

На правах рукописи



**МИТРОФАНОВ ВИТАЛИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**ВЛИЯНИЕ АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ  
НА НАКОПЛЕНИЕ КАДМИЯ И РТУТИ ЗЛАКОВЫМИ КУЛЬТУРАМИ**

Специальность: 06.01.04 – агрохимия

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата сельскохозяйственных наук

Воронеж

2022

Работа выполнена на кафедре почвоведения и агрохимии им. Л.Н. Александровой федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет».

- Научный руководитель:** **Ефремова Марина Анатольевна** – кандидат биологических наук, доцент, кафедра почвоведения и агрохимии им. Л.Н. Александровой ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», доцент
- Официальные оппоненты:** **Витковская Светлана Евгеньевна** – доктор биологических наук, доцент, кафедра геоэкологии, природопользования и экологической безопасности ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», профессор  
**Морозова Тамара Сергеевна** – кандидат сельскохозяйственных наук, кафедра земледелия, агрохимии, землеустройства, экологии и ландшафтной архитектуры ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина», доцент
- Ведущая организация:** ФГБУН «Институт почвоведения и агрохимии», Сибирское отделение Российской академии наук

Защита диссертации состоится «26» сентября 2022 года в 10 часов ауд. 149 на заседании диссертационного совета Д.220.010.07 на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, 1; тел./факс +7(473) 253-86-51, e-mail: stekolnikova-nv@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» и на сайте [www.ds.vsau.ru](http://www.ds.vsau.ru), с авторефератом на сайте ВАК Министерства образования и науки РФ [www.vak.minobrnauki.gov.ru](http://www.vak.minobrnauki.gov.ru) и ВГАУ [www.ds.vsau.ru](http://www.ds.vsau.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные и скрепленные гербовой печатью организации, просим направить ученому секретарю диссертационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Стекольников Н.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время за счет интенсивного использования почвенного плодородия, средств химизации и других научных достижений человек получает 98-99% продовольствия в результате хозяйственной деятельности (Добровольский, Трофимов, 2004). По данным ВНИИ им. Д.Н. Прянишникова урожайность зерновых культур в Российской Федерации составляет 25 ц/га в среднем по стране и может быть значительно увеличена при применении минеральных удобрений (Сычев, Шафран, Виноградова, 2020). В северо-западном регионе Российской Федерации широкое распространение получили дерново-подзолистые почвы, обладающие невысоким плодородием. Для увеличения плодородия этих почв эффективно внесение минеральных удобрений на фоне известкования почвы.

Однако уровень и состав агрохимических мероприятий влияет на физико-химические и биологические свойства почвы, изменяя скорость биогеохимических потоков макро- и микроэлементов, что в ряде случаев является причиной формирования неблагоприятной экологической обстановки. Изменение скорости миграции тяжелых металлов в системе почва-растение – одна из составляющих такого явления.

Тяжелые металлы в количествах, значительно превышающих фоновые, появляются в почве в результате её техногенного и агрогенного загрязнения. В нашей стране насчитывается около 100 тысяч опасных производств и объектов – источников техногенного загрязнения территории, из них приблизительно 3 тысячи химических (Янин, 2014). Агрогенное загрязнение связано с внесением в почву удобрений, мелиорантов, средств химической защиты растений, содержащих в своем составе большой спектр токсичных химических элементов (Витковская, 2017). К наиболее опасным поллютантам относят кадмий и ртуть, подвижность которых в системе почва-растение резко различается, однако для обоих металлов отмечается возможность транслокации в культурные растения из почвы, сопровождающейся хроническим накоплением токсикантов в организме человека (Исидоров, 1999). В связи с этим изучение накопления кадмия и ртути растениями из дерново-подзолистой почвы, на которой интенсивно используются химические средства увеличения урожайности сельскохозяйственных культур, является актуальным.

**Цель работы:** изучить накопление кадмия и ртути злаковыми сельскохозяйственными культурами из дерново-подзолистой почвы, при изменении ее агрохимических свойств.

Для достижения намеченной цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить изменение физико-химических показателей дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы при проведении известкования.
2. Оценить показатели накопления кадмия в вегетативных и репродуктивных органах пшеницы при изменении кислотности дерново-подзолистой почвы.

3. Провести сравнительную оценку накопления кадмия и ртути яровой пшеницей из не загрязненной тяжелыми металлами дерново-подзолистой почвы при изменении почвенной кислотности.

4. Исследовать динамику набора массы пшеницы и овса и динамику накопления кадмия и ртути злаковыми культурами при их выращивании на загрязненном минеральном техногенном почвенном грунте и на стандартном питательном растворе с использованием математической модели, основанной на логистической функции.

5. Сравнить удельные скорости накопления тяжелых металлов (кадмий, ртуть) и их максимальный вынос злаковыми культурами из минерального почвенного грунта с щелочной реакцией среды.

6. Сравнить коэффициенты накопления кадмия и ртути злаковыми культурами из кислой дерново-подзолистой почвы, минерального почвенного грунта с щелочной реакцией среды и стандартного питательного раствора.

7. Изучить накопление кадмия пшеницей из дерново-подзолистой почвы, загрязненной медью, при изменении содержания в почве фосфора.

**Научная новизна.** Впервые дан сопряженный анализ влияния известкования незагрязненной тяжелыми металлами дерново-подзолистой почвы на изменение её агрохимических показателей и накопление кадмия и ртути яровой пшеницей.

Впервые дана сравнительная оценка динамики накопления кадмия и ртути из почвы двумя злаковыми культурами при использовании математической модели миграции тяжелых металлов в системе почва-растение, основанной на логистической функции.

Впервые проведено сравнение удельной скорости выноса кадмия и ртути растениями овса и пшеницы, а также максимального выноса металлов злаковыми культурами из твердого почвенного субстрата и стандартного питательного раствора.

**Теоретическая и практическая значимость.** Полученные в работе результаты отражают важные теоретические аспекты формирования показателей накопления кадмия и ртути злаковыми культурами (концентрации, коэффициентов накопления, выноса элемента) под влиянием агрохимических свойств почвы. Дан сравнительный анализ динамики накопления химических элементов-аналогов кадмия и ртути злаковыми растениями в течение их роста и развития. При использовании математической модели динамики накопления химических элементов из почвы были определены удельные скорости накопления кадмия и ртути злаковыми культурами, максимальный вынос элементов растениями. В модельных экспериментах с водной и почвенной культурами оценен вклад твердой фазы почвы в формирование показателей накопления кадмия овсом и пшеницей.

Практическая значимость работы заключается в установлении закономерностей накопления кадмия и ртути пшеницей и овсом из дерново-подзолистой почвы, которые могут быть полезны при разработке экологических требований по возделыванию злаковых культур на загрязненных тяжелыми металлами почвах с низким естественным плодородием, где интенсивно ис-

пользуются мелиоранты и минеральные удобрения. Полученные данные могут быть востребованы при прогнозировании показателей накопления тяжелых металлов растениями из загрязненной почвы, а также для определения оптимальных путей рекультивации почвы, загрязненной кадмием и ртутью.

**Методология и методы исследований.** При решении задач были поставлены полевой, вегетационные и лабораторный опыты в соответствии с методикой агрохимических исследований. Физико-химические исследования почв и растений были проведены на кафедре почвоведения и агрохимии ФГБОУ ВО СПбГАУ в аккредитованной аналитической лаборатории университета по стандартным, аттестованным или общепринятым в агрохимии и почвоведении методикам. При выполнении работы использовались математическая модель, предложенная В.Ф. Дричко.

**Достоверность полученных научных результатов.** Достоверность полученных результатов подтверждается строгим соблюдением методики агрохимических исследований: экспериментальных и химико-аналитических работ. Необходимый объем выборки данных обеспечен достаточным количеством повторностей опытов. Результаты исследований прошли статистическую обработку, подтвердившую их достоверность. Данные экспериментов обобщены и представлены в виде выводов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Известкование кислой дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы доломитовой мукой в дозе, составляющей 60% от полной дозы, вызывает достоверное снижение гидролитической кислотности почвы, изменение обменной кислотности от кислой к нейтральной, существенно снижает содержание подвижных соединений фосфора и достоверно увеличивает урожайность яровой пшеницы.

2. При снижении кислотности дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы снижается содержание кадмия в зерне и соломе яровой пшеницы, наблюдается устойчивая тенденция увеличения накопления ртути в соломе пшеницы.

3. Динамика выноса кадмия и ртути пшеницей и овсом из среды их произрастания (минеральный почвенный грунт, питательный раствор) хорошо описывается логистической функцией. Удельная скорость выноса и максимальный вынос Cd злаковыми культурами из почвогрунта с щелочной реакцией среды выше, чем Hg.

4. Коэффициенты накопления Cd в растениях овса, произрастающих на минеральном техногенном почвенном грунте со щелочной реакцией среды, выше, чем в растениях пшеницы в 1,25 раза. Коэффициенты накопления Hg в злаковых культурах на два порядка ниже коэффициентов накопления Cd и существенно не различаются по видам растений.

5. Увеличение дозы двойного суперфосфата в 4 раза способствует снижению коэффициентов накопления Cd пшеницей из дерново-подзолистой почвы в 3,3 раза.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты научно-классификационной работы докладывались и обсуждались на международном

научном форуме "Новые материалы. Дни науки. Санкт-Петербург. 2015" (г. Санкт-Петербург, Экспофорум, 2015), на международных научно-практических конференциях "Наука и образование как основа устойчивого развития агропромышленного комплекса" (г. Санкт-Петербург, 25-27 января 2018) "Роль молодых ученых в решении актуальных задач АПК" (Санкт-Петербург, 1-2 марта 2018)

**Публикации автора.** Основные результаты научно-квалификационной работы опубликованы в 10 печатных работах, в том числе 5 – в журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

**Организация исследования и личный вклад соискателя.** Научные исследования выполнялись в ФГБОУ ВО СПбГАУ на кафедре почвоведения и агрохимии имени Л.Н. Александровой согласно плану научно-исследовательских работ, утвержденных на 2015-2019 гг. Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации, составляет около 75%. Автор самостоятельно проводил анализ литературы по теме, участвовал в обсуждении постановки цели и задач диссертации, лично участвовал в разработке схем опыта и их реализации на всех этапах: выбор опытного участка и первичный его анализ, закладка опыта, проведение агротехнических мероприятий, отбор почвенных и растительных образцов. Соискатель также проводил количественный химический анализ образцов на аналитическом оборудовании, собирал и обрабатывал данные экспериментальных и аналитических исследований, принимал активное участие в статистической обработке результатов, математическом моделировании динамики накопления тяжелых металлов растениями, теоретическом осмыслении полученных результатов, написании научных статей и представлении их на конференциях и форумах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 128 страницах компьютерного текста. Состоит из введения, 3 глав, заключения, рекомендаций производству, перспектив дальнейшей разработки темы, списка цитируемой литературы, включающего 181 наименований, среди которых 124 отечественных и 57 иностранных авторов. Текстовая часть работы содержит 16 рисунков, 20 таблиц и 1 приложение.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформированы цель и задачи исследования, показана научная новизна и теоретическая и практическая значимость научно-исследовательской работы, обоснована достоверность полученных результатов, приведена апробация результатов исследования, а также представлены основные положения, выносимые на представление научного доклада.

**В первой главе** «Поведение кадмия и ртути в системе почва-растение» представлен литературный обзор по заданной тематике, раскрыты химические

свойства Cd и Hg, а также источники их поступления в агроландшафты. Дано представление о нативных содержаниях кадмия и ртути в почвах, показаны факторы, влияющие на накопления кадмия и ртути растениями из почвы, а также биохимическая роль тяжелых металлов и их воздействие на живые организмы.

**Во второй главе «Объекты и методы исследований»** описывается схемы закладки опытов, а также используемые в опытах удобрения, мелиоранты и экотоксиканты, характеристика используемых субстратов и зерновых культур. Описаны определяемые показатели, методики анализов, способы подготовки объектов исследований к дальнейшим анализам. В рамках выполнения поставленных задач были заложено 5 опытов: 1 полевой, 2 вегетационных и 1 лабораторный. Данные опыты, а также дальнейший их анализ и лабораторные исследования были проведены на кафедре почвоведения и агрохимии им. Л.Н. Александровой ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургского государственного аграрного университета».

**Мелкоделяночный полевой опыт** по установлению влияния известкования почвы на накопление Cd и Hg пшеницей яровой был заложен на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве, сформированной на моренных отложениях. Почва опытного участка имела повышенное содержание органического вещества ( $C_{орг}$ ), подвижных соединений фосфора и калия, повышенную степень насыщенности основаниями (V) (Таблица 1). Согласно показателю обменной кислотности почва кислая и требует проведения известкования в целях повышения урожайности сельскохозяйственных растений.

Таблица 1 – Физико-химическая характеристика дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы перед закладкой полевого опыта

$C_{орг}$	pH кCl	Hg	S	V	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Hg	Cd
					подвижная форма			
%	-	ммоль(экв)/ 100 г		%	мг/кг			
4,89	4,91	3,3	18,8	85,0	153,5 ±23,0	220,0 ±29,8	0,06 ±0,01	0,74 ±0,15

Валовое содержание кадмия близко к нормативному показателю ориентировочно-допустимой концентрации металла (ОДК) в суглинистой почве с  $pH < 5,5$  (ОДК = 1,0 мг/кг), что указывает на слабую категорию загрязнения почвы. Содержание Hg в почве соответствует фоновому и было существенно ниже предельно-допустимой концентрации (ПДК=2,1 мг/кг).

Схема полевого опыта состояла из 6 вариантов, взятых в четырёхкратной повторности. Доломитовая мука (Д) была внесена в почву в возрастающих дозах на фоне применения комплексного удобрения азофоски (NPK = 16:16:16 % д.в.):

- |   |                 |                 |
|---|-----------------|-----------------|
| 1) N <sub>90</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub> – фон; | 2) фон + 0,2 Д; | 3) фон + 0,4 Д; |
| 4) фон + 1,0 Д;   | 5) фон + 1,4 Д; | 6) фон + 1,8 Д. |

Полная доза мелиоранта (1,0 Д) была эквивалентна дозе, необходимой для нейтрализации гидролитической кислотности почвы и составила 5,0 т/га. Таким

образом, дозы доломитовой муки в опыте возрастали в диапазоне от 1,0 до 9,0 т/га. Площадь опытной делянки – 6 м<sup>2</sup> (2х3 м). Делянки были размещены систематическим методом, общая территория опытного участка составила 144 м<sup>2</sup>. В опыте выращивалась пшеница яровая сорта Сударыня. Растения пшеницы были убраны в фазу полной спелости на 84-е сутки роста.

После уборки опыта почва для анализа отбиралась с каждой делянки с глубины 25 см. В почве было определено валовое содержание углерода и азота, сумма поглощенных оснований, обменная кислотность почвы (рН<sub>KCl</sub>), гидролитическая кислотность почвы, подвижные соединения фосфора и калия, валовое содержание ртути и кадмия по общепринятым и стандартным методикам.

В растениях пшеницы было определено содержание азота и углерода, ртути и кадмия. Растительные образцы, собранные с каждой делянки, готовили к атомно-абсорбционному анализу методом озоления пробы в смеси концентрированных кислот HNO<sub>3</sub> и HClO<sub>4</sub>, взятых в соотношении 4:1. Результаты эксперимента были обработаны статистически методами вариационной статистики и корреляционного анализа на уровне значимости p = 0,05.

**Вегетационный опыт** по установлению динамики накопления Cd и Hg овсом сорта Скакун и пшеницей сорта Дарья из техногенного почвогрунта со щелочной реакцией среды был заложен на территории малого опытного поля СПбГАУ. Исходные агрохимические показатели почвенного грунта определены в соответствии с методиками ГОСТ и представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Агрохимическая характеристика почвенного грунта

C <sub>орг</sub> , %	рН KCl	S, ммоль(экв)/ 100 г	Подвижные соединения		Валовое содержание	
			P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Cd	Hg
			мг/кг			
1,9	7,85	50,4	92,3	38,5	0,72±0,16	0,070±0,002

Используемый в вегетационном опыте дисперсный минеральный техногенно образованный почвенный грунт обладал близкой к щелочной реакцией среды, очень низким содержанием гумуса, средним содержанием фосфора, очень низким содержанием калия, очень высокой степенью насыщенности основаниями. Гранулометрический состав грунта – тяжелый суглинок. Валовое содержание ртути и кадмия в минеральном почвогрунте до искусственного загрязнения было ниже уровней допустимого содержания.

Растения выращивали в сосудах Кирсанова, содержание почвенного грунта в одном сосуде – 5 кг.

Схема опыта:

1. N<sub>0,10</sub>P<sub>0,10</sub>K<sub>0,10</sub> + Cd + Hg (пшеница)
2. N<sub>0,10</sub>P<sub>0,10</sub> K<sub>0,10</sub> + Cd + Hg (овёс)

При закладке опыта почвогрунт был искусственно загрязнен ртутью до 0,5 ПДК и кадмием до 0,5 ОДК. Тяжёлые металлы были внесены в виде раствора соли нитрата ртути и ацетата кадмия. В почву одновременно были внесены макроэлементы питания растений в составе азофоски (NPK=16:16:16 % д.в.). Количество питательных элементов, поступившее с удобрениями, составило: N – 0,10 г /кг почвы, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,10 г/кг, K<sub>2</sub>O – 0,10 г/кг. Влажность почвы поддерживалась на уровне 70% от полной полевой влагоёмкости.

После прореживания злаковых культур в начале фазы проростков в каждом сосуде было оставлено 25 растений. Злаковые растения убирали в динамике 10 раз: на 14, 21, 26, 31, 37, 42, 51, 59, 70, 83 сутки после всходов. Опыт поставлен в трёхкратной повторности.

После уборки растений в них определялось содержание кадмия и ртути атомно-абсорбционным методом. Статистическая и математическая обработка результатов исследования проведена с использованием компьютерных программ Excel и Origin. Удельные скорости роста злаковых культур и выноса ими тяжелых металлов из почвы были определены по методике, описанной В.Ф. Дричко (2011), основанной на использовании логистической функции при математической обработке полученных данных.

**Лабораторный опыт** с водной культурой по установлению динамики накопления Cd овсом сорта «Аргмак» и пшеницей сорта «Дарья». Растения выращивали на стандартной питательной смеси Митчерлиха, сбалансированной по основным макроэлементам питания растений с начальным показателем pH 5,97. Дополнительно в смесь была введена соль CdSO<sub>4</sub> с тем расчетом, чтобы создать концентрацию кадмия 0,01 ммоль/л раствора, к которой растения проявляют резистентность. Овес и пшеницу выращивали в стеклянных емкостях (сосудах) объемом 250 мл в течение 42 суток с момента прорастания семян. В каждый сосуд было размещено по 12 растений, которые с момента закладки опыта крепились на фильтровальной бумаге, свернутой в рулон и опущенной в питательный раствор. В период роста растений было сделано 9 отборов растительных проб – на 10, 14, 18, 23, 28, 31, 35, 38, 42 сутки роста, в четырех повторностях при выращивании пшеницы и пяти повторностях при выращивании овса.

Корни и надземную часть растений доводили до воздушно-сухого состояния. После в них определялась концентрация кадмия. Статистическая и математическая обработка результатов исследования сделана с использованием компьютерных программ Excel и Origin. Динамика роста овса и пшеницы и динамика накопления кадмия растениями из раствора описаны с использованием логистической функции.

**Вегетационный опыт** по изучению зависимости накопления Cd пшеницей сорта Дарья от содержания фосфора в почве был поставлен на хорошо окультуренной дерново-подзолистой среднесуглинистой почве. Почва характеризовалась высоким содержанием органического вещества, реакцией среды близкой к нейтральной, повышенным содержанием подвижного фосфора и калия, высокой степенью насыщенности основаниями и не нуждалась в известковании (Таблица 3).

Таблица 3 – Агрохимическая характеристика дерново-подзолистой почвы

C <sub>орг</sub> , %	pH <sub>кcl</sub>	Нr	S	V, %	Подвижные соединения мг/кг		Валовое содержание, мг/кг	
					ммоль(экв)/100 г почвы	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Cd
5,9	5,54	1,05	29,0	95,0	164,2	150,0	0,88	33,1

В опыте дозы фосфора различались от 0,025 до 0,1 г P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/кг, для внесения макроэлемента был использован двойной суперфосфат (Таблица 4). В качестве фона в почву были внесены аммиачная селитра и хлористый калий. Опыт был заложен в пятикратной повторности.

Таблица 4 – Схема вегетационного опыта по изучению зависимости накопления Cd пшеницей от содержания фосфора в почве

Варианты опыта	Содержание вариантов
1	N <sub>0,1</sub> K <sub>0,1</sub> - - Фон
2	Фон + P <sub>0,025</sub>
3	Фон+P <sub>0,05</sub>
4	Фон+P <sub>0,1</sub>

В почву при закладке опыта был внесен раствор солей тяжелых металлов Cd(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub> и CuSO<sub>4</sub>. С учетом фонового содержания (Таблица 3) почва была загрязнена до уровня 1 ОДК по Cd и до 0,5 ОДК по Cu.

Для постановки вегетационного опыта использовали сосуды Кирсанова вместимостью 5 кг. В каждом сосуде после прореживания было оставлено 15 растений пшеницы. Уборка растений произведена в фазу колошения. Подготовка растительных образцов к определению макроэлементов питания растений (фосфора и калия) осуществлялась методом мокрого озоления. Для определения тяжелых металлов растения были подготовлены методом сухого озоления. Полученные в эксперименте данные были обработаны методами дисперсионного и корреляционного анализов.

**В третьей главе «Накопление кадмия и ртути злаковыми культурами при разных условиях произрастания»** описаны результаты поставленных опытов и сделанные на их основании выводы.

**Полевой опыт. Влияние известкования почвы на накопление кадмия и ртути пшеницей яровой из дерново-подзолистой почвы.**

При увеличении дозы доломитовой муки в диапазоне 1,0–9,0 т/га гидролитическая кислотность почвы снизилась в 3 раза по сравнению с контролем, обменная кислотность дерново-подзолистой почвы изменилась от кислой к нейтральной (Таблица 5). Статистическая обработка показала высокую достоверную корреляционную связь показателя обменной кислотности почвы pH<sub>кcl</sub> от дозы мелиоранта. Существенное снижение гидролитической кислотности по сравнению с контролем отмечено только в вариантах с небольшими дозами доломитовой муки 0,2–0,6 Д (1–3 т/га). Содержание подвижных соединений фосфора в почве достоверно уменьшилось в 2,2 раза, при увеличении дозы долами-

товой муки от 1,0 до 9,0 т/га что, вероятно, связано со снижением растворимости минеральных фосфатов при уменьшении кислотности почвы (Рисунок 1).

После известкования кислотность почвы, начиная с варианта, где доза доломитовой муки составила 3,0 т/га (0,6 Д), соответствовала зоне оптимума для выращиваемой культуры. В этом варианте сырая и сухая надземная биомасса пшеницы, а также масса зерна пшеницы были достоверно выше, чем в контроле (Рисунок 2, 3). При дальнейшем повышении дозы мелиоранта продуктивность растений не изменялась.

Таблица 5 – Физико-химическая характеристика дерново-подзолистой почвы после уборки опыта

Варианты	Доза CaCO <sub>3</sub> •MgCO <sub>3</sub> , т/га	рН ксл	Нг	Нг	Cd
			ммоль(экв)/100 г	валовое содержание, мг/кг	
1. NPK – фон (контроль)	-	5,17	2,29 <sup>a</sup> ±0,43 <sup>b</sup>	<u>0,061</u> <sup>a</sup> 0,013 <sup>b</sup>	<u>0,471</u> <sup>a</sup> 0,114 <sup>b</sup>
2. Фон + 0,2 Д	1,0	5,81	1,48 ±0,28	<u>0,064</u> 0,014	<u>1,129</u> 0,305
3. Фон + 0,6 Д	3,0	6,11	0,88 ±0,22	<u>0,059</u> 0,011	<u>0,504</u> 0,147
4. Фон + 1,0 Д	5,0	6,08	0,79 ±0,13	<u>0,060</u> 0,009	<u>0,755</u> 0,152
5. Фон + 1,4 Д	7,0	6,26	0,79 ±0,11	<u>0,054</u> 0,009	<u>0,610</u> 0,124
6. Фон + 1,8 Д	9,0	6,24	0,75 ±0,13	<u>0,059</u> 0,005	<u>0,777</u> 0,131
Корреляция с дозой мелиоранта (R)	-	0,86*	-0,81	-0,003	0,516

Примечание: а - среднее значение, б - стандартное отклонение, \* - уровне значимости 0,05

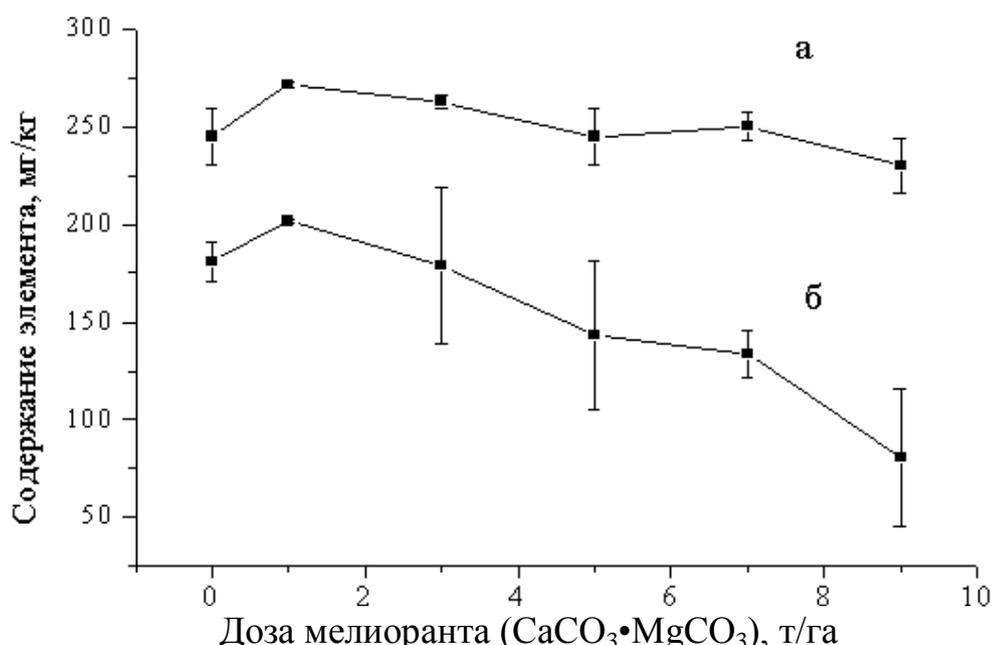


Рисунок 1 – Зависимость содержания подвижных соединений фосфора и калия в почве от дозы доломитовой муки: а - K<sub>2</sub>O (R= -0,58); б - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (R= -0,91)

Статистический анализ выявил снижение концентрации Cd в зерне пшеницы при увеличении дозы доломитовой муки. Полная доза  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 - 1,0 \text{ Д}$  (5 т/га) была наиболее эффективной, т.к. в 5 раз снижала содержание Cd в соломе пшеницы (Таблица 6).

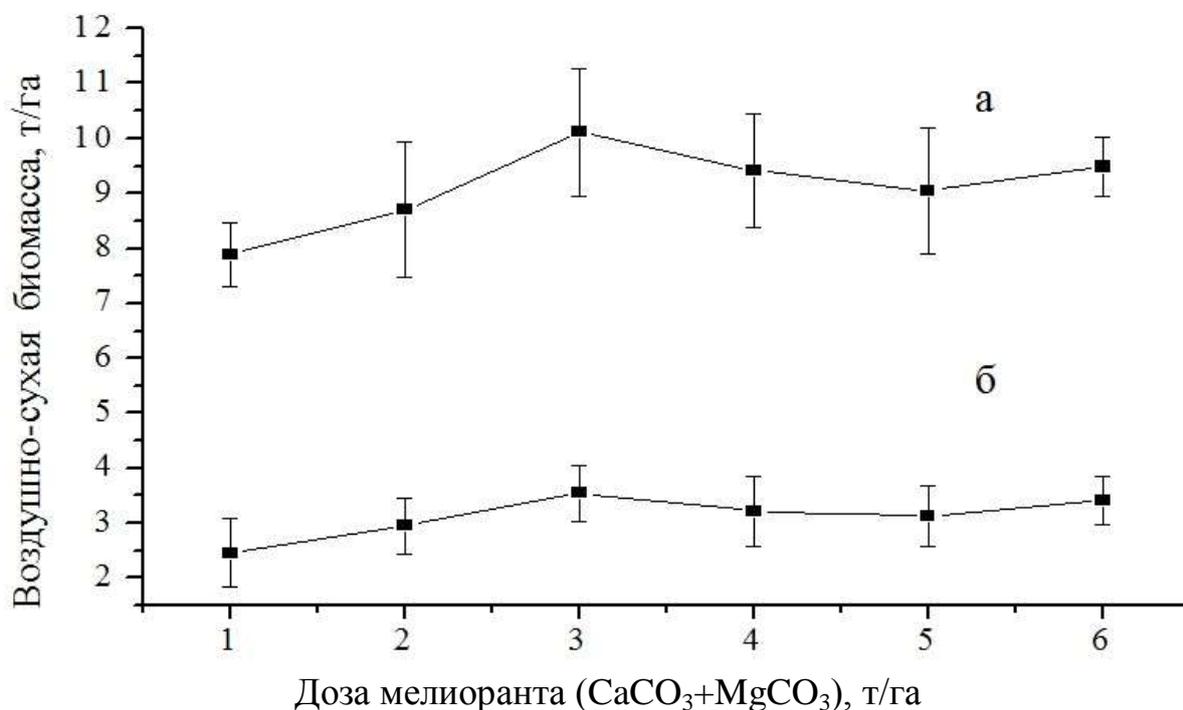


Рисунок 2 – Зависимость надземной биомассы пшеницы от дозы доломитовой муки: а - сырая масса ( $R=0,723$ ) б - сухая масса ( $R=0,645$ )

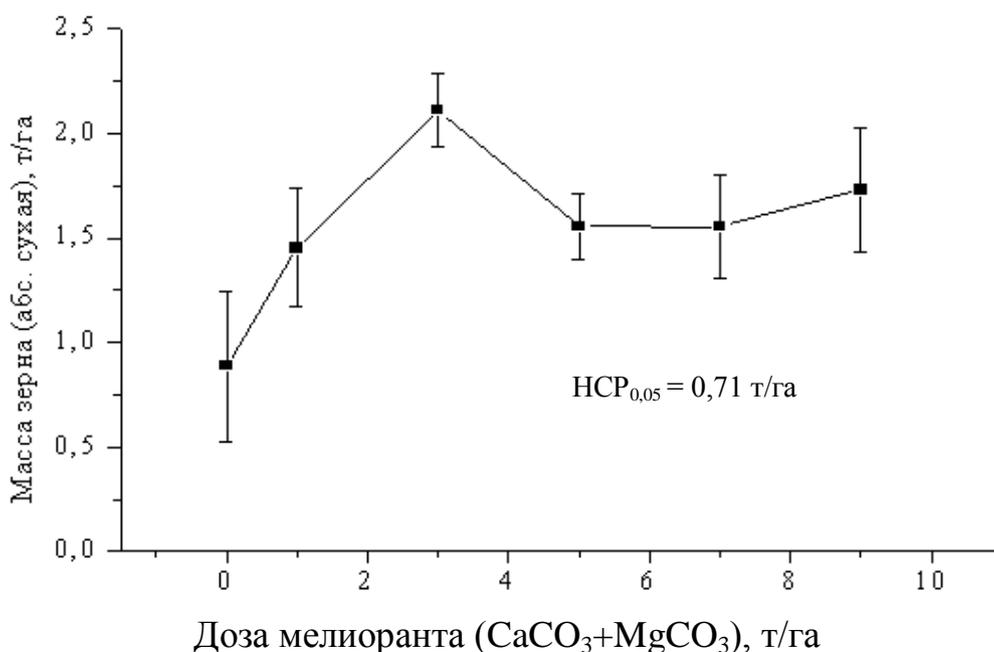


Рисунок 3 – Зависимость абсолютно-сухой массы зерна пшеницы от дозы доломитовой муки ( $R=0.475$ )

Таблица 6 – Содержание химических элементов в соломе и зерне пшеницы, мкг/кг

Варианты	Солома			Зерно
	Hg	Cd	S	Cd
1. НРК – фон	7,53±0,79	62,2±13,7	56000	35,60±9,25
2. Фон + 0,2 Д	11,73±1,76	63,0±13,2	63000	33,00±6,13
3. Фон + 0,6 Д	8,83±1,86	33,4±7,7	42000	31,75±6,78
4. Фон + 1,0 Д	11,30±2,70	40,1±8,9	56500	7,65±2,17
5. Фон + 1,4 Д	9,80±3,44	45,0±8,8	38500	12,05±2,94
6. Фон + 1,8 Д	10,88±3,40	41,9±9,4	32000	16,40±3,61
R (от дозы CaCO <sub>3</sub> •MgCO <sub>3</sub> )	0,390	-0,629	-0,81	-0,805

Коэффициенты накопления (КН) тяжелых металлов растениями из почвы, рассчитанные как отношение содержания элемента в растениях к их содержанию в почве представлены на рисунке 4.

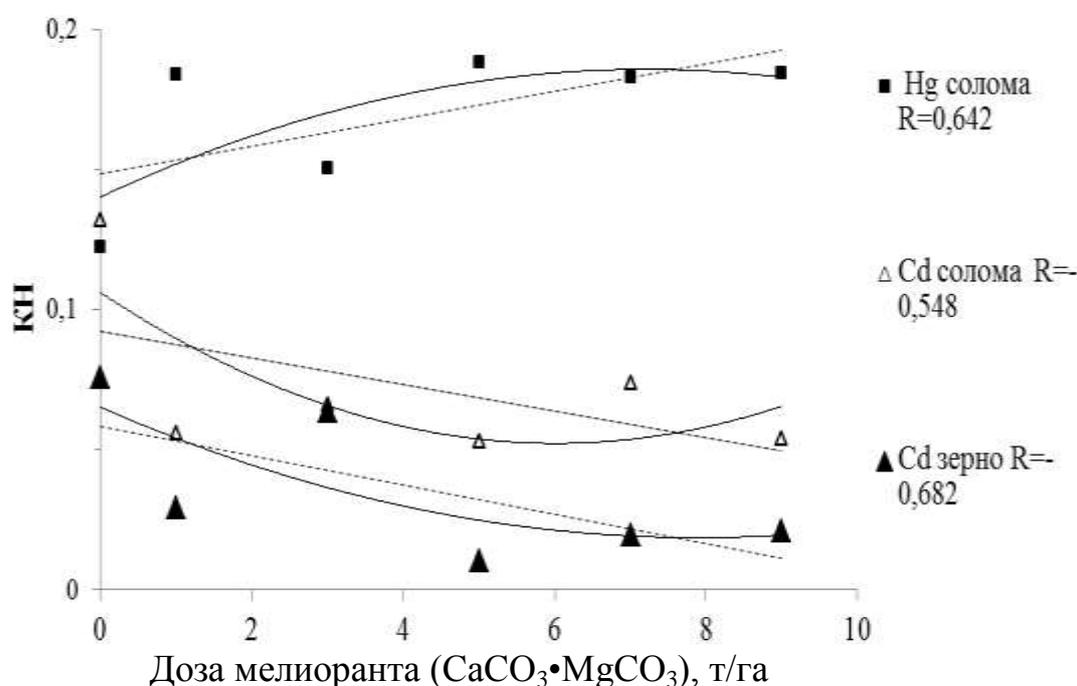


Рисунок 4 – Зависимость КН Cd и Hg в растениях пшеницы от дозы доломитовой муки

С увеличением дозы доломитовой муки КН Hg соломой пшеницы из дерново-подзолистой почвы слабо возрастали, а КН Cd – снижались. КН Cd в соломе пшеницы более чем в 2 раза меньше, чем показатели накопления Hg. Обнаружена тесная корреляционная связь между показателями кислотности почвы и коэффициентами накопления Cd в соломе и зерне пшеницы (Таблица 7). Увеличение дозы извести в 9 раз снижало КН Cd в растениях из дерново-подзолистой почвы пшеницы в 2,2 раза.

Таблица 7 – Коэффициенты линейной корреляционной зависимости между коэффициентом накопления тяжелых металлов растениями пшеницы и показателями кислотности почвы

Показатели	Hg	pH <sub>KCl</sub>
КН Cd (зерно)	-0,686	0,735
КН Cd (солома)	0,836*	-0,842*
КН Hg (солома)	-0,746	0,775

Примечание: \* - достоверная корреляционная связь при  $p = 0,05$

Изучение корреляционной зависимости между КН Hg в соломе пшеницы и показателями кислотности почвы выявило тенденцию к увеличению доступности ртути для растений при снижении кислотности среднесуглинистой дерново-подзолистой почвы (Таблица 9).

Таким образом, несмотря на то, что Cd и Hg являются химическими элементами-аналогами, их накопление пшеницей из дерново-подзолистой почвы не подчиняется общим закономерностям и по-разному откликается на снижение кислотности почвы при её известковании.

#### Вегетационный опыт. Динамика накопления кадмия и ртути овсом и пшеницей из почвогрунта.

В вегетационном опыте рост овса и пшеницы на техногенном загрязненном ТМ почвогрунте хорошо описывался S-образной кривой (Рисунок 5) и логистической функцией:

$$M(t) = \frac{M_{max}}{1 + \left[ \frac{M_{max}}{M_0} - 1 \right] e^{(-\mu t)}} \quad (1)$$

где  $M_{max}$  – максимально возможная масса растений, г/сосуд;  $M_0$  – некоторая начальная масса растений, г/сосуд;  $\mu$  – константа удельной скорости накопления массы растений в экспоненциальный период их роста, сут<sup>-1</sup>,  $t$  – время, прошедшее от момента прорастания зерна, сут.

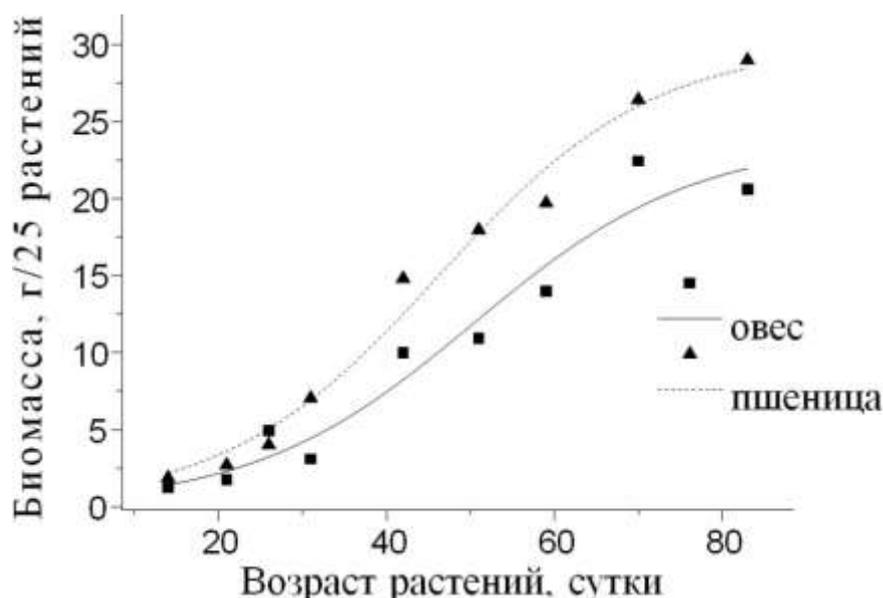


Рисунок 5 – Динамика воздушно-сухой массы зерновых культур в вегетационном опыте

Показатели логистической функции были рассчитаны в программе Origin и представлены в таблице 8. В процессе моделирования оптимальные значения параметров функции устанавливались по максимальным коэффициентам детерминации данных.

Таблица 8 – Показатели логистической функции динамики накопления массы злаковых культур и выноса ими химических элементов

Масса растений		Вынос элементов		
показатель	значение	показатель	значение	
			Cd	Hg
овес				
$M_0$ , г/25 растений	0,50	$A_0$ , мкг/25 растений	0,20	0,05
$M_{max}$ , г/25 растений	23,80±3,31	$A_{max}$ , мкг/25 растений	22,1±5,7	0,44±0,06
$\mu$ , сут <sup>-1</sup>	0,076±0,019	$\varepsilon$ , сут <sup>-1</sup>	0,236	0,050
$T$ , сут	9,1	$T$ , сут	2,9	13,8
$R^2$	0,98	$R^2$	0,98	0,97
пшеница				
$M_0$ , г/25 растений	0,77	$A_0$ , мкг/25 растений	-	0,1
$M_{max}$ , г/25 растений	30,05±2,01	$A_{max}$ , мкг/25 растений	25,7±4,2	0,44±0,07
$\mu$ , сут <sup>-1</sup>	0,079±0,011	$\varepsilon$ , сут <sup>-1</sup>	0,130	0,069
$T$ , сут	8,77	$T$ , сут	5,3	10,0
$R^2$	0,99	$R^2$	0,93	0,79

Экспоненциальный период роста растений, представляющий собой начальную стадию роста и развития растений, составил 21 сутки и охватил физиологические фазы всходов и начало кущения злаков. Период ( $T$ ) удвоения массы растений овса и пшеницы в этот период был рассчитан по формуле (2) и составил в среднем 9 суток для обеих культур (Дричко и др., 2011):

$$T = 0,693/\mu \quad (2)$$

Динамика выноса химических элементов растениями из почвы, также как и набор массы растениями во времени, может быть описана S-образной логистической функцией (Дричко и др., 2011; Сладкова, 2016; Ефремова и др., 2016, 2018):

$$A(t) = \frac{A_{max}}{1 + \left[ \frac{A_{max}}{A_0} - 1 \right] e^{(-\varepsilon t)}} \quad (3)$$

где  $A_{max}$  – максимальный вынос химического элемента растениями, мг/сосуд;  $A_0$  – начальный вынос химического элемента в момент прорастания зерна, мг/сосуд;  $\varepsilon$  – удельная скорость выноса химического элемента растениями в экспоненциальный период выноса, сут<sup>-1</sup>;  $t$  – время, сут.

Как показал математический анализ данных, вынос Cd и Hg овсом и пшеницей из почвогрунта в период роста растений до 83 суток после прорастания

хорошо описывается логистической функцией (Рисунок 6, 7). Показатели логистической функции, характеризующие вынос ТМ злаковыми культурами, представлены в таблице 10.

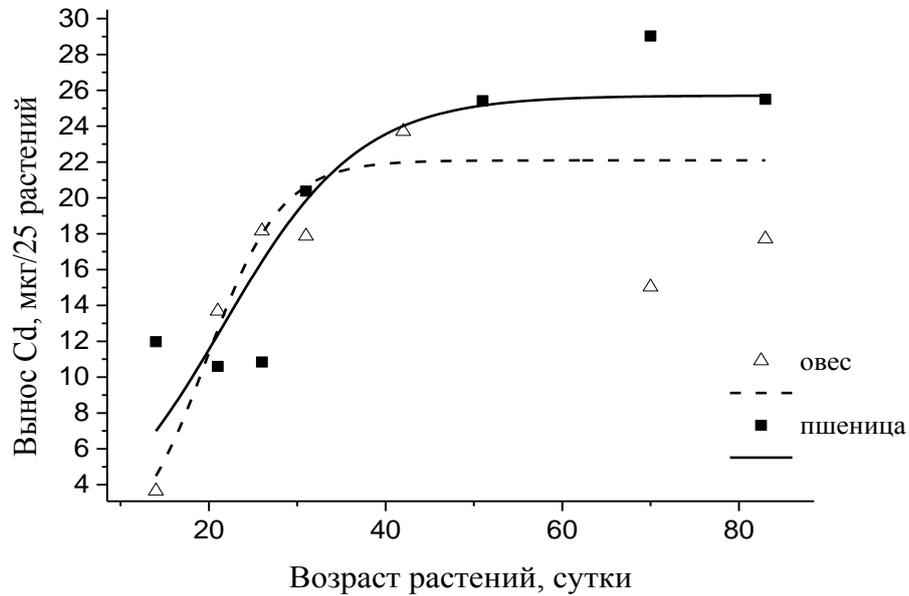


Рисунок 6 – Вынос кадмия злаковыми культурами из почвогрунта

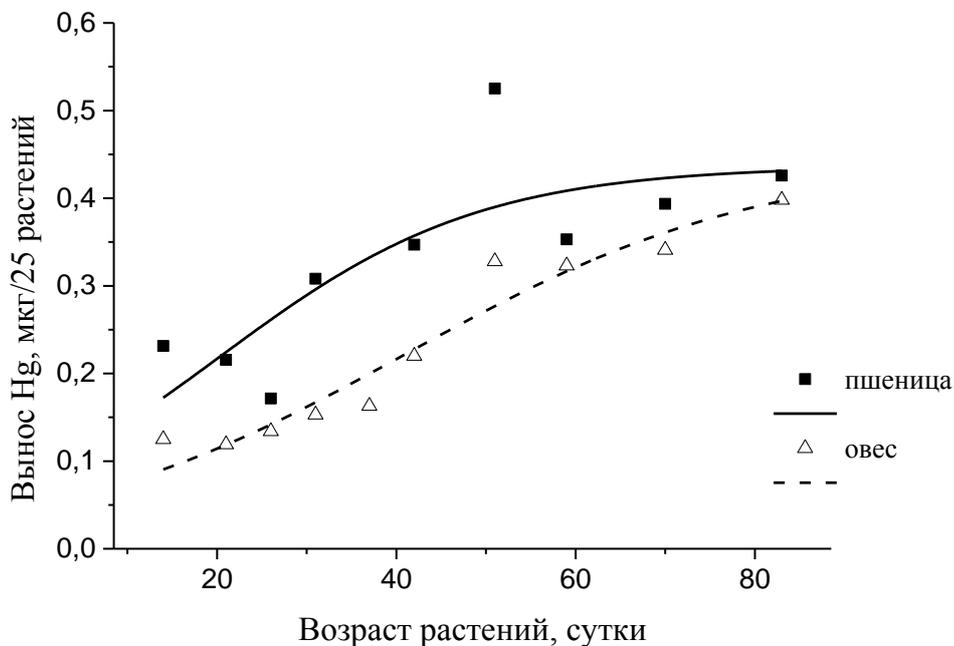


Рисунок 7 – Вынос ртути злаковыми культурами из почвогрунта

Удельная скорость выноса кадмия овсом ( $\epsilon$ ) в 1,8 раз больше, чем пшеницей, удельные скорости выноса ртути овсом и пшеницей различаются не значи-

тельно. Удельная скорость выноса ртути овсом из почвогрунта ниже, чем кадмия в 5 раз, а для пшеницы – в 2 раза. Период удвоения (Т) выноса Cd овсом в 5 раз выше, чем выноса Hg. Период удвоения выноса Cd пшеницей в 2 раза выше, чем период удвоения выноса Hg. По-видимому, это объясняется генетическими особенностями растений и механизмами закрепления металлов в твердой фазой почве.

Удельная скорость выноса ( $\varepsilon$ ) кадмия пшеницей и овсом из почвогрунта с щелочной реакцией среды была соответственно в 2 и 5 раз больше удельной скорости выноса ртути. Максимальный вынос кадмия злаковыми культурами из почвогрунта был в 50-60 раз выше, чем ртути. Максимальный вынос ртути растениями из почвогрунта в среднем составил 0,01%, кадмия – 0,3% от внесенного в почвенный субстрат количества металлов.

В таблице 9 приведены коэффициенты накопления тяжелых металлов злаковыми культурами.

Таблица 9 – Коэффициенты накопления тяжелых металлов злаковыми культурами из техногенного почвогрунта

Период после прорастания, сутки	Овес		Пшеница	
	Cd	Hg	Cd	Hg
14	1,74	0,092	3,75	0,112
21	4,60	0,062	2,29	0,072
26	2,17	0,039	1,59	0,039
31	3,41	0,028	1,70	0,040
37	-	0,018	-	0,023
42	1,39	0,020	-	0,025
51	-	0,027	0,85	0,033
59	-	0,021	-	0,021
70	0,39	0,014	0,65	0,021
83	0,51	0,018	0,52	0,026
среднее	2,03	0,034	1,62	0,041

Коэффициенты накопления тяжелых металлов, были рассчитаны как отношение их концентраций в растениях и в почве, исходя из того, что концентрации кадмия и ртути в почвогрунте после загрязнения составили  $1,7 \pm 0,7$  и  $1,1 \pm 0,4$  мг/кг соответственно. Средние значения коэффициентов накопления Cd в пшенице за период ее роста в 39 раз выше коэффициентов накопления Hg, в овсе – в 60 раз. Таким образом, кадмий обладает значительно большей подвижностью в системе почва-растение, чем ртуть.

#### **Лабораторный опыт. Динамика накопления кадмия овсом и пшеницей в опыте с водной культурой.**

Показатели динамики накопления кадмия злаковыми культурами, полученные при выращивании растений на питательном растворе, более стабильны, чем при выращивании на почве. В опыте с почвенной культурой удельная скорость накопления металла овсом в 8 раз больше, чем пшеницей (Таблица 10). Таким образом, состояние почвы, ее физико-химические свойства существенно влияют на накопление кадмия растениями.

Таблица 10 – Показатели логистической функции выноса Cd злаковыми культурами

Часть растения	Показатели	Овес	Пшеница
Надземная часть	$A_{max}$ , мкг/растение	3,31±0,36	3,32±0,36
	$A_0$ , мкг/растение	0,146	0,063
	$\varepsilon$ , сут <sup>-1</sup>	0,134±0,033	0,151±0,033
Корни	$A_{max}$ мкг /растение	6,66±1,36	10,32±8,25
	$A_0$ , мкг /растение	0,201	0,244
	$\varepsilon$ , сут <sup>-1</sup>	0,099±0,016	0,118±0,044

Удельная скорость выноса кадмия из питательного раствора пшеницей в 5 раз больше, чем на почвогрунте. Для овса, выращенного на растворе и на почвогрунте, эти показатели существенно не различаются.

Максимальный вынос ( $A_{max}$ ) кадмия корнями растений в 2-3 раза меньше, чем надземными органами. Максимальный вынос кадмия растениями овса и пшеницы ( $A_{max}$ ) при пересчете на 25 растений у овса в этом опыте больше в 3,7 раза, а у пшеницы в 7,1 раза по сравнению с показателями, полученными при выращивании растений на почвогрунте.

Коэффициенты накопления Cd злаковыми культурами рассчитаны как отношение концентраций металла в растениях и в питательном растворе (Таблица 11). Отсутствие почвы способствовало формированию высоких значений КН кадмия, которые в данном опыте на 1-2 порядка выше, чем в опыте с почвенной культурой.

В надземной части овса КН кадмия в 1,1-3,2 раза больше, чем пшеницы. Как показали данные опыта, корневая система пшеницы является хорошим барьером для проникновения токсиканта в надземные органы. В ее корнях Cd накапливается в 1,2-1,5 раза больше, чем в корнях овса.

Таблица 11 – Коэффициенты накопления кадмия злаковыми культурами из питательного раствора

Возраст растений, сутки	Овес		Пшеница	
	надземная часть	корни	надземная часть	корни
10	46,6	113,8	14,6	211,1
14	89,2	128,8	38,8	-
18	87,0	240,3	59,3	394,7
23	77,1	325,3	62,7	552,2
28	101,1	396,0	79,2	666,1
31	304,1	494,6	171,4	789,4
35	103,3	590,7	94,4	-
38	109,6	-	94,4	-
42	117,5	859,3	88,4	-
R (с надземной массой)	0,57	0,66	0,92*	0,94*
R (с массой корней)	0,39	0,66	0,83*	0,94*

Примечание: \* достоверный коэффициент корреляции на 0,05 уровне значимости

### Вегетационный опыт. Зависимость накопления Cd пшеницей от содержания фосфора в дерново-подзолистой почве.

В растениях пшеницы было определено содержание Cd и Cu при увеличении дозы простого суперфосфата (Таблица 12). Высокие отрицательные коэффициенты корреляции наблюдались между содержанием Cd и Cu в пшенице с одной стороны и дозой суперфосфата с другой, однако достоверная корреляционная связь между содержанием Cu в пшенице и дозой суперфосфата отсутствовала. Можно предположить, что при внесении однозамещенного фосфата кальция в почву происходило химическое взаимодействие этого соединения с катионами ТМ, т.е. химическое поглощение Cu и Cd почвой, при этом накопление их растениями снижалось.

Таблица 12 – Концентрация тяжелых металлов в растениях пшеницы, мг/кг абсолютно сухой массы

Варианты	Cu	Cd
N <sub>0,1</sub> K <sub>0,1</sub> - фон	5,47±1,64	1,26±0,38
Фон + P <sub>0,025</sub>	5,49±1,65	1,46±0,40
Фон+P <sub>0,05</sub>	5,53±1,70	0,74±0,22
Фон+P <sub>0,1</sub>	5,26±1,58	0,38±0,13
R (от дозы суперфосфата)	-0,76	-0,90*
R (от массы растений)	-0,50	-0,82

Примечание: \* - достоверный показатель на уровне значимости 0,05

Увеличение дозы двойного суперфосфата в 4 раза способствовало снижению коэффициентов накопления Cd в пшенице из дерново-подзолистой почвы в 3,3 раза (Рисунок 8).

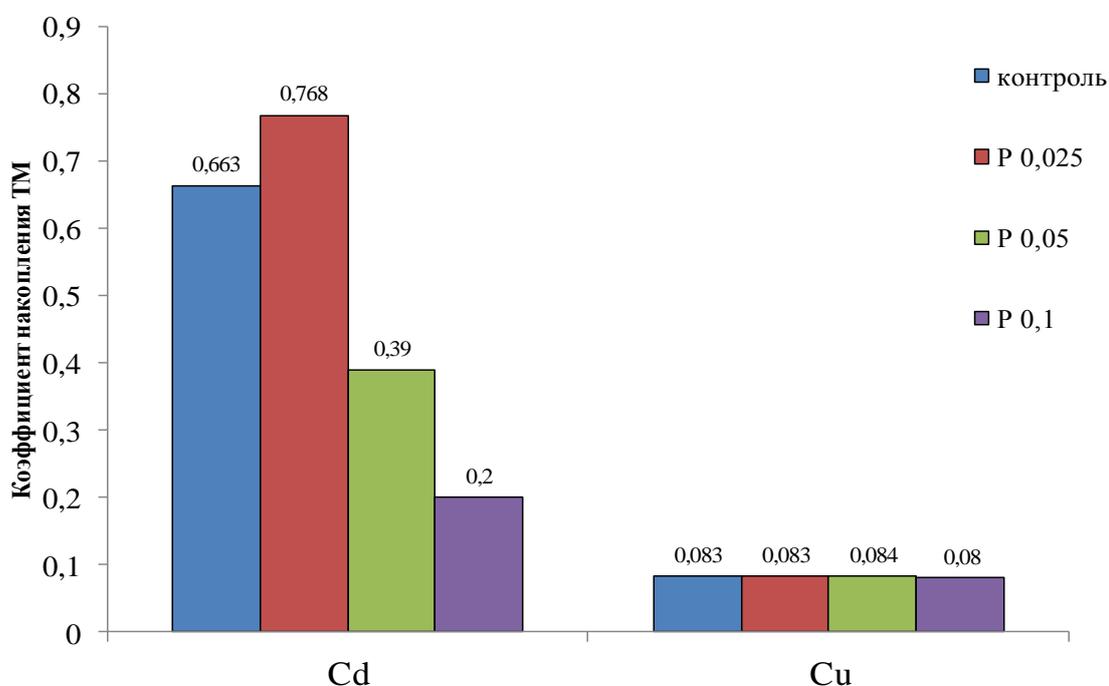


Рисунок 8 – Коэффициенты накопления кадмия и меди пшеницей из дерново-подзолистой почвы при увеличении дозы фосфорного удобрения

При увеличении дозы фосфорного удобрения в 4 раза содержание фосфора в растениях уменьшилось в 2,3 раза (Таблица 13). Различия между вариантами были существенными. Корреляционная связь между массой пшеницы и содержанием фосфора в растениях была отрицательной, что могло бы указывать на эффект биологического разбавления, однако статистическая обработка не подтвердила достоверность коэффициента корреляции на уровне значимости 0,05. Содержание калия в пшенице достоверно не изменялось по вариантам опыта.

Таблица 13 – Содержание макроэлементов в растениях, %

Варианты	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
N <sub>0,1</sub> K <sub>0,1</sub> - фон	1,18±0,32	4,00±0,18
Фон + P <sub>0,025</sub>	0,78±0,18	2,96±0,89
Фон+P <sub>0,05</sub>	0,88±0,18	4,04±0,34
Фон+P <sub>0,1</sub>	0,52±0,11	3,07±0,25
R (от дозы суперфосфата)	-0,90*	-0,44
R (от массы растений)	-0,85	-0,30

Примечание: \*- значение показателя достоверно на 5% уровне значимости

Результаты корреляционного анализа зависимости между содержанием макро- и микроэлементов в растениях, представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Коэффициенты корреляции между концентрациями тяжёлых металлов и содержанием макроэлементов в растениях

Элементы	Cu	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Cd	0,67	0,61	0,01
Cu	-	0,68	0,54

В процессе накопления химических элементов пшеницей из почвы проявился эффект взаимодействия по типу синергизма в парах Cd-P, Cd-Cu, Cu-P, Cu-K. Однако корреляционная связь между содержанием макро- и микроэлементов в растениях не существенна на уровне значимости 0,05.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Известкование кислой дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы в дозе, составляющей 60% от полной дозы, вызывало снижение гидролитической кислотности почвы в 3,3 раза, изменение обменной кислотности от кислой к нейтральной, существенно снижало содержание подвижных соединений фосфора и увеличивало урожайность пшеницы.

2. При известковании кислой дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы со слабой категорией загрязнения кадмием и содержанием ртути в диапазоне фоновых концентраций было установлено снижение содержания кадмия в зерне и соломе яровой пшеницы. Наиболее эффективной являлась полная доза извести. Наблюдалась устойчивая тенденция увеличения накопления ртути в соломе пшеницы при снижении кислотности почвы.

3. Динамика набора массы пшеницы и кадмия и динамика выноса кадмия и ртути злаковыми культурами из среды их произрастания (почвогрунт, питательный раствор) хорошо описывалась математической моделью, основанной на логистической функции.

4. Удельная скорость выноса кадмия пшеницей и овсом из минерального почвенного грунта с щелочной реакцией среды была соответственно в 2 и 5 раз больше удельной скорости выноса ртути. Максимальный вынос кадмия злаковыми культурами из почвогрунта был в 50-60 раз выше, чем ртути. Максимальный вынос ртути растениями из почвогрунта в среднем составлял 0,01%, кадмия – 0,3% от внесенного в почвенный субстрат количества металлов.

5. Коэффициенты накопления Cd в растениях овса, произрастающего на почвенном грунте со щелочной реакцией среды и на стандартном питательном растворе, в среднем за рассматриваемый период вегетации были выше, чем в растениях пшеницы в 1,25 и 1,5 раза соответственно. Коэффициенты накопления Hg в злаковых культурах, произрастающих на почвогрунте, существенно не различались и были на два порядка ниже коэффициентов накопления Cd.

6. Коэффициенты накопления Cd в злаковых культурах, произрастающих на разных субстратах, снижались в ряду: стандартный питательный раствор, минеральный почвогрунт со щелочной реакцией среды, дерново-подзолистая среднесуглинистая почва. Коэффициенты накопления Hg растениями из дерново-подзолистой почвы были в среднем в 5 раз выше, чем из почвогрунта со щелочной реакцией среды.

7. Увеличение дозы двойного суперфосфата в 4 раза привело к снижению коэффициентов накопления Cd в растениях яровой пшеницы из дерново-подзолистой почвы в 3,3 раза.

8. Коэффициенты накопления кадмия яровой пшеницей из хорошо окультуренной дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы в среднем были в 3 раза выше, чем коэффициенты накопления меди.

**Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации** имеют важное научно-практическое значение для дерново-подзолистых почв, испытывающих высокую техногенную нагрузку в местах сосредоточения промышленных предприятий, автодорог, хранения и переработки твердых бытовых и промышленных отходов, характерно высокое содержание тяжелых металлов, в том числе Cd и Hg. Полевой опыт по определению влияния известкования дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы на накопление тяжелых металлов яровой пшеницей сорта Сударыня был проведен на почве со слабой категорией загрязнения кадмием и содержанием ртути, соответствующим фоновым показателям. В связи с этим, не удалось достоверно установить влияние известкования почвы на накопление ртути пшеницей, несмотря на выявление устойчивой тенденции повышения содержания металла в растениях при увеличении дозы доломитовой муки. Возможно продолжение полевого эксперимента с учетом

требований севооборота и выбора таких видов растений, которые характеризуются повышенным накоплением ртути из почвы.

Необходимо проведение полевых опытов по изучению динамики накопления тяжелых металлов (кадмий, ртуть) пшеницей яровой с целью установления удельных скоростей накопления металлов растениями в обстановке, наиболее приближенной к процессу сельскохозяйственного производства с целью выработки рекомендаций для фиторемедиации загрязненных территорий.

### РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

При выращивании яровой пшеницы на кислой дерново-подзолистой среднесуглинистой почве со слабой категорией загрязнения кадмием и содержанием ртути в диапазоне фоновых концентраций рекомендуется проводить известкование почвы доломитовой мукой в полной дозе, рассчитанной по гидролитической кислотности, на фоне применения азофоски ( $N_{90}P_{90}K_{90}$ ). Данное мероприятие способствует снижению гидролитической кислотности почвы в 3 раза, изменению обменной кислотности почвы от кислой к нейтральной, существенному увеличению урожайности зерна яровой пшеницы при достоверном снижении содержания кадмия в сельскохозяйственной продукции. Если почвы производственного участка загрязнены ртутью, то необходимо контролировать содержание этого металла в пшенице, так как отмечена устойчивая тенденция увеличения накопления ртути в соломе пшеницы при снижении кислотности почвы.

На дерново-подзолистой среднесуглинистой почве, загрязненной кадмием, при выращивании яровой пшеницы рекомендуется вносить двойной суперфосфат в полной дозе на фоне применения полных доз аммиачной селитры и хлористого калия. Это мероприятие достоверно увеличивает урожайность пшеницы и значительно снижает накопление кадмия по сравнению с контролем.

### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

#### Статьи в рецензируемых журналах, согласно перечню ВАК :

1. Ефремова, М. А. Динамика накопления кадмия овсом в опытах с водной и почвенной культурами / М. А. Ефремова, **В. В. Митрофанов**. – Текст: непосредственный // Известия СПбГАУ. – 2017. – № 3 (48). – С.35-40.
2. Ефремова, М. А. Исследование динамики накопления кадмия овсом в опытах с водной и почвенной культурами / М. А. Ефремова, **В. В. Митрофанов**. – Текст: непосредственный // Известия СПбГАУ. – 2018. – № 1 (50). – С. 62-68.
3. Ефремова, М. А. Сравнение показателей динамики накопления ртути и кадмия овсом из почвы/ М. А. Ефремова, **В. В. Митрофанов**. – Текст: непосредственный // Известия СПбГАУ. – 2018. – № 3 (52). – С. 58-64.
4. Ефремова, М. А. Накопление кадмия и ртути в пшенице при известковании дерново-подзолистой почвы / М. А. Ефремова, **В. В. Митрофанов**, А. А. Акатова [и др.]. – Текст: непосредственный // Агрофизика. – 2020. – № 1. – С. 8-16.

5. Ефремова, М. А. Динамика накопления кадмия, цинка и ртути пшеницей при изменении физико-химических и биологических факторов почвы / М. А. Ефремова, А. А. Лохматова, **В. В. Митрофанов**. – Текст: непосредственный // Известия СПбГАУ. – 2020. – №58. – С. 88-96.

#### **Другие статьи и материалы конференций:**

6. Ефремова, М. А. Влияние биопрепаратов на накопление As пшеницей из дерново-подзолистой почвы / М. А. Ефремова, Е. М. Наумов, **В. В. Митрофанов** [и др.]. – Текст: непосредственный // Молодежная наука Молодежная наука 2013: технологии, инновации: материалы LXXIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Пермь:, 2013. – С. 231-234.

7. Ефремова, М. А. Применение микробиопрепарата Агрофил при выращивании пшеницы на дерново-подзолистой почве, загрязненной кадмием / М. А. Ефремова, Е. М. Наумов, **В. В. Митрофанов**. – Текст: непосредственный // Перспективы развития агропромышленного комплекса России в условиях членства в ВТО: сборник научных трудов международного агропромышленного конгресса: материалы для обсуждения, Северо-Западный региональный научный центр Российской академии сельскохозяйственных наук, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Экспофорум. – Санкт-Петербург:, 2013. – С. 194-195.

8. Ефремова, М. А. Накопление кадмия пшеницей и овсом в опытах с водной и почвенной культурой / М. А. Ефремова, **В. В. Митрофанов**, А. С. Пинаева. – Текст: непосредственный // Вестник студенческого научного общества – 2017. – № 8 (1). – С. 21-23.

9. Ефремова, М. А. Динамика накопления кадмия пшеницей и овсом в опыте с водной культурой / М. А. Ефремова, Ф. Адимале, **В. В. Митрофанов**. – Текст: непосредственный // Роль молодых учёных в решении актуальных задач АПК– 2017. – №8(1). – С. 31-34.

10. Ефремова, М. А. Накопление ртути пшеницей и овсом в вегетационном опыте / М. А. Ефремова, **В. В. Митрофанов**. – Текст: непосредственный // Повышение конкурентоспособности российской сельскохозяйственной продукции на внутренних и внешних рынках: сборник научных трудов международного конгресса: материалы для обсуждения. – Северо-Западный центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, ООО «Экспофорум-Интернэшнл». – 2017. – С. 39-40.