация изложена на 159 странице машинописного текста, состоит из введения, 6 глав, заключения, выводов и списка литературы. Работа содержит: 60 таблиц, 41 рисунок. Использовано 167 источников литературы, из них 17 на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость.

Глава 1. Обзор литературы

Рассмотрена проблема техногенного загрязнения сельскохозяйственных угодий в Российской Федерации. Представлен рейтинг опасности техногенных загрязнителей. Дана характеристика и рассмотрены источники поступления ТМ в компоненты окружающей среды и организм человека. Рассмотрены подходы к нормированию содержания ТМ в природных и аграрных экосистемах. Дана сравнительная оценка отечественных и зарубежных нормативов содержания ТМ в почве и растительности. Описаны реабилитационные приемы снижения накопления

ТМ в сельскохозяйственном сырье и продукции. Определены наиболее актуальные проблемы ведения сельского хозяйства в условиях загрязнения почв ТМ.

Глава 2. Материалы и методы исследования

1. Полевой опыт проведен для оценки влияния различных агрохимических мероприятий на накопление ТМ в урожае зерновых культур на глубоковыщелоченном среднекультуренном среднесуглинистом черноземе. Длительность опыта 20 лет. Севооборот зерновой четырехпольный: яровая пшеница, овес, озимая пшеница, однолетние травы (овес+вика посевная) последовательно развернут на всех полях.

Влияние систем минеральных удобрений на накопление ТМ в почве и растениях изучалось в полевых условиях в виде 5-ти блоков: 1) контроль (без удобрений); 2) варианты доз азотных удобрений от 0 до 150 кг/га при постоянном фоне $P_{60}K_{60}$; 3) дозы фосфорных удобрений от 0 до 120 кг/га при постоянном фоне $N_{90}K_{60}$; 4) дозы калийных удобрений от 0 до 150 кг/га при постоянном фоне $N_{90}P_{60}$; 5) применение минеральных удобрений и извести $N_{90}P_{60}K_{60} + CaCO_3$. Общее количество вариантов 17, повторность опыта 4-х кратная. Размер делянок составляет 240 м². Отбор проб почв и растений осуществлялся согласно общепринятым методикам.

2. Агроэкологический мониторинг. Для выявления источников поступления ТМ и степени их воздействия на компоненты окружающей среды была создана сеть агроэкологического мониторинга на разном удалении и направлении (по 8 румбам) от факела выброса (рисунок 1).

С шагом до 5 км отбирались пробы снежного покрова, почвы, растительности. Рассчитаны суммарные коэффициенты загрязнения, коэффициенты техногенной концентрации, коэффициенты пылевой нагрузки (ГОСТ 17.4.3.01-2017, методические рекомендации по оценке степени загрязнения, 1990, 1995, 2003). Отбор фоновых проб произведен с учетом сезонности розы ветров на расстоянии 23 («НЛМК-Калуга») и 33 (ПАО «НЛМК») км от источника загрязнения в южном и западном направлении. Структура почвенного покрова в районе расположения ООО «НЛМК-Калуга» относительно однородная с широким распространением дерново-

подзолистых и светло-серых лесных почв не отличающихся существенной пестротой физических и агрохимических свойств.

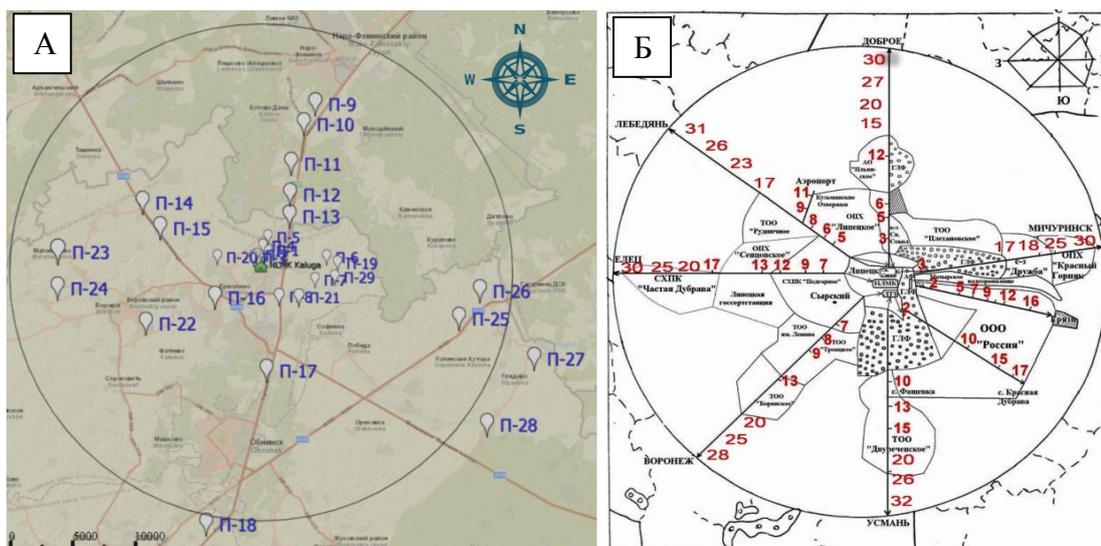


Рисунок 1 – Карта-схема расположения постоянных пробных площадок в 30 км зоне воздействия, А – ООО «НЛМК-Калуга», Б – ПАО «НЛМК»

Почвы в районе ПАО «НЛМК» (г. Липецк) представлены преимущественно выщелоченными среднесуглинистыми и тяжелосуглинистыми черноземами с незначительным распространением ареалов легкого гранулометрического состава.

Отбор растительных проб проводился на улучшенных и природных кормовых угодьях с естественными и сеянными многолетними травами, а при их отсутствии - на полях с зерновыми культурами.

3. *Определение валового содержания и подвижных форм ТМ в образцах почв, растений, минеральных удобрений, снежном покрове, пылевых выпадениях* проводилось с использованием метода атомно-эмиссионной спектрометрии в индукционно связанной плазме (ICP-OES, Hitachi-308). Для определения подвижных форм ТМ в почве используется ацетатно-аммонийный буферный раствор с pH 4,8. Разложение проб выполнялось при помощи микроволновой системы пробоподготовки МС-10 (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98, РД 52.18.289-2022, РД 52.19.191-2019).

Для определения содержания ТМ в минеральных удобрениях проведены лабораторные испытания 119 проб различных видов и форм удобрений.

В мониторинге загрязнения атмосферного воздуха использовались природные планшеты (снежный покров).

4. *Создание баз данных и разработка систем поддержки решений.* Для оптимизации процесса выбора РМ разработана БД в СУБД MS Access и модуль СППР в виде файла MS Excel, предназначенные для ввода, хранения, систематизации, поиска и анализа информации по эффективности РМ. Эффективность определялась по экологическим, нормативным и экономическим критериям.

При создании БД были обобщены данные, опубликованные в журналах, монографиях, докладах, диссертациях с 1986 г. по 2020 г.

Обработка полученной информации проводилась с использованием методов математической статистики и компьютерных программных средств (STATISTICA 10.0, Microsoft Excel).

Концептуальная схема выполнения исследовательской работы представлена на рисунке 2.

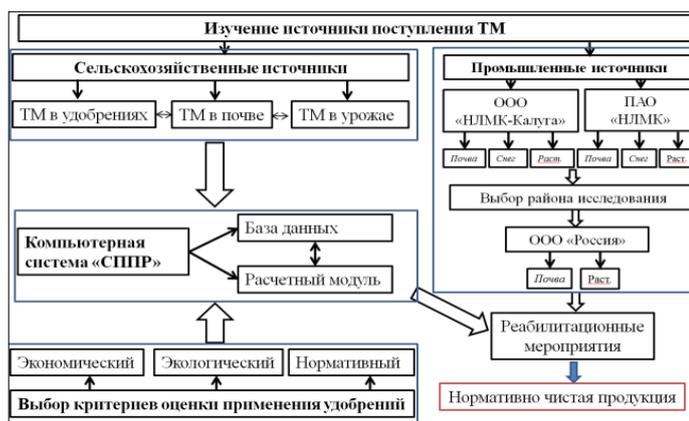


Рисунок 2 – Схема выполнения исследовательской работы

На первом этапе исследования изучались источники поступления ТМ (сельскохозяйственные, промышленные) в компоненты окружающей среды. На втором этапе проведен полевой опыт по изучению перехода ТМ из почвы в растения при применении различных доз и сочетаний минеральных удобрений. Полученные данные позволили заключить, что некоторые сочетания минеральных удобрений способствуют накоплению, а не снижению ТМ в растениях. Разработка РМ для конкретных климатических и агрохимических условий потребовала большого количества данных. Был проведен поиск литературных источников и анализ информации по эффективности агрохимических мероприятий на угодьях с широким

спектром почвенных и агрохимических характеристик, что позволило выделить для конкретных территорий определенный набор РМ.

В дальнейшем были разработаны БД и СППР, которые позволяют проводить поиск и оптимизацию РМ на территориях, загрязненных ТМ с определенными почвенными и хемозэкологическими характеристиками. Используя данный инструмент разработан комплекс РМ, позволяющий получать на условно загрязненной ТМ территории сельскохозяйственную продукцию, соответствующую нормативам.

Глава 3. Влияние сельскохозяйственных источников на поступление тяжелых металлов в компоненты агроэкосистем

На основании собственных данных и обобщения литературных источников показано, что содержание ТМ в удобрениях зависит от комплекса факторов: качества поступающего сырья, технологии его переработки, чистоты применяемых химических реагентов и т.д. При этом уровень ТМ в удобрениях из отечественного сырья значительно ниже, чем из сырья зарубежных месторождений (Китая, США, Австралии, стран западной Европы и Ближнего Востока). Анализ показал, что наиболее загрязненными ТМ являются фосфорные и сложные комплексные удобрения. В среднем в них содержится Cd в 10 раз, а Pb почти в 20 раз больше, чем в азотных. Содержание As в данных удобрениях вдвое больше, чем в калийных.

Совместно с Тульским НИИСХ в многолетних полевых опытах установлено, что систематическое применение несбалансированных доз минеральных удобрений или полное их отсутствие оказывает существенное влияние на баланс элементов питания и агрохимические показатели выщелоченного чернозема. В большинстве вариантов наблюдалось подкисление почвенного раствора и в наибольшей степени в вариантах с несбалансированным применением азотно-фосфорных и азотно-калийных удобрений. Внесение в почву известняковой муки (до 7 т/га) приводило к нейтрализации кислотности и росту значений рН почвенного раствора на 0,4 единицы.

Наибольшая урожайность (3,4 т/га) получена при внесении азотных удобрений в дозе $N_{90}P_{60}K_{60}$, а наименьшая (2,5 т/га) - при внесении удобрений без азотной

компоненты ($P_{60}K_{60}$). Внесение на едином фоне $N_{90}K_{60}$ различных доз фосфорных удобрений приводит к повышению урожайности яровой пшеницы до 3,3 т/га относительно контроля 2,4 т/га. В вариантах без внесения калийных удобрений отмечено снижение урожайности ниже контрольных значений (рисунок 3).

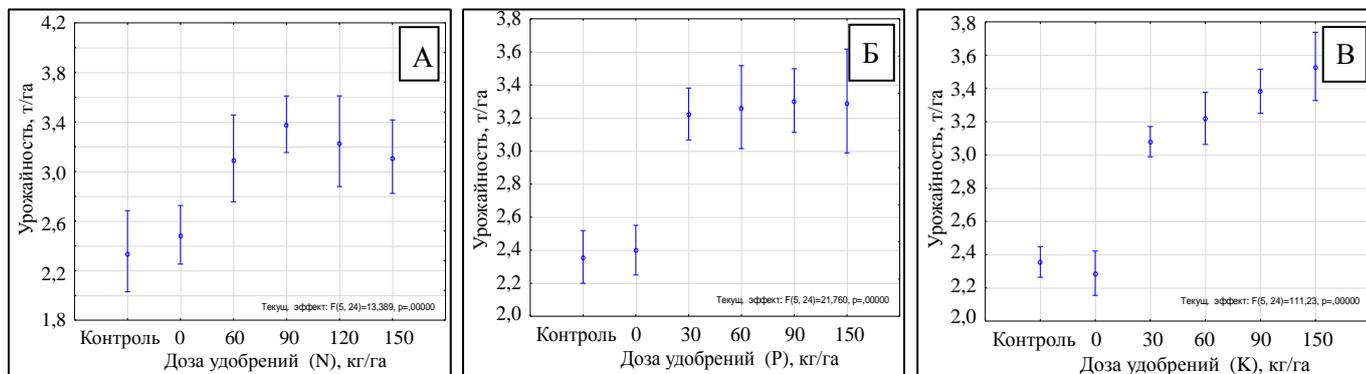


Рисунок 3 – Урожайность яровой пшеницы в зависимости от дозы удобрений:

А-азотных; Б-фосфорных; В-калийных (плашка погрешности - ошибка среднего)

Несбалансированное внесение высоких доз азотных и калийных удобрений увеличивает подвижность Pb и Cd в системе почва-растение (таблица 1).

Таблица 1 – Влияние агрохимических мероприятий на накопление ТМ в зерне яровой пшеницы

№	Вариант	Pb		Cd		Cu	
		мг/кг	КН*	мг/кг	КН	мг/кг	КН
1	Контроль	0,35±0,06	0,04	0,09±0,01	1,12	5,75±0,17	0,34
2	$P_{60}K_{60}$	0,33±0,07	0,04	0,10±0,02	1,11	5,64±0,01	0,33
3	$N_{60}P_{60}K_{60}$	0,42±0,06	0,04	0,12±0,01	1,33	5,13±0,19	0,30
4	$N_{90}P_{60}K_{60}$	0,45±0,07	0,06	0,11±0,01	1,22	5,84±0,10	0,34
5	$N_{120}P_{60}K_{60}$	0,48±0,06	0,06	0,14±0,01	1,56	4,75±0,20	0,29
6	$N_{150}P_{60}K_{60}$	0,54±0,06	0,05	0,15±0,01	1,40	5,28±0,20	0,33
7	$N_{90}K_{60}$	0,56±0,22	0,06	0,18±0,04	1,80	5,37±0,23	0,32
8	$N_{90}P_{30}K_{60}$	0,45±0,17	0,05	0,14±0,02	1,27	4,16±0,21	0,26
9	$N_{90}P_{90}K_{60}$	0,33±0,18	0,04	0,14±0,02	1,40	4,41±0,17	0,28
10	$N_{90}P_{120}K_{60}$	0,38±0,14	0,04	0,12±0,02	1,10	3,65±0,19	0,22
11	$N_{90}P_{60}$	0,39±0,05	0,04	0,14±0,03	1,40	4,04±0,17	0,29
12	$N_{90}P_{60}K_{30}$	0,36±0,04	0,04	0,10±0,01	0,91	5,37±0,22	0,34
13	$N_{90}P_{60}K_{60}$	0,44±0,03	0,06	0,13±0,02	1,18	4,93±0,19	0,28
14	$N_{90}P_{60}K_{90}$	0,47±0,04	0,06	0,12±0,01	1,20	5,06±0,30	0,33
15	$N_{90}P_{60}K_{150}$	0,46±0,02	0,06	0,15±0,01	1,50	4,53±0,25	0,30
16	$N_{90}P_{60}K_{60} + CaCO_3$	0,33±0,03	0,04	0,09±0,01	0,90	3,47±0,29	0,20
СанПин 2.3.2.1078-01		0,5		0,1		-	

*КН – коэффициент накопления

Длительное в течение 20 лет применение разных доз и сочетаний отечественных минеральных удобрений не оказывало значимого влияния на изменение содержания ТМ в пахотном слое черноземных почв. Под зерновые культуры для увеличения содержания в почве Cd и As на 0,1 мг/кг необходимо 660 и 250 лет, а на 1 мг/кг Pb, Zn, Co, Ni, Cu - 285, 47, 740, 115, 130 лет, соответственно. При внесении импортных удобрений с высокими уровнями содержания ТМ их накопление в почве может возрастать на порядок.

Глава 4. Основные закономерности распределения и накопления ТМ в компонентах агроэкосистем в зонах воздействия металлургических предприятий

В результате исследований выявлено 9 химических поллютантов (Fe, Cr, Zn, Mn, Ni, Co, Pb, Cu, Cd), накопление которых в снежном покрове и почве обследуемых территорий расположения металлургических предприятий превышает фоновые показатели. Спектр элементов характерен для производства черных металлов с изготовлением легированной стали. Основное количество ТМ содержится в твердой форме (металлическая стружка). Водорастворимая фракция ТМ в снежном покрове находится в концентрациях не выше: Cr 0,0035; Zn 0,089; Mn 0,023; Ni 0,005; Co 0,002; Pb 0,035; Cu 0,005 и Cd 0,0005 мг/л. Содержание ТМ в твердом осадке снежного покрова в зоне воздействия выбросов ПАО «НЛМК» достигает для Cr 384, Zn 3084, Mn 3550, Ni 92, Co 6, Pb 255, Cu 71, Cd 14 мг/кг и до 20 раз превышает аналогичные показатели для ООО «НЛМК-Калуга».

Максимальные концентрации поллютантов и пылевая нагрузка на снежный покров в районе расположения ПАО «НЛМК» проявляются в ближней зоне на расстоянии 4-6 км от источников загрязнения в юго-восточном направлении и превышало фоновые до 16 раз (рисунок 4 А).

С увеличением расстояния от источника загрязнения до 12 км пылевая нагрузка уменьшается до средней и далее фиксируется ее низкая степень (рисунок 4 А). В районе расположения ООО «НЛМК-Калуга» максимальные концентрации ТМ и относительно высокая пылевая нагрузки на снежный покров наблюдаются в ближней зоне на расстоянии до 3 км от источника загрязнения, в которых

превышение содержания ТМ по отношению к фоновым показателям могут достигать 8 раз (рисунок 3 Б). Аналогичные показатели загрязнения наблюдаются и при обследовании почвенного покрова.

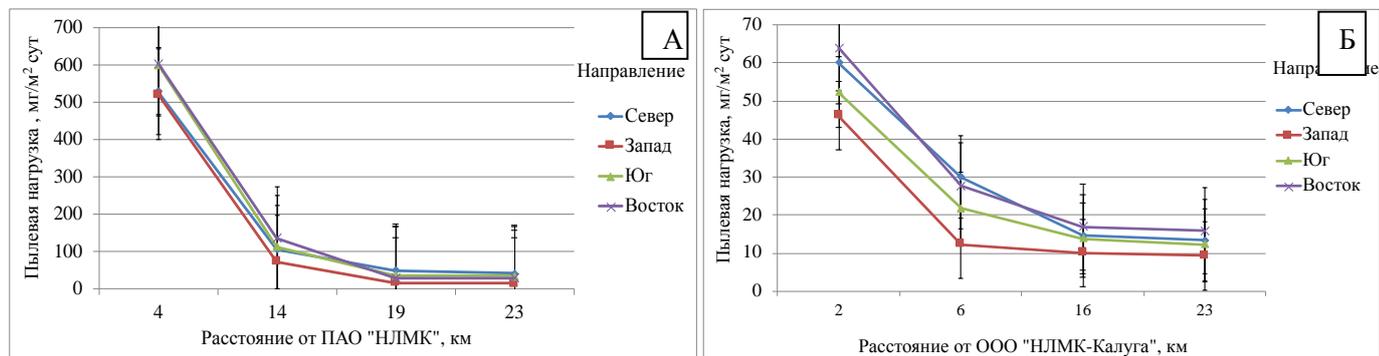


Рисунок 4 – Пылевая нагрузка (P_n) на снежный покров в зависимости от расстояния и направления от «А» – ПАО «НЛМК-Липецк»; «Б» – «НЛМК-Калуга», (100-250 mg/m^2 – нагрузка низкая, 250-450 – средняя, 450-850 - высокая) (плашка погрешности - ошибка среднего)

Определение коэффициентов техногенной концентрации в снежном покрове (K_c) позволило выявить зоны с более низкими уровнями загрязнения (таблица 2).

Таблица 2 – Коэффициенты техногенной концентрации (K_c) и Z_c ТМ в снежном покрове относительно фона

№ п.п.	Расстояние от факела, км	Направление	Cd	Co	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Mn	Fe	Zc
ПАО «НЛМК» (г. Липецк)												
1	4,0	С-В	7,8	4,2	10,4	14,9	16,	7,9	15,3	5,8	14,9	96,9
2	13,5	В	6,3	3,1	6,4	5,9	9,1	1,9	2,3	3,9	6,6	45,5
3	19,0	В	5,7	2,2	3,9	4,8	7,9	1,5	1,5	3,1	3,6	33,1
4	5,7	С-В	7,6	4,0	5,9	4,6	8,0	5,6	6,0	8,2	11,7	60,5
5	20,0	Ю-В	1,9	2,0	2,4	2,4	3,0	1,7	1,8	3,0	3,1	20,1
6	12,0	Ю	4,7	2,8	2,6	2,6	5,2	2,1	2,5	4,4	4,1	30,0
7	4,5	Ю-З	5,6	4,2	3,9	7,3	5,9	6,5	6,1	5,4	12,3	56,2
8	13,5	С-В	2,6	2,3	2,2	2,7	4,7	2,0	0,7	3,3	3,7	23,1
9	14,5	С-З	3,4	3,5	3,3	2,6	4,7	2,2	0,9	3,4	3,3	26,7
10	12,0	З	5,7	4,3	5,5	2,7	4,8	2,0	1,0	3,3	3,1	31,4
11	33,5	С-З	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
ООО «НЛМК-Калуга» (с. Ворсино)												
1	22,8	Ю-З	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2	15,8	Ю-В	2,7	1,3	3,1	2,6	1,9	1,7	1,7	0,8	1,0	8,9
3	16,5	В	2,5	1,8	3,1	2,4	1,9	1,8	1,6	0,8	1,1	9,0
4	3,0	Ю	2,0	1,2	2,5	3,2	3,4	1,2	4,6	2,2	2,1	14,4
5	3,5	В	1,7	0,6	3,0	3,1	4,4	1,9	7,3	2,4	2,2	18,5

№ п.п.	Расстояние от факела, км	Направление	Cd	Co	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Mn	Fe	Zc
6	1,2	С	4,1	1,6	6,4	2,9	6,3	2,4	8,0	2,6	6,0	32,3
7	9,8	С-В	3,4	1,6	3,2	2,7	2,0	2,0	1,9	1,0	1,9	11,7
8	5,8	Ю-З	1,6	1,1	2,8	3,3	4,4	2,5	5,1	2,1	2,7	17,6
9	9,8	С-З	2,2	1,8	4,4	3,0	3,5	2,5	3,5	0,8	1,2	14,8
10	1,6	З	3,9	1,9	5,9	4,7	3,1	3,7	6,6	2,5	4,0	28,3

Коэффициент K_c в снежном покрове указывает, что пыль и ее компоненты являются существенным источником загрязнения снежного покрова и показывает значительные превышения фона в 30 км зоне воздействия промышленных предприятий (таблица 2).

На всех площадках отбора проб в зоне воздействия ООО «НЛМК-Калуга» Z_c снега (до 32) и почвы (до 13) находится в диапазоне низких значений (до 64), тогда как в зоне ПАО «НЛМК» Z_c достигает 97 в снежном и 107 в почвенном покрове, что соответствует средней степени загрязнения снежного покрова (64-128).

Концентрация катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) и анионов (SO_4^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Cl^-) в талых водах в ближней зоне ПАО «НЛМК» выше (до 10 раз) соответствующих значений района расположения «НЛМК-Калуга», но не превышает предельно допустимых показателей, установленных для питьевой воды (СанПин 1.2.3685-21). В тоже время для водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение в зоне воздействия ПАО «НЛМК», в ряде случаев фиксируются превышения ПДК по NO_2^- , NH_4^+ до 3 раз, Cu до 5 раз, Zn до 9 раз (Приказ Минсельхоза РФ № 552 от 2016).

Различия в степени образования поллютантов объясняется используемыми технологиями: для производства стали на ООО «НЛМК-Калуга» функционируют электродуговые сталеплавильные печи, на ПАО «НЛМК» - доменные печи с более высокими объемами выбросов в атмосферу. Кроме того, на ООО «НЛМК-Калуга» используется лом черных металлов, а на ПАО «НЛМК» руда. Производственные мощности ПАО «НЛМК» (9,9 млн. т стали) примерно в 6 раз превышают проектную мощность ООО «НЛМК-Калуга» (1,5 млн. т стали). Даже с учетом этой поправки электродуговое производство стали с использованием лома черных металлов является более экологически эффективным по сравнению с производством стали с использованием доменных печей и руды в качестве сырья.

На целинных угодьях района расположения ПАО «НЛМК» выявлена выраженная аккумуляция ТМ в верхних 0-2 и 2-5 см слоях почвы. В ряде случаев содержание ТМ в слое 0-2 см ниже, чем в слое 2-5 см, что, вероятно обусловлено процессами формирования дернины, перераспределением ТМ и наблюдаемым снижением выбросов поллютантов в последние годы (рисунок 5).

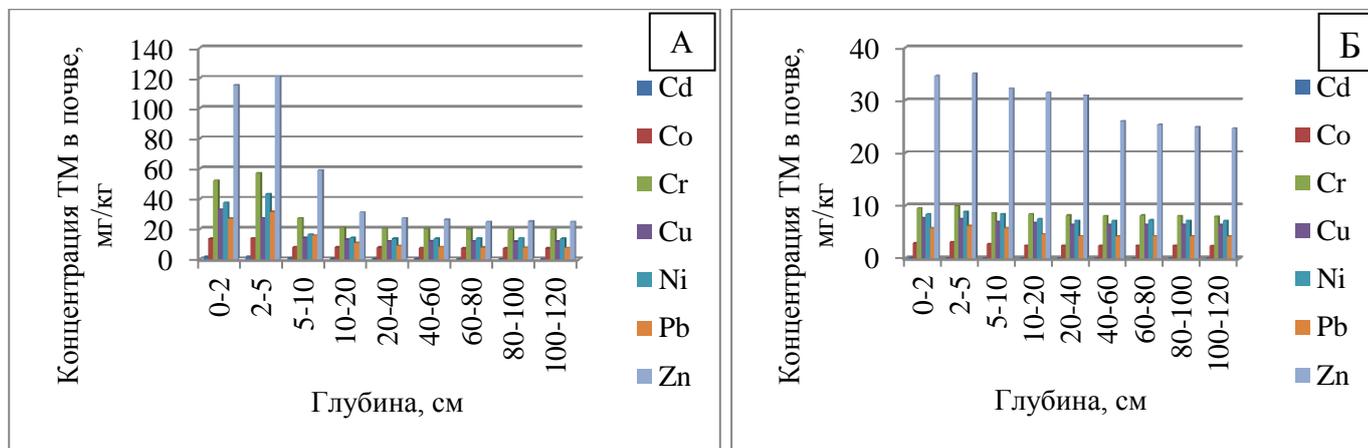


Рисунок 5 – Валовое содержание тяжелых металлов в профиле почв целинных участков на разном расстоянии от ПАО «НЛМК» (А) – 2 км и (Б) – 35 км

Экологический мониторинг сельскохозяйственных угодий, расположенных в 30-км зоне влияния ПАО «НЛМК» показал, что загрязнение урожая сельскохозяйственных культур ТМ в хозяйстве ООО «Россия» происходит преимущественно аэральным путем в результате атмосферных выпадений. Наблюдаемые превышения ВМДУ по содержанию Cr в травостое до 16 раз, Ni - до 13 раз, Fe – до 2 раз. Увеличение расстояния от предприятий ПАО «НЛМК» до 30 км способствует снижению накопления Fe в растениях до 15, Cr до 8 и Ni до 23 раза.

Глава 5. Информационная поддержка принятия решения по оценке эффективности применения реабилитационных мероприятий в сельском хозяйстве на территориях, загрязненных тяжелыми металлами

База данных включает 3809 строк записей, в том числе данные: о месте проведения опытов, источнике информации, агрохимическом и гранулометрическом составе почв, урожайности культур, КН для ТМ, результатах применения технологий реабилитации.

База данных содержит информацию об эффективности реабилитационных мероприятий для различных химических загрязнителей (Cd, Pb, Zn, Cu, Ni и т.д),

вида продукции (картофель, ячмень, овес, рожь озимая и т.д.), удобрений (минеральных, органические, биологических препаратов, и т.д.) на разных типах почв (дерново-подзолистые, серые лесные, черноземные и пойменные) различного гранулометрического состава и широким набором агрохимических характеристик на территории России, Республики Беларусь, Литвы и ряда иностранных государств.

На основе базы данных разработана СППР по оценке эколого-экономической эффективности технологий реабилитации в хозяйствах, расположенных на территориях, загрязненных ТМ.

Назначение СППР: 1) анализ и оценка экологической ситуации; 2) прогнозирование экологической ситуации; 3) выработка управленческих решений по применению стандартных и РМ ведения сельского хозяйства на территориях, загрязненных ТМ; 4) оценка рентабельности применения стандартных и РМ.

Этапы выполнения работ: устанавливаются основные поллютанты, агрохимические характеристики почвы и перечень выращиваемых сельскохозяйственных культур. Далее полученная информация вносится в бланк СППР. Если наблюдается превышение ВМДУ в производимой на участке продукции или существует риск такого превышения, появляется окно «Требуется проведение реабилитационных мероприятий», в противном случае появляется окно «Реабилитационные технологии не требуются (возможно применение стандартных технологий для повышения продуктивности)». Следующий шаг – это подбор РМ. Для оценки эффективности РМ в сельскохозяйственном производстве необходимо ввести актуальные данные по экономическим показателям (стоимость удобрений, работ, продукции и т.д.). После ввода экономических показателей и внесения данных в основной блок СППР автоматически происходит подбор нескольких эффективных РМ и рассчитывается: содержание ТМ после применения технологий, соответствие продукции нормативу, урожайность, дополнительный доход, затраты, связанные с технологией, прибыль от реализации с/х продукции, рентабельность дополнительных затрат.

Глава 6. Комплексное эколого-экономическое обоснование применения технологических приемов возделывания сельскохозяйственных культур на территориях, загрязненных тяжелыми металлами

Рассмотрены реальная и гипотетическая ситуация загрязнения сельскохозяйственных угодий на территории предприятия ООО «Россия», расположенного в зоне воздействия выбросов ПАО «НЛМК».

В условиях реальной ситуации, когда на исследуемой территории поступает информация о залповом аэрозольном выбросе, рекомендовано в качестве защитного приема изменение сроков уборки урожая на 1-2 недели. Учитывая относительно более высокие уровни аэрального загрязнения посевов на расстоянии до 10 км от источника выбросов, рекомендуется размещение культур, хозяйственно-ценная часть которых находится в почве (корне- и клубнеплоды). Для кормовых угодий подбираются участки, наиболее удаленные от источника выбросов поллютантов.

Разработанная БД и СППР были использованы для прогнозирования экологической обстановки и обоснования технологий реабилитации на территории сельскохозяйственного предприятия ООО «Россия» в случае гипотетической ситуации превышения содержания ТМ в почвах выщелоченного среднесуглинистого и тяжелосуглинистого чернозема. На основании экологической, агрономической и экономической эффективности РМ были отобраны наиболее эффективные агрохимические мероприятия. Для производства пшеницы в условиях загрязнения Zn эффективно применение минеральных удобрений ($N_{60}P_{60}K_{60}$) совместно с органическими удобрениями (навоз 30 т/га). При загрязнении Cr рекомендуется применение минеральных удобрений в дозах $N_{90}P_{90}K_{90}$, а Ni - применение органических удобрений (30 т/га навоза) и минеральных в дозах $N_{60}P_{80}K_{80}$. При загрязнении Cd и Pb эффективно применение минеральных удобрений $N_{60}P_{60}K_{60}$ (таблица 3). Агрохимические мероприятия обеспечивают снижение накопления ТМ до 1,5 раза, увеличение урожайности до 1,5 раза, рентабельность до 55% при соответствии продукции санитарно-гигиеническим нормативам.

Таблица 3 – Возможная эколого-экономическая эффективность РМ по производству яровой пшеницы на территории ООО «Россия» Липецкой области (в ценах 2021 г.)

ТМ	N, кг/га	P ₂ O ₅ , кг/га	K ₂ O, кг/га	CaCO ₃ , т/га	Навоз, т/га	*КС ТМ, раз	Увеличение урожайности, раз	Затраты тыс. руб./га	Рентабельность, %	
									Соотв. СанПин	Не соотв. СанПин
Zn	90	90	90	-	-	1,0	1,3	14,3	11	-59
	120	120	120	-	-	1,1	1,3	19,0	-11	-64
	60	60	60	-	30	1,3	1,5	9,7	55	-48
	30	30	30	6	-	1,2	1,2	13,9	7	-60
	-	-	-	-	30	1,8	1,2	6,2	15	-35
Cr	60	60	60	-	-	1,1	1,2	9,7	55	-48
	90	90	90	-	-	1,1	1,3	14,3	11	-49
	90	90	120	-	-	1,3	1,3	15,7	3	-61
Ni	60	60	40	-	-	1,0	1,3	8,7	70	-45
	60	60	60	-	-	1,1	1,3	9,7	55	-48
	60	80	80	-	-	1,5	1,2	11,8	31	-54
	120	120	120	-	-	1,1	1,2	19,0	-11	-64
	-	-	-	-	30	1,2	1,2	6,2	15	-35
Cd	60	60	60	-	-	1,5	1,3	9,7	55	-48
	60	80	80	-	-	1,1	1,3	11,8	31	-54
	120	120	120	-	-	1,5	1,3	19,0	-11	-64
	-	-	-	-	30	1,5	1,2	6,2	15	-35
Pb	60	60	60	-	-	1,4	1,3	9,7	55	-48
	60	80	80	-	-	1,0	1,2	11,8	31	-64
	120	120	120	-	-	1,5	1,3	19,0	-11	-64
	-	-	-	-	30	1,6	1,2	6,2	15	-35

* - кратность снижения

При возделывании картофеля на территории ООО «Россия» рекомендуется внесение минеральных удобрений в дозах N₃₀P₃₀K₄₅ и навоза 20 т/га, как основного удобрения. Такое сочетание удобрений позволяет снизить содержание Ni в среднем в 1,6 раза, при увеличении урожайности до 1,4 раза и возросшей на 23% рентабельности при условии получения продукции, соответствующей нормативам. Внесение органических удобрений в большем объеме (навоз 30 и более т/га) не приводит к какому-либо значимому экологическому и экономическому эффектам. При загрязнении почв Zn наиболее эффективно внесение навоза (30 т/га), кратность снижения содержания Zn в картофеле составит в этом случае 1,2, продуктивность увеличивается до 1,3 раза, рентабельность составит 89% при соответствии установленным нормативам и 16% при их несоответствии.

Таким образом, разработана системы обоснования оптимальных технологий реабилитации в растениеводстве на территориях, загрязненных ТМ. Данный

инструментарий (БД, СППР) обеспечивает поддержку принятия решений органам управления хозяйствующих субъектов по обеспечению производства продукции, соответствующей санитарно-гигиеническим нормативам. Для конкретного сельскохозяйственного предприятия ООО «России», располагающегося в зоне воздействия выбросов ПАО «НЛМК», определены состав, объемы внедрения мероприятий и необходимые затраты. СППР позволяет провести автоматическое ранжирование реабилитационных мероприятий по их эффективности и обосновать технологии с учетом уровня загрязнения ТМ, агрохимических характеристик почвы и вида продукции.

Заключение

Проведенные исследования показали, что накопление ТМ в сельскохозяйственной продукции, почве и компонентах окружающей среды в зависимости от источника загрязнения определяется комплексом факторов. При этом количество ТМ, поступающих в почву с минеральными удобрениями, определяется временем, видами и дозами внесения удобрений, а длительное их применение оказывает существенное влияние на баланс элементов питания, агрохимические свойства почв и биологическую подвижность ТМ.

В районах воздействия металлургических комбинатов интенсивность загрязнения снежного и почвенно-растительного покровов зависит от объемов выбросов, производственной мощности, используемых технологий, направления и расстояния от источников загрязнения, погодных условий и характера подстилающей поверхности.

Установленные закономерности обуславливают необходимость проведения в районах расположения промышленных предприятий и угодьях с высокой техногенной нагрузкой агроэкологического мониторинга, обеспечивающего объективную оценку токсико-экологической ситуации, выявление тенденций в ее изменении и составления прогноза агроэкологической обстановки в сфере сельскохозяйственного производства.

Выводы

1. Предложенные методы агроэкологического мониторинга, комплекс критериев (экологические, нормативные, экономические) и разработанные инструменты (БД, СППР) обеспечивают проведение анализа, оценки и прогнозирования экологической ситуации в агроценозах, оценку эффективности реабилитационных мероприятий по снижению накопления ТМ в продукции растениеводства, а также обоснование и оптимизацию применения реабилитационных мероприятий в зависимости от уровня загрязнения ТМ, агрохимических характеристик почв и вида продукции.
2. БД содержит данные об эффективности реабилитационных мероприятий для различных химических загрязнителей (Cd, Pb, Zn, Cu, Ni и т.д.), 38 видов продукции, удобрений (минеральных, органические и т.д.) на разных типах почв (дерново-подзолистые, серые лесные, черноземные и пойменные) с широким спектром агрохимических характеристик, опубликованных в литературных источниках с 1986 по 2020.
3. Применение отечественных удобрений под зерновые культуры не приводит к значительному увеличению содержания металлов в почве, для увеличения на 0,1 мг/кг As и Cd потребуется 660 и 250 лет, а на 1 мг/кг Pb – 285, Zn – 50, Co – 740, Ni – 115 и Cu – 130 лет. При внесении импортных удобрений, с высокими уровнями содержания ТМ, накопление токсикантов в почве может возрасти более чем на порядок.
4. Наибольший отрицательный баланс элементов питания в почве отмечен в вариантах без внесения агроулучшителей и при применении несбалансированных доз минеральных удобрений, что приводит к ухудшению свойств почв и снижению до 1,7 раза урожайности зерновых культур.
5. Характер загрязнения ТМ снежного покрова и почв в зоне влияния выбросов предприятий группы НЛМК определяется полиэлементным составом аэрозольных выпадений в труднорастворимой форме, включая Fe, Mn, Zn, Pb, Cr, Ni, Cu, Cd, Co. Концентрации водорастворимых фракций поллютантов в снежном покрове не превышают значений ПДК для водных объектов, имеющих рыбохозяйственное

значение, за исключением превышений по Cu до 5 раз, Zn до 9 раз. Основные выпадения ТМ происходят на расстоянии до 10 км от источника выброса.

6. На природных участках и целинных кормовых угодьях в районе расположения ПАО «НЛМК» (Липецк) выявлена аккумуляция ТМ в верхних 0-2 и 2-5 см слоях почвы. В ближней зоне воздействия выбросов ПАО «НЛМК» превышение ВМДУ по содержанию Cr в травостое составляет до 16 раз, Ni – до 13 раз, Fe – до 1,5-2,0 раз. В районе ООО «НЛМК-Калуга» превышений ВМДУ в растительности не обнаружено.

7. Установленные закономерности обуславливают необходимость проведения в районах расположения промышленных предприятий агроэкологического мониторинга, обеспечивающего оценку токсико-экологической ситуации, выявление тенденций в ее изменении и прогноза обстановки для организации сельскохозяйственного производства.

8. Разработаны рекомендации по организации сельскохозяйственного производства в зоне воздействия ПАО «НЛМК» (г. Липецк), включающие: оптимизацию сроков уборки урожая зерновых культур в случае информации о залповом выбросе; изменение структуры землепользования на близлежащих к источнику выбросов угодьях – размещение культур, хозяйственно-ценная часть которых находится в почве (корне- и клубнеплоды); выделение участков, наиболее удаленные от источника выбросов, для кормовых угодий.

9. На основании применения СППР рекомендованы оптимальные дозы и сочетания удобрений в случае высоких уровней загрязнения почв ТМ, превышающих ВМДУ, при выращивании пшеницы на участках загрязненных: Zn – совместное внесение минеральных ($N_{60}P_{60}K_{60}$) и органических удобрений (навоз 30 т/га); Cr – минеральных удобрений ($N_{90}P_{90}K_{90}$); Ni – органических удобрений (навоз 30 т/га). Рекомендованные мероприятия обеспечивают снижение накопления ТМ до 1,5 раза, увеличение урожайности до 1,5 раза, рентабельность до 55% при соответствии продукции санитарно-гигиеническим нормативам.

10. На основании применения СППР рекомендованы оптимальные дозы и сочетания удобрений при выращивании картофеля на участках загрязненных: Ni – минеральные удобрения ($N_{30}P_{30}K_{45}$) и органические (навоз 20 т/га); Zn – внесение

навоза в дозе 30 т/га. Рекомендованные мероприятия обеспечивают снижение накопления ТМ до 1,6 раза, увеличение урожайности до 1,4 раза, рентабельность до 89% при соответствии продукции санитарно-гигиеническим нормативам.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

в рецензируемых научных изданиях, индексируемых WoS, Scopus и RSCI

- 1. Курбаков Д.Н., Кузнецов В.К., Сидорова Е.В., Новикова Н.В., Саруханов А.В., Дементьева Н.В.** Содержание тяжелых металлов в почвах агроэкосистем зоны воздействия предприятий Липецкой промышленной агломерации // Экология промышленного производства. – 2023. – № 2 (122). – С. 59-63. DOI: 10.52190/2073-2589_2023_2_59 (**РИНЦ IF (2023) 0,395**) (**0,9/0,6**) (Здесь и далее в скобках приведен объем публикации в печатных листах и вклад автора в печатных листах)
- 2. Курбаков Д.Н., Кузнецов В.К., Сидорова Е.В., Саруханов А.В., Дементьева Н.В., Новикова Н.В.** Сравнительная оценка загрязнения тяжелыми металлами снежного покрова предприятиями черной металлургии // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26, № 8. – С. 59-65. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-8-59-65. (**РИНЦ IF (2023) 1,447**) (**1,1/0,6**)
- 3. Курбаков Д.Н., Кузнецов В.К., Хлопюк М.С., Сидорова Е.В.** Накопление тяжелых металлов в урожае зерновых культур при длительном применении минеральных удобрений // Агрохимия, – 2022. – № 3. – С. 74-80. DOI: 10.31857/S000218812203005X. (**РИНЦ IF (2023) 1,407**) (**1,0/0,4**)
- 4. Курбаков Д.Н., Кузнецов В.К., Сидорова Е.В., Андреева Н.В., Саруханов А.В., Новикова Н.В., Кречетникова Е.О.** Оценка экологического состояния снежного покрова в 30-километровой зоне Новолипецкого металлургического комбината // Экология промышленного производства. – 2021. – № 2(114). – С. 34-40. DOI: 10.52190/2073-2589_2021_2_34 (**РИНЦ IF (2023) 0,395**) (**0,9/0,6**)
- 5. Курбаков Д.Н., Кузнецов В.К., Сидорова Е.В., Андреева Н.В., Новикова Н.В., Саруханов А.В.** Загрязнение снежного покрова в 30-километровой зоне электрометаллургического завода ООО «НЛМК-Калуга» // Экология

промышленного производства. – 2020. – №2 (110). – С. 51-55. **(РИНЦ IF (2023) 0,395) (0,9/0,6)**

6. **Курбаков Д.Н., Кузнецов В.К., Анисимов В.С., Петров К.В.** Особенности распределения тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных угодий в зоне воздействия Липецкой промышленной агломерации // *Агрохимический вестник*. – 2017. – № 6. – С.10-13. **(РИНЦ IF (2023) 2,067) (0,8/0,5)**

Полный список публикаций размещен на странице соискателя в ИАС «Истина»:
<https://istina.msu.ru/workers/641066546/publications/?ysclid=m34ae0ryjm839340221>