

На правах рукописи

ШАВРИНА КСЕНИЯ ФЕДОРОВНА

КОНКУРЕНТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЦИНКА, КАЛЬЦИЯ
И МАГНИЯ В СИСТЕМЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТАЯ
ПОЧВА – КУЛЬТУРНЫЕ РАСТЕНИЯ

Специальность: 06.01.03. – агрофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в отделе физико-химической мелиорации и опытного дела Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ)

Научный руководитель:

Витковская Светлана Евгеньевна

доктор биологических наук, профессор кафедры геоэкологии, природопользования и экологической безопасности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Гидрометеорологический университет»

Официальные оппоненты:

Аканова Наталья Ивановна

доктор биологических наук, профессор, заведующая лабораторией агрохимии известковых удобрений и химической мелиорации Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова»

Анисимов Вячеслав Сергеевич

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории радиохимии и аналитической химии Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2022 года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 006.001.01 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Агрофизический научно-исследовательский институт» по адресу: 195220, Санкт-Петербург, Гражданский проспект, д.14. Тел. +7 (812) 534-13-24, факс +7 (812) 534-19-00,

e-mail: office@agrophys.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Агрофизического научно-исследовательского института и на сайте <http://www.agrophys.ru>, с авторефератом - на сайте <http://vak.ed.gov.ru> и <http://www.agrophys.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14, ФГБНУ АФИ

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 006.001.01

доктор биологических наук _____

Е.В. Канаш

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Такие необходимые приемы повышения плодородия кислых почв, как известкование, внесение органических и минеральных мелиорантов, существенно влияют на конкурентные взаимодействия химических элементов в системе почва-растение и микроэлементный состав сельскохозяйственных культур. Установление закономерностей поступления микроэлементов из почвы в растения при различных показателях плодородия почвы необходимо для прогноза и управления качеством сельскохозяйственной продукции. Построение зависимостей доза-ответ и время-ответ является необходимым условием, позволяющим количественно оценить влияние различных окультуривающих мероприятий на распределение химических элементов в системе почва-растение (Витковская и др., 2016).

Цинк, кальций и магний, элементы II группы периодической системы химических элементов – неполные химические аналоги (Семишин, 1972; Витковская и др., 2020). Химическое сродство цинка, кальция и магния предопределяет сходство их биологического поведения в системе почва–растение: интенсивность сорбции почвой и растениями микроэлемента зависит от интенсивности сорбции макроэлемента-аналога (Дричко, Цветкова, 1990; Витковская, 1996). Конкурентные взаимодействия цинка, кальция и магния могут быть как антагонистическими, так и синергетическими в зависимости от вида растений и параметров среды (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

Цинк – жизненно важный микроэлемент, накопление которого в растениях существенно зависит от содержания в почвенном растворе кальция и магния (Аштаб, 1994). Известкование – обязательный прием сохранения и воспроизводства плодородия дерново-подзолистых почв агроландшафтов, существенно влияющий на физические, химические, биологические свойства почвы, на распределение макро- и микроэлементов в системе почва-растение. При внесении в почву мелиорантов, помимо нейтрализации почвенной кислотности и насыщения почвенного поглощающего комплекса основаниями, происходит усиление конкурентных взаимодействий между Ca, Mg и Zn, приводя к изменению элементного состава почвенного раствора и растений (Витковская и др., 2020). Известкование может приводить к снижению содержания цинка в продукции растениеводства и рассматриваться как прием снижения его поступления в растения на загрязненных почвах. Существенное влияние на содержание цинка в почве и растениях может оказывать также внесение органических и минеральных удобрений. Исследование конкурентных взаимодействий цинка, кальция и магния в системе дерново-подзолистая почва – культурные растения при внесении различных доз известковых и органических мелиорантов позволяет получить информацию, необходимую для управления элементным составом сельскохозяйственных культур. В условиях рыночной экономики важной задачей является установление минимальных доз мелиорантов, способных обеспечить оптимальную продуктивность агроэкосистем и соответствие структурных компонентов систем санитарным правилам и нормам.

Степень разработанности темы. Известно (Семишин, 1972; Витковская, 1996), что свойства того или иного элемента закономерно связаны со свойствами четырех соседних элементов в Периодической системе Д.И. Менделеева, а именно двух аналогов по валентности, стоящих в одной группе, и двух соседей в горизонтальном ряду. Доказано (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Дричко, Цветкова, 1990; Витковская, 1996; Витковская, Дричко, 2001; Дричко и др., 2009; Литвинович, Дричко, 2012 и др.), что на поведение микроэлементов в системе почва - растение существенное влияние оказывает содержание в почве макроэлементов – аналогов. Результаты анализа литературных данных (Тома и др., 1980; Гэлстон, 1983; Зырин, Садовникова, 1985; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Ильин, 1991; Аштаб, 1994; Панасин, 2000 и др.) свидетельствуют о наличии конкурентных взаимодействий Zn-Ca и Zn-Mg при переходе из почвы в растения. Известно (Зырин, Садовникова, 1985; Аштаб, 1994; Дабахов и др., 2005; Небольсин, Небольсина, 2005; Шильников и др., 2008; Шильников, Аканова, 2009; Витковская, Яковлев, 2017 и др.), что взаимодействия цинка, кальция и магния в системе почва–растение существенно зависят от конкретных почвенно-климатических условий и видовых особенностей сельскохозяйственных культур: встречаются данные о синергетических, антагонистических и нейтральных отношениях между указанными элементами.

Несмотря на значительное количество накопленной информации, крайне мало экспериментальных данных, позволяющих установить зависимости доза-ответ и время-ответ, характеризующие особенности взаимодействия Zn-Ca и Zn-Mg в системе почва–растения в зависимости от параметров плодородия почвы и продолжительности контакта мелиорантов с почвой. Представленная диссертационная работа посвящена изучению конкурентных взаимодействий между цинком, кальцием и магнием в системе дерново-подзолистая почва–культурные растения при внесении различных доз известковых и органических мелиорантов в условиях многолетних полевых экспериментов.

Цель исследования: изучить влияние различных доз химических и органических мелиорантов и видовых особенностей растений на конкурентные взаимодействия цинка, кальция и магния в системе дерново-подзолистая почва–культурные растения.

Задачи исследования:

- В условиях многолетнего микрополевого эксперимента установить влияние возрастающих доз доломитовой муки (ДМ) на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы и урожайность различных видов сельскохозяйственных культур.
- Установить закономерности поведения цинка в системе дерново-подзолистая почва–растение в зависимости от дозы известкового мелиоранта и динамики кислотно-основных свойств почвы.
- Изучить конкурентные взаимодействия Zn-Ca и Zn-Mg в системе дерново-подзолистая почва – культурные растения в широком диапазоне доз доломитовой муки.

- В условиях стационарного полевого эксперимента установить влияние различных доз органических и минеральных удобрений на содержание цинка в вегетативных и генеративных органах растений озимой ржи и конкурентные взаимодействия Zn-Ca и Zn-Mg в системе дерново-подзолистая почва–растение.

Научная новизна. Получены экспериментальные данные, характеризующие взаимодействия Zn-Ca и Zn-Mg в системе почва–растение при известковании кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы доломитовой мукой (в широком диапазоне доз). Впервые установлено влияние дозы известкового мелиоранта на скорость нарастания высоты растений ячменя и овощных бобов. Выявлены закономерности, характеризующие влияние различных доз органических и минеральных удобрений на распределение цинка в вегетативных и генеративных органах растений озимой ржи. Впервые установлено, что конкурентные взаимодействия Mg-Zn в системе почва–растение проявляются более интенсивно, чем взаимодействия Ca-Zn.

Практическая значимость. Результаты исследований могут быть использованы для обоснования экологически безопасных и эффективных доз известковых мелиорантов, анализа риска изменения микроэлементного состава сельскохозяйственных культур при изменении параметров плодородия кислых почв.

Методология и методы исследований. Теоретической и методологической основой диссертационной работы послужил системный подход к анализу научных трудов в области поведения макро- и микроэлементов в системе почва–растение в зависимости от качественных и количественных характеристик агроэкосистем. Экспериментальные данные были получены в ходе проведения исследований в условия двух многолетних полевых экспериментов в Меньковском филиале Агрофизического научно-исследовательского института. Анализ почвенных и растительных проб проводили по общепринятым в почвоведении и агрохимии методам. Математическую обработку данных проводили в программе ORIGIN 7,5.

Положения, выносимые на защиту:

1. Взаимодействие цинка, кальция и магния в системе дерново-подзолистая почва – растение существенно зависит от кислотно-основных свойств почвы и видовых особенностей сельскохозяйственных культур.
2. Известкование кислых почв доломитовой мукой приводит к усилению конкурентных взаимодействий Ca-Zn и Mg-Zn в системе почва–растение. Содержание цинка в растениях линейно снижается в интервале доз мелиоранта 0-1,5 Нг. Повышенные дозы (более 1,0 Нг) мелиоранта могут приводить к дефициту цинка в растениях.
3. Систематическое внесение органических удобрений приводит к увеличению содержания кислоторастворимых и подвижных соединений цинка в почве.
4. Коэффициенты накопления цинка растениями озимой ржи линейно снижаются при возрастании реакции почвы, содержания органического вещества и обменных соединений Ca^{2+} и Mg^{2+} в почве.

5. Конкурентные взаимодействия Mg-Zn в системе дерново-подзолистая почва–культурные растения проявляются интенсивнее, чем взаимодействия Ca-Zn.

Обоснованность и достоверность результатов работы определяется достаточным объемом полученных экспериментальных данных и длительным сроком наблюдений. Аналитические испытания почвенных и растительных проб проводили по соответствующим ГОСТам и общепринятым методикам на сертифицированном оборудовании требуемой точности.

Апробация результатов. Результаты исследований диссертации были представлены на следующих конференциях: 49-й международной научной конференции молодых ученых, специалистов-агрохимиков и экологов (Москва, 2015), съезде Общества почвоведов им. В.В. Докучаева (Белгород, 2016), на студенческой научной конференции РГГМУ «Актуальные проблемы природопользования» (СПб, 2016), международной научной конференции «Докучаевские молодежные чтения» (СПб, 2016 и 2018), всероссийской научной конференции «Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях» (СПб, 2016), всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием «Экогидромет – новые горизонты» (СПб, 2017), IV международной научно-практической конференции молодых ученых «актуальные вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси и сопредельных государств» (Гомель, 2018), международной научно-практической конференции «Развитие агропромышленного комплекса на основе современных научных достижений и цифровых технологий» (СПб, 2019), всероссийской научной конференции «Вклад агрофизики в решение фундаментальных задач сельскохозяйственной науки» (СПб, 2020).

Организация исследования и личный вклад автора. Работа выполнена в соответствии с тематическими планами НИР отдела физико-химической мелиорации и опытного дела ФГБНУ «АФИ» в рамках государственного задания (№0667-2014-0008 «создать теоретические основы и усовершенствовать методы планирования и проведения многоуровневых опытов и мониторинга состояния почвенно-растительных комплексов на основе развития физико-технической базы адаптивно-ландшафтного земледелия, математического и физического моделирования агроэкосистем»). Автор принимала непосредственное участие в закладке и проведении полевых экспериментов, подготовке почвенных и растительных проб к анализу, обобщении и анализе экспериментальных данных, подготовке публикаций. Личный вклад автора в объем исследований составляет не менее 70%.

Основные публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ (включая тезисы к материалам конференций), 4 из которых в изданиях, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссией (ВАК).

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 140 страницах, иллюстрирована 32 рисунками, содержит 40 таблиц. Список литературы включает 259 источников, из них 31 иностранный.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Цинк, кальций и магний в системе почва-растение

Представлен анализ имеющихся литературных данных о содержании и формах нахождения цинка, кальция и магния в почве и факторах, влияющих на переход данных химических элементов в растения. Проанализированы факторы, влияющие на накопление цинка растением.

Глава 2. Объекты и методы исследования

Влияние известковых, органических и химических мелиорантов на распределение Zn, Ca и Mg в системе дерново-подзолистая почва – культурные растения изучали в условиях многолетних полевых экспериментов в Меньковском филиале Агрофизического института.

2.1 Микрополевой опыт

Влияние возрастающих доз доломитовой муки (ДМ) на распределение Zn, Ca и Mg в системе почва-растение изучали в условиях многолетнего прецизионного (без повторностей) микрополевого опыта, заложенного в полиэтиленовых сосудах без дна ($S=1 \text{ м}^2$, глубина 25 см, $\approx 300 \text{ кг}$ почвы на сосуд) в мае 2012 года (Витковская и др., 2014). Перед закладкой опыта из каждой делянки (сосуда) была вынута почва на глубину пахотного слоя (25 см). По периметру делянок размещали полиэтиленовые сосуды, которые наполняли кислой дерново-подзолистой почвой: $\text{pH}_{\text{KCl}} 4,64 \pm 0,04$, $\text{Нг} 4,11 \pm 0,08$, Ca^{2+} , Mg^{2+} - $2,68 \pm 0,14$ и $0,36 \pm 0,06 \frac{1}{2} \text{ ммоль/100г}$ соответственно. Доломитовая мука (ДМ) была внесена в почву при закладке опыта. Доза доломитовой муки по 1 Нг составляла 5,54 т/га, нейтрализующая способность – 99,3%: CaCO_3 – 50,4%; MgCO_3 – 48,9%. Схема опыта: 1) Контроль (Фон: НРК); 2) Фон + ДМ 0,2 Нг; 3) Фон + ДМ 0,3 Нг; 4) Фон + ДМ 0,4 Нг; 5) Фон + ДМ 0,5 Нг; 6) Фон + ДМ 0,6 Нг; 7) Фон + ДМ 0,7 Нг; 8) Фон + ДМ 0,8 Нг; 9) Фон + ДМ 0,9 Нг; 10) Фон + ДМ 1,5 Нг. Размещение делянок систематическое, 2-рядное. Минеральные удобрения (аммофоска, аммиачная селитра) вносили ежегодно в каждый сосуд (Шаврина, Витковская, 2019).

Исследование проводили в течение вегетационных периодов 2014 – 2017гг. Суммарная за 7 лет доза внесенных минеральных удобрений составила $\text{N}470\text{P}390\text{K}390 \text{ кг д.в./га}$. Отбор смешанных почвенных проб проводили два раза в год из каждого сосуда тростевым буром: 1-й отбор до внесения удобрений и мелиоранта – 22 мая 2012 года, далее – через 63; 359; 414; 713; 841; 1078; 1211, 1452, 1575, 1834 и 2191 суток после закладки опыта.

В 2014 году опытная культура - овощные бобы сорта «Белорусские». Внесение минеральных удобрений (нитрофоска 15:15:15 и аммиачная селитра) в дозе $\text{N}60\text{P}50\text{K}50$ и посев были проведены 10 мая. В процессе вегетации овощных бобов определяли динамику высоты растений – 7 замеров за вегетацию. Учет урожая проводили в фазу цветения, отбирали 10 растений с делянки, определяли сырую и воздушно-сухую массу.

В 2015 году опытной культурой являлся ячмень сорта «Ленинградский». Посев и внесение минеральных удобрений проводили 5 мая (500 семян/делянку (м^2)). Минеральные удобрения (нитроаммофоска 15:15:15 и аммиачная селитра) были внесены в дозе N120P100K100. Почвенные пробы отбирали до внесения удобрений. В процессе вегетации растений ячменя определяли динамику высоты растений – 10 замеров за вегетацию, объем выборки – 30 растений. Уборку урожая проводили в фазу восковой спелости, проводили сплошной учет урожая с каждой делянки. С каждого варианта были отобраны также корни растений (Витковская и др., 2020).

В 2016 году опытной культурой являлась викоовсяная смесь: вика – сорт «Льговская – 22», овес – сорт «Аргомак». Соотношение семян вики и овса при посеве 2:1. С учетом всхожести на каждой делянке количество семян составило 360 и 200 шт. для вики и овса соответственно. Отбор почвенных проб, посев и внесение минеральных удобрений проводили 13 мая. Минеральные удобрения (нитроаммофоска 15:15:15) были внесены в дозе N70P70K70. Почвенные пробы отбирали до внесения удобрений. Уборку урожая викоовсяной смеси проводили 19 июля. Определяли сырую и воздушно-сухую массу растений.

В 2017 году выращивали овощные бобы, сорт «Русский черный». Посев (60 семян на м^2) и внесение минеральных удобрений проводили 30 мая. Минеральные удобрения (азофоска 16:16:16) были внесены в дозе N70P70K70. Полевую всхожесть растений определяли 29 июня. Почвенные пробы отбирали до внесения удобрений. Уборку урожая овощных бобов проводили 26 июля в фазу цветения. Определяли сырую и воздушно-сухую массу растений.

2.2 Стационарный полевой опыт

Влияние органических и минеральных удобрений на накопление макро- и микроэлементов растениями озимой ржи сорта «Славия» изучали в условиях стационарного полевого эксперимента. Опыт был заложен в 2006г. в Меньковском филиале Агрофизического института под руководством академика РАСХН В.А. Семенова, на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, состоит из 3 парцелл (площадью 0,5 га каждая), различающихся дозами внесенных органических удобрений (бесподстилочный навоз КРС). Формирование парцелл (внесение органических удобрений) проводили в период 2003-2009гг: 1 – органические удобрения не вносили; 2 – за 7 лет внесено органических удобрений 240 т/га, извести 1 т/га; 3 – за 7 лет внесено органических удобрений 680 т/га, извести 3 т/га. Парцеллы разбиты на 3 повторности, каждая из которых включает 3 варианта, различавшиеся дозами ежегодно внесенных минеральных удобрений. Длина делянки – 43 м, ширина – 5.5 м. В настоящее время научным руководителем опыта является член-корр. РАН Иванов А.И. Посев озимой ржи был проведен в августе 2014 года (Витковская, Шаврина, 2017). Минеральные удобрения были внесены по следующей схеме: осень 2014г. 1) Контроль (без удобрений), 2) N30P30K30, 3) N60P60K60; апрель 2015г - подкормка: 1) Контроль (без удобрений), 2) N40, 3) N80.

Почвенные и растительные пробы отбирали на 2-й повторности каждой из парцелл (варианты 1–3). Общее количество тестируемых делянок – 9. На каждой делянке был выделен контрольный участок площадью 2×2 м. Смешанные почвенные пробы отбирали тростевым буром 1 июня 2015 г. Растительные пробы отбирали дважды: 01.06.2015 (фаза начала колошения) и 10.08.2015 (полная спелость). С каждого тестируемого варианта опыта растительные пробы отбирали в 3-х кратной повторности (по 12 растений в каждой пробе). Определяли сырую и воздушно-сухую массу растений, содержание цинка, кальция и магния в зерне, соломе, полове и корнях.

2.3 Методы исследования

Ежегодно отбирали растительные и почвенные образцы, определяли содержание цинка, кальция и магния. Анализ почвенных и растительных проб проводили по общепринятым в почвоведении и агрохимии методам в испытательных лабораториях АФИ и РГГМУ. Повторность измерений - 3-кратная. Содержание обменных Ca^{2+} и Mg^{2+} в почве устанавливали комплексонометрическим методом согласно (ГОСТ 26487–85), pH_{KCl} – потенциометрическим методом, гидролитическую кислотность – по Каппену.

Содержание Zn в почве и растениях устанавливали атомно-абсорбционным методом. В почвенных пробах содержание подвижных соединений Zn определяли в вытяжке ацетатно-аммонийного буферного раствора с pH 4,8, содержание кислоторастворимых соединений – после химического разложения проб 5М HNO_3 . Пробоподготовку растительных проб проводили согласно (ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011) (мокрое озоление HNO_3 + конц. перекись водорода, навеска 1 г.). Содержание Ca и Mg в растениях устанавливали согласно (Руководство по методам..., 1998). Математическую обработку данных проводили в программе ORIGIN 7,5 (Витковская, Шаврина, 2017).

Глава 3. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность сельскохозяйственных культур, кислотно-основные свойства почвы и распределение цинка, кальция и магния в системе почва-растение

3.1 Влияния возрастающих доз доломитовой муки на урожайность сельскохозяйственных культур

В представленной работе отзывчивость опытных культур на внесение доломитовой муки в условиях микрополевого эксперимента зависела от видовых особенностей растений и дозы мелиоранта.

3.1.1 Влияния возрастающих доз доломитовой муки на урожайность овощных бобов

В 2014 и в 2017гг. опытной культурой являлись овощные бобы сортов «Белорусские» и «Русский черный», соответственно. В 2014г. биомасса растений не зависела от дозы ДМ, в 2017 году достоверно возрастала. Зависимость сырой и воздушно-сухой биомассы растений от дозы мелиоранта (2017г.) ха-

рактиковалась коэффициентами корреляции 0,833 и 0,864, соответственно (при критическом значении r на 5% уровне значимости 0,632). Вероятно, выраженность эффекта в значительной мере связана с неблагоприятными погодными условиями большей части вегетационного периода 2017 года. Для описания динамики роста растений в высоту в течение вегетации была применена логистическая (сигмоидная) модель:

$$H(t) = \frac{H_1 - H_2}{1 + e^{(t-t_0)/dt}} + H_2, \quad (1)$$

где H_1 – начальная высота, см (равна нулю), H_2 – максимальная высота растений (см), t_0 – точка перегиба, в момент которой $H = 1/2(H_1 + H_2)$, dt – крутизна кривой (угол наклона) – постоянная величина для данной кривой. Скорость роста в высоту (см/сут) достигала максимума в момент $t = t_0$. Отношение $(H_2 - H_1) / 4dt$ характеризовало скорость на момент времени t_0 (максимальную), см/сут (V_{max}). Установлено, что максимальная скорость нарастания высоты растений овощных бобов (V_{max}) варьировалась в пределах 1,40–1,69 см/сутки и не зависела от дозы доломитовой муки (2014г.).

3.1.2 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность растений ячменя

В 2015 году опытной культурой являлся ячмень сорта Ленинградский. Установлено, что максимальная скорость роста растений ячменя в высоту в течение вегетации (V_{max}) варьировалась в пределах от 2,6 – 2,8 см/сут и не зависела от дозы мелиоранта. В интервале доз доломитовой муки 0-0,9 Нг урожайность зерна ячменя линейно возрастала, рисунок 1. Максимальная урожайность зерна, наблюдаемая в интервале доз 0,5-0,9, варьировалась в пределах 0,45–0,49 кг/м², что на 29–39% выше, чем в контрольном варианте опыта (Витковская и др., 2020). При внесении доломитовой муки в дозе 1,5 Нг, прибавка урожая зерна не превысила 11%. Выявлена тесная корреляционная связь между дозой доломитовой муки и отношением зерно: солома в урожае ячменя ($r=0,925$, при критическом значении r на 5% уровне значимости 0,632).

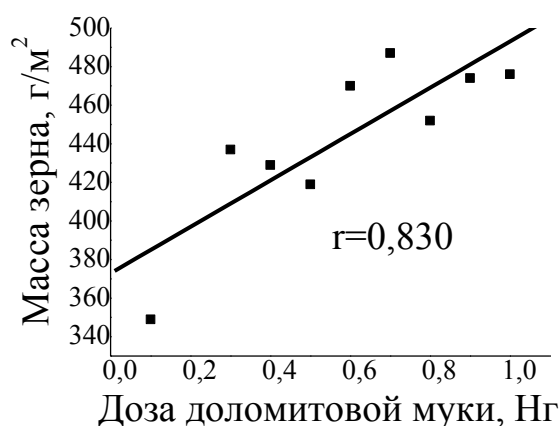


Рисунок 1 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность зерна ячменя в интервале 0–0,9 Нг

3.1.3 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность викоовсяной смеси

В 2016 году выращивали викоовсяную смесь: вика – сорт «Льговская - 22», овес – сорт «Аргомак». Максимальную прибавку (11-15% по отношению к контролю) сырой биомассы наблюдали в интервале доз ДМ 0,6-0,8 Нг. При внесении ДМ в дозе 1,5 Нг наблюдалась тенденция снижения сырой биомассы растений. В интервале доз ДМ 0-0,8 Нг наблюдалась линейное увеличение сырой биомассы (коэффициент корреляции по линейной модели составил 0,828 при критическом значении r на 5% уровне значимости 0,707).

3.2 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотнo-основные свойства дерново-подзолистой почвы

3.2.1 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на динамику реакции почвы

Влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотнo-основные свойства дерново-подзолистой почвы изучали в период с 2012-2018гг. (0–2191 суток после внесения мелиоранта). В течение указанного периода было проведено двенадцать отборов смешанных почвенных проб. В период наблюдения рН почвы в контрольном варианте линейно снижался с 4,65 до 4,2 ($r=-0,839$, при критическом значении на 5% уровне значимости $r=0,632$) со скоростью (b) $1,44 \cdot 10^{-4}$ в сутки. За 6 лет почва в контрольном варианте опыта из категории «среднекислая» перешла в категорию «сильно кислая», согласно градации почв по степени кислотности (Методические указания, 2003). При применении ДМ в дозе 1,5 Нг, значение рН_{KCl} достигло 6-ти через 414 суток и оставалось на этом уровне в течение пяти лет, к 2191 суткам значение рН снизилось до 5,8.

Характер зависимости кислотнo-основных свойств почвы от времени взаимодействия доломитовой муки с почвой существенно изменялся в интервале доз ДМ 0,2–1,5 Нг. Тесную корреляционную связь между реакцией почвы и дозой мелиоранта наблюдали на протяжении всего срока наблюдения. В интервале доз ДМ 0–1,5 Нг зависимость рН_{KCl}= f (Доза ДМ) характеризовалась по линейной модели коэффициентами корреляции (r) 0,844 и 0,974 на 63 и 2191-е сутки взаимодействия доломитовой муки с почвой, соответственно (при критическом значении на 5% уровне значимости $r=0,632$) (Витковская, Шаврина, 2021).

3.2.2 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на динамику содержания обменных соединений кальция и магния в почве

На момент закладки опыта содержание обменного Ca^{2+} в почве составляло $2,7 \pm 0,1$ $\frac{1}{2}$ ммоль/100 г, обменного Mg^{2+} - $0,36 \pm 0,06$ $\frac{1}{2}$ ммоль/100 г, что, согласно градации почв по содержанию элементов питания (Методические указания, 2003), соответствует низкому и очень низкому содержанию элементов, соответственно. В контрольном варианте опыта содержание обменных соединений Ca^{2+} и Mg^{2+} не зависело от времени в течение всего срока наблюдения. Ус-

тановлено, что внесение ДМ в дозах 0,2–1,5 обеспечило увеличение содержание обменных соединений кальция и магния в почве по отношению к контролю не менее чем на 4 года. В вариантах 2-10 содержание обменного Ca^{2+} возрастало в период 0-1459 суток со средней скоростью $8,6 \cdot 10^{-4} \pm 2,3 \cdot 10^{-4} \frac{1}{2}$ ммоль/100 г*сут⁻¹ затем снижалось. Скорость увеличения содержания обменного Mg^{2+} в почве линейно возрастала в интервале доз ДМ 0,2–0,6 Нг в период 0–1211 суток ($r=0,949$). Содержание Mg^{2+} в вариантах 2–10 линейно возрастало в период 0–1211 суток, затем снижалась. Линейную зависимость содержания обменных Ca^{2+} и Mg^{2+} в почве от дозы мелиоранта наблюдали на протяжении всего срока наблюдения, таблица 1.

Таблица 1 – Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость содержания обменных Ca^{2+} и Mg^{2+} в почве от дозы мелиоранта

Сутки	r	
	$\text{Ca}^{2+} = f(\text{Доза})$	$\text{Mg}^{2+} = f(\text{Доза})$
63	0,814	0,924
359	0,593	0,866
414	0,876	0,916
713	0,867	0,858
841	0,860	0,904
1079	0,517	0,835
1211	0,901	0,832
1452	0,717	0,945
1575	0,802	0,938
1834	0,810	-
2191	0,750	-0,288

3.3 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на динамику подвижных соединений цинка в почве

Внесение в почву известковых мелиорантов, помимо нейтрализации почвенной кислотности и насыщения почвенного поглощающего комплекса основаниями, приводит к изменению элементного состава почвенного раствора и растений (Витковская и др., 2016). Содержание кислоторастворимых и подвижных соединений Zn в почве до закладки опыта составляла 21,0 и $0,77 \pm 0,2$ мг/кг. Внесение ДМ существенно повлияло на динамику подвижных соединений цинка в почве. В период от 0 до 1291 суток наблюдали отрицательную корреляционную связь между содержанием подвижных соединений Zn и временем взаимодействия доломитовой муки с почвой. Наиболее тесную корреляционную связь между указанными параметрами наблюдали при внесении мелиоранта в дозах 0,8 и 1,5 Нг (рис. 2). Через 6 лет после внесения мелиоранта содержание подвижных соединений цинка в почве снизилось по отношению к исходному содержанию, в 1,2-3 раза в зависимости от дозы известкового мелиоранта и составило в среднем по вариантам $0,55 \pm 0,2$ мг/кг.

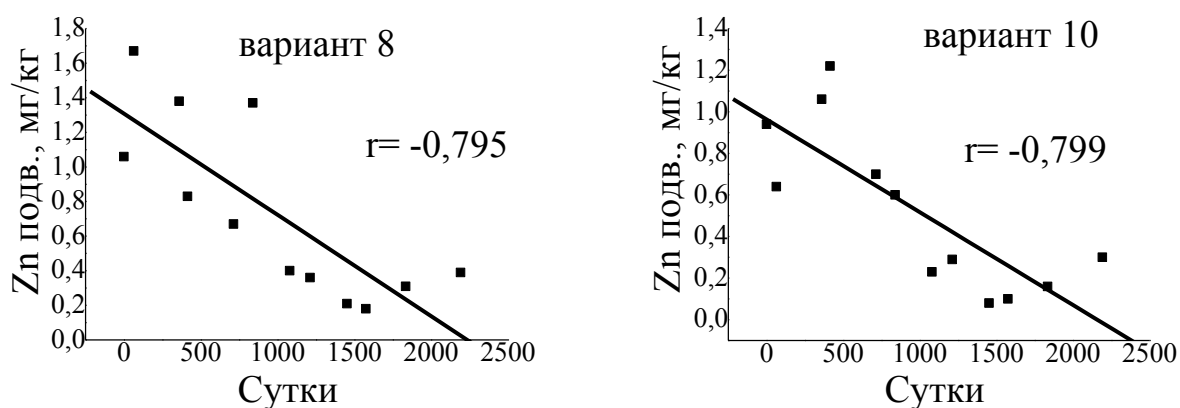


Рисунок 2 – Влияние времени воздействия мелиоранта в дозах 0,8 и 1,5 Нг на содержание подвижных соединений цинка в почве (вар. 8 и 10)

Содержание подвижных соединений цинка в почве линейно снижалось с увеличением дозы мелиоранта. Наиболее тесную корреляционную связь между данными параметрами наблюдали в период 1079–2191 сут. Значения коэффициентов корреляции (r) изменялись в пределах от $-0,792$ до $-0,935$.

3.4 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка, кальция и магния в системе почва-растение

Опыт показал, что при внесении ДМ увеличение содержания Mg в растениях оказывало значительно более существенное влияние на содержание Zn в растениях, чем увеличение содержания Ca, что, вероятно, связано с соотношением содержаний данных макроэлементов в почве (Витковская и др., 2020).

3.4.1 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка, кальция и магния в растениях овощных бобов

Содержание цинка в растениях овощных бобов в среднем по вариантам варьировалось в пределах: надземная часть – 16 ± 5 (2014) и 24 ± 8 (2017); в корнях – 23 ± 6 и 18 ± 5 мг/кг (на 5-й год взаимодействия мелиоранта с почвой содержание Zn увеличилось в среднем в 1,4 раза по отношению к 2014 году). Зависимость содержания Zn в растениях от дозы ДМ по линейной модели характеризовалась коэффициентами корреляции $-0,860$ и $-0,815$ в 2014 и 2017 гг., соответственно (при критическом значении r на 5 % уровне значимости $0,632$). В надземной части растений наблюдали тенденцию возрастания содержания цинка с увеличением содержания кальция (коэффициенты корреляции по линейной модели в 2014 и 2017 гг. составили $0,609$ и $0,622$ соответственно (при критическом значении r на 5 % уровне значимости $0,632$)). Содержание Zn линейно снижалось с увеличением содержания магния, рисунок 3. В корнях растений не выявлено взаимосвязи между данными показателями.

Установлено, что содержание магния в надземной части и корнях овощных бобов (2017) линейно возрастало с увеличением дозы ДМ. Коэффициенты корреляции составили $0,932$ и $0,803$ соответственно (при критическом значении r на 5 % уровне значимости $0,632$). При внесении мелиоранта в дозе 1,5 Нг, со-

держание Mg в надземной части и корнях растений бобов возросло в 2,5 и 3,0 раза, соответственно и составило 1,0 и 1,7%.

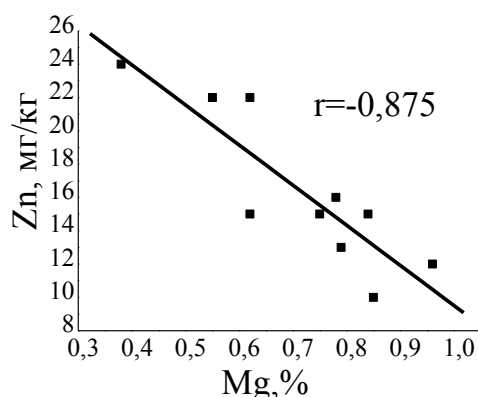


Рисунок 3 – Взаимосвязь содержания магния и цинка в надземной части овощных бобов (2017г)

3.4.2 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка, кальция и магния в растениях ячменя

Опытная культура 2015 года - ячмень сорта «Ленинградский». Содержание Zn в зерне, соломе и полове ячменя линейно снижалось с увеличением дозы ДМ (табл. 2).

Таблица 2 – Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимости содержания Zn, Ca и Mg в растениях ячменя от дозы ДМ (Витковская и др., 2020)

Зависимость	Ячмень зерно	Ячмень солома	Ячмень полова	Ячмень корни
Ca (f) = Доза ДМ	0,339	-	-0,274	0,711
Mg (f) = Доза ДМ	0,887	0,604	0,903	-
Zn (f) = Доза ДМ	-0,972	-0,792	-0,786	-0,468
Zn (f) = Ca	-0,236	0,394	-0,127	-0,402
Zn (f) = Mg	-0,884	-0,682	-0,745	-
Ca-Mg	-	-0,240	-	0,253

Примечание: r на 5% уровне значимости = 0,632

По убыванию содержания цинка (мг/кг) органы растений ячменя располагались в ряд: зерно (26 ± 9) > корни (12 ± 1) > полова (8 ± 4) > солома (5 ± 2). Внесение повышенной (1,5 Нг) дозы мелиоранта привело к снижению содержания Zn в зерне, соломе и полове ячменя по отношению к контрольному варианту в 6, 3 и 4 раза соответственно, рисунок 4.

Содержание магния в зерне, соломе и полове растений ячменя линейно возрастало в интервале доз ДМ 0–1,5 Нг, коэффициенты корреляции по линейным моделям составили 0,887, 0,604 и 0,903, соответственно. Содержание кальция практически не зависело от дозы мелиоранта. Взаимодействия Mg–Zn и Ca–Zn в вегетативных и генеративных органах растений ячменя хорошо аппроксимировались линейной моделью. Содержание Zn в зерне, соломе и полове

в ячменя линейно снижалось с увеличением содержания Mg. На рисунке 5 представлено антагонистическое взаимодействие магния и цинка в зерне ячменя. Содержание кальция в растениях ячменя практически не влияло на содержание цинка (Витковская и др., 2020)

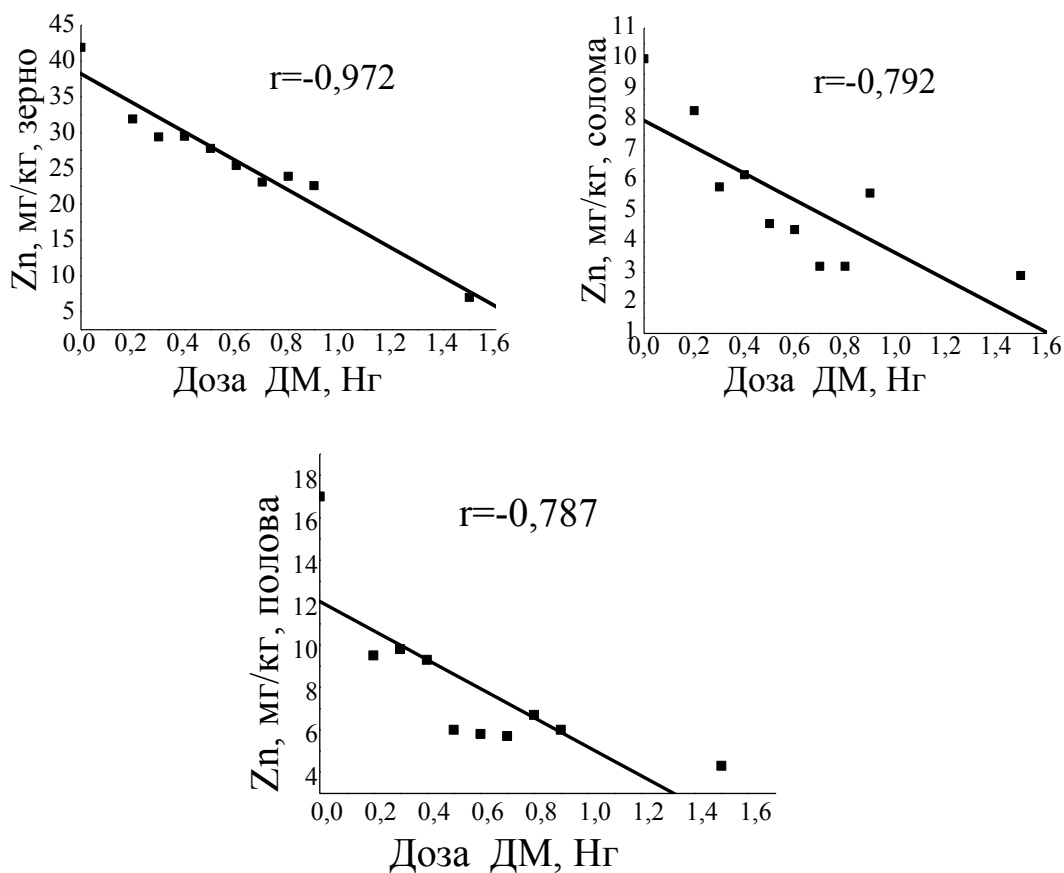


Рисунок 4 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание цинка в органах растений ячменя

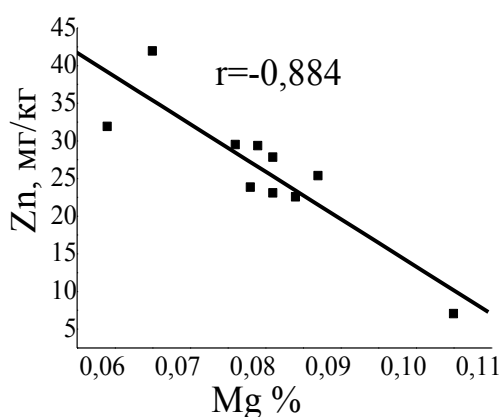


Рисунок 5 – Влияние содержания магния на содержание цинка в зерне ячменя

Содержание Zn в зерне, соломе и корнях растений ячменя линейно снижалось с увеличением содержания обменных соединений Ca^{2+} и Mg^{2+} в почве. Наиболее тесные отрицательные корреляционные связи были установ-

лены между содержанием обменного магния в почве и содержанием цинка в зерне, соломе и половине ячменя, таблица 3. Коэффициенты корреляции по линейным моделям составили -0,825, -0,936 и -0,914, соответственно (критическое значение r на 5% уровне значимости = 0,632) (Витковская и др., 2020).

Таблица 3 – Коэффициенты корреляции (r)*, характеризующие взаимодействие Ca, Mg и Zn в системе почва-растение (Витковская и др., 2020)

Зависимость	ячмень зерно	ячмень солома	ячмень половина	ячмень корни
Ca (почва) – Ca (растения)	0,487	0,257	-0,214	0,550
Ca (почва) – Mg (растения)	0,712	0,572	0,731	-0,150
Ca (почва) – Zn (растения)	-0,798	-0,623	-0,709	-0,612
Mg (почва) – Ca (растения)	0,207	-0,384	-	0,823
Mg (почва) – Mg (растения)	0,806	0,667	0,777	-0,117
Mg (почва) – Zn (растения)	-0,825	-0,936	-0,914	-0,668
Zn (почва) – Zn (растения)	0,770	0,905	0,836	0,673

3.4.3 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка, кальция и магния в растениях вики и овса

В 2016 году опытной культурой являлась викоовсяная смесь. Влияние возрастающих доз мелиоранта на содержания Ca, Mg и Zn в растениях характеризуют коэффициенты корреляции, представленные в таблице 4 (Шаврина, Витковская, 2019). Установлено, что внесение возрастающих доз ДМ привело к увеличению содержания магния в растениях: коэффициенты корреляции (r), характеризующие указанную зависимость в растениях вики и колосе растений овса составили 0,852 и 0,702, соответственно. Содержание кальция и цинка в растениях вики линейно снижалось с увеличением дозы мелиоранта: коэффициенты корреляции по линейным моделям составили -0,777 и -0,681 соответственно.

Таблица 4 – Коэффициенты корреляции (r), характеризующие зависимости содержаний Ca, Mg и Zn в растениях

Зависимость	Вика	Овес солома	Овес колос
Ca-доза ДМ	-0,681	-0,611	-0,392
Mg-доза ДМ	0,852	0,426	0,702
Zn-доза ДМ	-0,777	-0,481	-0,169
Zn-Ca	0,468	-	0,765
Zn-Mg	-0,909	0,225	0,237
Ca-Mg	-0,366	-0,617	-

Содержание цинка в растениях варьировалось в пределах: 22 ± 7 (вика); 33 ± 5 (овес, колос); 7 ± 1 (овес, солома). Выявлено, что содержание цинка в растениях вики линейно снижалось с увеличением содержания обменных соединений кальция и магния в почве: коэффициенты корреляции составили -0,854 и -0,886, соответственно (рис. 6).

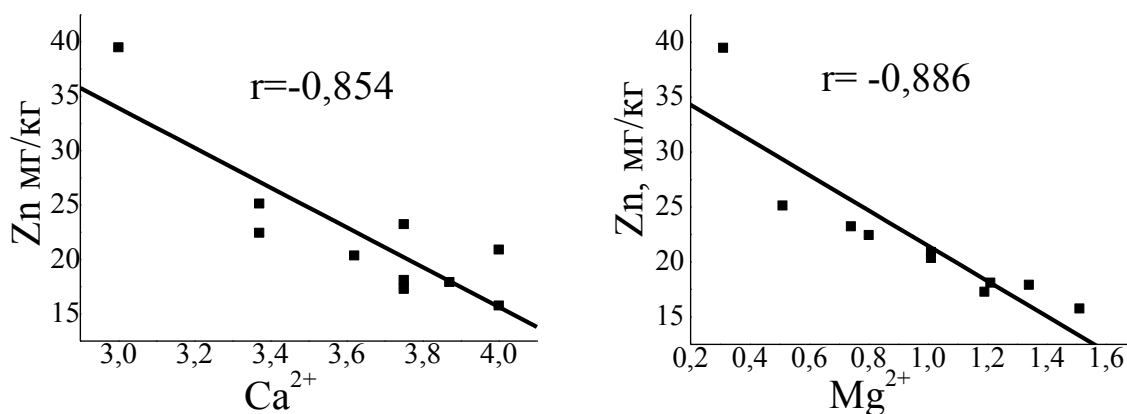


Рисунок 6 – Влияние содержания обменных соединений кальция и магния в почве на содержание цинка в растениях вики

Конкурентное взаимодействие магния и цинка наиболее ярко проявилось в растениях вики: содержание Zn линейно снижалось с увеличением содержания Mg в растениях ($r = -0,909$), рисунок 7.

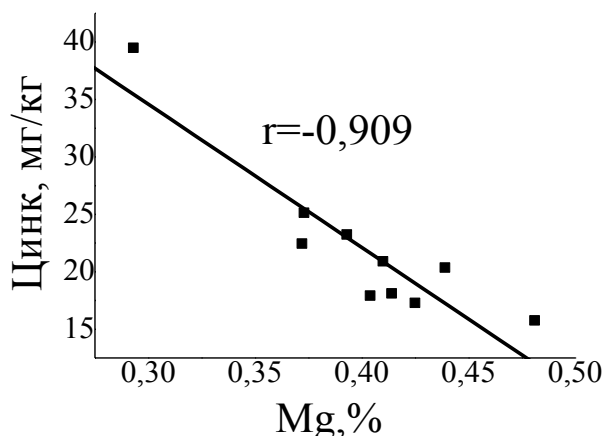


Рисунок 7 – Влияние содержания магния на содержание цинка в растениях вики

Взаимодействие Ca-Zn в растениях вики не выявлено, в растениях овса (колос) оно носило синергетический характер ($r = 0,765$). Наблюдали тесную корреляционную связь между содержанием подвижных соединений Zn в почве и содержанием элемента в растениях вики ($r = 0,921$) (Шаврина, Витковская, 2019). В отношении растений овса наблюдали достоверные корреляционные связи: содержание Ca^{2+} в почве – содержание Mg в соломе ($r = 0,660$) и содержанием Mg^{2+} в почве – содержание Mg в колосе ($r = 0,862$).

Глава 4. Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва-растение

Влияние органических и минеральных удобрений на накопление макро- и микроэлементов растениями озимой ржи сорта «Славия» изучали в условиях стационарного полевого эксперимента (2015 г.).

4.1 Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на содержание цинка, кальция и магния в почве

Влияние окультуривающих мероприятий на агрохимические параметры дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы и содержание подвижных и кислоторастворимых соединений цинка иллюстрируют данные, представленные в таблице 5. Почва опыта на парцелле 1, согласно (Методические указания..., 2003), характеризовалась слабокислой реакцией, повышенным содержанием обменного Mg, низким содержанием Ca.

Внесение органических удобрений и известкование оказали существенное влияние на уровень плодородия почвы опыта. На парцеллах 2 и 3 реакция почвы перешла в категорию близкой к нейтральной и нейтральной, соответственно, содержание обменного Mg оценивалось как высокое, обменного Ca – как среднее. Внесение органических удобрений существенно повлияло на содержание Zn в почве: среднее по вариантам содержание кислоторастворимых соединений Zn на парцеллах 2 (240 т/га органических удобрений за 7 лет) и 3 (680 т/га органических удобрений за 7 лет) превысило средние содержания на парцелле 1 в 1,4 раза; содержание подвижных соединений элемента на парцеллах 2 и 3 возросло по отношению к парцелле 1 в 2,4 и 2,7 раза, соответственно, таблица 5 (Витковская, Шаврина, 2017).

Таблица 5 – Агрохимические параметры почвы опыта

Вариант*	pH _{KCl}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Орган. вещ-во	Zn кислот. раств.	Zn подв.
		$\frac{1}{2}$ ммоль 100 г ⁻¹		%	мг/кг	
Парцелла 1 (без органических удобрений)						
1. Контроль, б/у	5,6±0,1	3,94±0,03	2,69±0,12	2,9±0,2	20,6±0,2	0,25±0,01
2. N ₇₀ P ₃₀ K ₃₀	5,3±0,1	4,56±0,05	2,49±0,06	3,3±0,3	21,4±0,5	0,34±0,02
3. N ₁₄₀ P ₆₀ K ₆₀	5,1±0,1	4,25±0,05	2,34±0,08	3,1±0,3	22,8±0,5	0,29±0,02
Парцелла 2 (навоз КРС, 240 т/га)						
1. Контроль, б/у	5,6±0,1	5,75±0,04	3,45±0,07	4,1±0,1	31,5±0,5	0,81±0,03
2. N ₇₀ P ₃₀ K ₃₀	5,8±0,1	5,25±0,06	3,49±0,04	3,9±0,3	31,2±0,2	0,72±0,02
3. N ₁₄₀ P ₆₀ K ₆₀	5,8±0,1	5,19±0,04	3,43±0,09	3,8±0,2	27,1±0,5	0,66±0,04
Парцелла 3 (КРС, 680 т/га)						
1. Контроль, б/у	6,2±0,1	6,87±0,02	3,41±0,07	5,7±0,2	30,1±0,3	1,40±0,03
2. N ₇₀ P ₃₀ K ₃₀	6,2±0,1	7,00±0,07	3,43±0,05	5,6±0,3	28,8±0,2	1,07±0,02
3. N ₁₄₀ P ₆₀ K ₆₀	6,1±0,1	7,44±0,03	3,39±0,02	5,4±0,3	29,1±0,2	0,99±0,02

Примечание* указана суммарная доза внесенных минеральных удобрений за осенне-весенний период, 2015г.

Согласно градации почв по содержанию микроэлементов (Методические указания..., 2003), почва опыта на всех парцеллах характеризовалась низким (<2 мг/кг⁻¹) содержанием подвижных соединений цинка. Установлено, что содержание подвижного Zn в почве тесно коррелировало с содержанием органического вещества (r=0,956). Зависимость содержания кислоторастворимого Zn в почве от содержания органического вещества была менее тесной (r = 0,686) (Витковская, Шаврина, 2017). Содержание обменных соединений кальция и

магния в почве на парцеллах 2 и 3 линейно возрастало (табл. 5), коэффициенты корреляции по линейной модели составили 0,952 и 0,789, соответственно, при критическом значении r на 5% уровне значимости 0,666.

4.2 Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на накопление цинка растениями озимой ржи

С целью изучения влияния различных доз органических и минеральных удобрений и известкования на распределение цинка в системе почва-растение в течение вегетации растений озимой ржи было произведено два отбора растительных проб: в фазах колошения и полной спелости, таблица 6 (Витковская, Шаврина, 2017).

Таблица 6 – Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на накопление Zn растениями озимой ржи, мг/кг а.с.в.

Вариант	1-й отбор зел. масса	2-й отбор			
		зерно	солома	полова	корни
Парцелла 1 (без органических удобрений)					
1. Контроль, б/у	15,1±3	17,2±2,9	5,0±0,7	11,8±1,5	15,6±2,1
2. N ₇₀ P ₃₀ K ₃₀	21,6±2	23,9±3,4	10,6±2,3	18,8±3,3	18,1±1,5
3. N ₁₄₀ P ₆₀ K ₆₀	23,1±2	24,9±4,6	13,1±1,2	23,8±2,5	15,4±1,1
Парцелла 2 (навоз КРС, 240 т/га)					
1. Контроль, б/у	14,2±2	16,6±0,6	5,2±0,5	9,1±2,8	23,0±3,2
2. N ₇₀ P ₃₀ K ₃₀	14,9±0,6	16,7±1,4	5,2±0,4	5,9±2,2	18,8±1,3
3. N ₁₄₀ P ₆₀ K ₆₀	17,1±2	19,3±0,6	8,0±2,3	8,1±1,8	12,2±1,1
Парцелла 3 (навоз КРС, 680 т/га)					
1. Контроль, б/у	16,4±2	16,2±2,4	5,8±0,7	6,8±1,3	18,1±0,5
2. N ₇₀ P ₃₀ K ₃₀	17,3±1	17,4±2,1	4,4±1,0	4,95±0,3	16,8±0,7
3. N ₁₄₀ P ₆₀ K ₆₀	18,6±2	14,4±0,5	4,7±0,5	5,7±1,1	13,5±0,2

По убыванию содержания цинка (мг/кг) органы растений озимой ржи располагаются в ряд: зерно (19±4) ≥ корни (17±3) > полова (11±7) > солома (7±3). Установлено, что распределение Zn между надземными органами растений озимой ржи тесно взаимосвязано. Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимости содержания Zn (зерно) – Zn (солома), Zn (зерно) – Zn (полова) и Zn (солома) – Zn (полова) составили, соответственно, $r=0,953$; 0,913 и 0,914 (при критическом значении r на 5% уровне значимости 0,666).

Установлено, что применение органических удобрений в сочетании с известкованием оказало существенное влияние на распределение цинка в системе почва - растение. Значения KH_1 (рассчитанных по отношению к содержаниям кислоторастворимых соединений элемента в почве) цинка зеленой массой растений на парцеллах 2 и 3 (навоз КРС, 240 и 680 т/га, соответственно) снизились по отношению к парцелле 1 (без органических удобрений) на 42 и 34% соответственно. Значения KH_2 (рассчитанных по отношению к содержаниям подвижных соединений элемента в почве) – на 68 и 77%, соответственно.

Значения коэффициентов накопления цинка растениями озимой ржи (КН₁ и КН₂) линейно снижались при возрастании содержания органического вещества, реакции почвы и содержания обменных соединений кальция и магния в почве. Коэффициенты корреляции приведены в таблице 7 (Витковская, Шаврина, 2017)

Таблица 7 – Коэффициенты корреляции (r), характеризующие зависимость КН цинка растениями озимой ржи от кислотно-основных свойств почвы

1-й отбор		2-й отбор							
зеленая масса		зерно		солома		полова		корни	
КН ₁	КН ₂	КН ₁	КН ₂	КН ₁	КН ₂	КН ₁	КН ₂	КН ₁	КН ₂
<i>КН (Zn) = f(органическое вещество)</i>									
-0,540	-0,800	-0,728	-0,835	-0,651	-0,744	-0,728	-0,759	-0,563	-0,868
<i>КН (Zn) = f(pH почвы)</i>									
-0,714	-0,871	-0,838	-0,884	-0,846	-0,899	-0,898	-0,889	-0,641	-0,841
<i>КН (Zn) = f(Ca²⁺ в почве)</i>									
-0,556	-0,817	-0,764	-0,857	-0,668	-0,760	-0,745	-0,781	-0,604	-0,886
<i>КН (Zn) = f(Mg²⁺ в почве)</i>									
-0,921	-0,985	-0,946	-0,977	-0,868	-0,949	-0,971	-0,981	-0,660	-0,908

4.3 Взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва – растения озимой ржи

В ходе исследования было выявлено, что содержание Mg линейно снижалось с увеличением содержания Ca в зерне озимой ржи, $r=-0,932$ (рис. 8).

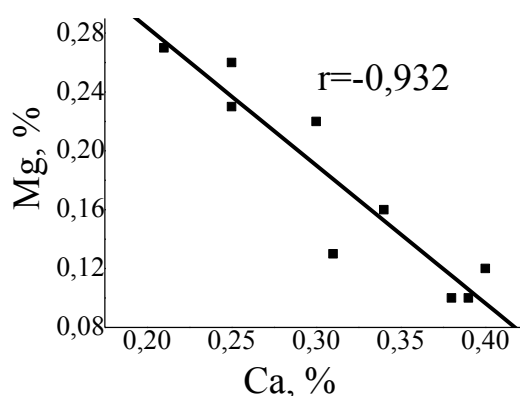


Рисунок 8 – Влияние возрастающих доз кальция в зерне озимой ржи на содержание магния в зерне растений

Содержание Zn в зерне, соломе и полостях растений озимой ржи линейно снижалось с увеличением содержания обменного Ca в почве: коэффициенты корреляции составили, соответственно, -0,661; -0,715 и -0,582. Установлено, что конкурентные взаимодействия Mg-Zn в системе почва-растение проявляются интенсивнее, чем взаимодействия Ca-Zn: коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость содержания цинка в зерне, соломе и полостях растений

озимой ржи от содержания обменного Mg^{2+} в почве составили, соответственно, -0,814; -0,933 и -0,767. Содержание Zn в корнях растений не зависело от содержания обменных соединений кальция и магния в почве (Витковская, Шаврина, 2017).

Выводы

1. Известкование кислых почв доломитовой мукой (ДМ) приводит к усилению конкурентных взаимодействий между ионами Zn, Ca и Mg в системе почва-растение вследствие изменения кислотно-основных свойств почвы, насыщения ППК кальцием и магнием. Содержание цинка в органах культурных растений зависит от дозы мелиоранта, продолжительности его контакта с почвой и видовых особенностей растений.
2. Характер зависимости кислотно-основных свойств почвы от времени взаимодействия доломитовой муки с почвой существенно изменялся в интервале доз ДМ 0,2–1,5 Нг. Тесную корреляционную связь между реакцией почвы и дозой мелиоранта наблюдали на протяжении всего срока наблюдения (6 лет): в интервале доз ДМ 0–1,5 Нг зависимость $pH_{KCl}=f(\text{Доза ДМ})$ характеризовалась по линейной модели коэффициентами корреляции (r) 0,844 и 0,974 на 63 и 2191-е сут., соответственно. В контрольном варианте опыта в период от 0 до 2191-х суток после закладки опыта pH_{KCl} почвы линейно снижался от 4,65 до 4,2 ($r=-0,839$) со скоростью (b) $1,44 \cdot 10^{-4}$ ед. pH в сутки. Через шесть лет после внесения ДМ потребность в известковании по вариантам опыта изменялась следующим образом: сильная - варианты 1-2; средняя - варианты 3-6; слабая – варианты 7-9; очень слабая – вариант 10.
3. В интервале доз ДМ 0,2–1,5 Нг содержание обменного Ca^{2+} в почве линейно возрастало в период 0–1459 суток со средней скоростью $8,6 \cdot 10^{-4} \pm 2,3 \cdot 10^{-4}$ $\frac{1}{2}$ ммоль/100 г·сут⁻¹. Максимальная скорость увеличения содержания обменного Mg составила $0,002 \frac{1}{2}$ ммоль/100 г·сут⁻¹ почвы при внесении ДМ в дозах 0,6–1,5 Нг. Установлено, что внесение ДМ в дозах 0,2–1,5 обеспечило увеличение содержания обменных соединений кальция и магния в почве по отношению к контролю не менее чем на 4 года.
4. Известкование дерново-подзолистой почвы доломитовой мукой может приводить к существенному снижению содержания подвижных соединений цинка в почве. Эффект возрастает с увеличением дозы мелиоранта (зависимость доза-ответ) и времени взаимодействия мелиоранта с почвой (зависимость время-ответ). Наиболее тесную отрицательную корреляционную связь между содержанием цинка в почве и дозой ДМ наблюдали в период 1079–2191 сут. после закладки опыта: значения коэффициентов корреляции (r) изменялись в пределах от -0,792 до -0,935. В зависимости от дозы ДМ, через 6 лет после внесения мелиоранта содержание подвижных соединений цинка в почве снизилось по отношению к исходному содержанию, в 1,2–3 раза. В интервале доз ДМ 0,3–1,5 Нг в период от 0 до 2191 суток содержание подвижного цинка в почве линейно снижалось

- (коэффициентов корреляции варьировались в пределах от - от -0,449 до - 0,799 при критическом значении r на 5% уровне значимости 0,632).
5. Влияние доломитовой муки на урожайность сельскохозяйственных культур зависит от дозы известкового мелиоранта и видовых особенностей растений. Максимальные значения урожайности были зафиксированы в интервале доз ДМ 0,6–1,5 Нг (овощные бобы, 2017г.); 0,5–0,9 (зерно ячменя); 0,6–0,8 (викоовсяная смесь).
 6. Динамика высоты растений хорошо аппроксимировалась логистической (сигмоидной) моделью. Установлено, что значения максимальной скорости (V_{max}) роста растений овощных бобов и ячменя в высоту варьировались в пределах 1,4–1,7 и 2,6–2,8 см/сутки, соответственно, и не зависели от дозы известкового мелиоранта.
 7. Содержание цинка во всех опытных культурах линейно снижалось в интервале доз доломитовой муки 0–1,5 Нг. Повышенные дозы (более 1,0 Нг) мелиоранта могут приводить к дефициту цинка в растениях: внесение ДМ в дозе 1,5 Нг привело к снижению содержания Zn в зерне, соломе и половине ячменя, по отношению к контрольному варианту, в 6; 3 и 4 раза, соответственно.
 8. Увеличение содержания Mg в почве и растениях при внесении ДМ оказывало более существенное влияние на содержание Zn в растениях, чем увеличение содержания Ca. Конкурентное взаимодействие Mg-Zn в системе почва – растение проявилось значительно интенсивнее, чем взаимодействие Ca-Zn на всех опытных культурах, о чем свидетельствуют высокие отрицательные коэффициенты корреляции, характеризующие зависимости $Zn(\text{растения})=f(Mg(\text{почва}))$ и $Zn(\text{растения})= f(Mg(\text{растения}))$.
 9. В ходе исследования были выявлены синергетические связи Ca-Zn в растениях: в надземной части растений овощных бобов и колосе овса с увеличением содержания кальция линейно возрастало содержание цинка (коэффициенты корреляции по линейной модели (r) составили 0,806 и 0,765 соответственно, при критическом значении r на 5% уровне значимости 0,632).
 10. Систематическое внесение органических удобрений в полевом стационарном эксперименте привело к увеличению содержания кислоторастворимых и подвижных соединений цинка в почве в 1,5 и 5,5 раз соответственно. Содержание подвижного Zn в почве тесно коррелировало с содержанием органического вещества ($r = 0,956$).
 11. По убыванию содержания цинка органы растений озимой ржи располагались в ряд: зерно (19 ± 4) \geq корни (17 ± 3) $>$ солома (11 ± 7) $>$ солома (7 ± 3). Содержание цинка в половине растений озимой ржи сопоставимо с содержанием в зерне. Установлено, что распределение цинка между надземными органами растений тесно взаимосвязано. Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимости содержания Zn(зерно) – Zn(солома), Zn(зерно) – Zn(полова) и Zn(солома) – Zn(полова) составили, соответственно, $r=0,953$; 0,913 и 0,913.

12. Содержание цинка в зерне, соломе и соломе озимой ржи линейно снижалось с увеличением содержания обменного кальция в почве: коэффициенты корреляции составили, соответственно, -0,661; -0,715 и -0,582 (критическое значение r на 5% уровне значимости 0,666). Конкурентные взаимодействия Mg-Zn в системе почва - растения озимой ржи проявлялись интенсивнее, чем взаимодействия Ca-Zn: коэффициенты корреляции, характеризующие зависимости содержания цинка в зерне, соломе и соломе от содержания обменного Mg в почве составили, соответственно, -0,814; -0,933 и -0,767.
13. Коэффициенты накопления цинка растениями озимой ржи линейно снижались при возрастании содержания органического вещества, реакции почвы и содержания обменных соединений Ca^{2+} и Mg^{2+} в почве. Значения KH_1 цинка зеленой массой растений на парцеллах 2 и 3 (навоз КРС, 240 и 680 т/га, соответственно) снизились по отношению к парцелле 1 (без органических удобрений) на 42 и 34%, значения KH_2 – на 68 и 77%, соответственно.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых журналах, согласно перечню ВАК:

1. Витковская С.Е., Яковлев О.Н., Шаврина К.Ф. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой почвы // *Агрoхимия*. – 2016. – №7. – С. 3–11.
2. Витковская С.Е., Шаврина К.Ф. Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на распределение цинка в системе «дерново-подзолистая почва – растения озимой ржи» // *Агрoфизика*. – 2017. – №3. – С. 4–12.
3. Витковская С.Е., Шаврина К.Ф., Яковлев О.Н. Продуктивность растений ячменя и взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва-растение при нейтрализации почвенной кислотности доломитовой мукой // *Агрoхимия*. – 2020. – №1. – С. 50–57.
4. Витковская С.Е., Шаврина К.Ф. Динамика кислотности дерново-подзолистой почвы в зависимости от дозы известкового мелиоранта // *Агрoфизика*. – 2021. – №1. – С. 1–6.

Другие статьи и материалы конференций:

1. Шаврина К.Ф., Яковлев О.Н., Власов А.В. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка в системе почва растение // *Материалы 49-й международной научной конференции молодых ученых, специалистов-агрoхимиков и экологов*. М.:ВНИИА. – 2015. – С. 250–253.
2. Витковская С.Е., Яковлев О.Н., Шаврина К.Ф. Динамика кислотно-основных свойств дерново-подзолистой почвы в зависимости от дозы мелиоранта // *Тезисы докладов VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева часть II* / Отв. ред.: С.А. Шоба, И.Ю. Савин. – Москва-Белгород: Издательский дом «Белгород». – 2016. – С. 146–147.
3. Шаврина К.Ф. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на накопление цинка растениями кормовых бобов // *Материалы Международной научной конференции XIX Докучаевские молодежные чтения «Почва – зеркало ланд-*

- шафта» / Под ред. Б.Ф. Апарина. СПб: Издательский дом СПбГУ. – 2016. – С. 200–201.
4. Шаврина К.Ф., Витковская С.Е. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка в растениях ячменя // Сборник трудов конференции «Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях: от теоретической модели к практике прецизионного управления». ФГБНУ АФИ, Санкт-Петербург. – 2016. – С. 382–386.
 5. Шаврина К.Ф., Витковская С.Е. Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на содержание цинка в растениях озимой ржи // Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего. Материалы Международной научной конференции, посвященной 85-летию Агрофизического НИИ. – 2017. – С. 532–535.
 6. Шаврина К.Ф., Витковская С.Е. Влияние возрастающих доз мелиоранта на распределение цинка в системе почва–растение // Метеорологический вестник. – 2017. Т. 9. – №2. – С. 238–241.
 7. Шаврина К.Ф., Витковская С.Е. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка, кальция и магния в растениях овощных бобов // Актуальные вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси и сопредельных государств. Сборник материалов: в 2 частях. – 2018. – С. 151–154.
 8. Шаврина К.Ф. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка, кальция и магния в растениях викоовсяной смеси // Материалы Международной научной конференции XIX Докучаевские молодежные чтения «Почвоведение – мост между науками» / Под ред. Б.Ф. Апарина. СПб. – 2018. – С. 362–363.
 9. Шаврина К.Ф., Витковская С.Е. Влияние возрастающих доз мелиоранта на распределение Zn, Ca, Mg в почве и растениях // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Развитие агропромышленного комплекса на основе современных научных достижений и цифровых технологий». – Ч. I. СПбГАУ. СПб. – 2019. – С. 94–97.
 10. Витковская С.Е., Шаврина К.Ф. Влияние возрастающих доз мелиоранта на конкурентные взаимодействия Zn, Ca, Mg в системе «почва-растение» // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Вклад агрофизики в решение фундаментальных задач сельскохозяйственной науки». СПб.:ФГБНУ АФИ. –2020. – С. 560–566.

Отпечатано в ФГБНУ АФИ
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д.14.
Тираж 100.