

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«АГРОФИЗИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ»

*На правах рукописи*

Шаврина Ксения Федоровна

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

Специальность: 06.01.03 – Агрофизика

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Научный руководитель:  
доктор биологических наук  
С.Е. Витковская

Санкт-Петербург – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Цинк, кальций и магний в системе почва – растение.....	10
1.1 Цинк в окружающей среде.....	10
1.1.1 Содержание и формы нахождения цинка в почве.....	14
1.1.2 Физиологическая роль цинка.....	17
1.1.3 Цинк в растениях.....	22
1.1.4 Факторы, влияющие на поступление цинка в растения.....	26
1.2 Кальций в окружающей среде.....	28
1.2.1 Кальций в литосфере.....	28
1.2.2 Кальций в почве.....	29
1.2.3 Физиологическая роль кальция.....	32
1.2.4 Кальций в растениях.....	33
1.3 Магний в окружающей среде.....	36
1.3.1 Магний в почве.....	36
1.3.2 Физиологическая роль магния.....	39
1.3.3 Магний в растениях.....	41
1.4 Влияние известкования на элементный состав растений.....	44
Глава 2. Объекты и методы исследования.....	47
2.1 Микрополевой опыт.....	47
2.2 Стационарный полевой опыт.....	49
2.3 Методы исследования.....	50
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.....	52
3.1 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность сельскохозяйственных культур.....	52
3.1.1 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность растений овощных бобов.....	52
3.1.2 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность	

растений ячменя.....	56
3.1.3 Влияния возрастающих доз доломитовой муки на урожайность викоовсяной смеси.....	60
3.2 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой почвы.....	62
3.2.1 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на динамику реакции почвы.....	62
3.2.2 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на динамику содержания обменных соединений кальция и магния в почве.....	68
3.3 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на динамику подвижных соединений цинка в почве .....	75
3.4 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка, кальция и магния в системе почва – растение .....	79
3.4.1 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка, кальция и магния в растениях овощных бобов.....	80
3.4.2 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка, кальция и магния в растениях ячменя .....	87
3.4.3 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка, кальция и магния в растениях вики и овса .....	95
Глава 4. Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва – растение.....	101
4.1 Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на содержание цинка, кальция и магния в почве.....	101
4.2 Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на накопление цинка растениями озимой ржи.....	103
4.3 Взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва – растения озимой ржи.....	107
Выводы.....	110
Список литературы.....	114

## Введение

**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 си-

нергетических, 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  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  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 были представлены автором лично и заочно на следующих конференциях: 49-й международной научной конференции молодых ученых, специалистов-агрохимиков и экологов (заочное участие, 2015), съезде Общества почвоведов им. В.В. Докучаева (заочное участие, 2016), ежегодной студенческой научной конференции РГГМУ «Актуальные проблемы природопользования» (2016), международной научной конференции «Докучаевские молодежные чтения» (2016 и 2018), всероссийской научной конференции с международным участием «Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях: от теоретической модели к практике прецизионного управления» (2016), всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием «Экогидромет – новые горизонты» (2017), IV международной научно-практической конференции молодых ученых «актуальные вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси и сопредельных го-



сударств» (заочное участие, 2018), международной научно-практической конференции «Развитие агропромышленного комплекса на основе современных научных достижений и цифровых технологий» (заочное участие, 2019), всероссийской научной конференции с международным участием «Вклад агрофизики в решение фундаментальных задач сельскохозяйственной науки» (заочное участие, 2020).

**Организация исследования и личный вклад автора.** Работа выполнена в соответствии с тематическими планами НИР отдела физико-химической мелиорации почв 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.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность за оказанную всестороннюю помощь своему научному руководителю доктору биологических наук, профессору РГГМУ С.Е. Витковской. Автор благодарна доктору с/х наук, члену-корреспонденту РАН Иванову А.И., доктору с/х наук, профессору Литвиновичу А.В., сотрудникам отдела физико-химической мелиорации и опытного дела АФИ, сотрудникам Меньковского филиала АФИ, студентам Полярной академии и РГГМУ за помощь в проведении полевых работ, а также сотрудникам испытательных лабораторий АФИ и РГГМУ.

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

### 1.1. Цинк в окружающей среде

Цинк относится к побочной подгруппе второй группы периодической системы, обладает типичными свойствами металла, проявляет стабильную валентность, характеризуется высокой комплексообразующей способностью (Битюцкий, 1999; Сладкова, 2012). Цинк является эссенциальным, и в тоже время, широко распространенным в природе элементом. Он встречается в почвах, водах, в горных породах и во всех живых организмах. Среднее содержание Zn в земной коре – 83 мг/кг (0,02% по весу), в поверхностных слоях почв различных стран оно колеблется в пределах от 17 до 125 мг/кг. Цинк имеет большое количество изотопов, среди них присутствуют радиоактивные. Период полуудаления из почвы для Zn составляет продолжительное время: от 70 до 510 лет (Каталымов, 1965; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Кирейчева, 1995; Овчаренко 1997; Битюцкий, 1999).

Главный путь поступления цинка в гидросферу – микробиологическое и химическое выщелачивание из горных пород. Поведение и формы существования цинка в водных объектах зависят от многих условий. В водах с достаточным содержанием  $\text{CO}_2$  устойчивыми оказываются гидрокарбонатные и карбонатные комплексы цинка  $[\text{Zn}(\text{HCO}_3)]^+$  и  $[\text{Zn}(\text{CO}_3)]$ . В слабокислой среде с pH 5,5-6,5 значительная часть цинка входит в состав гидроксокомплексов  $[\text{Zn}(\text{OH})]^+$  (Исидоров, 1999).

Кларк цинка в земной коре составляет  $75 \cdot 10^{-4} \%$  ( $6,8 \cdot 10^{-3}$ ), почве –  $5 \cdot 10^{-3}$ , золе растений –  $9 \cdot 10^{-2} \%$ , речных водах – 20 мкг/л. Основные цинковые минералы – сфалерит  $\text{ZnS}$  и смитсонит  $\text{ZnCO}_3$ , также распространены франклинит  $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  и гемиморфит  $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (Исидоров, 1999; Чертко, Чертко, 2008; Водяницкий, 2010).

Среднее содержание цинка в основных горных породах – 120 мг/кг, в средних – 60 мг/кг и в кислых – 45 мг/кг (Алексеев и др., 1992). Концентрация Zn в песчаниках и карбонатных породах колеблется в пределах от 10–30 мг/кг. В гли-

нистых осадках и сланцах концентрация элемента повышена и может достигать 80–120 мг/кг (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

Известно 66 минералов цинка, наибольшее практическое значение имеют сфалерит, цинкит и смитсонит; Zn находится в рассеянном состоянии в километровой толще гранитного слоя земли в виде свинцово-цинковых руд (Зырин, Садовникова, 1985; Самофалова, 2009; Вильдфлуш, 2011). В породах Zn присутствует главным образом в виде простого сульфида ZnS, а также изоморфно замещает  $Mg^{2+}$  в силикатах (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

Программой глобального мониторинга ООН по окружающей среде, принятой в 1980 году, цинк, наряду с шестью другими элементами – медью, кадмием, ртутью, свинцом, хромом, мышьяком и никелем – отнесен к приоритетным токсическим элементам (Добровольский, 1983).

Источники поступления цинка в окружающую среду разнообразны. Главным природным источником поступления элемента в почву (больше 700 кг в год) является вулканическая деятельность, также играют роль ветровая пыль и лесные пожары (Сладкова, 2016). Ежегодно с различными атмосферными осадками на поверхность Земли ( $1 \text{ км}^2$ ) выпадает около 70 кг цинка, что превышает поступление свинца и меди в 3 и 12 раз, соответственно (Вальков и др., 2004; Самофалова, 2009).

Техногенные источники поступления цинка – в первую очередь предприятия цветной металлургии. Технологические процессы в промышленности, машиностроении, металлообработке, стройиндустрии, радиотехнике, гальванике и полиграфии; карьеры и шахты при добыче полиметаллических руд; электростанции, сжигающие уголь; автотранспорт; мусороперерабатывающие заводы; химические средства защиты сельскохозяйственных культур от болезней и вредителей, а также удобрения (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Ильин, 1991; Дабахов и др., 2005; Бадтиев, 2009; Чикенева, 2013).

Наиболее мощные ареалы цинка возникают вокруг предприятий черной и особенно цветной металлургии. Валовое количество металла в загрязненной поч-

ве может достигать внушительных размеров. Например, Б.А. Важениной (1983) в слое 0–5 см было обнаружено свыше 400 мг Zn (Ильин, 1991).

Выбросы цинко-кадмиевых плавильных заводов составляют больше половины от общего количества выбросов Zn (около 60%); при производстве железа, стали и различных сплавов в окружающую среду поступает примерно 13%, в результате сжигания отходов – 17%, древесины – 6%, около 4% приходится на прочие источники (Овчаренко, 1997; Бурдуковский, 2014).

Функционирование металлургических предприятий ежегодно поставяет более 121,5 тыс. т. цинка (Куликов, Галиуллина, 2006). В пыли металлургических производств, заводов по переработке руд концентрация элемента может быть повышена по сравнению с литосферой в сотни раз (Мотузова, Безуглова, 2007).

На поверхности почвы накапливается значительное количество тяжелых металлов при их длительном поступлении из источников эмиссии в атмосферу. Известно достаточное количество примеров загрязнения почв цинком в результате выбросов металлургических заводов в России и за рубежом. В окрестностях свинцово-цинкоплавильного завода в Канаде содержание в почвах цинка, извлекаемого 1 н.  $\text{HNO}_3$  достигало 1390 мг/кг при фоне 50–75 мг/кг (Водяницкий, 2010). В почвах штатов Миссури, Канзас и Оклахома, расположенных в районе месторождений Pb и Zn было обнаружено больше 10500 мг/кг цинка (Abdel-Saheb J.A. et al. 1992). При производстве цинка выбросы металла в атмосферу (без очистки) достигают 62,5–77,5 кг на тонну выплавленного цинка (Зырин, Садовникова, 1985; Ильин, 1991). Значительное загрязнение атмосферного воздуха и почвы происходит за счет транспорта, в том числе авиационного. Накопление этого элемента также происходит в зонах напряжённого автотранспорта в промышленных центрах, вдоль автострад (Самофалова, 2009).

Применение минеральных удобрений также является источником загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами. Наиболее загрязнены ими фосфорные и комплексные удобрения (Вальков и др., 2004).

Нетрадиционные органические удобрения и известковые мелиоранты, наряду с соединениями необходимыми для обеспечения жизнедеятельности растений,

содержат примеси, которые могут представлять опасность для человека и окружающей природной среды. В составе простого суперфосфата по данным J. Саго (1964) присутствуют следующие тяжелые металлы – кадмий (до 170 мг/кг), хром (до 240 мг/кг), кобальт (до 90 мг/кг), медь (до 80 мг/кг), свинец (до 90 мг/кг), ванадий (до 180 мг/кг) и цинк (до 1430 мг/кг) (Алексеев, 1987).

Большая часть цинка, поступившего на поверхность почвы, закрепляется в верхних гумусовых горизонтах. Zn образует устойчивые формы с органическим веществом, чаще всего он накапливается в горизонтах почв с высоким содержанием гумуса, а также в торфе. Цинк – наиболее растворимый, по сравнению с другими тяжелыми металлами, элемент в почве. Концентрация Zn в почвенных растворах колеблется в пределах от 4–270 мкг/л в зависимости от свойств почвы и методов определения (Овчаренко, 1997; Сладкова, 2012).

Степень подвижности данного элемента зависит от геохимической обстановки и силы техногенного воздействия. Тяжелый гранулометрический состав и высокое содержание органического вещества в почве приводят к связыванию цинка. Рост значений рН среды усиливает сорбированность Zn (Вальков и др., 2004).

Согласно (ГН 2.1.7.2041-06), предельно допустимая концентрация (ПДК) подвижных соединений цинка в почве составляет 23,0 мг/кг. Лимитирующий показатель вредности – транслокационный. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) валового Zn в песчаных и супесчаных почвах составляют 55 мг/кг, в кислых (суглинистых и глинистых с  $pH_{KCl} < 5,5$ ) – 110 мг/кг, в близких к нейтральным и нейтральным (суглинистым и глинистым почвам с  $pH_{KCl} > 5,5$ ) – 220 мг/кг (ГН 2.1.7.2511 – 09; Сладкова, 2016).

По данным министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Ежегодник...2016) загрязнение почв цинком в 2015 г. обнаружено в городах Артемовский, Благовещенск, Владивосток, Владикавказ, Екатеринбург, Иркутск, Кстово, в поселке Листвянка, в городах Нижний Новгород и Саранск (содержания элемента превышало ОДК от 2 – до 40 раз, ОДК = 220 мг/кг).

### 1.1.1 Содержание и формы нахождения цинка в почве

В почвах различают водорастворимые, обменные, легкорастворимые (непрочносвязанные), кислоторастворимые, фиксированные и прочно фиксированные формы цинка (Битюцкий, 1999). Цинк в почве находится в обменной форме, в форме растворимых в воде солей, в форме органического вещества и в составе кристаллической решетки минералов (Ковда, 1973; Вгuemmer, 1985; Битюцкий, 1999). Кларк Zn по А.П. Виноградову равен 50 мг/кг (Виноградов, 1957), в почвах США он несколько выше и составляет 58 мг/кг (Водяницкий, 2008). В незагрязненных почвах концентрация элемента колеблется в широком диапазоне от 10–300 мг/кг (Хижняк, 2015).

Валовое содержание цинка в естественных незагрязненных почвах обусловлено содержанием Zn в материнской породе и определяется генезисом, петрохимией, фациальными различиями материнского субстрата и процессами почвообразования. Содержание элемента в почвах также связано с реакцией среды, содержанием в почве органического вещества, биологическим круговоротом элемента, механическим составом, процессами миграции элемента в почвенно-грунтовом слое с участием природных вод и с неоднородностью состава растительного покрова (Зырин, Садовникова, 1985; Самофалова, 2009; Сладкова, 2016).

Изучением валового содержания цинка в почвах Советского Союза занимались такие исследователи как Я.В. Пейве, А.П. Виноградов, И.А. Власюк, В.А. Ковда, Г.Л. Мокриевич и Г.М. Игнатович, М.Н. Хорошкин, М.В. Брежнева, В.В. Акимцев, А.Н. Гульяхмедов, М.Ф. Охрименко (Каталымов, 1965; Сладкова, 2012).

Фоновое содержание Zn в почвах мира в среднем – 50 мг/кг. В почвах России этот показатель находится в пределах от 25–65 мг/кг. Самое высокое содержание цинка – 235 мг/кг установлено в известковых почвах Китая (Овчаренко, 1997; Яхияев и др., 2011).

Валовое содержание цинка в почвообразующих породах следующее: глины – до 55 мг/кг, покровные суглинки – 30–50 мг/кг, пески – 8–30 мг/кг (Минеев, 2004). Почвы таежно-лесной Нечерноземной зоны содержат в среднем около 40 мг/кг Zn, серые лесные почвы и черноземы лесостепной и степной зоны 50 и 90

мг/кг соответственно, почвы сухостепной, полупустынной и пустынной – 80 мг/кг, горные почвы – 40 мг/кг (Зырин, Садовникова, 1985). Валовое содержание элемента в некоторых почвах России представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание валового цинка в почве (Минеев, 2004)

Почвы	Zn, мг/кг
Тундровая	53-76
Дерново-подзолистая	20-67
Лесостепная	28-65
Чернозем	24-90
Каштановая	-
Серозем	26-63
Краснозем	46-73

Дефицит Zn чаще всего проявляется на нейтральных и слабощелочных карбонатных почвах. В легких кислых почвах Zn наиболее подвижен и биологически доступен (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Самофалова, 2009).

По данным (Environmental..., 1984) содержание Zn в почвах, сформировавшихся на типичных материнских породах, составляет от 25–200 мг/кг почвы, а на геохимически аномальных – 1000 и более мг/кг. Например, в почвах США, сформировавшихся в местах выхода к поверхности полиметаллических жил, содержание цинка достигает 600–5500 мг/кг (Хафф, 1954).

При разрушении цинксодержащих горных пород и минералов, в процессе выветривания (особенно в кислых средах) образуется подвижный ион  $Zn^{2+}$ . Наиболее важными факторами, контролирующими накопление и поведение цинка в почвах, являются водные оксиды железа, глинистые частицы, органическое вещество и значения pH (Кашин, 1999).

Кислые почвы содержат относительно больше обменного цинка, Минимальная растворимость соединений данного элемента наблюдается при pH 5,5–6,9; дальнейшее повышение pH ведет к увеличению растворимости, так как Zn

является амфотерным элементом и в щелочной среде образует цинкаты типа  $Zn(ONa)_2$  (или  $Na_2ZnO_2$ ). Однако в присутствии достаточных количеств кальция и в слабощелочной среде подвижность соединений Zn мала ввиду малой растворимости цинкаты кальция (Возбуцкая, 1968; Шаврина, Витковская, 2017).

При повышенных pH, когда в почвенном растворе возрастает концентрация органических веществ, Zn-органические комплексы могут вносить свой вклад в растворимость этого металла. Цинк ассоциируется в почвах главным образом с водными оксидами железа и алюминия (14–40% от общего содержания Zn) и с глинистыми минералами (25–60%). Легкоподвижные формы цинка и органические комплексы составляют 1–20 и 1,5–2,3 соответственно (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

Количество подвижного цинка в почвах подвержено значительным колебаниям. Снижение подвижности элемента на карбонатных почвах объясняется связыванием Zn известью в нерастворимые цинкаты кальция. Кальций задерживает поступление цинка в растения, так как эти катионы являются антагонистами. Подкисление почвы обычно сопровождается ростом содержания подвижного Zn в почве (Минеев, 2004).

Основной и наиболее подвижной формой цинка в почвах считается  $Zn^{2+}$ , однако встречаются и другие ионные формы, в том числе анионные:  $[ZnCl_3]^-$ ,  $[ZnCl_4]^{2-}$ . В кислых дерново-подзолистых почвах содержание подвижных форм (ПФ) цинка (1 н. KCl) выше (0,12–20 мг/кг), чем в почвах с близкой к нейтральной и щелочной реакцией среды. В черноземах, сероземах, каштановых и бурых почвах содержание ПФ цинка обычно не превышает 0,25 мг/кг. Наименьшие количества ПФ цинка содержатся в почвах с реакцией близкой к нейтральной (Возбуцкая, 1968; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Ильин, 1991; Битюцкий, 1999).

Согласно группировке почв по содержанию подвижных соединений Zn, при экстракции ацетатно-аммонийным буфером (pH 4,8), уровни содержания <2; 2,1–5 и >5 мг/кг почвы оцениваются как низкий, средний и высокий, соответственно (Флоринский и др., 1994; Сладкова, 2012). При экстракции 1 н. KCl низкому,



среднему и высокому уровням содержания элемента соответствуют значения концентраций  $<0,7$ ;  $0,8-1,5$  и  $>1,5$  мг/кг почвы (Методические указания..., 2003).

На распределение обменных форм цинка по почвенному профилю оказывает влияние рН почвенного раствора: при увеличении рН доля обменных форм уменьшается, они осаждаются на щелочном барьере (Коновалова, 2018). Обменные формы Zn довольно непрочно закрепляются как с гуминовыми кислотами, так и с фульвокислотами (Минкина, 2008; Попова и др., 2010). Цинк может закрепляться на карбонатах кальция и магния в виде непрочно связанных соединений (Минкина, 2008).

Обменные формы цинка, связанные как с минеральным, так и с органическим веществом, составляют незначительную часть общей массы металла: доли или несколько процентов от валовых запасов находящегося в почве. В связи с этим дефицит подвижных форм цинка распространен на значительных площадях (Кашин, 1999; Яхияев и др., 2011; Коновалова, 2018).

Около 75–80% пахотных земель России бедны цинком. Низкое содержание элемента в почве приводит к низкому содержанию его в растениях, а затем и к недостатку этого микроэлемента в организме человека (Солдатов, Чумаченко, 1987; Авцын и др., 1991; Сальникова и др., 2012).

### **1.1.2 Физиологическая роль цинка**

Цинк – биологически активный эссенциальный элемент для всех форм жизни (Сальникова, Осипова, 2015). Этот элемент играет важную роль в окислительно-восстановительных процессах, протекающих в растительном и животном организмах. Zn является жизненно важным микроэлементом, влияющим на обмен веществ, рост и развитие растений, входит в состав более 200 ферментов (Swinkels et al., 1994; Битюцкий, 1999; Черных, 2002; Кузнецов, 2006; Шаврина, Витковская, 2019). Цинк путем дегидрирования играет значительную роль в регуляции окислительно-восстановительного потенциала в клетках, участвует в синтезе хлорофилла и оказывает влияние на процесс фотосинтеза и углеводный обмен (Каталымов, 1965; Спицына и др., 2013).

Этот микроэлемент способен влиять на обмен веществ и морозоустойчивость растений (Самофалова, 2009). Цинк связан с обменом углеводов, белков и минеральных веществ, участвующих в процессах образования макроэргических соединений АДФ и АТФ (Серегина, 2011). Он является составной частью многих ферментов (Каталымов, 1965), входит в состав карбоангидразы, катализирующей гидратацию  $\text{CO}_2$ . Этот элемент активирует дыхательные ферменты, в присутствии цинка ускоряется поглощение калия, марганца, молибдена. Zn играет важную роль в образовании индолилуксусной кислоты (гормона роста), оказывает непосредственное влияние на темпы роста растений (Битюцкий, 1999; Кузнецов, 2006).

Цинк является структурным компонентом биологических мембран и играет важную роль в их интеграции. Этот элемент может связываться фосфолипидами и сульфгидрильными группами мембран, формировать тетраэдрические комплексы с цистеиновыми остатками полипептидных цепей и тем самым защищать липиды и белки от окислительной деструкции. Один из типичных признаков дефицита Zn у растений – повышение проницаемости мембран (Битюцкий, 1999).

Недостаток цинка для растений нарушает нормальное течение биологических процессов и снижает урожайность различных сельскохозяйственных культур (Спицына и др., 2013). При недостатке данного микроэлемента в растениях нарушается синтез белка и подавляется деление клеток, что приводит к морфологическим изменениям листьев, нарушению растяжения клеток и дифференциации тканей (Самофалова, 2009).

Цинк играет важную роль при оплодотворении и развитии зародыша, при недостатке этого элемента растения могут не образовывать семян (Каталымов, 1965). Дефицит этого микроэлемента ведет к нарушению в превращениях углеводов, сельскохозяйственные культуры накапливают фенольные соединения, которые снижают содержание крахмала. К недостатку элемента особо чувствительны плодовые деревья, бобы, кукуруза, соя, менее – картофель, томаты, лук, люцерна, просо и красный клевер (Минеев, 2004).

Высокое содержание цинка в растении приводит к нарушению физиологических и биохимических процессов, нарушается питание растений микроэлементами и основными элементами (Зырин, Садовникова, 1985; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Изменения наблюдаются в углеводно-белковом обмене, который выражается в снижении содержания и накопления сахаров и белкового азота, а также – в нарушении отношения содержания редуцирующих сахаров к дисахаридам и белка к сумме сахаров (Егорова, 2008).

Цинк – один из важнейших элементов организма человека. Он необходим человеку для выполнения важных физиологических функций организма на протяжении всей его жизни, начиная с внутриутробного периода (Забелина, 2005; Коровина и др., 2013; Халиуллина, 2013; Скальный и др., 2016).

Этому элементу принадлежит важная роль в синтезе белка и нуклеиновых кислот. Цинк – часть генетического аппарата клетки, этот элемент незаменим на многих этапах экспрессии гена, оказывает прямое влияние на рост и пролиферацию клеток всего организма (Марков и др., 1992; Федосеенко и др., 2003). Цинк участвует в образовании жизненно важных гормонов и кровяных телец, принимает участие в сокращении мышц и может оказывать влияние на транспортные способности гемоглобина, способствует снижению неспецифической проницаемости клеточных мембран, предотвращает фиброз (Кудрявцева и др., 2012). Zn играет значительную роль в функционировании системы иммунитета. Данный элемент участвует в формировании рецепторной чувствительности к различным гормонам, факторам роста (обеспечивает контроль экспрессии генов в процессе репликации и дифференцировки клеток) и т.д. (Скальный, Рудаков, 2004). Благодаря цинку происходит секреция инсулина в поджелудочной железе, нормализуется уровень глюкозы и холестерина в крови. Zn стимулирует образование и минерализацию костной ткани (Горбылева, 2009; Максимова и др., 2010).

Цинк является единственным металлом, представленным в каждом классе ферментов, и не может быть заменен никаким другим металлом (Федосеенко и др., 2003). Он является компонентом более 300 металлоферментов (ДНК-полимераза, Zn-зависимая тимидинкиназа, карбоангидраза и т.д.), входит в состав

многих белков (Vallee, Falchuk, 1993), принимает участие во всех видах обмена (Colenan, 1992). Ему принадлежит важная роль в синтезе белка и нуклеиновых кислот, он необходим для стабилизации структуры ДНК, РНК и рибосом (Журавлева и др., 2007).

Запасы цинка в человеческом организме составляют около 1,5–3 г и зависят от многих факторов – возраст и пол человека, состояние слизистой оболочки ЖКТ, наличие сопутствующих заболеваний, беременность и пр. (Krebs, 2000; King, 2001; Мальцев, Файзуллина, 2002; Файзуллина, 2002; Фролова, Охупкина, 2010; Быстрова и др., 2013).

Цинк содержится практически во всех органах и тканях. Около 63% запасов элемента находится в скелетной мускулатуре. Гомеостаз Zn поддерживается преимущественно через ЖКТ (Халиуллина, 2013).

Суточная потребность взрослого человека в этом микроэлементе колеблется в пределах от 10–25 мг. Поступление цинка в организм происходит с пищей (Батцевич, Зорина, 2009; Фролова, Охупкина, 2010). Из продуктов питания наибольшее содержание Zn наблюдается в морских продуктах (устрицах), печени, говядине, семенах тыквы и кунжута, моркови и луке (Скальная и др., 2003; Скальный, Рудаков, 2004).

ПДК цинка в основных пищевых продуктах составляет в печени рыб, яичном порошке 200 мг/кг; мясе, яйцах, сырах, зерне, крупах, муке, шоколаде – 50–70; рыбе, твороге, хлебе, кондитерских изделиях – 30–40; овощах, фруктах, поваренной соли, грибах – 10–20; молоке, питьевой воде – 5 мг/кг. ПДК оксида цинка в воздухе – 0,5 мг/м<sup>3</sup> (СанПиН 2.3.2.1078—01).

В России наблюдается дефицит подвижных форм цинка в почвах большинства регионов, соответственно существует проблема обеднения рациона жителей этим микроэлементом (Авцын и др., 1991; Сальникова, 2016). Дефицит Zn может развиваться при недостаточном поступлении этого элемента в организм (менее 1 мг/день). Порог токсичности цинка для организма человека составляет 600 мг/день (Скальный, 2003).

Дефицит данного микроэлемента оказывает влияние на функциональную активность многих систем и органов: ЖКТ, центральную и периферическую нервную систему, иммунную, костную и репродуктивную системы (Халиуллина, 2013). Основные проявления дефицита цинка характеризуются раздражительностью, утомляемостью и потерей памяти. Происходит снижение остроты зрения, а также потеря вкусовых ощущений, замедленное заживление ран, возможны аллергические заболевания, выпадение волос и диарея (Бацевич, Зорина, 2009; Сальникова, 2016). Задержки роста, развития вторичных половых признаков, костной зрелости, иммунные дисфункции – признаки дефицита элемента в организме (Шейбак, Шейбак, 2000; Федосеенко и др., 2003; Prasad, 2003).

В период беременности дефицит цинка приводит к нарушению течения беременности у женщины, а также способствует развитию дефицитного состояния у плода с последующим нарушением формирования и функционирования основных физиологических систем организма новорожденного (Щеплягина, Легонькова, 2004; Журавлева и др., 2007).

Дефицит цинка широко распространен в развивающихся и бедных странах (Chen et al., 1985; Cavan et al., 1993), но эта проблема актуальна и для развитых стран (Авцын и др., 1991). Около 17–25% населения Земли подвержено опасности развития Zn-дефицитных состояний (Marret, Sandstead, 2006; Wessells, Brown, 2012). По данным Российского общества микроэлементологии в России в отдельных регионах страны дефицит цинка наблюдается более чем у 30% населения (Халиуллина, 2013).

Избыток Zn оказывает токсическое действие на организм и может стать причиной язвы желудка, панкреатической летаргии, анемии, лихорадки, тошноты, рвоты, дыхательной недостаточности, фиброза легких (Рустембекова, Барабошкина, 2006). Токсическая доза цинка для человека (при хроническом поступлении) – 150–600 мг, летальная доза – 6 г. (Илларионова и др., 2016). Вдыхание цинковых паров вызывает так называемую «цинковую» или «литейную лихорадку», это профессиональное заболевание появляется у рабочих, занятых сваркой оцинкованной стали (Косарев, Бабанов, 2011).

### 1.1.3 Цинк в растениях

В 1855 г. на присутствие цинка в золе растений указал Г. Форгаммер, в 1872 г. К. А. Тимирязев указал на то, что этот микроэлемент может иметь значение в устранении хлороза у растений. В СССР в конце 30-х годов были проведены первые исследования по изучению влияния цинковых удобрений на развитие сельскохозяйственных культур (Битюцкий, 1999).

Содержание цинка в золе растений составляет  $9 \times 10^{-2}$  %, он входит в состав всех растительных организмов (Орлов, Садовникова, 2005). Растениям доступны растворимые формы цинка, потребление элемента линейно возрастает с повышением его концентрации в питающем растворе и в почве (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Сладкова, 2012). Доступность цинка для растений зависит от  $pH_{KCl}$ , содержания в почве карбонатов и органических веществ. Недостаток элемента в почвах чаще всего проявляется в нейтральной и щелочной среде (Воропаев, Пашкова, 2009), в песчаных карбонатных почвах и богатых кальцием болотных почвах. На усвояемость цинка отрицательно влияют и фосфаты почвы, которые могут образовывать с ним труднорастворимые соединения (Ковальский, 1970; Минеев, 2004; Кошелев, 2009).

Цинк является биологически важным элементом для растений. Его содержание и соотношение в плодах зависит от биологических особенностей пород, уровня обеспеченности питательными веществами и экологической обстановки. При высоких концентрациях Zn может быть опасным токсикантом для живых организмов (Мотылева, 2015).

Цинк поступает в растения как катион  $Zn^{2+}$  или в форме хелатных соединений через корни и листья. В ксилеме может встречаться в виде свободного двухвалентного катиона  $Zn^{2+}$  или в составе комплексов с органическими соединениями (Коновалова, 2018). Во флоэме большая часть цинка связана в комплексы (Битюцкий, 1999).

Цинк играет важную роль в белковом, азотном, углеродном и фосфорном обменах, способствует синтезу аскорбиновой кислоты, тиамин, повышает вододерживающую силу растений (Вильдфлуш, 2011). Данный микроэлемент спо-

способствует увеличению содержания ауксинов в тканях и активирует рост клеток, а также повышает устойчивость растений к стрессовым воздействиям (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Кузнецов, 2006; Титов и др., 2011). По данным И. Г. Важенина (1985) почвы по обеспеченности цинком можно разделить на три группы, таблица 2 (Самофалова, 2009).

Содержание цинка в растительном организме зависит от морфофизиологических особенностей растений и агрохимических свойств почвы. Концентрация Zn в растениях колеблется в диапазоне 1–80 мг/кг сухой массы, в среднем – 15–20 мг/кг сухого вещества. При высоком содержании цинка в почве содержание элемента в растениях может достигать сотых долей процента. В растениях с повышенным содержанием Zn отличаются листья, генеративные органы и точки роста. Концентрация цинка в меристемах листьев в 5–10 раз выше, чем в листовой пластинке зрелых листьев (Битюцкий, 1999; Ильин, Сысо, 2001; Минеев, 2004; Алексеев, 2008).

Таблица 2 – Группировка почв по обеспеченности растений цинком (мг/кг)  
(Важенин, 1985)

Обеспеченность растений	I группа растений (невысокий вынос микроэлементов)	II группа растений (повышенный вынос микроэлементов)	III группа растений (высокий вынос микроэлементов)
Низкая	<0,3	1,5	<3,0
Средняя	0,3–0,5	1,5–3,0	3,0–5,0
Высокая	>1,5	3,0	5,0

**Примечание:** I группа – зерновые, кукуруза, зернобобовые, картофель; II группа – корнеплоды, овощи, травы; III группа – сорта интенсивного типа, с/х культуры I и II групп, возделываемых в условиях повышенного агрофона

В стеблях и корнях цинк накапливается в меньших количествах. В семенах Zn больше накапливается в зародыше, чем в эндосперме и семенной оболочке, что говорит о связи элемента с важнейшими процессами фотосинтеза и образования семян (Минеев и др., 1993; Сладкова, 2012).

Существуют растения–гипераккумуляторы, которые способны накапливать тяжелые металлы в надземных частях, в концентрациях, превышающих до 100–1000 раз таковые у обычных растений. Например, содержание цинка в побегах *Arabidopsis helleri* и *Thlaspi caerulescens* составляет около 30000 и 20000 мг/кг сухой массы, соответственно.

Существуют растения–концентраторы микроэлемента: лишайники и хвойные, среди травянистых известны представители гвоздичных (более 4800 мг/кг) и крестоцветных (более 1300 мг/кг сухого вещества). Древесные растения – хорошие индикаторы на содержание Zn. Они ослабляют действие металла путем метаболической адаптации, комплексообразования и перевода элемента в нерастворимую форму (Вредные..., 1998; Прохорова и др., 1998; Войтюк, 2011; Титов и др., 2011). В таблице 3 представлены нормальные и токсичные для растений концентрации цинка.

Таблица 3 – Нормальные и токсичные содержания цинка в растениях, мг/кг сухого вещества (Ильин, 1991)

Разные растения (Melated, 1973)		Райграсс (Cottene et al., 1976)		
нормальное	предположительно максимальное	дефицитное	нормальное	токсичное
15–150	300	<20	25–250	>400

Цинк обладает слабой фитотоксичностью, которая обнаруживается только при существенном увеличении его содержания в почве (Воропаев, Пашкова, 2009). На почвах с малой емкостью катионного поглощения токсичный эффект Zn наблюдается при поступлении его в количествах 400–700 кг/га, а на почвах с большой емкостью поглощения – 2000 кг/га (Сладкова, 2012). Появление признаков токсичности цинка наступает при содержании его в тканях 300–500 мг/кг сухой массы. Среднее содержание Zn в частях растений, бедных хлорофиллом, со-



ставляет от 7–27 мг/кг с.м., а в растительных материалах, богатых хлорофиллом – 40–95 мг/кг (Алексеев, 2008).

В больших количествах ( $>7 \times 10^{-3} \%$ ) цинк токсичен для растений, происходит угнетение процессов окисления (Безуглова, 2000). Фитотоксичность Zn часто отмечается на кислых и интенсивно орошаемых стоками почвах, в зонах промышленного загрязнения, при неправильном применении цинкосодержащих удобрений. Обычные симптомы – хлороз молодых листьев, снижение роста, некрозы, ускорение опадения листьев, карликовость (Зырин, Садовникова, 1985). Цинк может вызывать у растений симптомы недостаточности железа и марганца, он может снижать поступлении меди и кадмия в растение (Аштаб, 1994).

Содержание Zn значительно колеблется у представителей разных семейств и у отдельных видов внутри семейств (табл. 4), особенно у основных групп сельскохозяйственных культур (Schnetzer et al., 1980).

Таблица 4 – Содержание цинка в растениях незагрязненных территорий (усредненные данные) (Ильин, 1991)

Овощи	Зерновые		Бобовые		Травы
	листья	зерно	листья	зерно	
72,5 / 10	29 / 8	6 / 66	38,5 / 11	32,1 / 40	надземная часть 33,1 / 321

Примечание: концентрация, мг/кг сухой массы / объем выборки

Специфические признаки цинкового голодания – повышенная пассивная проницаемость мембран, задержка роста междоузлий, появление хлороза и мелколистности, развитие розеточности (Школьник и др., 1967; Битюцкий, 1999). Листья становятся узкими с завернутыми внутрь краями, клубни мелкие. При недостатке цинка на листьях растений появляются хлоротичные пятна, у некоторых растений они становятся бледно-зелеными, а у некоторых становятся почти белыми (Каталымов, 1965). У бобовых культур появляется крапчатость листьев. Особенно чувствительна к недостатку микроэлемента фасоль. Кукуруза, хлопок и

яблоня более чувствительны к недостатку цинка, чем пшеница, овес и горох (Битюцкий, 2014).

От недостатка цинка чаще всего страдают плодовые и цитрусовые культуры на нейтральных и слабощелочных карбонатных почвах с высоким содержанием фосфора. При сильном поражении ветви отмирают, что приводит к появлению «суховершинности». Плоды приобретают неправильные формы и нетипичную окраску и преждевременно опадают (Минеев, 2004). У косточковых пород и винограда при недостатке цинка наблюдается мелколистность, у грецкого ореха – желтуха (Каталымов, 1965).

Цинк оказывает не только прямое воздействие на систему почва–растение, накапливаясь в токсичных концентрациях, изменяя проницаемость клеточных мембран и нормальный метаболизм в растительных тканях, но и косвенное влияние, вызывая усиление или ослабление поглощения растениями многих макро-, и микроэлементов. По абсолютному содержанию в растительном веществе Zn относится к элементам повышенной концентрации (Ильин, 1991; Аштаб, 1994).

#### **1.1.4 Факторы, влияющие на накопление цинка растениями**

Поведение химических элементов в системе почва – растение определяется множеством факторов, которые можно разделить на 2 группы: факторы внешней среды и свойства химического элемента (Витковская, 2006). Наиболее хорошо изучена зависимость поступления элемента в растения от буферной способности почвы, формы и концентрации элемента в почве, генетически обусловленных особенностей растений (Горбатов, Зырин, 1987; Минеев, 1988; Овчаренко, 1997). К свойствам химического элемента, определяющим его биодоступность, относятся знак и величина заряда иона, форма соединения, способность к комплексообразованию и гидролизу (Прохоров, 1981).

Доступность микроэлементов определяется содержанием их в почвенном растворе и в ионообменном состоянии. Преобладающая часть содержащихся в почве микроэлементов недоступна растениям. Содержание микроэлементов в подвижной форме определяется типом почвы, составом материнских пород и рас-

тельности, микробиологической активностью почвы, реакцией среды и содержанием органического вещества (Алексеев, 2008; Самофалова, 2009).

Растворимые формы цинка доступны для растений, по данным А. Кабата-Пендиас (1989), потребление элемента линейно возрастает с повышением его концентрации в питающем растворе. Скорость поглощения Zn сильно колеблется в зависимости от вида растений и условий среды роста (Сладкова, 2012).

Кислая реакция почвенного раствора приводит возрастанию подвижности цинка и соответственно более активному поглощению его растениями (Горбылева и др., 1994; Алексеев, 2008; Бодеева, Чимитдоржиева, 2012). Доступность цинка уменьшается с возрастанием концентраций в почвах Са и фосфорных соединений, фосфаты образуют с Zn труднодоступные для растений соединения. Чрезмерное известкование почв и доведение pH до 7–8 приводит к образованию труднорастворимых соединений Zn, снижению поступления и дефициту элемента в растениях (Клышевская, 2010; Небольсин, Небольсина, 2010).

Цинк распределяется между различными органами растений следующим образом: корни > листья > стебли > ствол (стебель) (Kabata-Pendias, 2011). Однако при дефиците металла в субстрате можно наблюдать и обратную закономерность (Гармаш, 1985).

Поглощение Zn корнями растений может быть как активным процессом, так и пассивным в зависимости от его концентрации в субстрате. Поскольку цинк является необходимым для питания растений микроэлементом, уровень его фитотоксичных концентраций в тканях растений достаточно высок – 100–500 мг/кг. Большинство высших растений (включая все сельскохозяйственные культуры) проявляет высокую толерантность к Zn в широком диапазоне его повышенных концентраций в почвах. Толерантность при этом обусловлена функционированием различных механизмов, определяющих барьерный (исключительный) или безбарьерный (аккумулятивный) типы поглощения элемента (Анисимов и др., 2019).

Молодые растения более 75% поглощенного цинка содержат в надземной части, а у старых доля снижается до 20–30%. Корни растений до определенного предела обеспечивают защиту надземным органам. По данным Н.Г. Зырина

(1985) в растениях петрушки корни накапливают в 10 раз больше, чем надземные органы. Поступление в корни может быть резко увеличено при высоких, около 1000 мг/кг концентрациях Zn в почве (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Цинк может поступать в растения из атмосферы некорневым путем, через листья (фолиарное поглощение происходит путем неметаболического проникновения через кутикулу) (Сладкова, 2012).

По степени накопления Zn относится к элементам средней степени поглощения. По скорости накопления элементов в растениях цинк среди тяжелых металлов занимает второе место после кадмия: Cd > Zn > Cu > Pb (Овчаренко, 1997).

В процессе эволюции у растений сформировались механизмы блокировки поступления излишних количеств микроэлементов, что обеспечивает нормальную жизнедеятельность растений. Барьерные механизмы у растений начинают проявляться при валовом содержании цинка больше 50 мг/кг. Содержание в растениях Zn под влиянием избыточных количеств микроэлемента в почве и барьерных механизмов снижается: у цинка – до <30 мг/кг (Спицына и др., 2013).

На протяжении вегетативного роста растения наблюдаются флуктуации Zn в растении. Наибольшее его количество поглощается зерновыми культурами в фазу кущения (около 30%), именно в эту фазу рекомендуется вносить цинковые удобрения (Власюк, 1969).

## **1.2 Кальций в окружающей среде**

### **1.2.1 Кальций в литосфере**

Кальций и его соединения имеют огромное значение для биосферы. Кальций – пятый по распространенности химический элемент земной коры, является щелочноземельным металлом. Известняк можно считать фундаментом ноосферы, так как на протяжении веков являлся основным строительным материалом (Лукьянчиков, 2012; Шеуджен и др. 2015).

В 1808 г. Х. Дэви открыл этот химический элемент с массой 40 а.е.м. и охарактеризовал его как щелочноземельный металл со специфическими свойствами и

высокой реактивностью (Балезина, 2012). Содержание кальция в земной коре составляет 4,1 % массы, в морской воде – около 0,04 %, в организме человека – порядка 1,4 % (Эмсли, 1993). В природе этот элемент образует шесть стабильных изотопов с относительной распространенностью (% отн.):  $^{40}\text{Ca}$ –96,97;  $^{42}\text{Ca}$ –0,64;  $^{43}\text{Ca}$ –0,135;  $^{44}\text{Ca}$ –2,06;  $^{46}\text{Ca}$ –0,0033;  $^{48}\text{Ca}$ –0,185 (Попова, Тимошин, 1997). Кларк кальция в литосфере составляет 2,96%. Среди осадочных пород Ca концентрируется в карбонатах (30,23–32,5%), в глинах и сланцах – 2,53%, в песчаниках – 3,91%, в золе растений – 3,0 %, речных водах – 15 мг/ (Алексеев, 2000).

Среднее содержание Ca в гранитах и базальтах, составляет 1,3% и 11,5% соответственно. Большое количество кальция, помимо силикатов, присутствует в сульфатах (гипс, барит и др.), фосфатах (фосфорит, апатит, вивианит и др.), и в карбонатах (известняк, мрамор, доломит и др.) (Бурдуковский, 2014).

Соединения Ca многочисленны, он входит в состав более чем 700 минералов, больше 100 минералов содержат заметную примесь кальция. Преобладающими являются карбонаты кальция – кальцит  $\text{CaCO}_3$  и его природных форм – известняка, мела, мрамора, доломита  $(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$  и др. Распространены также силикаты, фосфаты, фосфорные соли – фосфорит  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{CO}_3)$  и апатиты  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl})$ , а также сульфаты - например, гипс  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Григорьев, 2006; Бурдуковский, 2014).

Минералы на основе  $\text{CaCO}_3$  покрывают примерно 40 млн км<sup>2</sup> земной поверхности. В верхней части континентальной коры 94,97 % массы Ca сконцентрировано в его собственных минералах и только 3,38 % – рассеяно в чужих минералах (Григорьев, 2006; Чертко, Чертко, 2008).

### 1.2.2 Кальций в почве

В. Р. Вильямсом кальций был назван «сторожем» плодородия, К. К. Гедройц (1932) отмечал, что благодаря наличию этого элемента в почве создаются наиболее благоприятные условия для жизни большинства высших растений и аэробных микроорганизмов (Нуриев и др., 2006).

Кальций играет серьезную роль в почвообразовании и плодородии почв. Большое влияние этого макроэлемента связано с его высокой миграционной способностью, значительным потреблением растениями и участием в обменных реакциях (Митрофанова, 2011). Роль Са и его соединений в почве и растениях многогранна. Кальций влияет на структуру почвы, реакцию почвенного раствора, интенсивность биологических процессов и подвижность питательных веществ (Шеуджен и др., 2015).

Валовое содержание кальция в литосфере составляет 3,64%. Са входит в кристаллическую решетку минералов, обменный катион кальция представляет в большинстве почв основную массу обменных катионов, этот элемент входит в состав простых солей (хлориды, нитраты, карбонаты, сульфаты и фосфаты) (Возбуцкая, 1968). Валовое содержание кальция зависит от типа почвы и колеблется в широких пределах от 0,3–5%. Тундровые почвы содержат 2,14 %, торфяные – 1,20, подзолистые – 0,28–0,78, черноземы – 1,22–4,20 (Орлов и др., 2005).

В почвах черноземного типа общие количества обменного кальция достигают десятков тонн на гектар. Чем кислее почва, тем меньше в ней содержится обменного Са (Возбуцкая, 1968; Сокаев, Бестаев, 2014). Содержание соединений кальция в почвах зависит от следующих факторов: поступления элемента в почву, действия мелиорантов, интенсивности обменных реакций (Переверзев и др., 1997).

Кальций вместе с магнием играет важную роль в формировании почвенного покрова. Соединения Са входят в состав многих минералов и участвуют в образовании минералогического скелета почвы. Они играют большую роль в ионообменных процессах и формировании состава почвенных растворов. Если поглощающий комплекс насыщен Са и Mg, то почва хорошо оструктурена, обладает агрохимически благоприятными воднофизическими характеристиками и высоким плодородием (Зарецкая и др., 2006).

Кальций и магний – основные катионы почвенного раствора; их концентрация находится в подвижном равновесии с поглощенными Са и Mg и их карбонатами (Возбуцкая, 1968). Растворимый и обменный Са – основные формы элемен-

та, способные передвигаться к корням растений и поглощаться ими. Кроме того, кальций присутствует в составе различных почвенных минералах (Митрофанова, 2011).

Кальций является наиболее легко вымываемым питательным элементом из почв и интенсивно поглощается растениями. В условиях сельскохозяйственного производства корнеобитаемый слой почвы теряет значительное количество кальция с инфильтрационными атмосферными осадками. Размер потерь этого элемента, обусловленных вымыванием, зависит от количества атмосферных осадков, валового содержания и гранулометрического состава почвы, и варьирует в пределах 50–350 кг/га. Многолетние лизиметрические исследования, проведенные в средней Европе, показали, что потери кальция из почвы в среднем составляют около 250 кг в год. По данным немецких ученых выщелачивание этого макроэлемента из песчаных почв составило 168 кг в год, из суглинка 85 кг в год (Кундлер, Ансорге, 1975; Бурдуковский, 2014).

На величину потерь элемента оказывают влияние также и вносимые удобрения. Аммоний удобрений вытесняет кальций из поглощающего комплекса, который теряется с просачивающимися водами. Внесение 1 ц. сульфата аммония влечет за собой потерю кальция, эквивалентную примерно 1 ц. карбоната кальция, калийные удобрения в меньшей степени способствуют декальцинации почвы (Тильба и др., 2003; Минеев и др., 2004; Шеуджен и др., 2015).

Сельскохозяйственное производство с устойчиво высокими урожаями культур ведет к повышению расхода кальция из почв. Вынос Ca зависит и от генотипических особенностей сельскохозяйственных культур и может колебаться в пределах от 35 до 900 кг/га, в пересчете на CaCO<sub>3</sub> (Небольсин, Небольсина, 2010). Зерновые выносят 30–40, горох и вика – 40–60, свекла (сахарная и кормовая) – 60–120, клевер и люцерна – 120–250, капуста – 350–500 кг CaO с 1 га в год (Небольсин, Небольсина, 2005; Яковлева, 2009). Недостаток кальция в почве приводит к избыточной кислой среде. Биологическая активность почвы снижается, уменьшается содержания гумуса, физико-химические и физико-механические свойства почв ухудшаются (Нуриев и др., 2006).

### 1.2.3 Физиологическая роль кальция

Ионы кальция являются ключевым компонентом любого живого организма.  $\text{Ca}^{2+}$  участвует практически во всех процессах, лежащих в основе функционирования растения, его роста, развития и регуляции (Harper et al., 2004). Как структурный компонент  $\text{Ca}^{2+}$  выполняет важную роль в формировании клеточной стенки и клеточных мембран, как противоион участвует в процессах ионного транспорта. Кальций контролирует активность многих ферментов. Другой немаловажной функцией этого элемента является его участие в процессах внутриклеточной сигнализации.  $\text{Ca}^{2+}$  играет роль вторичного медиатора, переносчика информации, находясь, между рецепторной и реактивной частями различных сигнальных систем клетки (Волотовский, 2011).

Кальций участвует в регуляции избирательной проницаемости клеточной мембраны, при его недостатке мембраны утрачивают свою эффективность как барьеры, препятствующие свободной диффузии ионов, начинают «протекать» (Гэлстон и др., 1983). Кальций вместе с магнием является связующим звеном между ДНК и белками. Этот элемент постоянно содержится в хлоропластах, митохондриях и эндоплазматическом ретикуле (Кузнецов, Дмитриева, 2006).

Са необходим для нормального роста надземных органов и корней растений. Потребность в нем возникает уже в фазе прорастания. Роль кальция тесно связана с фотосинтезом, поскольку он улучшает синтез хлорофилла. Этот элемент активирует ферменты, усиливает обмен веществ, положительно влияет на процесс преобразования азотсодержащих соединений (Лихочвор, Демчишин, 2016).

Соединения кальция распространены повсеместно, растворимые соли Са содержатся в водах Мирового океана, а также во внутренних средах нашего организма. В плазме крови человека порядка 1 мМ ионизированного кальция (Berridge et al., 2003; Williams, 2006; Балезина, 2012; Лукьянчиков, 2012).

Роль кальция в организме человека огромна, он является самым распространенным элементом. Доля его – примерно 1–1,5 кг (Колесниченко, Кулинский, 2004; Krebs, Michalek, 2007; Балезина, 2012). Примерно 99% – в скелете в форме гидроксиапатита, 1% – в других тканях (Ребров, Громова, 2003). В организме этот



элемент присутствует в двух формах – ионизированной (свободной) и связанной с белками (главным образом, с альбуминами) (Стенникова, Санникова, 2007; Костылева, 2008).

Са обеспечивает функции движения, а именно сокращения мышц, передачу нервного импульса, изменение активности гормонов. Также кальций участвует в построении целостной скелетной системы человека. Костная система – буфер для поддержания стабильного уровня циркуляции Са в течение всего жизненного цикла (Громова, 2007; Костылева, 2008).

В зависимости от возраста недостаток этого макроэлемента приводит к задержкам роста, признакам рахита, а также влияет на уровень психомоторного развития и интенсивность морфофункционального созревания внутренних органов (Котова и др., 2002). Спектр хронических состояний, приводящих к дисбалансу кальция в организме велик. Ведущими являются патология эндокринных органов, почек и пищеварительной системы (Костылева, 2008; Ершова и др., 2011).

При избытке кальция возникает повреждение клеток – некроз и апоптоз (Колесниченко, Кулинский, 2004). Признаки дефицита Са следующие: снижается эластичность кожи, ухудшается состояние волос, ногтей, возникают дефекты зубной эмали, кариес, возникает состояние напряженности, раздражительности, возникает желание съесть кусочек мела или известки, возможно появление тремора, возникновение ночных мышечных судорог (Бублик и др., 2016).

#### **1.2.4 Кальций в растениях**

Кальций играет большую роль в создании благоприятных для растений, физических, физико-химических и биологических свойств почвы, ее структуры, реакции и связанной с ними интенсивности биологических процессов и подвижности питательных веществ (Возбуждая, 1968). Ионы Са входят в состав растений в количестве 0,2% (Добровольский, 2003). Катионы Са присутствуют во всех клеточных структурах и стабилизируют их функции, особенно важны ионы кальция для нормального развития и функционирования корневой системы (Журова, Светличная, 2018).

Физиологические функции кальция тесно связаны с фотосинтезом. Са входит в состав ядра клетки, связан в хромосомах с нуклеопротеидами. Некоторое количество макроэлемента находится в поглощенном состоянии в коллоидах плазмы, значительная его часть используется растениями для нейтрализации кислот в клетках и находится в форме солей пектиновой кислоты, карбоната, сульфата, оксалатов. Данный элемент участвует в передвижении углеводов, играет роль регулятора кислотно-щелочного равновесия в растениях (Небольсин, Небольсина, 2005; Васильева и др., 2011).

Кальций содержится во всех растительных органах, преимущественно в надземной части растений. Больше его в стареющих клетках, где этот элемент находится в виде щавелевокислого кальция, а иногда солей пектиновых кислот (Коломиец и др., 2014). У большинства сельскохозяйственных культур Са накапливается преимущественно в вегетативных органах, исключение составляют бобовые (Кук, 1970; Шильников, 2012; Шеуджен и др., 2015). В клубнях картофеля, например, содержится около 7% этого катиона, а в листьях и стеблях – 93%; в семенах кукурузы содержится 3,4% кальция, а в других частях растений – 96,6%. Большая часть Са в отличие от других питательных веществ не отчуждается с сельскохозяйственной продукцией, а возвращается на поля (Минеев, 2004).

Потребление кальция у растений различных семейств сильно различается. На формирование 1 т товарной продукции зерновым культурам необходимо 0,75–1,25; зернобобовым – 2,0–3,0; овощным – 0,35–0,70 кг (Шеуджен и др., 2015). Согласно результатам исследованиям Н.Э. Коломиец и др. (2014) содержание кальция для видов семейств Plantaginaceae и Urticaceae колеблется в пределах от 17–23%, Polygonaceae – около 15%, Apiaceae – 15–20%, Betulaceae – 9–17%, Lamiaceae – 4–15%, Laminariaceae – 13%, и видах класса Pteridopsida – 4–11%.

Выщелачивание Са из почвы в большей степени приводит к выносу элемента из почвы, чем в результате выноса его с урожаем сельскохозяйственных культур. По данным И.А. Шильникова (1984), соотношение между потерями Са с инфильтрационными водами и выносом с урожаем растений в среднем составляет 4:1. Потери кальция из различных почв составляет от 20 до 200–400 кг/га в год в

зависимости от гранулометрического состава почв, дозы мелиоранта, применения удобрений и особенностей культуры (Минеев, 2004; Яковлева, 2009).

Источником питания для растений служат соли кальция, а также гумат Са. Поступление элемента в растение осуществляется в виде катиона  $\text{Ca}^{2+}$  с транспирационными потоками через кончик корня, далее транспортируется акропетально. Процессы поступления элемента зависят таких внешних факторов, как влажность почвы, количество кислорода и кислотность почвенного раствора (Швартау и др., 2014; Михайлова и др., 2019). Для поддержания нормального роста и развития растения уровень поглощения Са должен находиться в пределах 1–10 мкМ. Кальций не способен к реутилизации и накапливается в старых частях растения. Перемещение по растению осуществляется ситовидными трубками, примерная скорость составляет 1 м/час (Медведев 2005; Швартау и др., 2014).

Доступность растениям Са, помимо наличия его в поглощенном состоянии, определяется степенью насыщенности коллоидов этим катионом. Доступность растениям катиона тем меньше, чем ниже степень насыщенности им почвы. Наличие в почве высокой концентрации других катионов ( $\text{H}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  и др.) препятствует поступлению кальция в растение, что объясняется антагонизмом катионов (Минеев, 2004). Ион Na в значительно большей степени подавляет доступность Са, чем H-ион (Возбуждая, 1968).

Кальциевое голодание встречается чрезвычайно редко на очень кислых и солонцеватых почвах (Зарецкая и др., 2006). Недостаток этого элемента в почве отрицательно сказывается в первую очередь на корневую систему растения (Минеев, 2004). Перестают образовываться корневые волоски, нарушается поступление основной массы питательных веществ и воды, корни ослизняются и легко загнивают (Михайлова и др., 2019).

Признаки кальциевого голодания обнаруживаются и на надземной части растения, а именно отмирает верхушечная почка, в результате чего прекращается рост стебля, рост молодых листьев задерживается (развивается хлороз). У томатов желтеют верхние листья, в то время как нижние остаются зелеными, у сахарной свеклы края листьев чернеют. Низкое содержание Са в растительной продукции,

используемой в качестве корма, приводит к ухудшению роста и продуктивности животных. У растений, испытывающих кальциевое голодание, снижается устойчивость к неблагоприятным условиям внешней среды (Зарецкая и др., 2006; Кузнецов, Дмитриева, 2006; Михайлова и др., 2019)

### **1.3 Магний в окружающей среде**

Магний широко распространен в природе, является слабощелочным металлом. Атомная масса элемента 24,3 а.е.м., число изотопов с учетом ядерных изомеров – 12. Кларк элемента в литосфере равен 2,0%, в земной коре – 2,3% (2,26), почве – 0,63, в золе растений – 7,0 %, речных водах – 4,1 мг/л, коэффициент биологического поглощения – 1–10 (Симакин, 1988; Шеуджен 2010).

В 1695 году соль магния добывали из минеральной воды Эпсомского источника в Англии. В 1808 году английский химик Хамфри Дьюи применил метод электролиза смеси растворов и получил амальгаму неизвестного металла, названного «магнием» (Жумаев и др., 2019).

Соединения Mg легче растворимы, чем стронция и бария. Геохимическая миграция элемента сложная и охватывает все геосферы. Простые соли магния ( $MgSO_4$ ,  $MgCl$ ,  $MgBr$ ,  $MgI$ ) легко растворимы, карбонаты и силикаты трудно растворимы. Этот элемент обнаруживается в глубинных оливиновых породах и поздних осадках морских и озерных бассейнов. Известен 191 минеральный вид магния, преобладают силикаты (55 %) (Чертко, Чертко, 2008).

#### **1.3.1 Магний в почве**

Магний – элемент, влияющий на гранулометрический и агрегатный состав, структурное состояние, удельный и объемный вес, пористость, воздушные, водные, тепловые, электрические и радиоактивные свойства почвы (Абрамова, 1975; Воеводина, Воеводин, 2015). Mg содержится в живой фазе почвы и неразложившихся растительных остатках. В процессе разложения органических соединений он переходит в почвенный раствор и поглощенное состояние (Магницкий, 1967; Шеуджен и др., 2015).

Магний входит в состав более 200 минералов. В почве присутствует в форме доломита, монтмориллонита, вермикулита, иллита, и др. Силикаты магния – преобладающая форма элемента в почве. Mg находится в обменной форме в почвенном поглощающем комплексе и в ионной форме в почвенном растворе. Корни растений могут поглощать растворимый и обменный магний из почвенного раствора (Lindsay, 2001; Воеводина, Воеводин, 2015).

По данным С.А. Барбера (1988) в почвах с промывным водным режимом в почвенном растворе содержится от 12 до 48 мг/л данного химического элемента, в почвах непромывного режима – от 48 до 195 мг/л. В структуре глинистых минералов магний может высвобождаться из необменных положений и прочно фиксироваться в этих же позициях. По обобщенным литературным данным (Аристархов, 2000; Jakovljević et al., 2003; Воеводина, Воеводин, 2015; Шеуджен и др., 2015), содержание валового (общего) магния в почвах варьирует от 0,2 до 2,4% в зависимости от минералогического и гранулометрического состава почв.

Колебания содержания элемента в пределах каждого типа почвы бывают значительными, это связано с минералогическим составом материнской породы. В почвах, образованных на суглинках и глинах, больше Mg, чем в тех почвах, которые появились на песках. Почвы, сформированные на породах с преобладающим минералом монтмориллонитом, богаты магнием, с преобладанием каолинита – бедны этим элементом (Шеуджен и др., 2015; Бурдуковский, 2014; Нечаева и др. 2019). Содержание валового Mg в различных типах почв России представлено в таблице 5. Для питания растений важен магний, находящийся в почвенном поглощающем комплексе (подвижный, доступный, обменный) и в почвенном растворе (водорастворимый и легкообменный) (Нечаева и др., 2019). Mg почвенного раствора находится в равновесии с обменно-поглощенным. Обычно около 15–25 % обменных оснований в почвенном поглощающем комплексе (ППК) представлено ионами магния. Избыток этого элемента для растений создается в том случае, если на обменную форму приходится более 40–60 % емкости катионного обмена; недостаток – при его доле в составе ППК менее 5–10% (Martin, 1969; Нечаева и др., 2019).

Таблица 5 – Среднее содержание магния в метровом слое почв Европейской части России, % на абс. сухую навеску (Самофалова, 2009)

Почвы	Mg
Тундровые	0,90
Торфяные	0,13
Подзолистые:	
<i>суглинистые</i>	0,72
	0,70
<i>супесчаные</i>	0,09
Подзолисто-глеевые	0,60
Серые лесные	1,02
Черноземы:	
<i>выщелоченные</i>	0,82
	0,97
<i>типичные</i>	1,00
<i>обыкновенные</i>	1,19
Каштановые	1,09
Красноземы	0,93
Сероземы	1,44
Почвы в среднем	0,92
Материнские породы (суглинистые и глинистые)	0,91

Обменного магния, как правило, меньше, чем обменного кальция, однако в почвах, сформированных на серпентинитах, он может быть преобладающим обменным катионом (Кожуро и др., 1984). Режим увлажнения оказывает сильное влияние на содержание водорастворимого магния в почве. В зонах достаточного увлажнения количество элемента в почвенном растворе незначительно – 12–18 мг/л. В условиях сухого климата на засоленных почвах и при подъеме грунтовых вод к поверхности концентрация магния в почвенном растворе достигает 48–192 мг/л, соли магния могут отлагаться на почвенных частицах в виде серых налетов (Прокошев, 1987; Тихомирова, 2011).

Магний занимает одно из первых мест в ряду потерь:  $Ca > Mg > Na > K > NH_4$ . Выщелачивание Mg обусловлено не только количеством осадков, процесс тесно связан с гранулометрическим и минералогическим составом, реакцией

среды и внесением физиологически кислых минеральных удобрений (Нечаева и др., 2019). Потери магния из почвы в результате вымывания составляют около 10–20 кг MgO с 1 га. Более высокими они бывают при повышенной влажности и на почвах легкого гранулометрического состава, а также при внесении некоторых сопутствующих минеральных удобрений. Например, при внесении хлористого калия потери Mg с дренажными водами усиливаются (Минеев, 2004).

Резкое проявление недостаточности магния наблюдается в том случае, когда в почве обменного магния содержится 2 мг/100 г почвы и меньше. Недостаток элемента проявляется, прежде всего, на дерново-подзолистых кислых почвах легкого гранулометрического состава. Чем легче и кислее почвы, тем меньше они содержат магния. Водная и ветровая эрозии увеличивают потери Mg и тем острее необходимость во внесении магниевых удобрений (Магницкий, 1967; Минеев, 2004; Шильников, 2011).

Повышенное содержание магния, по мнению ряда авторов, способствует образованию почвенной корки. При содержании обменного элемента больше 30 % от суммы основных катионов Mg может усиливать действие обменного натрия, что вызывает разрушение структуры почвы (особенно в почвах нарушенного сложения). С увеличением отношения Mg: Ca (>1) магний оказывает специфическое влияние на диспергацию глины (Воеводин, Воеводина, 2015; Нечаева и др., 2019).

Обеспеченность почвы обменным магнием наряду с pH, содержанием гумуса, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O отнесена к комплексу агрохимических ее свойств, с которыми связана урожайность сельскохозяйственных культур, качество получаемой сельскохозяйственной продукции и эффективное использование других агрохимических средств (Тихомирова, Сорокина, 2007).

### **1.3.2 Физиологическая роль магния**

Магний относится к биогенным макроэлементам, является необходимой составляющей всех клеток и тканей, входит в состав многих ферментов, участвует в процессе нервно-мышечной возбудимости (Бублик, 2016). Этот элемент влияет на многие физиологические функции в организме млекопитающих. Катионы Mg

участвуют в регуляции сердечного ритма, процессов остеогенеза, регулируют проницаемость клеточных мембран. Этот макроэлемент входит в состав различных ферментных систем (Черницкий и др., 2013).

Общее количество магния в организме взрослого человека составляет 25–35г, наибольшая часть элемента (60%) содержится в костях (Ткаченко, Дробышева, 2016). Данный макроэлемент содержится во всех органах, больше всего – в миокарде. Магний необходим для синтеза и поддержания структуры нуклеиновых кислот, белков и рибосом. Он влияет на проницаемость возбудимых мембран и их электрические свойства, часто выступает как функциональный антагонист кальция. Mg Препятствует развитию атеросклероза (Колесниченко, Кулинский, 2004).

В состоянии стресса организм человека интенсивно «сжигает» магний, что приводит к его дефициту и вызывает целый ряд негативных проявлений, самым наглядным из которых является синдром хронической усталости (СХУ), *Chronic Fatigue Syndrome*. Впервые этот синдром был описан американскими учеными в 1984 году (Holmes et al., 1988; Fukuda et al. 1994; Пигарова и др., 2010; Ткаченко, Дробышева, 2016). Симптомы СХУ – мышечные боли и спазмы, депрессия, раздражительность, нарушения сна (Manuel et al., 2000; Бурчинский, 2005; Ткаченко, Данильчук, 2010). Признаками дефицита магния в организме являются тахикардия, аритмия, развитие атеросклероза, патологическое течение беременности, тревожность, тошнота, рвота, образование камней в почках, и преждевременное старение (Бублик, 2016).

Недостаток магния в организме является одним из предрасполагающих факторов развития заболеваний сердечно-сосудистой системы и гипертонической болезни. Дефицит Mg приводит к снижению скорости кровотока большинства органов и повышению сопротивления периферических сосудов, может вызвать гипертензию и снижение микроциркуляции в капиллярах. Нормальное снабжение клеток магнием способствует ослаблению негативных катехоламиновых воздействий на клеточные структуры и повышает резистентность к стрессу (Святова и др., 2013).



По данным Л.В. Янковской (2015) установлен антагонизм между действием магния и кальция в отношении гладкой мускулатуры сосудов и миокарда. Известно, что Mg является естественным антагонистом Ca, способствуя фиксации калия в клетке, тем самым обеспечивая поляризацию клеточных мембран и контролируя нормальную деятельность кардиомиоцитов на всех уровнях субклеточных структур (Святова и др., 2013). Повышенные концентрации магния могут вызвать седативный, иногда наркотический эффект, а также угнетение дыхательного центра (Чертко, Чертко, 2008). Высокие концентрации элемента могут привести к нарушению проводимости сердечной мышцы и угнетению головного мозга (Колесниченко, Кулинский, 2004).

### 1.3.3 Магний в растениях

Магний – полифункциональный элементом питания растений. Он выполняет структурообразующую роль, входя в состав органелл, клеток, мембран и клеточных стенок. Mg также выполняет важную функциональную роль в составе более 300 ферментов (Тихомирова, 2011; Marschner, 2011; Святова и др., 2013; Нечаева и др., 2019).

Этот элемент способствует повышению урожайности и улучшению качества продукции (увеличению крахмалистости картофеля, сахаристости корней сахарной свеклы, белковости бобовых культур и т.д.), оказывает влияние на биологическую активность почвы. Недостаток магния в окружающей среде и кормах негативно сказывается на жизнедеятельности биоты: у растений развивается хлороз (Нечаева и др., 2019), животные заболевают тетанией (Аристархов, 2000; Афанасьев, 2005), у людей повышается риск заболевания раком желудка и артериальной гипертензией, начинается преждевременное старение (Бублик, 2016; Яхияев и др., 2019).

Магний является незаменимым макроэлемент жизнедеятельности растений. Магний входит в состав хлорофилла, фитина и пектиновых веществ. В хлорофилле сосредоточено 15–30% всего магния, усвояемого растениями. В отличие от кальция, магний более подвижен и может повторно использоваться в растениях,

передвигаясь из старых листьев в молодые, а после цветения – из листьев в семена, где он концентрируется в зародыше. Исключением являются корне- и клубнеплоды, большая часть бобовых культур, у которых магния больше в листьях (Минеев, 2004; Тихомирова, 2011).

Магний играет важную физиологическую роль в процессе фотосинтеза (является центральным в молекуле хлорофилла) и в работе различных ферментов. Он влияет также на окислительно-восстановительные процессы. Важную роль играет Mg и в процессах, связанных с фиксацией атмосферного азота бобовыми растениями (Минеев, 2004; Небольсин, Небольсина, 2005).

Этот элемент также входит в состав многих энзимов и является их активатором, контролирует потребление питательных элементов, улучшает усвоение железа (Воеводина, Воеводин, 2015). Образование в листьях пигментов ксантофилла и каротина связано с магнием (Коломиец и др., 2014).

Магний, химический родственник кальция составляет центральную часть хлорофилла, является специфическим кофактором нескольких ферментов, а также обеспечивает стабильность нуклеиновых кислот (Гэлстон и др., 1983). Недостаток этого элемента ограничивает урожайность сельскохозяйственных культур, снижает качество продукции, оказывает влияние на эффективность использования азотных, фосфорных и калийных удобрений (Станилевич и др., 2019).

Транспорт Mg к корням растений обычно осуществляется в почвенном растворе с помощью движения ионов к корню в конвективном потоке воды к поверхности корня (Прокошев, 1987; Нечаева и др., 2019). Среднее содержание Mg в растениях выражается следующими величинами (в % MgO к воздушно-сухому веществу): в зерне озимой пшеницы – 0,15, гороха – 0,13, гречихи – 0,15, клубнях картофеля – 0,06, ботве картофеля – 0,21 (Минеев, 2004).

Катионы магния входят в состав основного пигмента зеленых листьев – хлорофилла; поддерживают структуру рибосом, связывая РНК и белок. Недостаток макроэлемента сопровождается хлорозом листьев – они начинают бледнеть (или розоветь) между жилками, становятся пестрыми, а края листьев скручиваются (Журова, Светличная, 2018).

На поступление магния в растение влияют концентрации катионов калия, кальция, марганца, железа, аммония и др., рН почвенного раствора, емкость катионного обмена, низкие температуры, недостаточная влажность. Наиболее чувствительными к избытку калия при недостатке магния являются злаковые, особенно кукуруза (Авдонин, 1972; Воеводина, Воеводин, 2015).

Авторы указывают, что в условиях промывного водного режима из почвы ежегодно вымывается от 20 до 60 кг/га  $MgCO_3$  (Яковлева, 2009). При высоких урожаях сельскохозяйственными культурами выносятся 10–70 кг MgO с 1 га (Минеев, 2004). Значительное количество магния из почвы выносят свекла (60–70 кг/га) и картофель (40–60 кг/га), меньше – зерновые (10–15 кг/га) и кормовые злаковые травы (10–12 кг/га). Промежуточное место по выносу занимают бобовые травы (30–50 кг/га) (Прокошев, 1987).

Растения способны потреблять магний в довольно широком диапазоне, не испытывая недостатка даже при 20-кратном превышении содержания Ca над содержанием Mg, при условии достаточного содержания общего магния в почве. Поступлению элемента в растение при очень высоких концентрациях может мешать кальций. Средняя концентрация Ca наоборот способствует поглощению магния растениями. Наиболее сильными антагонистами Mg в почвенных условиях являются легкоподвижные одновалентные катионы  $H^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$  (Мазаева, 1967; Чертко, Чертко, 2008).

По данным В.Я. Тихомировой (2007) увеличение содержания цинка препятствует поступлению магния. Высокие концентрации Mg в почвенном растворе в свою очередь ограничивают поступление цинка в растение и сдерживают усвоение бора (Тихомирова, 2011).

Недостаток магния возможен в основном на легких почвах при низких значениях рН и высоком содержании калия и (или) аммония, когда в почве мало обменного Mg. При недостатке макроэлемента у более старых листьев наблюдается пожелтение, характерное для дефицита хлорофилла (хлороз) (Гэлстон, 1983).

При недостатке магния в почве происходит его мобилизация из листьев в генеративные органы за счет нарушения нормальной деятельности листового ап-

парата. Обычно нижние листья обедняются Mg в первую очередь, они покрываются белесой пятнистостью и при резком оттоке элемента преждевременно опадают. Поэтому нижние листья – индикаторы обеспеченности растений магнием (Тихомирова, 2011).

Избыток магния может повлиять на растения при преобладании содержания магния над содержанием кальция. При соотношении содержания элементов от 1 до 20 доступность магния в почве остается удовлетворительной при достаточном содержании общего магния (Шеуджен и др., 2013; Воеводина, Воеводин, 2015).

#### **1.4 Влияние известкования на элементный состав растений**

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 (Небольсин, Небольсина, 2005; Шильников и др., 2008). При внесении в почву мелиорантов, помимо нейтрализации почвенной кислотности и насыщения ППК основаниями, происходит усиление конкурентных взаимодействий между кальцием, магнием и их химическими аналогами, приводя к изменению элементного состава почвенного раствора и растений (Витковская и др., 2016).

Практика известкования имеет многовековую историю. У истоков научных исследований в этой области в бывшем СССР стояли Д.Н. Прянишников, К.К. Гедройц, О.К. Кедров-Зихман, С.С. Ярусов, Д.Л. Аскинази, Н.П. Ремезов, С.В. Щерба, Н.С. Авдонин, М.Ф. Корнилов и многие другие ученые (Тиво, Филиппов, 2018).

Кислые почвы на территории Российской Федерации занимают около 50 млн. га сельскохозяйственных угодий. Избыточная кислотность часто является фактором, лимитирующим нормальный рост и развитие растений. Средством коренного улучшения кислых почв является известкование, на сельскохозяйственные земли этот прием оказывает многостороннее положительное влияние: улучшает питательный режим, снижает негативное действие токсичных и

радиоактивных элементов, активизирует микробиологическую деятельность, зачастую улучшает физические свойства почв и продуктивность сельскохозяйственных культур (Клебанович, Василюк, 2003; Небольсин, Небольсина, 2005; Литвинович, Небольсина, 2012; Биккинина и др., 2017).

Кислотность почв и степень насыщенности почвенного поглощающего комплекса основаниями являются определяющими показателями почвенного плодородия. Кислая реакция почвенной среды и дефицит кальция – одна из основных причин низких урожаев сельскохозяйственных культур и невысокого качества получаемой продукции. Этот показатель может послужить причиной массовой гибели озимых зерновых и многолетних трав в зимний период времени. Повышенная почвенная кислотность является основной причиной низкого содержания белка в зерне и кормах, а также недостаточной эффективности минеральных удобрений (Шильников, Аканова, 2011; Бурдуковский, 2014).

Отзывчивость растений на известкование, в основном, определяется их отношением к почвенной кислотности, устранение избыточной почвенной кислотности оказывает положительное влияние на рост и развитие растений. Известкование позволяет установить благоприятные для развития растений соотношения кальция и магния в поглощающем комплексе и почвенном растворе (Шильников и др., 2008). При кислой реакции почвы поступление кальция в растения затруднено из-за антагонизма между катионами Са и катионами водорода, марганца, алюминия, железа (Небольсин, Небольсина, 2005; Яковлева, 2009).

Одним из значимых эффектов известкования кислых почв является изменение микроэлементного состава сельскохозяйственных культур и соотношений содержания микроэлементов в растениях (Витковская, Яковлев, 2017). Согласно результатам многочисленных исследований, растения, выращенные на известкованном фоне, имеют более низкий уровень содержания тяжелых металлов, чем на не известкованном (Дабахов и др., 2005).

Доля кальция, усвоенного растениями из извести составляет от 14 до 82% (Барбер 1988). Поступая в почву, Са способствует коагуляции почвенных коллоидов, улучшает структуру почвы, водопроницаемость и водоудерживающую спо-

способность (Дабахов и др., 2005). Известно (Шильников и др., 2008), что эффект от известкования кислых дерново-подзолистых почв возрастает при применении магнийсодержащих мелиорантов вследствие создания благоприятных для роста и развития растений соотношений между кальция и магния в почве.

Применение мелиорантов, содержащих только  $\text{CaCO}_3$ , приводит к нарушению оптимального для растений соотношения  $\text{Ca} : \text{Mg}$  в почвенном растворе и поглощающем комплексе. При отношении  $\text{Ca} : \text{Mg}$  более 8-ми для полевых культур, и более 10-ти для многолетних насаждений, растения испытывают недостаток доступного магния (Шильников, Аканова, 2009).

На почвах легкого гранулометрического состава применение  $\text{Mg}$  содержащих мелиорантов (таких как доломитовая, доломитизированная и магнезиальная известняковая мука) является самым эффективным и наименее энергоемким приемом обогащения почвы подвижными соединениями магния (Шильников и др., 2008).

Благоприятное соотношение кальция и магния в почвенно-поглощающем комплексе почвы под влиянием доломитовой муки способствует активизации деятельности азотофиксирующих и фосфатмобилизующих почвенных микроорганизмов, обеспечивающих растения азотным и фосфорным питанием (Биккинина и др., 2017).

## Глава 2. Объекты и методы исследования

Влияние известковых, органических и химических мелиорантов 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,  $\approx 300$  кг почвы на сосуд) в мае 2012 года (Витковская и др., 2014). Перед закладкой опыта из каждой делянки (сосуда) была извлечена почва на глубину пахотного слоя (25 см). По периметру делянок размещали полиэтиленовые сосуды, которые наполняли кислой дерново-подзолистой почвой:  $\text{pH}_{\text{KCl}} 4,64 \pm 0,04$ , Нг  $4,11 \pm 0,08$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  -  $2,68 \pm 0,14$  и  $0,36 \pm 0,06 \frac{1}{2}$  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%:  $\text{CaCO}_3$  - 50,4%;  $\text{MgCO}_3$  – 48,9%. Схема опыта 1) Контроль (Фон: NPK); 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 (Витковская и др., 2016). 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, рисунок 1. В период наблюдения в опыте выращивали следующие сельскохозяйственные культуры: овощные бобы сорта «Белорусские» (2014), ячмень сорта «Ленинградский» (2015), викоовсяную смесь: вика – сорт «Льговская – 22», овес – сорт «Аргомак» (2016), овощные бобы сорта «Русский черный» (2017). Суммарная за 7 лет доза внесенных минеральных удобрений составила  $\text{N}470\text{P}390\text{K}390$  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.



а

б

Рисунок 1 – Микрополевой опыт (а – ячмень; б – викоовсяная смесь)

В 2014 году опытной культурой были овощные бобы сорта «Белорусские». Внесение минеральных удобрений (нитрофоска 15:15:15 и аммиачная селитра) в дозе N60P50K50 и посев были проведены 10 мая. Отбор индивидуальных растительных проб позволяет исключить влияние такого фактора, как неоднородность количества растений на единице площади на оценку урожайности опытной культуры (Витковская, 2011). В процессе вегетации овощных бобов определяли динамику высоты растений – 7 замеров за вегетацию (через 19, 25, 32, 40, 47, 53 и 58 суток после посева). Учет урожая проводили в фазу цветения, отбирали 10 растений с делянки, определяли сырую и воздушно-сухую массу.

В 2015 году опытной культурой был ячмень сорта «Ленинградский». Посев и внесение минеральных удобрений проводили 5 мая (500 семян/делянку ( $m^2$ )). Минеральные удобрения (нитроаммофоска 15:15:15 и аммиачная селитра) были внесены в дозе N120P100K100. Почвенные пробы отбирали до внесения удобрений –



5 мая. В процессе вегетации растений ячменя определяли динамику высоты растений – 10 замеров за вегетацию (через 15, 22, 28, 35, 42, 49, 56, 70, 77 и 84 суток после посева), объем выборки – 30 растений. Уборку урожая проводили в фазу восковой спелости, через 87 суток после посева. Проводили сплошной учет урожая с каждой делянки. С каждого варианта были отобраны также корни растений (Витковская и др., 2020).

В 2016 году опытной культурой была 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 (сплошной учет с делянки).

В 2017 году выращивали овощные бобы, сорт «Русский черный». Посев (60 семян на м<sup>2</sup>) 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 кормовых бобов проводили 26 июля в фазу цветения. Определяли сырую и воздушно-сухую массу растений (сплошной учет с делянки).

## 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 (рис. 2). 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).



Рисунок 2 – Стационарный полевой опыт (рожь, 2015 г)

Почва опыта характеризовалась  $pH_{KCl}$  5,2–6,3 содержанием гумуса – 2,1–3,7%; подвижных соединений  $P_2O_5$  – 195–576 мг/кг и  $K_2O$  – 97–298 мг/кг. Органические удобрения (навоз) характеризовались следующими показателями (среднее за 2003–2009гг): органическое вещество – 83%;  $pH_{KCl}$  – 6,5; сумма  $N+P_2O_5+K_2O$  – 10,3 кг/т (Иванов и др., 2019). 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-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  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в почве устанавливали комплексонометрическим методом согласно (ГОСТ 26487–85),  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  – 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  $\text{HNO}_3$ . Содержание кальция и магния в почве устанавливали комплексонометрическим методом согласно (ГОСТ 26487–85),  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  – потенциометрическим методом, гидролитическую кислотность – по Каппену.

Пробоподготовку растительных проб проводили согласно (ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011) (мокрое озоление  $\text{HNO}_3$  + конц. перекись водорода, навеска 1 г.) (Витковская, Шаврина, 2017). Содержание Ca и Mg в растениях устанавливали согласно (Руководство по методам..., 1998). Аналитические исследования проводили в испытательных лабораториях АФИ и РГГМУ. Математическую обработку данных проводили в программе ORIGIN 7,5.

### **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**

Площади почв с избыточной кислотностью в Российской Федерации наибольшие в мире, на сельскохозяйственных угодьях с повышенной кислотностью в России ежегодно не добывается около 20 млн. тонн продукции в пересчете на зерно. Резко снижается эффективность минеральных удобрений, ухудшается экологическая обстановка окружающей среды, падает качество с/х продукции. Известкование является основным средством оптимизации реакции среды в почве. Устранение избыточной кислотности повышает плодородие почв, эффективность применения минеральных удобрений и улучшает экологическую обстановку. Известкование оказывает существенное влияние на урожайность и качество сельскохозяйственных культур. Эффективность известкования во многом определяется биологическими особенностями культур (Шильников и др., 2010; Якушев и др., 2013).

В то же время известкование кислых почв уменьшает доступность для растений некоторых элементов, в том числе цинка (Небольсин, Небольсина, 2010). В данной работе на микрополевом эксперименте отзывчивость опытных культур на внесение доломитовой муки зависела от видовых особенностей растений и дозы мелиоранта.

##### **3.1.1 Влияния возрастающих доз доломитовой муки на урожайность овощных бобов**

В 2014 и в 2017 гг. опытной культурой являлись овощные бобы сортов «Белорусские» и «Русский черный», соответственно. Бобы (*Vicia faba* L.) В 2014 г. прослеживалась тенденция увеличения всхожести растений овощных бобов с увеличением дозы мелиоранта: коэффициент корреляции по линейной модели состав-

вил 0,519 при критическом значении  $r$  на 5% уровне значимости 0,632 (табл. 6, рис. 3), в 2017г. указанный показатель не зависел от дозы ДМ. Учет урожая растений бобов проводили в фазу цветения, таблица 7.

Таблица 6 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на всхожесть овощных бобов (Отчет НИР, 2014, 2017)

Вариант	Всхожесть, %	
	2014г	2017г
1. Контроль	69	70
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	71	58
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	66	68
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	71	75
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	89	62
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	79	70
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	84	70
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	79	85
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	80	67
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	79	67

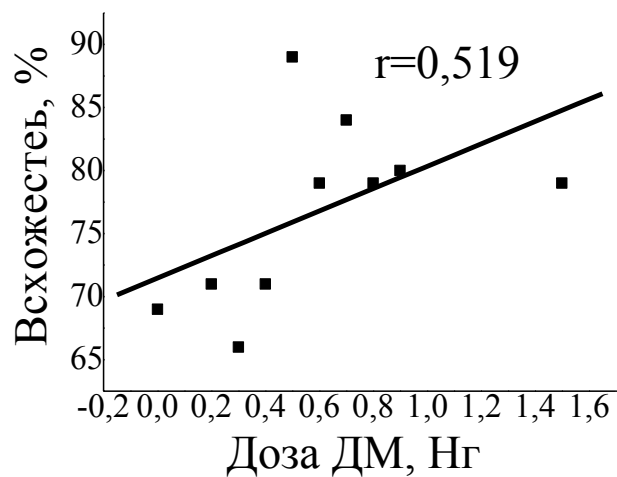


Рисунок 3 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на всхожесть овощных бобов (2014г.)

Таблица 7 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на биомассу растений овощных бобов (Отчет НИР, 2014, 2017)

Вариант	2014 г.		2017 г.	
	масса сырая, кг	масса в-сухая, кг	масса сырая, кг	масса в-сухая, кг
1. Контроль	1,04	0,159	0,52	0,060
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	1,06	0,166	0,66	0,076
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	1,08	0,169	0,64	0,076
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	2,00	0,336	0,62	0,070
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	1,04	0,159	0,60	0,070
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	1,10	0,166	0,76	0,086
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	1,06	0,174	0,65	0,076
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	1,08	0,163	0,68	0,077
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	1,08	0,163	0,65	0,078
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	1,07	0,155	0,75	0,090

В 2014г. биомасса растений не зависела от дозы ДМ, в 2017г. зависимость сырой и воздушно-сухой биомассы растений от дозы мелиоранта характеризовалась коэффициентами корреляции 0,697 и 0,779, соответственно (при критическом значении  $r$  на 5% уровне значимости 0,632), рисунок 4.

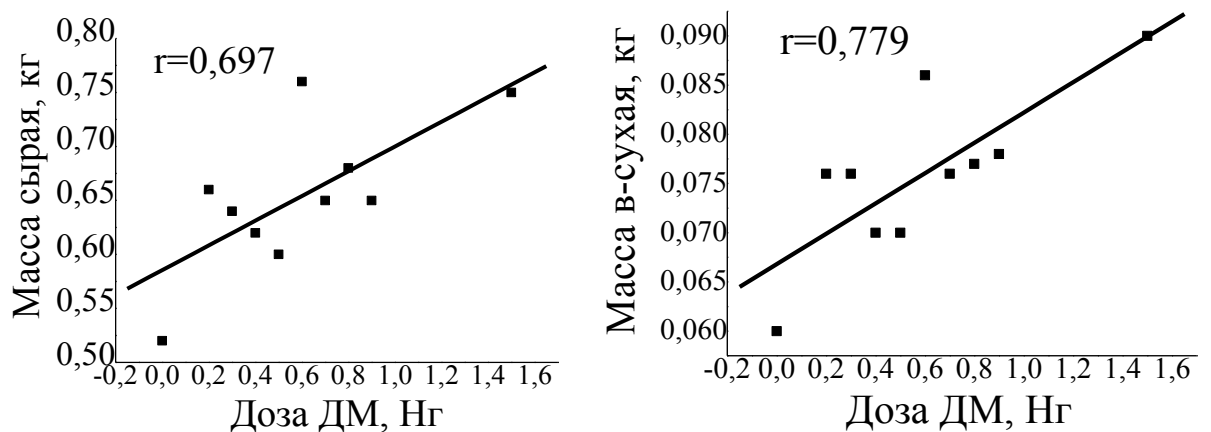


Рисунок 4 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность растений овощных бобов (2017г.)

В 2017 году, впервые за 5-ть лет проведения опыта, биомасса растений достоверно возрастала с увеличением дозы доломитовой муки. Вероятно, выраженность эффекта в значительной мере связана с неблагоприятными погодными условиями большей части вегетационного периода 2017 года (Шаврина, Витковская, 2018).

Установлено (2014г.), что динамика нарастания высоты растений хорошо аппроксимировалась сигмоидной (логистической) функцией:

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

где  $H_1$  – начальная высота, см, (равна нулю);  $H_2$  – конечная высота, см (среднее значение по 20-ти растениям),  $t_0$  – точка перегиба, в момент которой  $H = 1/2 (H_1 + H_2)$ ;  $dt$  – крутизна кривой (угол наклона) – постоянная величина для данной кривой (данных семян).

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 ( $V_{max}$ ). Параметры модели приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Параметры модели нарастания высоты растений овощных бобов

Вариант	$r^2$	$H_1$	$H_2$	$t_0$	$dt$	$V_{max}$
1. Контроль	0,99	0	59±6	37±3	10±2	1,48
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	0,99	0	57±4	35±2	9±1	1,58
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	0,97	0	67±16	42±7	12±3	1,40
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	0,99	0	61±4	34±2	9±1	1,69
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	0,98	0	56±5	34±2	9±2	1,56
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,99	0	57±3	33±2	9±1	1,58
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,99	0	65±6	38±3	10±2	1,63
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	0,99	0	53±4	33±2	9±2	1,47
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,99	0	63±5	37±2	10±1	1,58
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	0,99	0	63±4	37±2	10±1	1,58

Для примера на рисунке 5 приведена кривая, характеризующая динамику высоты растений в варианте 2. 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.

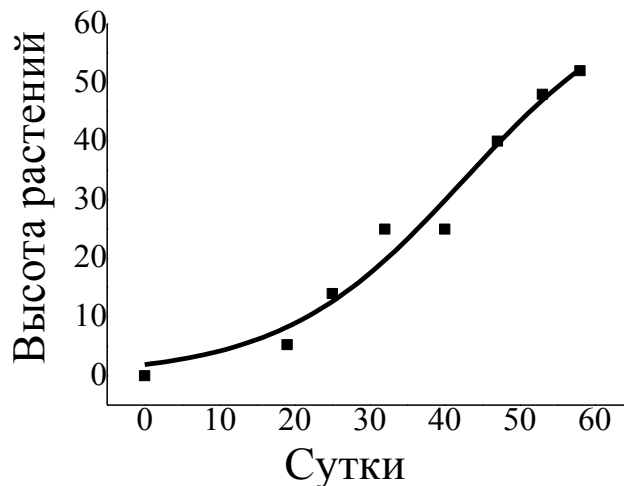


Рисунок 5 – Динамика высоты растений бобов, 2014г. (вариант 2)

### 3.1.2 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность растений ячменя

В 2015 году опытной культурой являлся ячмень сорта Ленинградский. Среди зерновых злаков яровой ячмень занимает в России одно из первых мест по посевным площадям, он является важнейшей фуражной и зерновой культурой, способной формировать высокие урожаи зеленой массы и семян в разных климатических зонах (Казнина и др., 2010). Сорт зернофуражного ячменя Ленинградский был создан в ГНУ Ленинградский НИИСХ «Белогорка».

Всхожесть растений ячменя в вариантах опыта, установленная через 10 суток после посева, изменялась от  $86 \pm 5$  до  $94 \pm 6\%$  и не зависела от дозы мелиоранта. Коэффициенты вариации ( $v$ ) данного показателя не превышали 2–10% (для расчета величины (%)) использовали показатели всхожести в каждом рядке (10 рядков в варианте) (Витковская и др., 2020).



Динамику высоты растений изучали в период от 0 до 81 сут. с момента высева семян, 10 замеров за вегетацию (через 15, 22, 28, 35, 42, 49, 56, 70, 77 и 84 суток после посева), объем выборки – 30 растений.

Для описания указанного процесса была использована логистическая модель (Витковская, 2015):

$$H(t) = \frac{H_1 - H_2}{1 + e^{(t-t_0)/dt}} + H_2, \quad (2)$$

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 ( $V_{max}$ ), таблица 9, рисунок 6.

Таблица 9 – Параметры логистической модели, характеризующие динамику высоты растений ячменя (Витковская и др., 2020)

Вариант	$r^2$	$H_1$ , см	$H_2$ , см	$t_0$ , сут	$dt$	$V_{max}$ , см/сут
1. Контроль	0,98	0	94±5	46±2	9,2±1,5	2,6
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	0,98	0	96±5	46±2	8,5±1,4	2,8
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	0,98	0	96±4	45±2	8,6±1,4	2,8
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	0,98	0	97±4	44±2	9,2±1,3	2,6
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	0,98	0	99±4	45±2	8,7±1,3	2,8
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,99	0	98±4	45±1	8,8±1,2	2,8
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,99	0	98±4	46±2	8,8±1,2	2,8
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	0,98	0	99±5	45±2	8,8±1,4	2,8
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,98	0	100±5	45±2	8,9±1,4	2,8
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	0,99	0	94±4	45±1	8,8±1,2	2,7

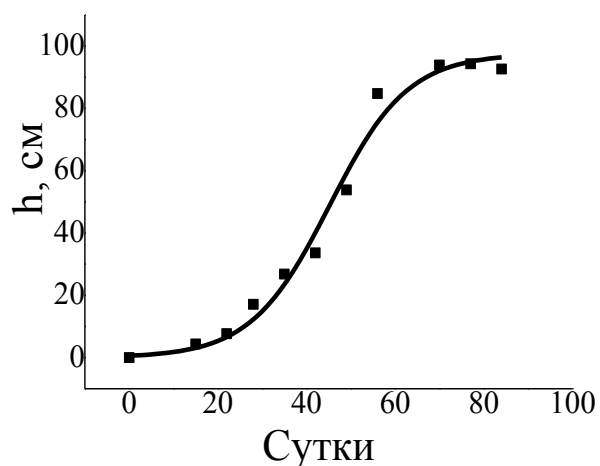


Рисунок 6 – Динамика изменения высоты растений ячменя в течение вегетации (вариант 6)

Влияние возрастающих доз ДМ на урожайность растений ячменя районированного сорта «Ленинградский» представлено в таблице 10.

Таблица 10 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность растений ячменя (Шаврина, Витковская, 2016)

Вариант	кг/м <sup>2</sup>			зерно: солома
	зерно	солома	полова	
1. Контроль	0,349	0,397	0,071	0,88
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	0,437	0,455	0,083	0,96
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	0,429	0,469	0,082	0,91
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	0,419	0,426	0,079	0,98
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	0,470	0,463	0,085	1,01
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,487	0,484	0,086	1,00
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,452	0,444	0,081	1,01
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	0,474	0,475	0,093	1,00
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,476	0,462	0,086	1,03
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	0,386	0,351	0,067	1,10

Максимальная урожайность зерна, отмеченная в интервале доз доломитовой муки 0,5–0,9 Нг, варьировалась в пределах 0,45–0,49 кг/м<sup>2</sup>, что на 29–39% больше, чем в контрольном варианте опыта (Витковская и др., 2020). В интервале доз 0–0,9 Нг, зависимость урожайности зерна ячменя от дозы мелиоранта характеризовалась коэффициентом корреляции  $r=0,830$ , при критическом значении  $r$  на 5% уровне значимости 0,666 (рис.7).

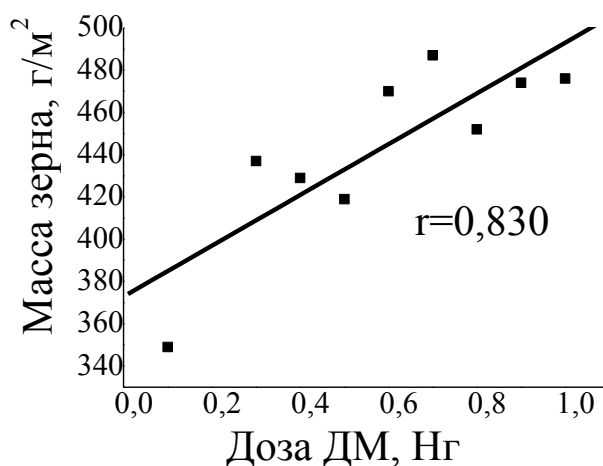


Рисунок 7 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность зерна ячменя (варианты 1-9)

При внесении доломитовой муки в дозе 1,5 Нг, прибавка урожая зерна не превысила 11%. В ходе эксперимента было выявлено, что влияние на урожайность зерна ячменя доломитовой муки в дозах 0,5–0,6 Нг практически идентично влиянию доз 0,8–0,9 Нг.

Зависимость урожайности соломы ячменя в интервале доз 0–0,9 Нг, характеризовалась коэффициентом корреляции  $r=0,605$ . Установлена 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 8 (Витковская и др., 2020).

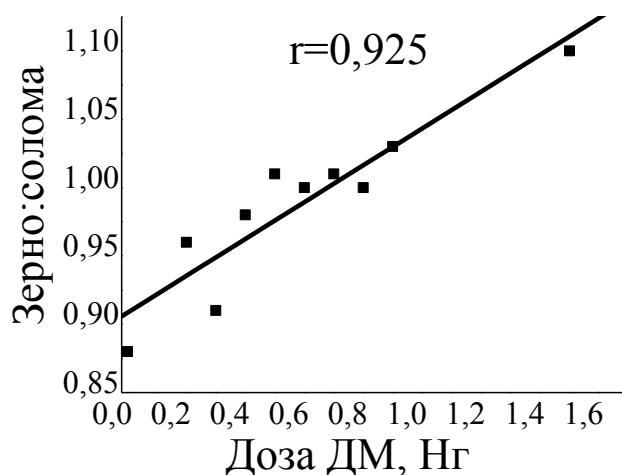


Рисунок 8 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на отношение зерно: солома в урожае ячменя (Витковская и др., 2020)

### 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». Вика яровая по своему значению и распространению занимает первое место среди однолетних трав. Вику высевают в смеси с овсом или другими злаками, при этом она меньше полегает, дает большие урожаи, ее лучше поедают животные (Витковская, 2016).

В период проведения эксперимента существенного влияния возрастающих доз мелиоранта на всхожесть растений викоовсяной смеси не выявлено. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность викоовсяной смеси представлено в таблице 11.

В интервале доз ДМ 0–0,8 Нг сырая биомасса линейно возрастала, коэффициент корреляции ( $r$ ) составил 0,828, при критическом значении  $r$  на 5% уровне значимости 0,707, рисунок 9. Максимальную прибавку (11–15% по отношению к контролю) сырой биомассы наблюдали в интервале доз ДМ 0,6–0,8 Нг. При внесении мелиоранта в дозе ДМ 1,5 Нг появилась тенденция снижения сырой биомассы растений. Воздушно-сухая биомасса не зависела от дозы доломитовой муки и варьировалась в диапазоне  $0,59 \pm 0,02$  ( $v=3,4\%$ ).

Таблица 11 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на урожайность викоовсяной смеси, кг/м<sup>2</sup> (Отчет НИР, 2016)

Вариант	Масса сырая, кг	Масса сухая, кг
1. Контроль	2,66	0,57
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	2,79	0,59
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	2,7	0,57
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	2,78	0,58
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	2,72	0,55
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	3,04	0,61
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	2,94	0,58
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	3,05	0,63
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	2,79	0,61
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	2,62	0,57

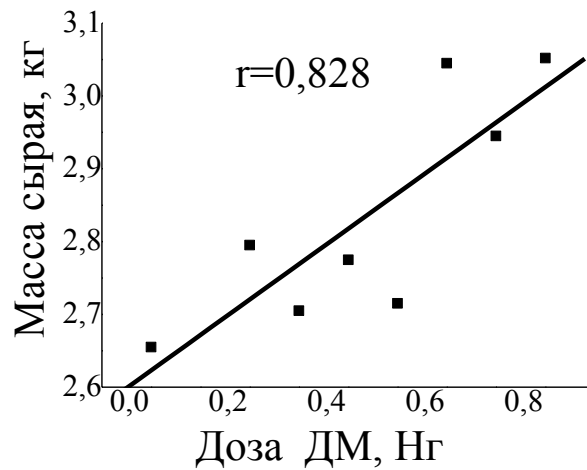


Рисунок 9 – Зависимость урожайности сырой биомассы викоовсяной смеси от дозы мелиоранта (в интервале доз 0-0,8 Нг)

### **3.2 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой почвы**

Известно (Шильников и др., 2008; Небольсин, Небольсина, 2010; Шамрикова, 2013; Витковская и др., 2014), что динамика кислотно-основных свойств известкованной почвы зависит от дозы, химического состава, размера фракций и нейтрализующей способности мелиоранта, скорости выноса оснований растениями и водами, внесения физиологически кислых минеральных удобрений, кислотных и атмосферных осадений, изменения форм нахождения Ca и Mg в почве.

#### **3.2.1 Влияние возрастающих доз доломитовой муки на динамику реакции почвы**

Реакция почвы является одним из важнейших факторов, определяющих условия развития культур и формирования целевой продукции, а также эффективности использования растениями вносимых удобрений. Внесение известковых материалов влияет практически на все характеристики почвы, существенно улучшая их (Комиссарова, Варламова, 2018).

Наблюдается снижение как обменной, так и гидролитической кислотности, повышается сумма поглощенных оснований, увеличивается обеспеченность почв, а, соответственно, растений азотом, фосфором, калием и рядом микроэлементов, повышается биологическая активность почв. Все это сопровождается ростом урожайности сельскохозяйственных культур, повышением их качества (Окорков, Окоркова, 2013; Комиссарова, Варламова, 2018).

Основным приемом улучшения плодородия кислых почв является известкование, необходимость проведения которого подчеркивали многие классики и современные ученые, занимающиеся агрономической химией (Митрофанова, 2012).

Влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой почвы изучали в период с 2012-2018гг. (период 0–2191 суток после внесения мелиоранта). В течение указанного периода было проведено двенадцать отборов смешанных почвенных проб, таблица 12 (Витковская,

Шаврина, 2021). Обменная кислотность почвы опыта до внесения мелиоранта характеризовалась  $pH_{KCl}$   $4,64 \pm 0,04$  (среднее по 10 вариантам значение).

В контрольном варианте опыта выявлено подкисление почвы, обусловленное применением минеральных удобрений (суммарная за 7 лет (2012-2018гг. доза внесенных минеральных удобрений составила  $N470P390K390$  кг д.в./га) и выносом оснований растениями и водами. Через 2 года (841-е сутки) почва из категории «среднекислая» перешла в категорию «сильнокислая».

В период от 0 до 2191-х суток динамика  $pH$  почвы в контрольном варианте опыта хорошо аппроксимировалась линейной моделью (рис. 10):

$$pH(t) = pH_0 + bt, \quad (3)$$

где  $pH_0$  – значение водородного показателя в почве на момент закладки опыта,  $b$  – скорость изменения реакции почвы, ед.  $pH \cdot сут.^{-1}$ .

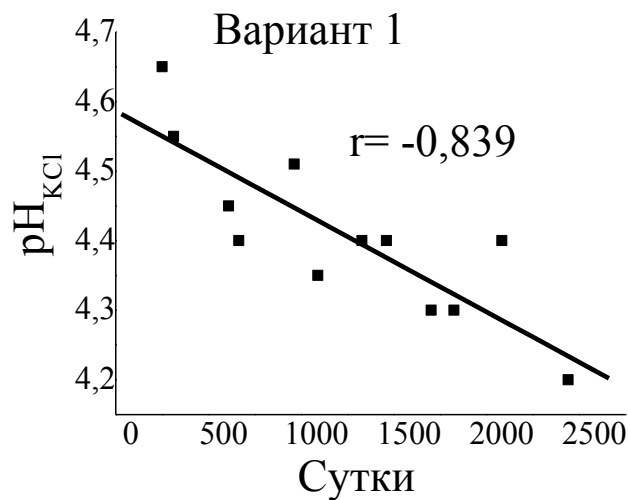


Рисунок 10 – Динамика  $pH_{KCl}$  почвы в контрольном варианте опыта в период от 0 до 2191 суток после закладки опыта

Таблица 12 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на динамику рН<sub>KCl</sub> почвы (Витковская, Шаврина, 2021)

Вариант	Сутки											
	0	63	359	414	713	841	1079	1211	1452	1575	1834	2191
1. Контроль	4,7±0,1	4,6±0,1	4,5±0,2	4,4±0,2	4,5±0,2	4,4±0,1	4,4±0,1	4,7±0,1	4,3±0,1	4,3±0,1	4,4±0,01	4,2±0,1
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	4,6±0,1	4,9±0,1	4,8±0,2	4,7±0,2	4,7±0,1	4,6±0,1	4,6±0,1	4,6±0,1	4,6±0,1	4,5±0,2	4,4±0,01	4,4±0,2
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	4,6±0,1	4,9±0,2	4,9±0,3	5,0±0,3	5,1±0,1	5,0±0,2	4,9±0,2	4,6±0,1	4,8±0,1	4,8±0,1	4,7±0,01	4,7±0,1
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	4,6±0,2	5,0±0,4	5,0±0,2	5,1±0,3	5,1±0,3	4,9±0,2	4,9±0,2	4,6±0,04	4,9±0,3	4,8±0,1	4,7±0,01	4,7±0,3
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	4,6±0,3	5,1±0,3	5,3±0,2	5,3±0,3	5,3±0,2	5,2±0,2	5,2±0,2	4,6±0,2	5,2±0,2	5,1±0,2	5,1±0,02	5,0±0,2
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	4,7±0,2	5,2±0,2	5,4±0,1	5,3±0,3	5,2±0,1	5,3±0,1	5,3±0,1	4,7±0,2	5,2±0,2	5,1±0,1	5,1±0,02	5,0±0,1
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	4,6±0,2	5,1±0,3	5,3±0,2	5,6±0,2	5,6±0,1	5,4±0,1	5,5±0,2	4,6±0,1	5,3±0,1	5,3±0,2	5,3±0,01	5,2±0,1
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	4,7±0,3	5,2±0,2	5,5±0,2	5,5±0,1	5,3±0,3	5,4±0,1	5,4±0,1	4,7±0,2	5,3±0,1	5,4±0,1	5,4±0,01	5,2±0,2
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	4,6±0,2	5,0±0,2	5,1±0,3	5,8±0,3	5,8±0,1	5,5±0,2	5,6±0,1	4,6±0,1	5,6±0,1	5,5±0,2	5,4±0,01	5,2±0,3
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	4,6±0,2	5,3±0,3	5,3±0,1	6,0±0,3	5,9±0,2	6,0±0,1	6,2±0,1	4,6±0,1	6,1±0,2	6,1±0,3	6,1±0,02	5,8±0,1



В период наблюдения рН почвы 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).

Характер зависимости  $pH_{KCl}$  почвы от времени взаимодействия мелиоранта с почвой существенно изменялся в интервале доз ДМ 0,2–1,5 Нг. Нейтрализующее действие доломитовой муки в дозе 0,2 Нг продолжалось не более 800-от суток. Согласно (Методические указания, 2003), через 4 года почва опыта в варианте 2 перешла в категорию «сильнокислая», таблица 12 (Витковская, Шаврина, 2021).

Установлено, что при внесении ДМ в дозах 0,3 и 0,4 Нг нейтрализующее действие мелиоранта продолжалось не менее 900 сут.:  $pH_{KCl}$  почвы в период 0-713 сут. линейно возрастал от 4,62 до 5,09 ( $r = 0,853$ ) и от 4,64 до 5,12 ( $r = 0,767$ ) соответственно, затем наметилась устойчивая тенденция к подкислению: через 6 лет взаимодействия ДМ с почвой значение рН не превышало 4,7 (табл. 12). На протяжении всего срока наблюдения почва опыта в вариантах 3 и 4 характеризовалась как среднекислая. При внесении доломитовой муки в дозах 0,5 и 0,6 почва перешла в категорию «среднекислая» к 2191-м суткам после внесения мелиоранта (значение рН достигло 5,0), рисунок 11 (Витковская, Шаврина, 2021).

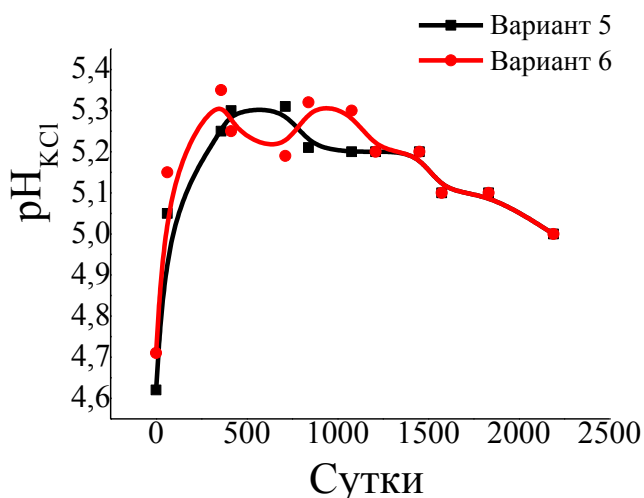


Рисунок 11 – Динамика  $pH_{KCl}$  почвы в вариантах 5 и 6 в период от 0 до 2191 суток взаимодействия доломитовой муки с почвой (Витковская, Шаврина, 2021)

При внесении ДМ в дозах 0,7–0,8 Нг через 6 лет после внесения мелиоранта (2191 суток) продолжалось его нейтрализующее действие, значение  $pH_{KCl}$  составляло 5,2 (Витковская, Шаврина, 2021). При увеличении дозы мелиоранта до 0,9 Нг почва перешла в категорию близкой к нейтральной ( $pH_{KCl}$  5,6–6,0), максимальная величина  $pH_{KCl}$  составила 5,8 через 414 суток взаимодействия ДМ с почвой (Витковская и др., 2016). Далее наблюдали тенденцию снижения реакции почвы, к 2191 суткам  $pH_{KCl}$  не превышал 5,2 (табл. 12). Установлено, что при внесении доломитовой муки в дозе 0,9 Нг значение  $pH_{KCl}$  находилось на уровне 5,5 более 4-х лет (Витковская, Шаврина, 2021).

При применении ДМ в дозе 1,5 Нг, значение  $pH_{KCl}$  достигло 6-ти через 414 суток взаимодействия мелиоранта с почвой (Витковская и др., 2016) и оставалось на уровне 6,1 до пяти лет после внесения мелиоранта (1834 суток). К 2191 суткам значение  $pH_{KCl}$  снизилось до 5,8 (табл.12). Тесную корреляционную связь между реакцией почвы и дозой мелиоранта наблюдали на протяжении всего срока наблюдения (табл. 13).

Таблица 13 – Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость  $pH_{KCl}$  почвы от дозы мелиоранта (Витковская, Шаврина, 2021)

Сутки	г
	$pH=f(\text{Доза})$
63	0,844
359	0,722
414	0,946
713	0,922
841	0,966
1079	0,981
1211	0,982
1452	0,982
1575	0,988
1834	0,979
2191	0,973

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 0,973 на 63 и 2191-е сутки взаимодействия доломитовой муки с почвой, соответственно, (при критическом значении на 5% уровне значимости  $r=0,632$ ), рисунок 12 (Витковская, Шаврина, 2021).

Информация о пролонгированности действия химических мелиорантов на почвенную кислотность варьируется в широком диапазоне (Витковская и др., 2016). Как правило, считается, что известь действует в течение 5–8 лет (Доспехов, 1985). Однако эффект последействия сохраняется значительно дольше – до 10–15 лет, а расчетное время окончательного прекращения действия извести авторы указывают – от 35 до 40 лет в зависимости от конкретных условий, в частности, от количества применяемых минеральных и органических удобрений (Комиссарова, Варламова, 2018).

Так, по данным (Шильников и др., 2008), при внесении в почву с повышенной кислотностью извести в дозах, близких к нормальным (2/3–3/4 Нг), действие мелиоранта проявляется в течение 15–20 лет и более. Согласно (Минеев и др., 2014) при однократном внесении извести сближение с уровнем реакции контрольного варианта для дозы 0,25 Нг происходит в условиях легкосуглинистых почв Ленинградской области через 3–4 года, для дозы 0,5 Нг – через 15–18 лет, для полной дозы – через 30 лет.

В нашем опыте нейтрализующее действие доломитовой муки в дозе 0,2 Нг полностью прекратилось через 2 года после внесения мелиоранта. Исследования в полевом опыте на дерново-подзолистой супесчаной почве показали, что при внесении известняковой муки в дозе 1,0 Нг в течение первых 3-х месяцев взаимодействия мелиоранта с почвой произошло резкое уменьшение концентрации  $H^+$ , но далее наметилась тенденция к подкислению почвы: период полуувеличения концентрации  $H^+$ , ммоль/л, в период от 94 до 1120 суток после внесения мелиоранта по экспоненциальной модели составил 230 суток (Витковская и др., 2016).

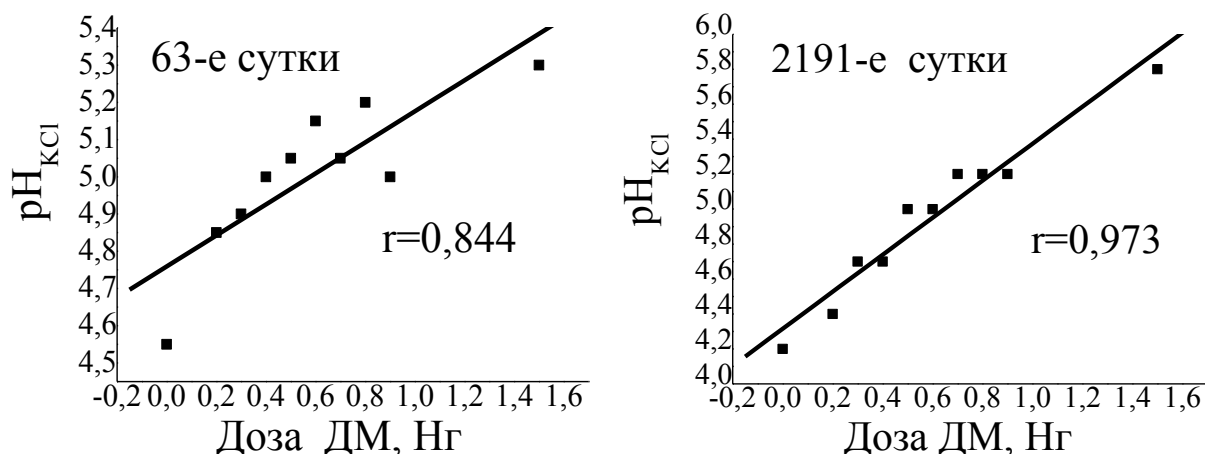


Рисунок 12 – Зависимость  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  почвы от дозы доломитовой муки  
(Витковская, Шаврина, 2021)

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

На момент закладки опыта содержание обменного  $\text{Ca}^{2+}$  в почве составляло  $2,7 \pm 0,1 \frac{1}{2}$  ммоль/100 г, обменного  $\text{Mg}^{2+}$  -  $0,36 \pm 0,06 \frac{1}{2}$  ммоль/100 г (табл. 14,15), что согласно градации почв по содержанию элементов питания (Методические указания, 2003), соответствует низкому и очень низкому содержанию элементов, соответственно.

Известно (Барбер, 1988; Агрохимия, 1989; Воеводина, Воеводин, 2015), что обменного  $\text{Mg}^{2+}$  в почвах содержится в 2–8 раз меньше, чем обменного  $\text{Ca}^{2+}$ . Особенно бедны обменными основаниями кислые дерново-подзолистые почвы легкого механического состава. В почве опыта до внесения ДМ обменного содержание  $\text{Ca}^{2+}$  превышало содержание  $\text{Mg}^{2+}$  в  $7,5 \pm 1,4$  раз (табл. 14,15) (Витковская и др., 2016).

В контрольном варианте опыта содержание обменных соединений  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  не зависело от времени в течение всего срока наблюдения. В лизиметрических и полевых экспериментах установлено (Шильников и др., 2008; Небольсин, Небольсина, 2010), что в условиях промывного водного режима главная причина потерь кальция и магния из пахотных почв – миграция их при промывании почвы атмосферными осадками.

Таблица 14 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание обменного  $\text{Ca}^{2+}$  в почве,  $\frac{1}{2}$  ммоль/100 г  
(Витковская и др., 2016)

Вариант	Сутки											
	0	63	359	414	713	841	1079	1211	1452	1575	1834	2191
1. Контроль	2,7±0,02	2,6±0,02	2,7±0,02	2,7±0,02	2,3±0,01	2,1±0,01	2,7±0,01	3,4±0,02	2,9±0,01	3,0±0,02	0,9±0,01	1,0±0,01
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	2,5±0,03	2,9±0,02	2,7±0,02	2,8±0,01	2,6±0,02	2,6±0,01	4,0±0,01	3,4±0,01	3,9±0,02	3,4±0,01	1,3±0,02	1,1±0,02
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	2,6±0,02	3,1±0,03	3,0±0,02	2,9±0,01	2,9±0,01	2,9±0,01	3,9±0,02	3,4±0,02	4,1±0,02	3,4±0,02	1,6±0,02	3,6±0,01
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	2,8±0,01	3,0±0,03	2,9±0,01	2,9±0,01	2,9±0,02	2,9±0,02	3,6±0,02	3,7±0,01	3,9±0,05	3,8±0,01	1,6±0,02	3,6±0,01
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	2,9±0,01	3,0±0,02	3,4±0,04	3,1±0,02	3,1±0,02	3,1±0,02	3,8±0,03	3,8±0,03	4,2±0,01	3,6±0,02	1,8±0,02	4,3±0,03
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	2,7±0,04	3,1±0,05	3,2±0,03	3,1±0,02	3,2±0,02	3,3±0,02	3,9±0,02	4,0±0,02	3,9±0,01	4,0±0,03	1,9±0,02	4,0±0,02
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	2,7±0,02	3,2±0,02	3,2±0,03	3,4±0,02	3,4±0,03	3,2±0,01	3,4±0,01	4,1±0,02	4,1±0,01	3,8±0,02	2,6±0,01	4,4±0,02
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	2,8±0,02	3,2±0,01	3,2±0,02	3,2±0,02	3,2±0,01	3,4±0,01	3,7±0,01	4,0±0,01	3,8±0,02	3,8±0,02	2,7±0,01	4,3±0,01
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	2,5±0,01	3,1±0,01	3,1±0,02	3,3±0,01	3,1±0,01	3,2±0,02	3,8±0,01	4,8±0,01	4,6±0,02	3,9±0,01	2,4±0,02	4,5±0,01
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	2,6±0,02	3,3±0,02	3,2±0,01	3,4±0,04	3,5±0,02	3,6±0,03	4,1±0,02	4,7±0,02	4,5±0,01	4,0±0,01	2,4±0,02	4,6±0,04

Таблица 15 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на динамику обменного  $Mg^{2+}$ ,  $\frac{1}{2}$  ммоль/100 г почвы  
(Витковская и др., 2016)

Вариант	Сутки											
	0	63	359	414	713	841	1079	1211	1452	1575	1834	2191
1. Контроль	0,4±0,02	0,4±0,02	0,1±0,01	0,1±0,01	0,4±0,02	0,3±0,01	0,7±0,03	1,2±0,01	0,3±0,01	0,3±0,01	0,4±0,02	0,6±0,01
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	0,4±0,02	0,6±0,03	0,5±0,02	0,5±0,01	0,6±0,02	0,4±0,02	1,4±0,02	1,6±0,01	0,5±0,02	0,5±0,02	0,6±0,01	0,6±0,02
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	0,4±0,01	0,5±0,03	0,5±0,02	0,6±0,03	0,7±0,04	0,7±0,02	2,3±0,02	2,4±0,02	0,7±0,01	0,8±0,02	<0,1	0,4±0,01
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	0,4±0,07	0,5±0,04	0,6±0,03	0,5±0,02	0,7±0,03	0,6±0,03	2,2±0,01	2,7±0,02	0,8±0,02	0,7±0,01	0,9±0,01	0,4±0,02
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	0,4±0,01	0,6±0,02	0,7±0,03	0,6±0,02	0,8±0,04	0,7±0,03	3,0±0,02	3,1±0,03	1,1±0,01	1,0±0,01	1,0±0,02	0,5±0,02
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,3±0,04	0,8±0,03	0,8±0,02	0,6±0,03	0,8±0,02	0,8±0,04	3,0±0,02	3,0±0,02	1,0±0,01	1,0±0,02	1,8±0,02	0,5±0,01
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,3±0,04	0,6±0,03	0,6±0,03	0,7±0,02	0,9±0,03	0,9±0,02	3,3±0,01	3,3±0,02	1,2±0,02	1,2±0,01	<0,1	0,5±0,01
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	0,4±0,03	0,8±0,03	0,8±0,02	0,7±0,02	0,6±0,02	0,8±0,02	3,1±0,02	3,3±0,01	1,1±0,02	1,2±0,02	<0,1	0,5±0,01
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,5±0,09	0,7±0,02	0,7±0,04	0,9±0,01	0,9±0,02	0,9±0,02	3,4±0,01	3,4±0,01	1,3±0,01	1,3±0,01	<0,1	0,4±0,01
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	0,4±0,03	1,1±0,04	1,0±0,02	1,0±0,04	1,0±0,03	1,0±0,02	3,5±0,02	3,5±0,02	1,5±0,01	1,5±0,02	1,4±0,01	0,5±0,02

При известковании, в зависимости от дозы извести, вымывание кальция повышается из песчаной дерново-подзолистой почвы в 1,5–2,0 раза, из супесчаной и глинистой – в 2-5 раз (Яковлева, 2009). 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 (табл. 14, 15).

Максимальное увеличение содержания обменных  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  на 63-е сутки (доза 1,5 Нг) по отношению к исходному содержанию составило 29 и 210%, соответственно, таблицы 14, 15 (Витковская и др., 2016). В вариантах 2-10 содержание обменного  $\text{Ca}^{2+}$  линейно возрастало в период 0-1459 суток со средней скоростью  $8,6 \cdot 10^{-3} \pm 2,3 \cdot 10^{-4}$   $\frac{1}{2}$  ммоль/100 г\*сут<sup>-1</sup> (параметры линейной модели (4) представлены в таблице 16), затем снижалось, рисунок 13.

$$\text{Ca}(t) = \text{Ca}_0 + bt, \quad (4)$$

где  $\text{Ca}_0$  – содержание обменного кальция в почве на момент закладки опыта,  $b$  – скорость изменения содержания обменного кальция,  $\frac{1}{2}$  ммоль/100 г/сут. Максимальной скоростью увеличения содержания обменного  $\text{Ca}^{2+}$  характеризовались варианты 9, 10:  $1,3 \cdot 10^{-3}$  и  $1,2 \cdot 10^{-3}$   $\frac{1}{2}$  ммоль/100 г/сут., соответственно (табл. 16) (Витковская, Шаврина, 2021).

Параметры линейной модели, характеризующие динамику содержания обменных соединений магния в период 0–1211 суток, в почве представлены в таблице 16. Скорость увеличения содержания обменного  $\text{Mg}^{2+}$  в почве ( $b$ ) линейно возрастала в интервале доз ДМ 0,2–0,6 Нг в период 0–1211 суток ( $r=0,949$ ).

Максимальная скорость увеличения содержания обменного магния составила  $0,002$   $\frac{1}{2}$  ммоль/100 г почвы в вариантах 6-10 (Витковская, Шаврина, 2021). Содержание  $\text{Mg}^{2+}$  в вариантах 2–10 линейно возрастало в период 0–1211 суток, затем снижалась (рис. 14, табл. 16).

Таблица 16 – Параметры линейной модели, характеризующие динамику содержания обменных соединений  $\text{Ca}^{2+}$  в период 0–1459 суток и  $\text{Mg}^{2+}$  в период 0–1211 суток в почве (Витковская, Шаврина, 2021)

Вариант	$\text{Ca}^{2+}$		$\text{Mg}^{2+}$	
	r	b	r	b
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	0,759	$8,5 \cdot 10^{-4}$	0,787	$5,3 \cdot 10^{-4}$
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	0,806	$8,1 \cdot 10^{-4}$	0,836	$6,6 \cdot 10^{-4}$
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	0,872	$7,0 \cdot 10^{-4}$	0,816	0,0016
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	0,856	$7,6 \cdot 10^{-4}$	0,822	0,0016
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,915	$7,9 \cdot 10^{-4}$	0,824	0,002
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,842	$7,4 \cdot 10^{-4}$	0,849	0,002
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	0,872	$6,0 \cdot 10^{-4}$	0,802	0,002
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,887	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,826	0,002
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	0,924	$1,2 \cdot 10^{-3}$	0,820	0,002

**Примечание:** критическое значение r на 5% уровне значимости 0,666 и 0,707 для Ca и Mg и соответственно

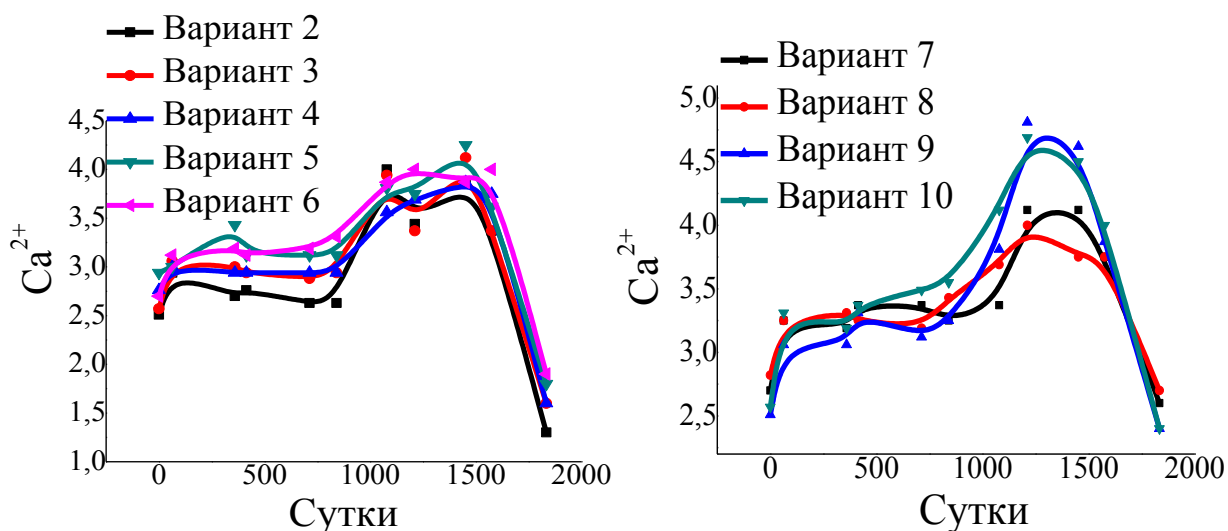


Рисунок 13 – Динамика содержания обменного кальция в почве в период 0–1834 суток взаимодействия ДМ с почвой (2–10 вар.)



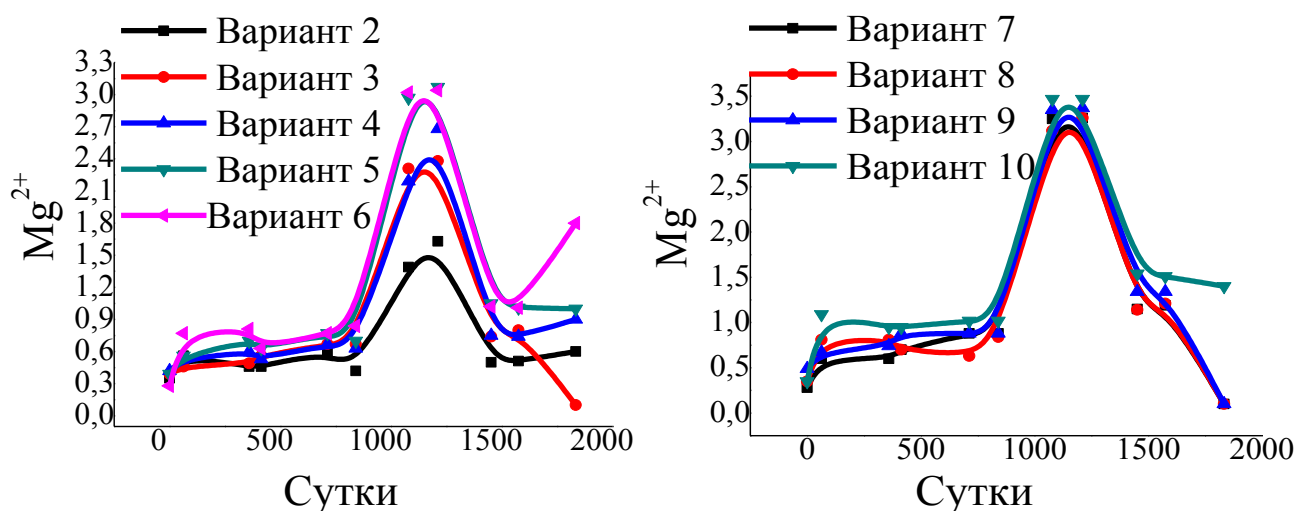


Рисунок 14 – Динамика содержания обменного магния в почве в период 0–1834 суток взаимодействия ДМ с почвой (варианты 2–10)

Линейную зависимость содержания обменных  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в почве от дозы мелиоранта наблюдали на протяжении всего срока наблюдения, таблица 17 (Витковская, Шаврина, 2021).

Таблица 17 – Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость содержания обменных  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в почве от дозы мелиоранта (Витковская, Шаврина, 2021)

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

Выявлено, что зависимости между дозой мелиоранта (в интервале от 0 до 1,5 Нг) и соотношением содержания обменных Ca: Mg характеризовались коэффициентами корреляции  $r = -0,869$  (63-е сут.) и  $r = -0,783$  (1575 сут.) при критическом значении  $r$  на 5%-ном уровне значимости 0,632, рисунок 15. Через пять лет после внесения мелиоранта (1834 сут.) зависимость отношения  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  в почве от дозы ДМ отсутствовала (табл. 18,19) (Витковская, Шаврина, 2021).

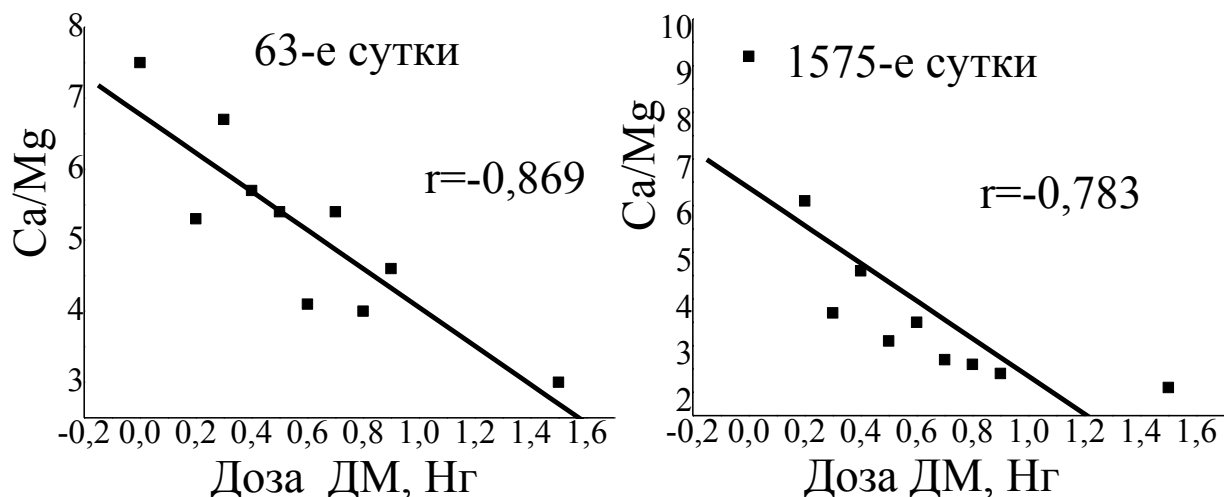


Рисунок 15 – Влияние возрастающих доз мелиоранта на соотношение содержания обменных Ca: Mg на 63-е и 1575-е сутки опыта

Таблица 18 – Влияние возрастающих доз ДМ на динамику отношения концентраций обменных  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  в почве (Витковская, Шаврина, 2021)

Вариант	Ca : Mg											
	0	63	359	414	713	841	1079	1211	1452	1575	1834	2191
1. Контроль	7,7	7,5	19,3	19,3	6,7	6,7	4,0	2,9	10,3	9,7	2,2	1,6
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	7,2	5,3	5,9	6,0	4,4	6,3	2,9	2,1	7,7	6,6	2,2	2,0
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	6,6	6,7	6,1	5,3	4,3	4,4	1,7	1,4	5,6	4,2	16	8,3
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	6,6	5,7	4,9	5,5	4,4	4,7	1,6	1,4	5,2	5,1	1,8	8,3
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	7,5	5,4	4,9	5,0	4,1	4,5	1,3	1,2	4,0	3,6	18	9,4
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	9,6	4,1	3,9	5,0	4,1	3,9	1,3	1,3	3,8	4,0	1,1	8,9
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	9,6	5,4	5,3	4,8	3,8	3,7	1,0	1,3	3,6	3,2	26	9,2
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	8,1	4,0	4,1	4,6	5,1	4,1	1,2	1,2	3,3	3,1	27	8,7
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	5,1	4,6	4,1	3,8	3,5	3,7	1,1	1,4	3,4	2,9	24	10,3
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	7,3	3,0	3,4	3,5	3,4	3,5	1,2	1,4	2,9	2,6	1,7	9,7

Таблица 19 – Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость отношения  $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$  в почве от дозы мелиоранта (Витковская и др., 2016)

Сутки	r
	$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} = f(\text{Доза})$
63	-0,869
359	-0,615
414	-0,615
713	-0,667
841	-0,798
1079	-0,706
1211	-0,585
1452	-0,807
1575	-0,783
1834	0,204
2191	0,651

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

Одним из критериев степени обеспеченности растений микроэлементами является их содержание в почве. При этом наиболее важно не валовое (общее) количество в почве отдельных микроэлементов, а наличие подвижных форм, которые определяют их доступность для растений (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Внесение в почву мелиорантов, помимо нейтрализации почвенной кислотности и насыщения почвенного поглощающего комплекса основаниями, приводит к изменению элементного состава почвенного раствора и растений (Витковская и др., 2016).

Известно (Возбуждая, 1968), что растворимость и доступность растениям соединений цинка возрастает с подкислением среды. Минимальная растворимость соединений Zn наблюдается при pH 5,5–6,9; дальнейшее повышение pH ведет к увеличению растворимости, так как цинк как амфотерный элемент образует в щелочной среде цинкаты типа  $\text{Zn}(\text{ONa})_2$  (или  $\text{Na}_2\text{ZnO}_2$ ). Однако в присутствии

достаточных количеств Са подвижность соединений Zn и в слабощелочной среде мала ввиду малой растворимости цинкатов кальция. Имеется информация (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989), что растворимость и доступность Zn в почвах обнаруживают отрицательную корреляционную связь со степенью насыщенности кальцием.

Низкое содержание доступного для растений Zn наблюдается на карбонатных почвах, особенно легкого гранулометрического состава (Ефимов и др., 1991). Реакция почвы оказывает наибольшее влияние на содержание цинка в растениях: в почвах с рН 6.0 большая часть цинка находится в недоступной для растений форме, с увеличением кислотности почвы доступность Zn резко возрастает (Витковская и др., 2020).

Концентрация кислоторастворимых соединений Zn (валового) в почве до закладки опыта составила 21 мг/кг, концентрация подвижных соединений цинка составляла  $0,77 \pm 0,2$  мг/кг. Внесение мелиоранта существенно повлияло на динамику подвижных соединений цинка в почве, таблица 20.

В период от 0 до 1291 суток наблюдали отрицательную корреляционную связь между содержанием подвижных соединений Zn и временем взаимодействия доломитовой муки с почвой (табл. 21). Наиболее тесную корреляционную связь между указанными параметрами наблюдали при внесении мелиоранта в дозах 0,8 и 1,5 Нг (рис. 16).

Таблица 20 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на динамику подвижных соединений цинка в почве  
(Витковская и др.,2020)

Вариант	Сутки											
	0	63	359	414	713	839	1079	1211	1452	1575	1834	2191
1. Контроль	0,6±0,01	1,2±0,05	0,7±0,01	0,6±0,01	1,1±0,03	0,8±0,01	0,9±0,03	0,7±0,05	0,7±0,05	0,7±0,03	1,0±0,04	0,9±0,02
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	1,0±0,05	1,5±0,03	0,8±0,01	0,5±0,01	2,0±0,04	2,2±0,03	0,6±0,01	0,7±0,04	0,4±0,01	0,5±0,02	0,7±0,03	0,7±0,01
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	0,9±0,04	1,1±0,03	0,6±0,01	1,2±0,03	1,0±0,03	1,1±0,01	0,4±0,01	0,5±0,04	0,3±0,02	0,4±0,01	0,5±0,02	0,7±0,03
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	0,5±0,01	0,7±0,01	1,3±0,02	1,3±0,03	0,7±0,02	0,6±0,01	0,5±0,01	0,6±0,02	0,3±0,02	0,3±0,02	0,5±0,02	0,6±0,02
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	0,8±0,02	0,9±0,02	0,7±0,02	0,8±0,02	0,6±0,01	1,0±0,01	0,3±0,01	0,3±0,01	0,2±0,01	0,2±0,02	0,4±0,01	0,5±0,01
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,8±0,02	1,4±0,02	0,6±0,01	0,8±0,01	0,8±0,01	1,0±0,02	0,4±0,01	0,4±0,01	0,3±0,02	0,3±0,02	0,4±0,01	0,5±0,01
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,5±0,01	0,6±0,01	0,9±0,01	2,0±0,02	0,5±0,01	0,9±0,02	0,3±0,01	0,3±0,01	0,3±0,02	0,3±0,02	0,4±0,03	0,4±0,02
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	1,1±0,04	1,7±0,02	1,4±0,02	0,8±0,01	0,7±0,01	1,4±0,03	0,4±0,02	0,4±0,02	0,2±0,01	0,2±0,01	0,3±0,01	0,4±0,02
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,7±0,01	1,4±0,02	0,7±0,02	1,2±0,1	0,7±0,01	0,9±0,02	0,3±0,01	0,3±0,01	0,2±0,01	0,3±0,01	0,2±0,01	0,4±0,01
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	0,9±0,02	0,6±0,01	1,1±0,03	1,2±0,1	0,7±0,02	0,6±0,01	0,2±0,01	0,3±0,01	0,1±0,01	0,1±0,01	0,2±0,01	0,3±0,01

Таблица 21 – Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость содержания подвижных соединений цинка от времени взаимодействия известкового мелиоранта с почвой

Варианты опыта									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,010	-0,375	-0,646	-0,516	-0,685	-0,696	-0,449	-0,795	-0,739	-0,799

Примечание\*: Критическая величина  $r$  на 5% уровне значимости 0,632

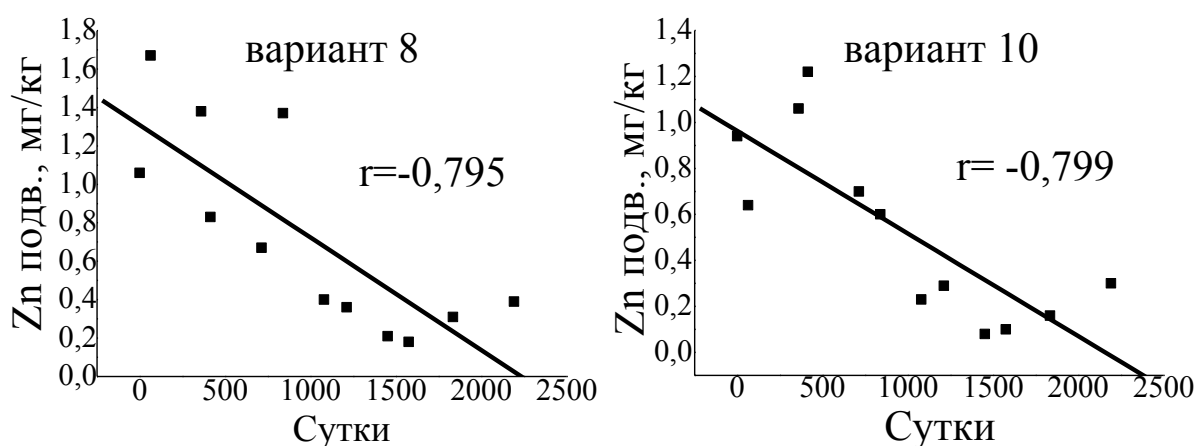


Рисунок 16 – Влияние времени воздействия мелиоранта в дозах 0,8 и 1,5 Нг на содержание подвижных соединений цинка в почве (вар. 8 и 10)

Содержание подвижных соединений цинка в почве линейно снижалось с увеличением дозы мелиоранта. Наиболее тесную корреляционную связь между указанными параметрами наблюдали в период 1079–2191 сут. (табл. 22, рис. 17): Значения ( $r$ ) изменялись в пределах от  $-0,792$  до  $-0,935$ .

Таблица 22 – Коэффициенты корреляции, характеризующие влияние возрастающих доз мелиоранта на содержание подвижных соединений цинка

Сутки											
0	63	359	414	713	841	1079	1211	1452	1575	1834	2191
0,232	-0,279	0,322	0,381	-0,520	-0,378	-0,792	-0,791	-0,844	-0,872	-0,858	-0,935

Примечание\*: критическая величина  $r$  на 5% уровне значимости 0,632

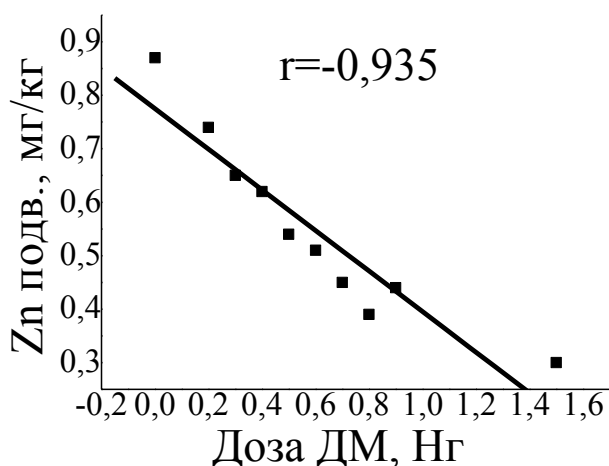


Рисунок 17 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание подвижных соединений цинка в почве на 2191-е сутки

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 доломитовой муки и составило в среднем по вариантам  $0,55 \pm 0,2$  мг/кг.

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

Взаимодействия цинка, кальция и магния могут быть как антагонистическими, так и синергетическими в зависимости от вида растений и факторов окружающей среды (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). В литературе чаще встречаются сведения об антагонизме этих элементов (Аштаб, 1994).

Известкование – обязательный прием сохранения и воспроизводства плодородия дерново-подзолистых почв агроландшафтов. Содержание доступных для растений соединений цинка существенно зависит от реакции почвы, избыточное внесение известковых мелиорантов может привести к дефициту элемента в сельскохозяйственных культурах (Клебанович, Василюк, 2003).

Многочисленными исследованиями доказано, что при недостатке цинка в растениях накапливаются редуцирующие сахара, небелковые соединения азота, органические кислоты, уменьшается содержание сахарозы и крахмала, нарушает-

ся синтез белка. Характерный признак для всех растений, страдающих от недостатка цинка – это задержка роста (Школьник, 1974; Битюцкий, 1999).

При известковании кислой почвы доломитовой мукой изменение кислотных свойств почвы, насыщение ППК кальцием и магнием приводили к усилению конкурентных взаимодействий в системе почва–растение между ионами Ca, Mg, Zn, присутствующими в почвенном растворе (Витковская и др., 2020).

Исследование взаимодействия Zn-Ca и Zn-Mg в системе почва-растение в широком диапазоне доз доломитовой муки позволяет построить зависимости, характеризующие влияние содержания Ca и Mg в растениях на содержание Zn (Шаврина, Витковская, 2020).

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

Содержание Zn в растениях овощных бобов в среднем по вариантам варьировалось в пределах: надземная часть –  $16 \pm 5$  (2014) и  $24 \pm 8$  (2017); в корнях –  $23 \pm 6$  и  $18 \pm 5$  мг/кг. Содержание Zn в надземной части овощных бобов на 5-й год взаимодействия мелиоранта с почвой (2017) увеличилось в среднем в 1,4 раза по отношению к 2014 году.

Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание цинка, кальция и магния в растениях овощных бобов (2014; 2017гг.) характеризуют данные, представленные в таблице 23. 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).

Установлено, что в 2014 году содержание кальция в надземной части растений овощных бобов линейно снижалось с возрастанием доз мелиоранта. Коэффициент корреляции ( $r$ ) составил -0,759, рисунок 18.

Содержание Ca в корнях растений не зависело от дозы ДМ. В 2017 наблюдали тенденцию снижения содержания элемента в надземной части и корнях рас-



тений: коэффициенты корреляции по линейной модели составили -0,609 (рис. 18) и -0,483, соответственно (Отчет НИР, 2020).

Таблица 23 – Влияние возрастающих доз ДМ на содержание Ca, Zn и Mg в растениях овощных бобов, а.с.в. (Шаврина, Витковская, 2018)

Вариант	Ca, %		Zn, мг/кг		Mg, %
	2014г	2017г	2014г	2017г	2017г
надземная часть					
1. Контроль	1,8±0,1	1,9±0,2	24±2	42±3	0,4±0,01
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	1,8±0,1	2,0±0,2	22±2	31±2	0,6±0,01
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	2,3±0,2	1,9±0,1	22±2	25±2	0,6±0,01
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	1,5±0,1	1,9±0,1	15±1	26±2	0,6±0,01
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	1,5±0,1	1,9±0,1	15±1	21±1	0,8±0,02
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	1,3±0,1	2,0±0,2	16±2	20±1	0,8±0,02
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	1,2±0,2	1,8±0,2	13±1	24±1	0,8±0,02
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	1,3±0,1	1,9±0,1	15±2	17±1	0,8±0,01
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	1,3±0,1	1,8±0,1	10±0,5	19±1	0,9±0,01
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	1,1±0,1	1,8±0,2	12±1	13±1	1,0±0,03
корни					
1. Контроль	0,4±0,01	0,6±0,01	21±2	27±2	0,6±0,01
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	0,4±0,01	0,7±0,01	19±2	24±02	1,0±0,1
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	0,4±0,01	0,6±0,01	37±3	19±1	1,1±0,1
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	0,5±0,02	0,6±0,01	19±1	20±2	1,1±0,1
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	0,5±0,01	0,5±0,01	20±2	16±1	1,2±0,1
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,4±0,01	0,6±0,01	24±2	16±1	1,6±0,2
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,4±0,01	0,6±0,01	19±1	15±2	1,7±0,2
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	0,4±0,01	0,6±0,01	27±2	15±2	1,5±0,1
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,5±0,02	0,5±0,02	20±1	13±1	1,3±0,2
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	0,5±0,02	0,6±0,02	20±1	13±1	1,7±0,2

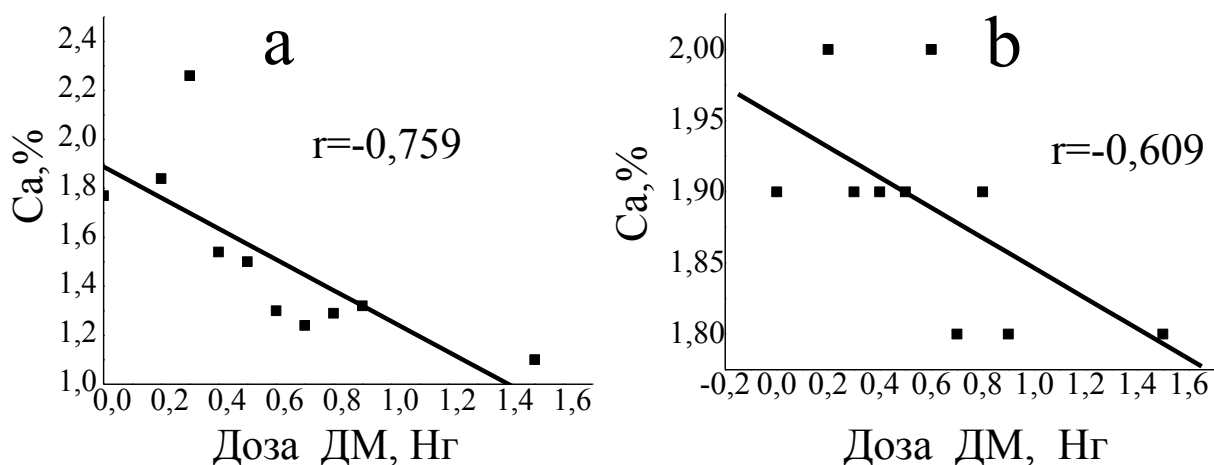


Рисунок 18 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание кальция в надземной части овощных бобов: а - 2014г.; б – 2017г.

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), рисунок 19.

При внесении мелиоранта в дозе 1,5 Нг, содержание Mg в надземной части и корнях растений бобов возросло в 2,5 и 3,0 раза, соответственно и составило 1,0 и 1,7%, таблица 23 (Отчет НИР, 2020).

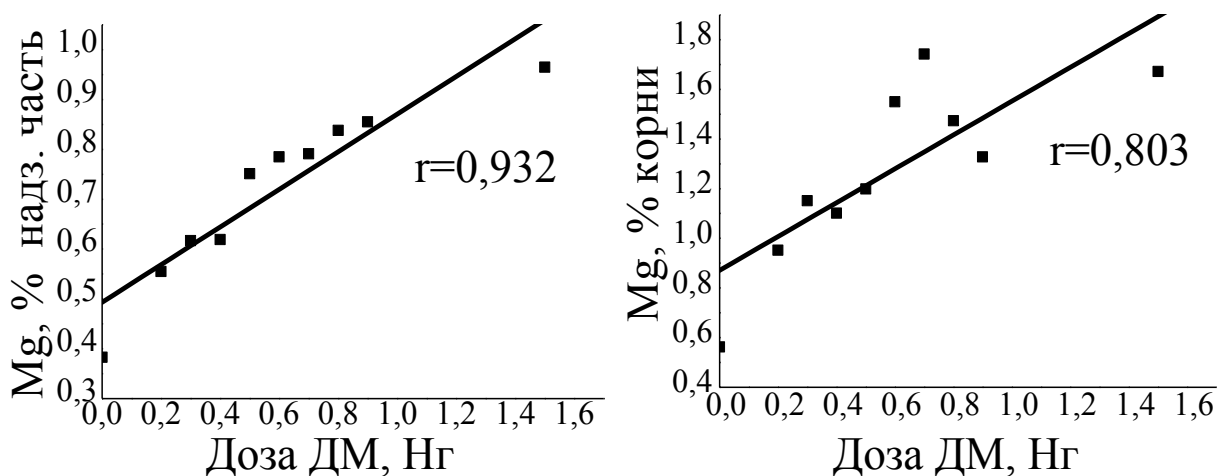


Рисунок 19 – Влияние возрастающих доз мелиоранта на накопление Mg, % надземной частью и корнями овощных бобов (2017г.)

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)), рисунок 20. Содержание цинка в корнях растений в 2014 и 2017 гг., не зависело от содержания кальция.

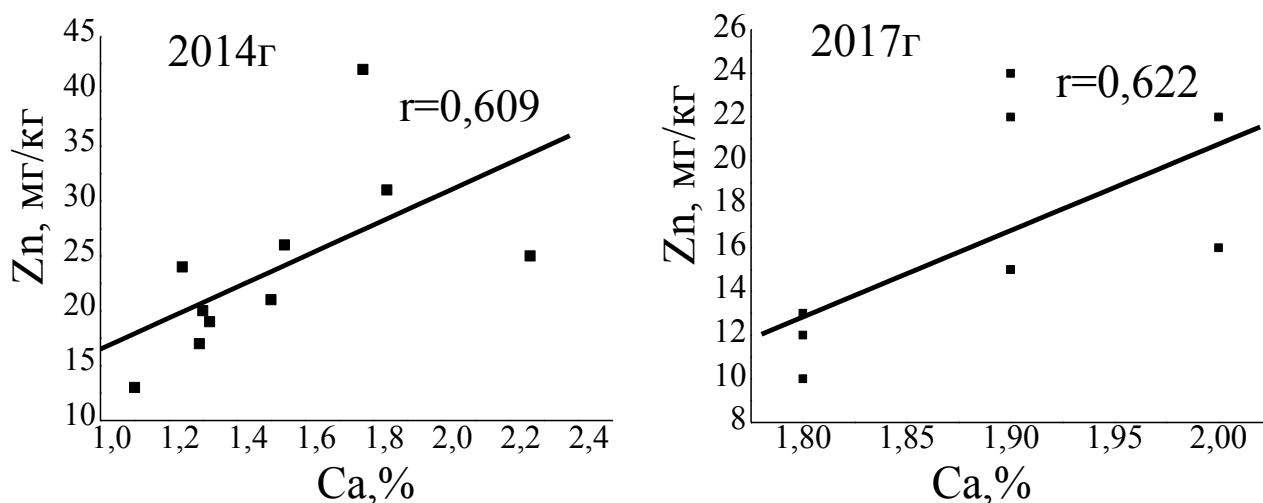


Рисунок 20 – Взаимосвязь содержания кальция и цинка в надземной части овощных бобов

В надземной части растений содержание цинка линейно снижалось с увеличением содержания магния, рисунок 21. В корнях растений не выявлено взаимосвязи между данными показателями.

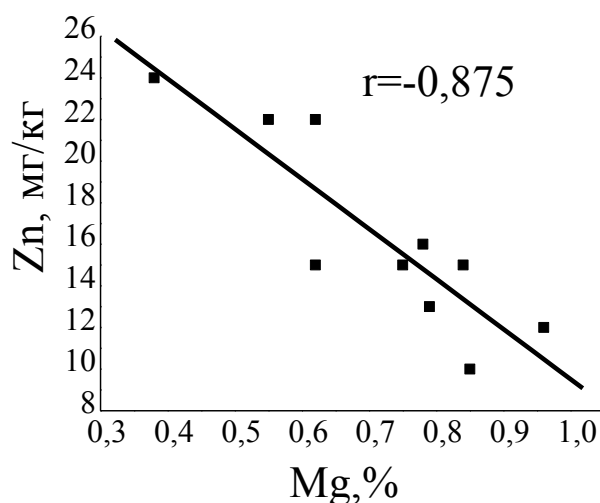


Рисунок 21 – Взаимосвязь содержания магния и цинка в надземной части овощных бобов (2017г.)

Комплексным показателем, позволяющим оценивать влияние различных факторов на распределение химических элементов в системе почва-растение является коэффициент накопления (КН), представляющий собой отношение концентраций элемента в растениях ( $C_p$ ) к концентрации в почве ( $C_n$ ), (Витковская, 2006):

$$КН = C_p / C_n \quad (5)$$

Установлены значения КН Zn надземной частью и корнями овощных бобов относительно содержания кислоторастворимых и подвижных соединений элемента в почве ( $КН_1$  и  $КН_2$  соответственно), таблица 24. Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость коэффициентов накопления Zn растениями от дозы мелиоранта представлены в таблице 25.

Таблица 24 – Коэффициенты накопления цинка  $КН_1$  и  $КН_2$  растениями овощных бобов, 2014 и 2017гг. (Шаврина и др., 2015)

Вариант	Надземная часть				Корни			
	2014		2017		2014		2017	
	$КН_1$	$КН_2$	$КН_1$	$КН_2$	$КН_1$	$КН_2$	$КН_1$	$КН_2$
1. Контроль	1,4	21,2	2,5	41,1	1,2	18,6	1,6	26,9
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	1,1	10,9	1,5	41,1	1,0	9,4	1,2	32,4
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	1,2	21,4	1,4	48,4	2,1	35,9	1,0	35,9
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	0,8	21,7	1,3	57,3	1,0	27,5	1,0	44,40
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	1,0	25,4	1,4	57,9	1,3	33,9	1,1	45,5
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,9	19,8	1,2	54,8	1,4	29,6	0,9	43,4
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,9	26,5	1,6	57,4	1,3	38,8	1,0	36,8
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	0,8	22,4	0,9	54,0	1,5	40,3	0,8	48,5
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,6	14,1	1,1	82,5	1,1	28,2	0,7	54,
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	0,7	17,1	0,7	82,2	1,1	28,6	0,7	80,4

Таблица 25 – Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость  $KH_1$  и  $KH_2$  цинка растениями овощных бобов от дозы ДМ

Надземная часть				Корни			
2014		2017		2014		2017	
$KH_1$	$KH_2$	$KH_1$	$KH_2$	$KH_1$	$KH_2$	$KH_1$	$KH_2$
-0,799	-0,09	-0,803	0,876	0,143	0,404	-0,841	0,941

Зависимость  $KH_1$  цинка надземной частью овощных бобов от дозы ДМ характеризовалась коэффициентами корреляции ( $r$ ) -0,799 и -0,803 в 2014 и 2017 гг., соответственно, рисунок 22.

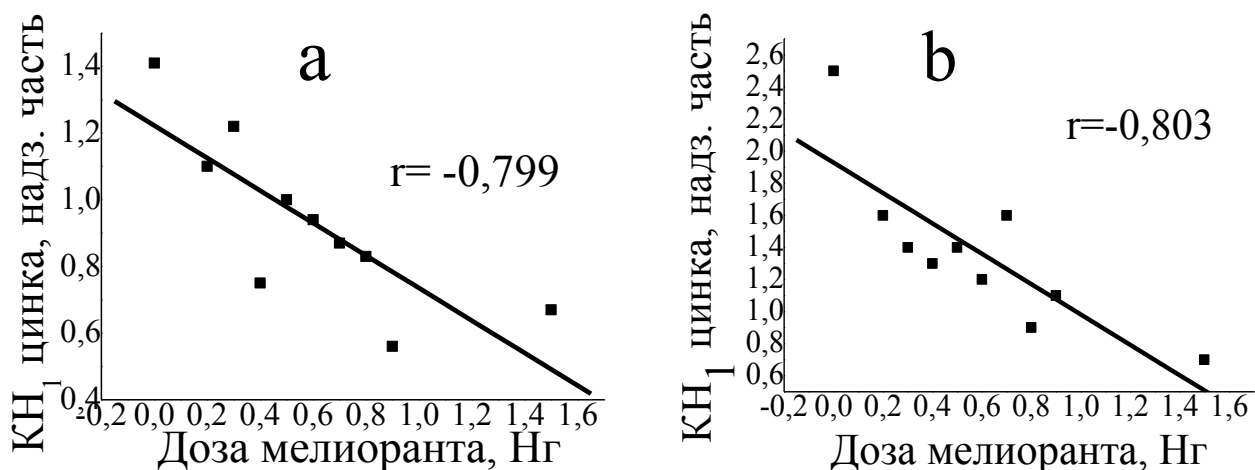


Рисунок 22 – Влияние возрастающих доз мелиоранта на  $KH_1$  цинка надземной частью овощных бобов: а – 2014 г.; б – 2017 г.

Значения  $KH_2$  надземной частью и корнями растений в 2014 году не зависели от дозы мелиоранта. В 2017 году наблюдалась положительная связь между  $KH_2$  цинка надземной частью и корнями растений и дозой доломитовой муки, коэффициенты корреляции по линейной модели составили 0,876 и 0,941 соответственно (рис. 23, табл. 25).

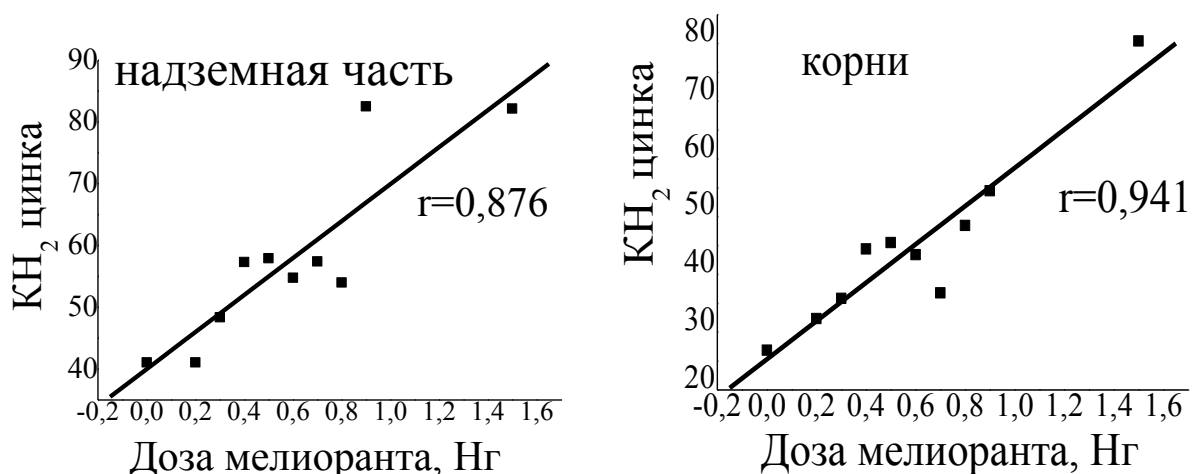


Рисунок 23 – Влияние возрастающих доз мелиоранта на  $KH_2$  цинка овощных бобов (2017г.)

Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость коэффициентов накопления Zn растениями от содержания обменного кальция и магния в почве представлены в таблицах 26 и 27.

Таблица 26 – Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость коэффициентов накопления цинка от содержания обменного кальция в почве

Надземная часть				Корни			
2014		2017		2014		2017	
$KH_1$	$KH_2$	$KH_1$	$KH_2$	$KH_1$	$KH_2$	$KH_1$	$KH_2$
-0,736	0,255	-0,781	0,693	0,08	0,690	0,836	0,713

Таблица 27 – Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость коэффициентов накопления цинка от содержания обменного магния в почве

Надземная часть				Корни			
2014		2017		2014		2017	
$KH_1$	$KH_2$	$KH_1$	$KH_2$	$KH_1$	$KH_2$	$KH_1$	$KH_2$
-0,749	0,08	-0,680	0,823	-0,09	0,409	-0,781	0,721

Установлены коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость коэффициентов накопления Zn растениями от содержания магния в растениях овощных бобов, таблица 28.

Таблица 28 – Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость коэффициентов накопления цинка от содержания магния (2017 г.)

Надземная часть		Корни	
2017		2017	
КН <sub>1</sub>	КН <sub>2</sub>	КН <sub>1</sub>	КН <sub>2</sub>
-0,874	0,807	-0,802	0,608

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

Опытная культура 2015 года – ячмень сорта «Ленинградский». 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).

На момент закладки опыта содержание обменного Ca<sup>2+</sup> в почве составляло  $2,7 \pm 0,1$ , обменного Mg<sup>2+</sup> –  $0,36 \pm 0,06$  ммоль/100 г, что, согласно градации почв по содержанию элементов питания (Методические указания, 2003), соответствует низкому и очень низкому содержанию элементов соответственно. В почве опыта до внесения ДМ содержание Ca<sup>2+</sup> превышало содержание Mg<sup>2+</sup> в  $7,5 \pm 1,4$  раза (Витковская и др., 2016). Таким образом, при внесении мелиоранта в почву увеличение содержания обменного магния было гораздо более существенным для растений, чем увеличение содержания обменного кальция (Витковская и др., 2020).

Влияние возрастающих доз ДМ на содержание обменных соединений Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> и подвижных соединений Zn в почве на момент уборки растений (1211-е сут. взаимодействия мелиоранта с почвой) представлено в таблице 29.

Таблица 29 – Влияние возрастающих доз ДМ на содержание обменных  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  и подвижных соединений Zn в почве (Витковская и др., 2020)

Вариант	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	Zn
	1/2 ммоль/100 г		мг/кг
1. Контроль	3,4±0,3	1,2±0,02	0,7±0,05
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	3,4±0,2	1,6±0,05	0,7±0,04
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	3,4±0,2	2,4±0,1	0,5±0,04
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	3,7±0,3	2,7±0,1	0,6±0,02
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	3,8±0,1	3,1±0,2	0,3±0,01
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	4,0±0,2	3,0±0,2	0,4±0,01
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	4,1±0,1	3,3±0,3	0,3±0,01
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	4,0±0,1	3,3±0,3	0,4±0,02
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	4,8±0,1	3,4±0,2	0,4±0,01
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	4,7±0,1	3,5±0,1	0,3±0,01

Влияние возрастающих доз ДМ на содержание Ca, Mg и Zn в растениях ячменя характеризуют экспериментальные данные, представленные в таблице 30 (Витковская и др., 2020). Содержание Zn в зерне, соломе и полове ячменя линейно снижалось с увеличением дозы ДМ (табл. 30). По убыванию содержания цинка (мг/кг) органы растений ячменя располагаются в ряд:

зерно (26±9) > корни (12±1) > полова (8±4) > солома (5±2)

Среднее содержание Zn в зерне ячменя в разных странах варьируется от 15 до 51 мг/кг, содержание элемента при его дефиците оценивается в 10–20 мг/кг сухой массы (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Установлено, что при внесении ДМ в дозе 1,5 Нг содержание Zn в зерне ячменя снизилось до 7,0 мг/кг, в остальных вариантах опыта находилось в пределах нормы (Витковская и др., 2020).

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 24.



Таблица 30 – Влияние возрастающих доз ДМ на распределение кальция, магния и цинка в органах ячменя, а.с.в. (Витковская и др., 2020)

Вариант	Ca, %	Mg, %	Zn, мг/кг
Ячмень зерно			
1. Контроль	0,1±0,02	0,1±0,01	42±2
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	0,1±0,02	0,1±0,01	32±1
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	0,1±0,01	0,1±0,01	29±1
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	0,1±0,01	0,1±0,01	29±1
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	0,1±0,01	0,1±0,01	28±1
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,1±0,01	0,1±0,01	25±1
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,1±0,01	0,1±0,01	23±1
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	0,1±0,01	0,1±0,01	24±1
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,1±0,01	0,1±0,01	23±1
10. Фон + ДМ1,5 Нг	0,1±0,01	0,1±0,01	7±0,5
Ячмень солома			
1. Контроль	0,5±0,03	0,1±0,0	10±0,3
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	0,5±0,03	0,1±0,01	8,3±0,3
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	0,4±0,01	0,1±0,01	5,8±0,4
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	0,4±0,02	0,1±0,01	6,2±0,1
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	0,5±0,01	0,1±0,01	4,6±0,5
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,4±0,02	0,1±0,0	4,4±0,3
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,4±0,01	0,1±0,01	3,2±0,1
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	0,4±0,01	0,1±0,01	3,2±0,1
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,5±0,02	0,1±0,01	5,6±0,5
10. Фон + ДМ1,5 Нг	0,5±0,02	0,1±0,01	2,9±0,1
Ячмень солова			
1. Контроль	0,5±0,02	0,2±0,02	17±2
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	0,6±0,03	0,2±0,02	9,5±0,5
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	0,6±0,02	0,3±0,01	9,8±0,5
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	0,6±0,04	0,3±0,01	9,3±0,4
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	0,7±0,04	0,3±0,02	6,0±0,5
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,6±0,05	0,3±0,01	5,8±0,2
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,6±0,03	0,3±0,02	5,7±0,4
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	0,5±0,03	0,3±0,02	6,7±0,5
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,6±0,04	0,3±0,01	5,9±0,5
10. Фон + ДМ1,5 Нг	0,5±0,02	0,4±0,04	4,3±0,2
Ячмень корни			
1. Контроль	0,2±0,03	0,4±0,02	14±1
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	0,4±0,02	0,8±0,01	13±1
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	0,4±0,03	0,5±0,03	11±0,5
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	0,4±0,02	0,5±0,03	13±1
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	0,5±0,02	0,7±0,04	11±1
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,5±0,03	0,5±0,02	12±1,5
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,4±0,01	0,4±0,01	12±1
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	0,6±0,02	0,5±0,01	13±1
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,4±0,03	0,5±0,02	9±0,5
10. Фон + ДМ1,5 Нг	0,5±0,01	0,6±0,02	12±0,5

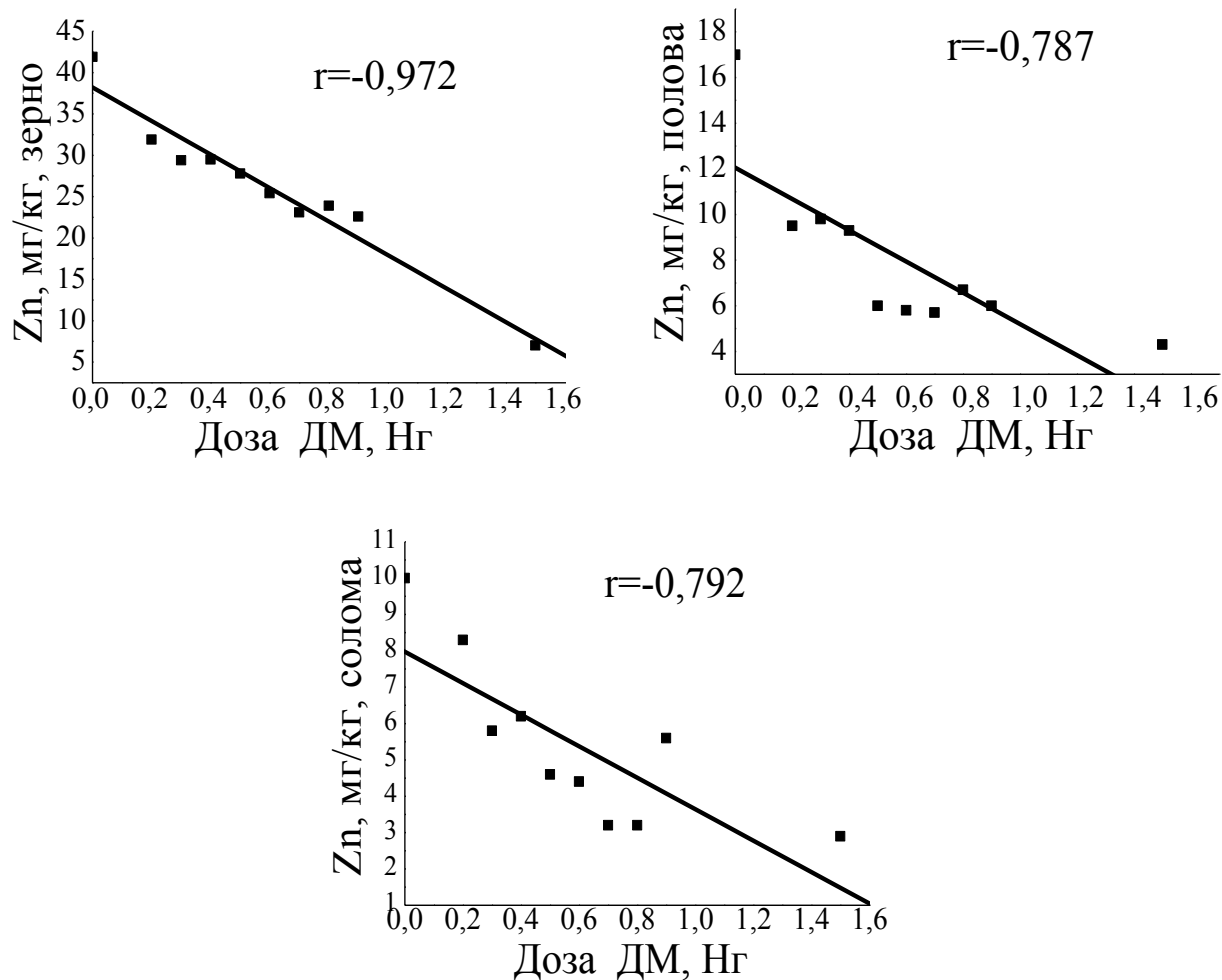


Рисунок 24 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание цинка в органах растений ячменя (Шаврина, Витковская, 2017)

В таблице 31 представлены коэффициенты корреляции, характеризующие зависимости содержания цинка, кальция и магния в растениях ячменя от дозы известкового мелиоранта. 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, коэффициент корреляции (r), характеризующий зависимость  $Ca (f) = \text{доза}$ , в корнях растений составил 0,711 (табл.31) (Витковская и др., 2020).

Таблица 31 – Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимости содержания Ca, Mg и Zn 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

Взаимодействие Mg–Zn и Ca–Zn в вегетативных и генеративных органах растений ячменя хорошо аппроксимировалось линейной моделью. Содержание Zn в зерне, соломе и полове ячменя линейно снижалось с увеличением содержания Mg, на рисунке 25 показана взаимосвязь магния и цинка в зерне ячменя. Содержание кальция практически не влияло на содержание цинка в органах растений ячменя (Витковская и др., 2020).

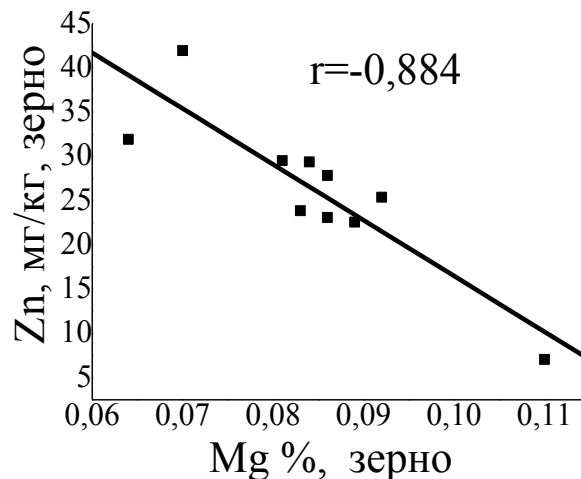


Рисунок 25 – Влияние возрастающих концентраций магния на содержание цинка в зерне ячменя

Опыт показал, что с увеличением  $pH_{KCl}$  почвы (табл. 11) линейно снижалось содержание Zn в зерне, соломе и полове ячменя. Наиболее тесной корреляцион-

ной связью ( $r = -0,953$ ) характеризовалась зависимость  $Zn(\text{зерно}) - pH(\text{почва})$ . Коэффициент корреляции, характеризующий зависимость  $Zn(\text{корни}) - pH(\text{почва})$  не превысил  $-0,496$  (критическая величина  $r$  на 5%-ном уровне значимости равна  $-0,632$ ) (Витковская и др., 2020).

Установлено, что в интервале доз ДМ 0–1,5 Нг на момент уборки опыта (1211-е сут. взаимодействия ДМ с почвой) содержание подвижных соединений  $Zn$  линейно зависело от содержаний обменных  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  в почве: зависимости  $Zn(f) = Ca$  и  $Zn(f) = Mg$  характеризовались коэффициентами корреляции ( $r$ )  $-0,736$  и  $-0,928$  соответственно (Витковская и др., 2020).

Содержание  $Zn$  в зерне, соломе, полове и корнях растений ячменя линейно снижалось с увеличением содержания обменных соединений  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  в почве. Наиболее тесные отрицательные корреляционные связи были установлены между содержанием обменного магния в почве и содержанием цинка в зерне, соломе и полове ячменя, таблица 32, рисунок 26. 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).

В ходе исследования были установлены тесные корреляционные связи между содержанием обменного кальция в почве и накоплением магния и цинка в зерне и полове ячменя (табл. 32).

Таблица 32 – Коэффициенты корреляции ( $r$ )\*, характеризующие взаимодействие  $Ca$ ,  $Mg$  и  $Zn$  в системе почва-растение (Витковская и др., 2020)

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

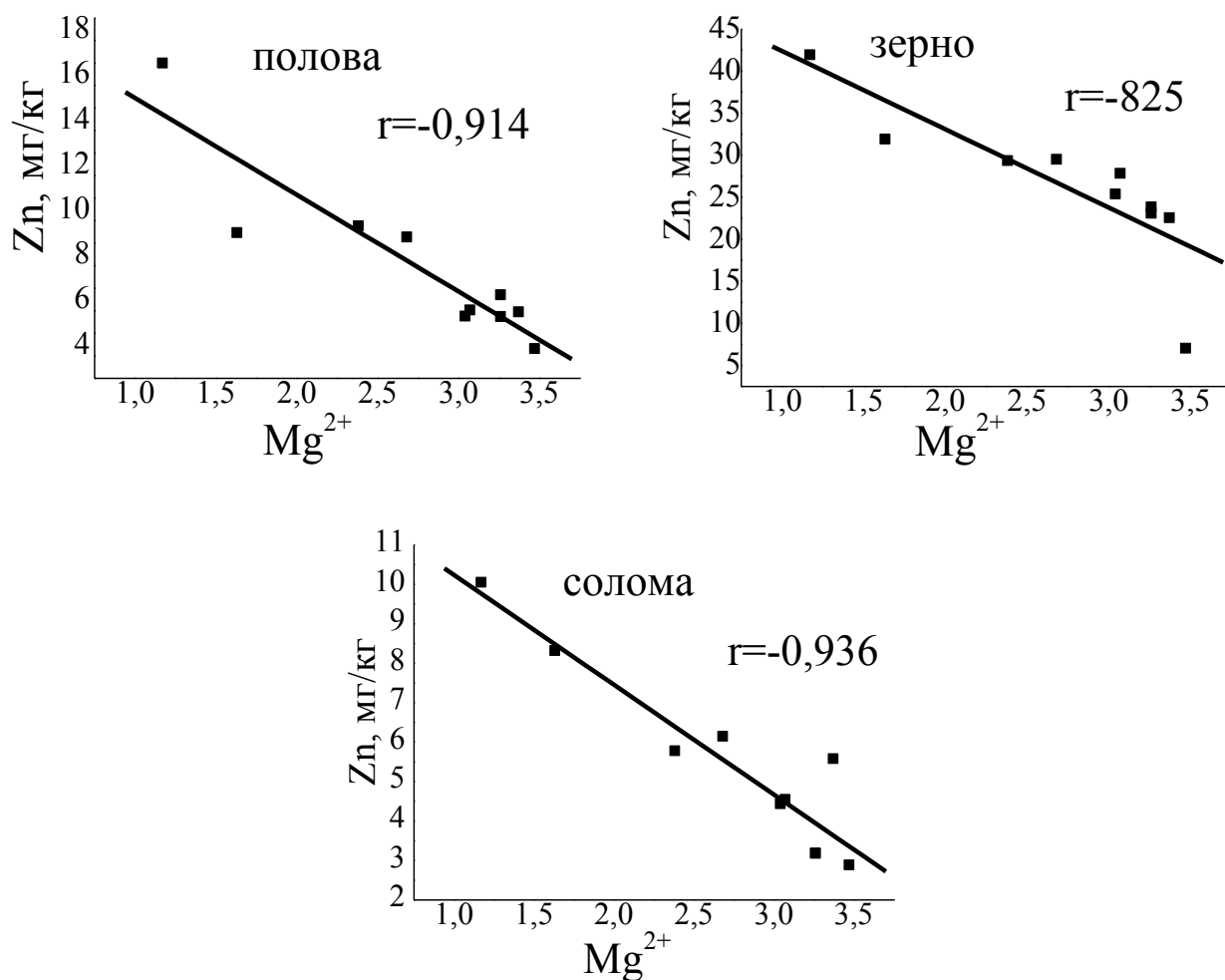


Рисунок 26 – Зависимость содержания цинка в зерне, соломе и полове ячменя от содержания обменного магния в почве (Витковская и др., 2020)

Содержание Mg в зерне, соломе и полове ячменя возрастало с увеличением содержания обменного магния в почве, в корнях связи между данными параметрами не обнаружено. Была выявлена положительная корреляционная связь между содержанием обменного магния и содержанием кальция в корнях ячменя, коэффициент корреляции по линейной модели составил  $r = 0,823$ .

Тесную положительную корреляционную связь наблюдали между содержанием подвижных соединений цинка в почве и содержанием данного элемента в органах растений ячменя. Коэффициенты корреляции (r) по линейной модели изменялись от 0,673 до 0,905 при критическом значении r на 5% уровне значимости = 0,632, (табл. 32; рис. 27).

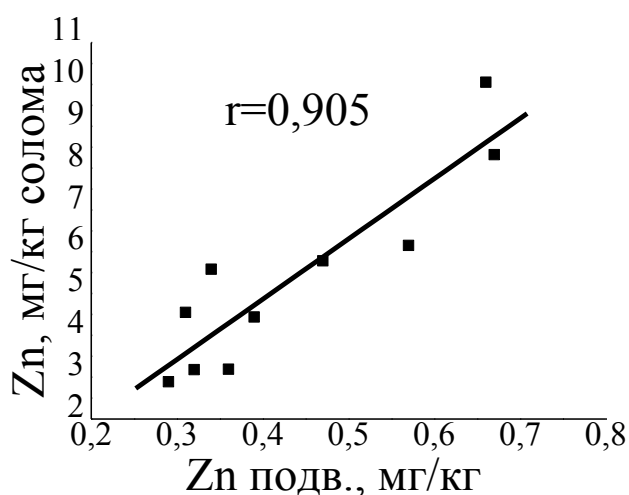


Рисунок 27 – Влияние содержания подвижного цинка в почве на содержание цинка в соломе ячменя

Были установлены коэффициенты накопления Zn в органах растений ячменя относительно содержания кислоторастворимых и подвижных соединений элемента в почве ( $KH_1$  и  $KH_2$  соответственно), таблица, 33. Значения  $KH_1$  цинка в зерне, соломе и полове линейно снижались с увеличением дозы мелиоранта, коэффициенты корреляции составили  $r = -0,971$ ,  $r = -0,789$  и  $r = -0,781$  соответственно. В корнях ячменя обнаружена положительная зависимость  $KH_2$  цинка от дозы доломитовой муки,  $r=0,788$ .

Таблица 33 – Коэффициенты накопления цинка органами растений ячменя

Вариант	Зерно		Солома		Полова		Корни	
	$KH_1$	$KH_2$	$KH_1$	$KH_2$	$KH_1$	$KH_2$	$KH_1$	$KH_2$
1. Контроль	2,10	63,4	0,50	15,2	0,85	25,7	0,72	21,9
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	1,61	47,4	0,42	12,4	0,48	14,1	0,66	19,5
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	1,45	62,3	0,29	12,3	0,48	20,7	0,55	23,5
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	1,45	51,6	0,30	10,8	0,45	16,2	0,63	22,5
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	1,34	89,8	0,22	14,7	0,29	19,4	0,54	36,2
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	1,31	65,1	0,23	11,4	0,30	14,8	0,59	29,4
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	1,16	72,4	0,16	10,0	0,29	18,0	0,59	36,8
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	1,20	65,6	0,16	8,8	0,34	18,4	0,66	35,8
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	1,10	66,4	0,27	16,4	0,29	17,5	0,45	27,3
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	0,36	24,4	0,15	10,0	0,22	15,0	0,61	40,9

### 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. В таблице 34 отражено влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение кальция, магния и цинка в растениях вики и овса.

Таблица 34 – Влияние возрастающих доз ДМ на содержание кальция, магния и цинка в растениях вики и овса, а.с.в.

Вариант	Са %	Mg %	Zn, мг/кг
Вика			
1. Контроль	1,47±0,02	0,29±0,01	39±2
2. Фон +ДМ 0,2 Нг	1,51±0,03	0,37±0,02	25,±1
3. Фон +ДМ 0,3 Нг	1,34±0,02	0,37±0,02	22±1
4. Фон +ДМ 0,4 Нг	1,45±0,02	0,39±0,01	23±1
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	1,51±0,02	0,44±0,02	20±1
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	1,43±0,02	0,41±0,01	21±1
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	1,47±0,02	0,42±0,02	17±1
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	1,21±0,01	0,41±0,02	18±1
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	1,30±0,02	0,40±0,02	18±1
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	1,25±0,02	0,48±0,02	16±0,5
Овес колос			
1. Контроль	0,34±0,01	0,13±0,02	32±2
2. Фон +ДМ 0,2 Нг	0,34±0,01	0,17±0,01	28±1
3. Фон +ДМ 0,3 Нг	0,34±0,02	0,22±0,01	29±1
4. Фон +ДМ 0,4 Нг	0,34±0,02	0,23±0,01	37±2
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	0,38±0,01	0,28±0,01	36±2
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,38±0,01	0,24±0,01	36±2
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,38±0,02	0,22±0,02	35±1
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	0,38±0,01	0,25±0,02	41±2
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,34±0,02	0,21±0,01	34±2
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	0,30±0,01	0,28±0,01	26±1

Вариант	Ca %	Mg %	Zn, мг/кг
Овес, солома			
1. Контроль	0,14±0,01	0,12±0,01	7±0,5
2. Фон + ДМ 0,2 Нг	0,14±0,01	0,14±0,01	7±0,5
3. Фон + ДМ 0,3 Нг	0,13±0,01	0,13±0,01	6±0,4
4. Фон + ДМ 0,4 Нг	0,13±0,01	0,17±0,01	1±0,1
5. Фон + ДМ 0,5 Нг	0,13±0,01	0,20±0,01	8±0,3
6. Фон + ДМ 0,6 Нг	0,13±0,02	0,17±0,01	6±0,4
7. Фон + ДМ 0,7 Нг	0,13±0,01	0,17±0,01	7±0,3
8. Фон + ДМ 0,8 Нг	0,13±0,01	0,19±0,02	7±0,3
9. Фон + ДМ 0,9 Нг	0,13±0,01	0,16±0,02	7±0,3
10. Фон + ДМ 1,5 Нг	0,13±0,01	0,16±0,02	5±0,2

Влияние возрастающих доз мелиоранта на содержания Ca, Mg и Zn в растениях характеризуют коэффициенты корреляции, представленные в таблице 35. Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость содержания Mg в растениях вики и колосе растений овса от дозы ДМ составили  $r=0,852$  и  $r=0,702$ , соответственно, рисунок 28.

Таблица 35 – Коэффициенты корреляции ( $r$ ), характеризующие зависимости содержания Ca, Mg и Zn в растениях вики и овса от дозы доломитовой муки (Шаврина, Витковская, 2019)

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	-



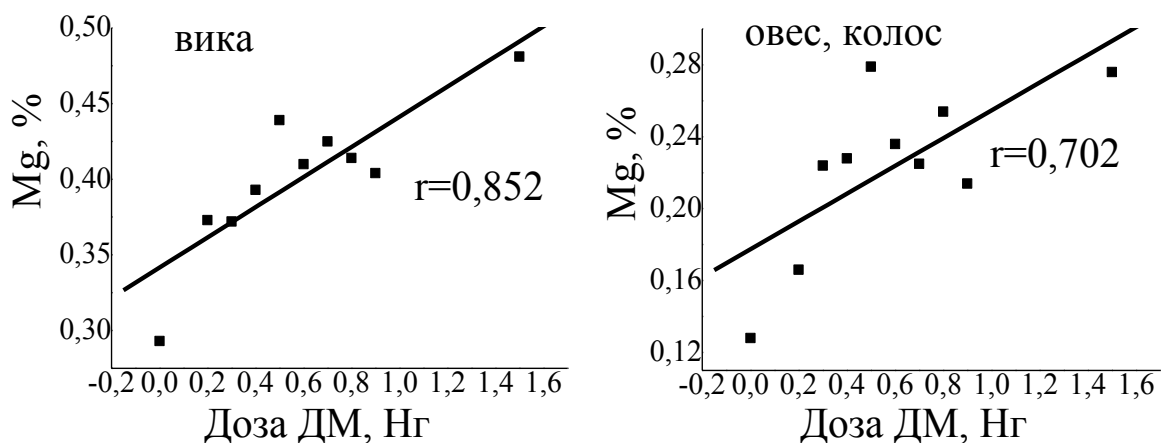


Рисунок 28 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание магния в растениях вики и овса (колос)

С увеличением дозы мелиоранта содержания цинка и кальция в растениях вики линейно снижались: коэффициенты корреляции по линейным моделям составили  $-0,777$  и  $-0,681$  соответственно (рис. 29). Выявлено, что содержание Zn в растениях вики линейно снижалось также с увеличением содержания Mg в растениях ( $r = -0,909$ ), таблица 34, рисунок 30. В растениях овса наблюдали тенденцию снижения содержания кальция в растениях с возрастающими дозами ДМ (коэффициент корреляции  $-0,611$  при критическом значении  $r$  на 5% уровне значимости  $0,632$ ). Конкурентные взаимодействия между Ca, Mg и Zn в растениях вики проявлялись значительно интенсивнее, чем в растениях овса.

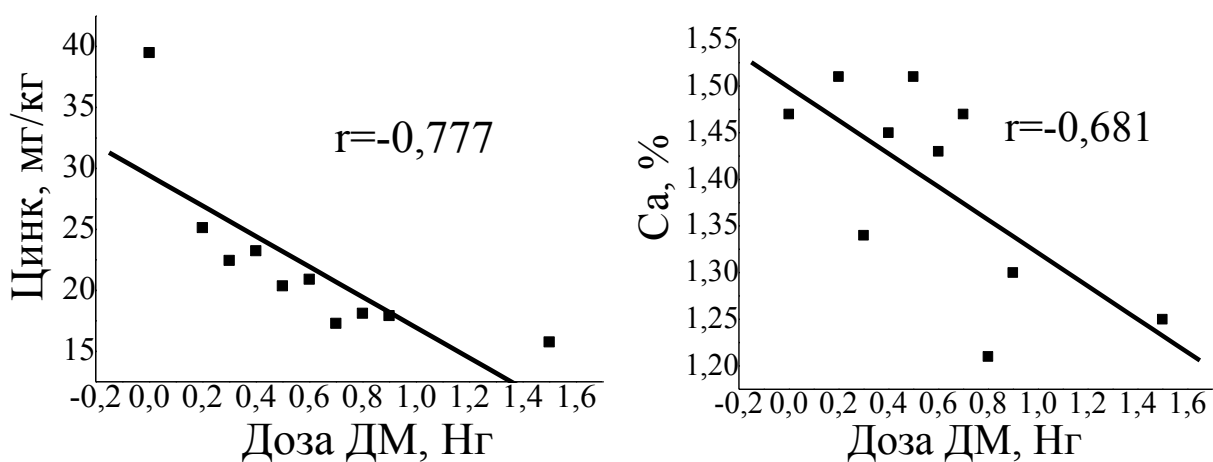


Рисунок 29 – Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание цинка и кальция в растениях вики

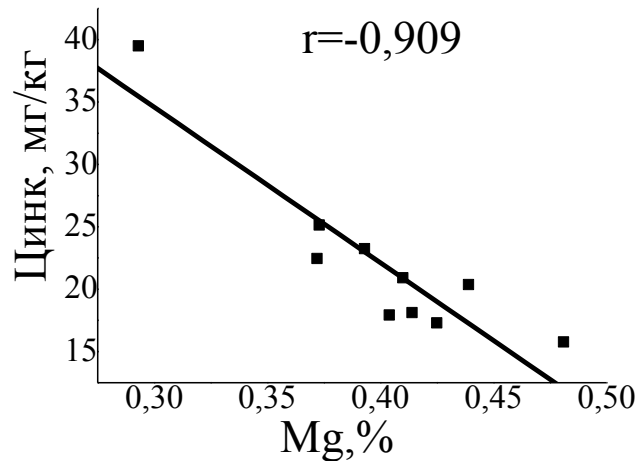


Рисунок 30 – Влияние содержания магния на содержание цинка в растениях вики (Шаврина, Витковская, 2020)

Влияние возрастающих доз ДМ на взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва – растение характеризуют коэффициенты корреляции, представленные в таблице 36.

Таблица 36 – Коэффициенты корреляции (r), характеризующие взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва-растение (Шаврина, Витковская, 2019)

Зависимость	Вика	Овес солома	Овес колос
Ca(почва) - Ca(растения)	-0,426	-0,770	-0,426
Ca(почва) - Mg(растения)	0,844	0,660	0,763
Ca(почва) - Zn(растения)	-0,854	-0,156	0,235
Mg(почва) - Ca(растения)	-0,648	- 0,777	-
Mg(почва) - Mg(растения)	0,862	0,588	0,766
Mg(почва) - Zn(растения)	-0,886	-0,404	-
Zn(почва) - Zn(растения)	0,921	0,270	-0,173

Содержание цинка в растениях варьировалось в пределах:  $22 \pm 7$  (вика);  $33 \pm 5$  (овес, колос);  $7 \pm 1$  (овес, солома). Установлено, 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. 31). Наблюдали тесную корреляционную связь между содержанием подвижных соединений Zn в почве и содержанием элемента в растениях вики ( $r=0,921$ ) (рис. 32) (Шаврина, Витковская, 2019).

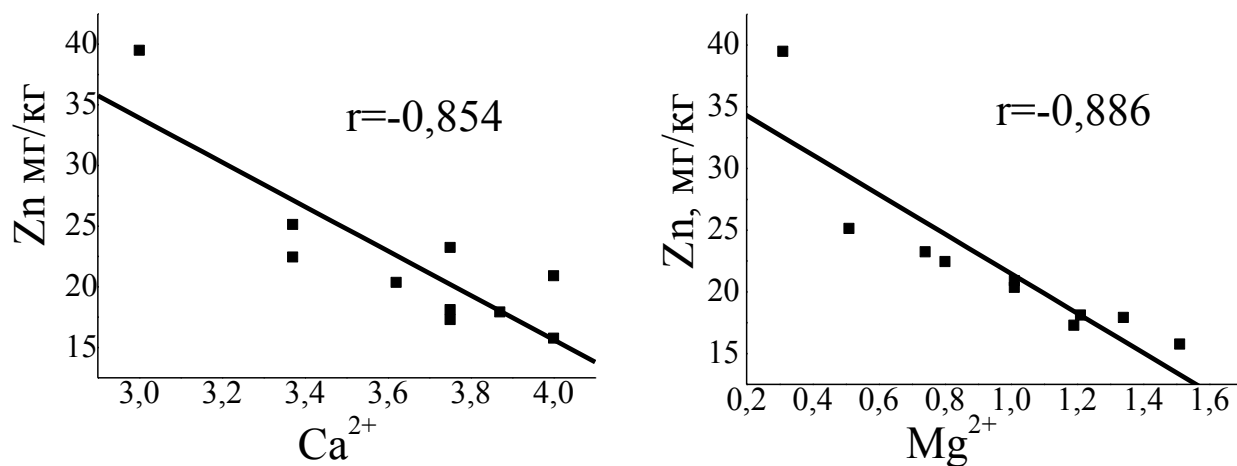


Рисунок 31 – Влияние содержания обменных соединений  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в почве на содержание цинка в растениях вики (Шаврина, Витковская, 2019)

В отношении растений овса наблюдали достоверные корреляционные связи: содержание  $\text{Ca}^{2+}$  в почве – содержание Mg в соломе ( $r=0,660$ ) и содержанием  $\text{Mg}^{2+}$  в почве – содержание Mg в колосе ( $r=0,862$ ).

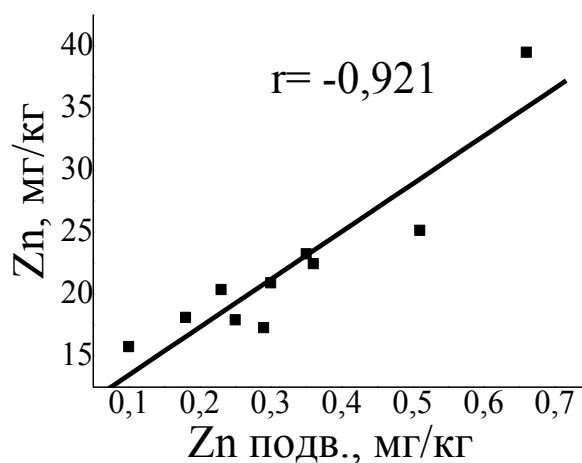


Рисунок 32 – Зависимость содержания цинка в растениях вики от содержания подвижных соединений цинка в почве (Шаврина, Витковская, 2019)

### Основные выводы к главе 3

- 1) В ходе исследования были установлены зависимости между возрастающими дозами доломитовой муки, содержанием элементов в почве и в растениях, а также корреляционные связи между цинком, кальцием и магнием в органах растений. Возрастающие дозы доломитовой муки привели к увеличению содержания магния во всех тестируемых в опыте сельскохозяйственных культурах.
- 2) Взаимодействия Ca-Zn и Mg-Zn в системе почва-растение при внесении различных доз ДМ существенно зависели от видовых особенностей растений.
- 3) Получены данные, свидетельствующие о проявлениях антагонизма между ионами цинка, кальция и магния в системе почва – растение.
- 4) Выявлено, что при известковании почвы доломитовой мукой конкурентные взаимодействия Mg-Zn в системе почва – растение проявляются интенсивнее, чем взаимодействия Ca-Zn (увеличение содержания Mg в почве и растениях оказывало более существенное влияние на содержание Zn в растениях, чем увеличение содержания Ca).

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

Известкование существенно влияет на элементный состав и буферную способность почв и, как следствие – на распределение микроэлементов в системе почва – растение (Витковская, Шаврина, 2017). Влияние органических и минеральных удобрений на накопление макро- и микроэлементов растениями озимой ржи сорта «Славия» изучали в условиях стационарного полевого эксперимента (2015 г.). Опыт был заложен в 2006 г. на территории Меньковского филиала Агрофизического института на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве.

### **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 37. 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 подвижного 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 (Витковская, Шаврина, 2017).

Таблица 37 – Содержание кальция, магния и цинка в почве опыта  
(Витковская, Шаврина, 2017)

Вариант*	pH <sub>KCl</sub>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Орган. вещ-во	Zn кислот. раств	Zn подв.
		$\frac{1}{2}$ ммоль 100 г <sup>-1</sup>		%	мг/кг <sup>-1</sup>	
<b>Парцелла 1 (без органических удобрений)</b>						
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 <sub>70</sub> P <sub>30</sub> K <sub>30</sub>	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 <sub>140</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	5,1±0,1	4,25±0,05	2,34±0,08	3,1±0,3	22,8±0,5	0,29±0,02
<b>Парцелла 2 (навоз КРС, 240 т/га)</b>						
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 <sub>70</sub> P <sub>30</sub> K <sub>30</sub>	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 <sub>140</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	5,8±0,1	5,19±0,04	3,43±0,09	3,8±0,2	27,1±0,5	0,66±0,04
<b>Парцелла 3 (навоз КРС, 680 т/га)</b>						
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 <sub>70</sub> P <sub>30</sub> K <sub>30</sub>	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 <sub>140</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	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.

Согласно градации почв по содержанию микроэлементов (Методические указания..., 2003), почва опыта на всех парцеллах характеризовалась низким (<2 мг/кг<sup>-1</sup>) содержанием подвижных соединений цинка. Повышение содержания подвижного Zn в почве связано с увеличением содержания элемента при внесении органических удобрений. 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 кальция и магния в почве с увеличением органических удобрений линейно увеличивалось (табл. 37). Коэффициенты корреляции по линейной модели составили 0,952 (по Ca<sup>2+</sup>) и 0,789 (Mg<sup>2+</sup>) при критическом значении r на 5% уровне значимости 0,666.

Органические удобрения характеризуются невысокими содержаниями большинства ТМ (Макарова и др., 2002; Гогмачадзе, 2010), однако их регулярное применение может оказать более существенное влияние на накопление примесных элементов в почве, чем внесение минеральных удобрений. Основная причина заключается в том, что суммарное поступление примесных элементов с органическими удобрениями выше, чем с минеральными удобрениями (Витковская, 2013; Витковская, Шаврина, 2017).

Результаты ранее проведенных исследований (Витковская, 2013; Витковская, Хофман, 2013) свидетельствуют о достоверном возрастании валового содержания Zn в пахотной почве по сравнению с нативной. В длительном полевом опыте (МСХА им. Тимирязева) также было установлено (Бушуев, 2006), что при продолжительном совместном внесении NPK и навоза на известкованном фоне валовое содержание цинка в пахотном слое дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы возросло в 1,4 раза по сравнению с контролем (без удобрений).

Кислотно-основные свойства почвы – один из основных факторов, влияющих на содержание подвижных соединений цинка в почве. Известно (Химия тяжелых металлов..., 1985), что уровень pH играет существенную роль в процессах сорбции цинка почвами. При подкислении почвы подвижность данного элемента, как правило, возрастает (Возбуцкая, 1968; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). В данном эксперименте содержание подвижного Zn в почве положительно коррелировало с  $pH_{KCl}$  и содержанием обменных  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  в почве, по линейной модели коэффициенты корреляции ( $r$ ) составили 0,878, 0,918 и 0,805 соответственно (критическое значение  $r$  на 5%-м уровне значимости 0,666). В данном случае возрастание содержания подвижного Zn в почве связано с увеличением содержания элемента вследствие внесения органических удобрений, таблица 37.

#### **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 (табл. 38).

Таблица 38 – Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на накопление цинка растениями озимой ржи, мг/кг а.с.в.

(Витковская, Шаврина, 2017)

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

$$\text{зерно (19±4)} \geq \text{корни (17±3)} > \text{полова (11±7)} > \text{солома (7±3)}$$

Наблюдали существенное увеличение содержания Zn в зерне, соломе и полове растений в вариантах 2,3 парцеллы 1 по отношению к варианту 1. При внесении органических удобрений и известняковой муки (парцеллы 2, 3) внесение минеральных удобрений не оказали существенного влияния на содержание Zn в растениях (Витковская, Шаврина, 2017).

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  $0,666$ ), рисунок 33.

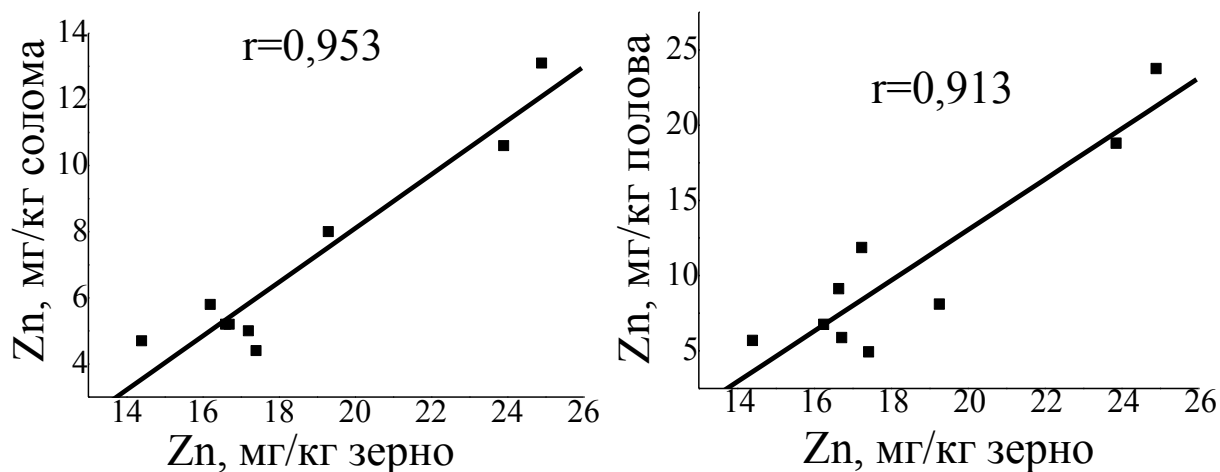


Рисунок 33 – Распределение цинка в надземных органах растений озимой ржи

Комплексным показателем, позволяющим оценивать влияние различных факторов на распределение химических элементов в системе почва-растение является коэффициент накопления (КН), представляющий собой отношение концентраций элемента в растениях к концентрации в почве ( $КН=Cp/Cп$ ). КН цинка растениями рассчитывали по отношению к содержаниям кислоторастворимых и подвижных соединений элемента в почве ( $КН_1$  и  $КН_2$ , соответственно), таблица 39.

Установлено, что применение органических удобрений в сочетании с известкованием оказало существенное влияние на распределение цинка в системе почва - растение. Значения  $КН_1$  цинка зеленой массой растений озимой ржи на парцеллах 2 и 3 снизилось по отношению к парцелле 1 на 42 и 34% соответственно, значения  $КН_2$  – на 68 и 77%, соответственно (Витковская и др., 2017).

Таблица 39 – Коэффициенты накопления (КН<sub>1</sub> и КН<sub>2</sub>) цинка растениями озимой ржи (Витковская, Шаврина, 2017)

Вар	1-й отбор		2-й отбор							
	зеленая масса		зерно		солома		полова		корни	
	КН <sub>1</sub>	КН <sub>2</sub>	КН <sub>1</sub>	КН <sub>2</sub>	КН <sub>1</sub>	КН <sub>2</sub>	КН <sub>1</sub>	КН <sub>2</sub>	КН <sub>1</sub>	КН <sub>2</sub>
<b><i>Парцелла 1 (без органических удобрений)</i></b>										
1. Контроль, б/у	0,7±0,2	60±12	0,8±0,1	68±11	0,24±0,03	20±3	0,58±0,07	47±6	0,8±0,2	62±5
2. N <sub>70</sub> P <sub>30</sub> K <sub>30</sub>	1,01±0,09	64±6	1,1±0,2	71±10	0,5±0,1	32±7	0,9±0,2	56±10	0,8±0,1	54±7
3. N <sub>140</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	1,0±0,1	79±9	1,09±0,2	85±16	0,57±0,05	45±4	1,0±0,1	81±8	0,7±0,1	53±4
<b><i>Парцелла 2 (навоз КРС, 240 т/га)</i></b>										
1. Контроль, б/у	0,45±0,06	17,5±2,2	0,53±0,02	20,5±0,7	0,17±0,02	6,4±0,6	0,29±0,09	11±4	0,7±0,05	28±5
2. N <sub>70</sub> P <sub>30</sub> K <sub>30</sub>	0,48±0,02	20,8±0,8	0,54±0,04	23±2	0,18±0,01	8,0±0,5	0,19±0,07	8±3	0,6±0,03	26±2
3. N <sub>140</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	0,63±0,08	26,0±3	0,71±0,02	29,3±0,9	0,3±0,09	12±3,6	0,3±0,07	12±3	0,4±0,02	18±1
<b><i>Парцелла 3 (навоз КРС, 680 т/га)</i></b>										
1. Контроль, б/у	0,55±0,06	11,7±1,4	0,54±0,02	12±2	0,19±0,02	4,1±0,5	0,22±0,04	4,8±0,9	0,6±0,04	13±2
2. N <sub>70</sub> P <sub>30</sub> K <sub>30</sub>	0,60±0,05	16,2±1,3	0,60±0,07	16±2	0,15±0,04	4,09±1	0,17±0,01	4,6±0,3	0,6±0,05	16±2
3. N <sub>140</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	0,64±0,07	18,7±2,1	0,49±0,02	14,5±0,5	0,16±0,02	4,7±3,6	0,2±0,04	6±1	0,5±0,05	14±3

### 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. 34).

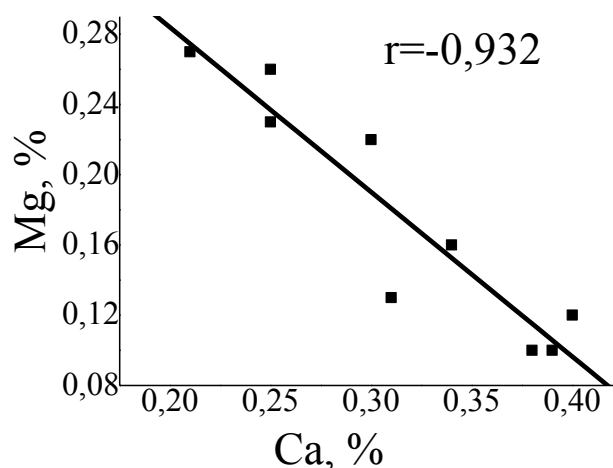


Рисунок 34 – Влияние возрастающих доз кальция в зерне озимой ржи на содержание магния в зерне растений

Содержание Zn в зерне, соломе и полосте 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 полосте 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).

Прослеживалась тенденция снижения магния в корнях с увеличением содержания кальция в корнях растений озимой ржи. Коэффициент корреляции составил 0,653 (при критическом значении  $r$  на 5% уровне значимости 0,632).

В таблице 40 представлены коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость КН цинка растениями озимой ржи от кислотно-основных свойств почвы.

Таблица 40 – Коэффициенты корреляции (r), характеризующие зависимость КН цинка растениями озимой ржи от кислотно-основных свойств почвы (Витковская, Шаврина, 2017)

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

Примечание: КН<sub>1</sub> - по отношению к содержаниям кислоторастворимых соединений Zn в почве; КН<sub>2</sub> - по отношению к содержанию подвижных соединений Zn в почве

Значения коэффициентов накопления цинка растениями озимой ржи (КН<sub>1</sub> и КН<sub>2</sub>) линейно снижались при возрастании содержания органического вещества, реакции почвы и содержания обменных соединений Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> в почве (Витковская и др., 2017).

#### Основные выводы к главе 4

- 1) Систематическое внесение органических удобрений привело к существенному увеличению содержания кислоторастворимых и подвижных соединений цинка в почве. Содержание подвижного Zn в почве тесно коррелировало с содержанием органического вещества (r = 0,956).

- 2) По убыванию содержания цинка органы растений озимой ржи располагаются в ряд: зерно ( $19 \pm 4$ )  $\geq$  корни ( $17 \pm 3$ )  $>$  солома ( $11 \pm 7$ )  $>$  солома ( $7 \pm 3$ ). Содержание цинка в соломе растений озимой ржи сопоставимо с содержанием в зерне.
- 3) Применение минеральных удобрений привело к существенному увеличению содержания цинка в зерне, соломе и соломе растений озимой ржи только в случае, когда внесение органических удобрений и известкование не осуществлялись (парцелла 1).
- 4) Распределение Zn между надземными органами растений тесно взаимосвязано.
- 5) Содержание цинка в зерне, соломе и соломе линейно снижалось с увеличением содержания обменного кальция в почве.
- 6) Выявлено, 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 соломе растений озимой ржи от содержания обменного Mg в почве, составили -0,814; -0,933 и -0,767 соответственно.
- 7) Установлено, что коэффициенты накопления цинка растениями озимой ржи линейно снижались при повышении содержания органического вещества, реакции почвы и содержания обменных соединений  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ . Значения  $\text{KN}_1$  цинка зеленой массой растений на парцеллах 2 и 3 снизились по отношению к парцелле 1 на 42 и 34% соответственно,  $\text{KN}_2$  – на 68 и 77% соответственно.

## 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<sup>-1</sup>. Максимальная скорость увеличения содержания обменного Mg составила  $0,002 \frac{1}{2}$  ммоль/100 г ·сут<sup>-1</sup> почвы при внесении ДМ в дозах 0,6-1,5 Нг. Установлено, 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.
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

мость 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 (коэффициенты корреляции варьировались в пределах 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 (ви-коовсяная 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 ( $19\pm 4$ )  $\geq$  корни ( $17\pm 3$ )  $>$  солома ( $11\pm 7$ )  $>$  солома ( $7\pm 3$ ). Содержание цинка в соломе 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(солома) и Zn(солома) – Zn(солома) 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  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в почве. Значения  $\text{KN}_1$  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  $\text{KN}_2$  – на 68 и 77%, соответственно.

## Список литературы

1. Абрамова, М.М. Толковый словарь по почвоведению [Текст] / М.М. Абрамова, Л.Н. Александрова, Я.М. Аммосова. – М.: Наука, 1975. – 288 с.
2. Авдонин, Н.С. Научные основы применения удобрений [Текст] / Н.С. Авдонин. – М.: Колос, 1972. – 320 с.
3. Авцын, П.А. Микроэлементозы человека: этиология, классификация, органопатология [Текст] / П.А. Авцын, А.А. Жаворонков, М.А. Риш [и др.]. – М.: Медицина, 1991. – 496 с.
4. Агрохимия / Под ред. Б.А. Ягодина. – 2-е издание, перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1989. – 639 с.
5. Алексеев, Ю. В. Тяжелые металлы в агроландшафте [Текст] / Ю.В. Алексеев. – СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2008. – 216 с.
6. Алексеенко, В.А. Экологическая геохимия [Текст] / В.А. Алексеенко. – М.: Химия, 2000. – 627 с.
7. Алексеенко, В.А., Цинк и кадмий в окружающей среде [Текст] / В.А. Алексеенко, Л.В. Алещукин, Л.Е. Беспалько. – М.: Наука, 1992. – 200 с.
8. Анисимов, В.С. Исследование миграционной способности Zn в системе дерново-подзолистая почва – кормовые бобы в условиях вегетационного опыта [Текст] / В.С. Анисимов, Л.Н. Анисимова, Л.М. Фригидова, Ю.Н. Корнеев, Р.А. Фригидов, А.И. Санжаров, Д.В. Дикарев, И.В. Кочетков // Агрохимия. – 2019. – №3. – С. 72 – 84.
9. Аристархов, А.Н. Оптимизация питания растений и применения удобрений в агроэкосистемах [Текст] / А.Н. Аристархов. – М.: ЦИНАО, 2000. – 524 с.
10. Аштаб, И.В. Взаимодействие цинка с другими элементами как показатель его экологической активности [Текст] / И.В. Аштаб // Агрохимия. – 1994. – №11. – С. 114 – 128.
11. Афанасьев, Р.А. Магний в системе почва – растение – животное [Текст] / Р.А. Афанасьев // Плодородие. – 2005. – №5 (26). – С. 19 – 21.

12. Бадтиев, Ю.С. Биомониторинг экологической обстановки [Текст] / Ю.С. Бадтиев. – Владикавказ, 2009. – 297 с.
13. Балезина, О.П. Кальций многоликий [Текст] / О.П. Балезина // Природа. – 2012. – №9. – С. 14 – 21.
14. Барбер, С.А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход [Текст] / С.А. Барбер. – М.: Агропромиздат, 1988. – 376 с.
15. Бацевич, В.А. Концентрации цинка в волосах и их взаимосвязь с развитием ряда морфологических признаков у детей и подростков [Текст] / В.А. Бацевич, Д.Ю. Зорина // Антропология. Вестник Московского университета. 2009. – Серия XXIII – №3. – С. 37 – 46.
16. Безуглова, О.С. Биогеохимия [Текст] / О.С. Безуглова, Д.С. Орлов. – Ростов-на-Дону, 2000. – 320 с.
17. Биккинина, Л.М.-Х. Известкование на различных фонах туков [Текст] / Л.М.-Х. Биккинина, Е.И. Ломако, В.О. Ежков, Р.Р. Газизов, И.М. Суханова, М.М. Ильясов, А.А. Лукманов // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. – 2017. – №4. – С. 18 – 21.
18. Битюцкий, Н.П. Микроэлементы и растение [Текст] / Н.П. Битюцкий. – СПб.: Изд-во Санкт.-Петербур. ун-та, 1999. – 232 с.
19. Битюцкий, Н.П. Минеральное питание растений [Текст] / Н.П. Битюцкий. – СПб.: изд-во С.-Петербур. ун.-та., 2014. – 540 с.
20. Бодеева, Е.А. Cu, Zn и Ni в каштановых почвах Бурятии [Текст] / Е.А. Бодеева, Г.Д. Чимитдоржиева // Агрохимический вестник. – 2012. – №1. – С. 38 – 42.
21. Бублик, Е.С. Элементы здоровья – кальций и магний [Текст] / Е.С. Бублик, А.В. Ткаченко, В.А. Калинина // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – №11 (4). – С. 641 – 642.
22. Бурдуковкий, М.Л. Влияние длительной химизации почв юга Дальнего Востока на биологический круговорот и содержание макро- и микроэлементов

[Текст] / М.Л. Бурдуковский. Дис... канд. биол. наук. – Владивосток, 2014. – 135 с.

23. Бурчинский, С.Г. Проблемы дефицита магния в организме: методы фармакологической коррекции [Текст] / С.Г. Бурчинский // Здоровье Украины. – 2005. – №2. – С. 56.

24. Бушуев, Н.Н. Влияние применения минеральных удобрений, навоза и извести на содержание тяжелых металлов в почвах длительных полевых опытов [Текст] / Н.Н. Бушуев // Материалы конф. «Роль природообустройства в обеспечении устойчивого функционирования и развития экосистем». – М.: МГУП. – 2006. – С. 81 – 88.

25. Быстрова, Н.А. Роль микроэлементов в биохимических процессах. Учебное пособие по биологической химии для студентов лечебного, педиатрического, медико-профилактического, фармацевтического, стоматологического и биотехнологического факультетов [Текст] / Н.А. Быстрова, А.И. Конопля, Д.Л. Шушкевич, А.Ю. Анохин. – Курск: КГМУ, 2013. – 47с.

26. Важенин, И.Г. О нормировании загрязнённости почвы выбросами промышленных предприятий [Текст] / И.Г. Важенин // Химия в сельском хозяйстве. – 1985. – Т. 23. – №6. – С. 42 – 45.

27. Вальков, В.Ф., Экология почв: Учебное пособие для студентов вузов. Часть 3. Загрязнение почв / В.Ф. Вальков, К.Ш. Казеев, С.И. Колесников. – Ростов-на-Дону: УПЛ РГУ, 2004. – 54 с.

28. Васильева, Г.Г. Физиологическая роль кальция при бобово-ризобиальном симбиозе [Текст] / Г.Г. Васильева, А.А. Ищенко, А.К. Глянько // Журнал стресс-физиологии и биохимии. – 2011. – №4. – Т. 7. – С. 398 – 414.

29. Вильдфлуш, И.Р. Эффективность применения микроудобрений и регуляторов роста при возделывании сельскохозяйственных культур [Текст] / И.Р. Вильдфлуш. – Минск: Беларус. наука, 2011. – 293 с.

30. Виноградов, А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах [Текст] / А.П. Виноградов. – Изд. АН ССР., 1957. – 238 с.

31. Витковская, С.Е. Взаимодействие радиосурьмы и фосфора в системе почва-растение [Текст] / С.Е. Витковская. Дисс...канд. биол.наук. Обнинск, 1996 – 171 с.

32. Витковская, С.Е. Влияние инокуляции семян гороха и ячменя клубеньковыми бактериями в комплексе с ассоциативными диазотрофами на поступление в растения фосфора-33 и сурьмы-125 [Текст] / С.Е. Витковская, В.Ф. Дричко, Г.А. Воробейков, Т.А. Мирюгина // Агрохимия. – 1998. – №3. – С. 49 – 52.

33. Витковская, С.Е. Поступление  $^{125}\text{Sb}$  в растения яровой пшеницы при различных уровнях обеспеченности фосфором (опыты с водной и почвенной культурами) [Текст] / С.Е. Витковская, В.Ф. Дричко // Агрохимия. – 2001. – №5. – С. 70 – 75.

34. Витковская, С.Е. Влияние компоста из твердых бытовых отходов на урожай зерновых культур и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы [Текст] / С.Е. Витковская, В.Ф. Дричко // Агрохимия. – 2004. – №6. – С. 35 – 41.

35. Витковская, С.Е. Агроэкологические основы использования биотермически переработанных твердых бытовых отходов для повышения плодородия кислых почв [Текст] / С.Е. Витковская. Дис. ...док. биол. наук. СПб., 2006. – 249 с.

36. Витковская, С.Е. Методы оценки неоднородности почвенного покрова при планировании и проведении полевых опытов [Текст] / С.Е. Витковская. – СПб: АФИ, 2011. – 52 с.

37. Витковская, С.Е. Неоднородность роста и развития растений ячменя в условиях полевых и модельных экспериментов [Текст] / С.Е. Витковская, Е.В. Шестакова // Агрохимия. – 2012. – №4. – С. 51 – 59.

38. Витковская, С.Е. Оценка риска загрязнения агроэкосистем тяжелыми металлами [Текст] / С.Е. Витковская // Агрохимия. – 2013. – №11. – С. 78 – 85.

39. Витковская, С.Е. Оценка экологического состояния агроэкосистем (на примере полевого опыта) [Текст] / С.Е. Витковская, О.В. Хофман // Вестник СПбГУ. – 2013. – Сер. 3. – Вып. 1. – С.103 – 113.

40. Витковская, С.Е. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на поведение тяжелых металлов в системе почва-растение [Текст] / С.Е. Витковская, О.Н. Яковлев, А.С. Оглуздин, В.И. Дубовицкая // Проблемы агрохимии и экологии. – 2014. – №3. – С. 31 – 34.

41. Витковская, С.Е. Изменение строения профиля и агрохимических параметров дерново-подзолистой почвы при окультуривании [Текст] / С.Е. Витковская, А.И. Иванов, П.А. Филиппов // Агрохимия. – 2014. - №7. – С. 9 – 16.

42. Витковская, С.Е. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой почвы [Текст] / С.Е. Витковская, О.Н. Яковлев, К.Ф. Шаврина // Агрохимия. – 2016. – №7. – С. 3 -11.

43. Витковская, С.Е. Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на распределение цинка в системе «дерново-подзолистая почва – растения озимой ржи» [Текст] / С.Е. Витковская, К.Ф. Шаврина // Агрофизика. – 2017. – №3. – С. 4 - 12.

44. Витковская, С.Е. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение марганца и железа в системе почва-растение [Текст] / С.Е. Витковская, О.Н. Яковлев // Агрохимия. – 2017. – №11. – С. 44 - 51.

45. Витковская, С.Е. Продуктивность растений ячменя и взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва-растение при нейтрализации почвенной кислотности доломитовой мукой [Текст] / С.Е. Витковская, К.Ф. Шаврина, О.Н. Яковлев // Агрохимия. – 2020. – №1. – С. 50 – 57.

46. Витковская, С.Е. Динамика кислотности дерново-подзолистой почвы в зависимости от дозы известкового мелиоранта [Текст] / С.Е. Витковская, К.Ф. Шаврина // Агрофизика. – 2021. – №1. – С. 1 - 6.

47. Власюк, П.А. Биологические элементы в жизнедеятельности растений / П.А. Власюк. – Киев: Наукова думка, 1969. – 630 с.

48. Водяницкий, Ю.Н. Формы цинка в загрязненных почвах (обзор литературы) [Текст] / Ю.Н. Водяницкий // Почвоведение. – 2010. – №3. – С. 293–302.

49. Воеводина, Л.А. Магний для почвы и растений [Текст] / Л.А. Воеводина, О.В. Воеводин // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2015. – №2 (18). – С. 70 – 81.
50. Возбуцкая, А.Е. Химия почвы / А.Е. Возбуцкая. – М.: Высш.шк., 1968. – 429 с.
51. Войтюк, Е.А. Аккумуляция тяжелых металлов в почве и растениях в условиях городской среды: на примере г. Чита [Текст] / Е.А. Войтюк. Дис... канд. биол. наук. – Чита, 2011. – 143 с.
52. Волоотовский, И.Д. Роль ионов кальция в процессах фотосигнализации в растительной клетке [Текст] / И.Д. Волоотовский // Биофизика. – 2011. - Вып. 5. – С. 800 – 812.
53. Воропаев, В.Н. Цинк в почвах и растениеводческой продукции стационарного опыта [Текст] / В.Н. Воропаев, О.М. Пашкова // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2009. – №2. – С. 31 – 35.
54. Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I – IV групп / Справ. изд. Л.: Химия, 1988. – 512 с.
55. Гармаш, Н.Ю. Устойчивость пшеницы и конских бобов к тяжелым металлам [Текст] / Н.Ю. Гармаш // Изв. СО АН СССР. Сер. Биол. науки. – 1985. – Т. 1. – №6. – С. 92 – 97.
56. Гедройц, К.К. Учение о поглотительной способности почв / К.К. Гедройц. – Гос. изд-во с/х и колх. кооперативной литературы. М., Л., 1932. – 203 с.
57. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2511-09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 10 с.
58. Глунцов, М.Н. Агрохимическая лаборатория овощевода [Текст] / М.Н. Глунцов. – М.: Росагропромиздат, 1989. – 192 с.
59. Гогмачадзе, Г.Д. Агроэкологический мониторинг почв и земельных ресурсов Российской Федерации / Предисл. и общ. ред. Д. М. Хомякова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2010 – 592 с.

60. Горбатов, В.С. О выборе экстрагента для вытеснения из почв обменных катионов тяжелых металлов [Текст] / В.С. Горбатов, Н.Г. Зырин // Вестник МГУ. 1987. – Почвоведение. Сер. 17. – Ч. 2. – №2. – С. 22 – 26.

61. Горбатов, В.С. Динамика трансформации малорастворимых соединений цинка, свинца и кадмия в почвах [Текст] / В.С. Горбатов, А.И. Обухов // Почвоведение. – 1989. – №6. – С. 129 – 133.

62. Горбылева, Т.П. Медь и цинк как токсин и макроэлемент в пищевых продуктах [Текст] / Т.П. Горбылева // Актуальные проблемы транспортной медицины. – 2009. – №4 (18). – С. 84 – 87.

63. ГОСТ 26487-85. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО. Введ. 26.03.85 // Сборника государственных стандартов. Разработаны Мин. сел. хоз-ва СССР. М.: Изд-во стандартов, 1985. – С. 21 – 33.

64. Григорьев, Н.А. Распределение масс магния и кальция в верхней части континентальной коры [Текст] / Н.А. Григорьев // Уральский геологический журнал. – 2006. – №5 (53). – С. 21 – 38.

65. Громова, О.А. Значение дефицита кальция в педиатрии и пути его коррекции [Текст] / О.А. Громова // Вопросы современной педиатрии. – 2007. – Т.6. – №2. – С. 82 – 87.

66. Гэлстон А., Жизнь зеленого растения: пер. с англ. [Текст] / А. Гэлстон, П. Девис, Р. Сэттер. – М.: Мир, 1983. – 552 с.

67. Дабахов, М.В. Экоотоксикология и проблемы нормирования [Текст] / М.В. Дабахов, Е.В. Дабахова, В.И. Титова. – Нижегородская гос. с.-х. академия. Н. Новгород: Изд-во ВВАГС, 2005. – 165 с.

68. Добровольский, В.В. География микроэлементов: глобальное рассеяние [Текст] / В.В. Добровольский. М.: Мысль, 1983. – 272 с.

69. Добровольский, В.В. Основы биогеохимии [Текст] / В.В. Добровольский. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 400 с.



70. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б.А. Доспехов. – М.: АГРОПромиздат, 1985. – 351 с.

71. Дричко, В.Ф. Сорбционная модель поступления радионуклидов из почвы в растения [Текст] / В.Ф. Дричко, В.В. Цветкова // Почвоведение. – 1990. – С. 35 – 40.

72. Дричко, В.Ф. Математическая модель накопления радионуклидов и тяжелых металлов растениями из почвы [Текст] / В.Ф. Дричко, М.А. Ефремова, А.А. Изосимова // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2009. – Т. 49. – №2. – С. 166 – 171.

73. Дъери, Д. Особенности динамики марганца, кобальта, меди, цинка и молибдена в системе почва-растение [Текст] / Д. Дъери, Н.Г. Зырин // Агрохимия. – 1965. – №2. – С. 87 – 97.

74. Егорова, Е.В. Влияние кадмия, меди и цинка на содержание углеводов и форм азота в ячмене на удобренной дерново-подзолистой почве [Текст] / Е.В. Егорова // Проблемы агрохимии и экологии. – 2008. – №4. – С. 39 – 41.

75. Ершова, О.Б. Кальций и витамин D: все ли мы о них знаем? [Текст] / О.Б. Ершова, К.Ю. Белова, А.В. Назарова // Ревматология. Медицинский журнал. – 2011. – Т.19. – №12. – С. 719 – 724.

76. Ефимов В.Н.,. Применение микроэлементов при выращивании с/х культур (овощные, кормовые корнеплоды, многолетние травы) на почвах Северо-запада Нечерноземной зоны РСФСР [Текст] / В.Н. Ефимов, В.Г. Калиниченко, М.Л. Горлова: Уч. пособ. – Л.: ЛГАУ, 1991. – 36 с.

77. Журавлева, Е.А. Роль цинка и меди в микронутриентном статусе новорожденного [Текст] / Е.А. Журавлева, Е.Н. Каменская, Е.А. Бульина // Медицинская экология. – 2007. – №11. – С. 23 – 28.

78. Журова, В.Г., Изучение влияния ионов калия, кальция и магния на рост и развитие растений [Текст] / В.Г. Журова, М.С. Светличная // Достижения науки и образования. – 2018. – №14 (36). – С. 13 – 15.

79. Забелина, В.Д. Микроэлементы и микроэлементозы. Похвальное слово о меди [Текст] / В.Д. Забелина // Consilium Provisorum. – 2005. – Т. 5. – №6. – С. 45 – 51.

80. Зарецкая, Г.Н., Определение содержания кальция, магния и кадмия в водных вытяжках из почвы пригородов г.Южно-Сахалинска / Г.Н. Зарецкая, А.М. Богута, О.В. Карпова // Фундаментальные исследования. – 2006. – №8. URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=5286> (дата обращения: 13.04.2020).

81. Зборищук, Ю.Н. Кларки концентраций физиологически важных микро-элементов в почвах [Текст] / Ю.Н. Зборищук // Вестник Моск. ун-та Сер. Почвовед. – 1977. – №4. – С. 31 – 48.

82. Зырин, Н.Г. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах [Текст] / Н.Г. Зырин, Л.К. Садовникова. – М.: изд-во Моск. ун-та, 1985. – 208 с.

83. Иванов, А.И. Отзывчивость картофеля на удобрение и потери урожая от фитофтороза в условиях Севера-Запада России [Текст] / А.И. Иванов, Ж.А. Иванова, О.И. Якушева, П.А. Филиппов // Картофель и овощи. – 2019. – №8. – С. 23-26.

84. Ильин, В.Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение [Текст] / В.Б. Ильин. – Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1991. – 151 с.

85. Ильин, В.Б. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области [Текст] / В.Б. Ильин, А.И. Сысо.– Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 229 с.

86. Илларионова, Е.А. Химико-токсикологический анализ тяжелых металлов: учебное пособие [Текст] / Е.А. Илларионова, И.П. Сыроватский. – Иркутск: ИГМУ, 2016. – 58 с.

87. Исидоров В.А. Введение в химическую экотоксикологию: Учеб. пособие [Текст] / Исидоров В.А. – СПб.: Химиздат, 1999. – 144 с.

88. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях [Текст] / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас – М.: Мир, 1989. – 439 с.

89. Казнина, Н.М. Влияние цинка на продуктивность ярового ячменя в вегетационном опыте [Текст] / Н.М. Казнина, А.Ф. Титов, Г.Ф. Лайдинен, Ю.В. Батова // *Агрохимия*. – 2010. – №8. – С. 72 – 76.
90. Каталымов, М.В. Микроэлементы и удобрения [Текст] / М.В. Каталымов. – М.: изд-во «Химия», 1965. – 332 с.
91. Кашин, В.К. Цинк в почвах Забайкалья [Текст] / В.К. Кашин, Г.М. Иванов // *Почвоведение*. – 1999. – №3. – С. 318 – 325.
92. Кершбергер, М., Азот для почвы важен. А кальций? [Текст] / М. Кершбергер, Т. Пройскер // *Новое сельское хозяйство*. – 2007. – №4. – С. 68 – 70.
93. Кирейчева, Л.В. Методы детоксикации почв, загрязненных тяжелыми металлами [Текст] / Л.В. Кирейчева // *Почвоведение*. – 1995. – №7. – С. 892 – 896.
94. Клебанович, Н.В. Известкование почв Беларуси [Текст] / Н.В. Клебанович, Г.В. Василюк. – Мн.: БГУ, 2003. – 322 с.
95. Клышевская, С.В. Изменения содержания микроэлементов в почвах при агломерации [Текст] / С.В. Клышевская // *Вестник КрасГАУ*. 2010. – №10. – С. 45 – 48.
96. Ковальский, В.В. Микроэлементы в почвах СССР [Текст] / В.В. Ковальский, Г.А. Андрианова. – М.: Наука, 1970. – 419 с.
97. Ковда, В.А. Основы учения о почвах: в 5 т. [Текст] / В.А. Ковда. – М.: Наука, 1973. – Т. 2. – 468 с.
98. Кожуро, И.А. Содержание магния [Текст] / И.А. Кожуро, М.Ю. Швядайте, А.И. Антанайтис, Л.П. Крегждайте, В.В. Лапа, Э.И. Раудвяли, А.М. Сиренди // *Оптимальные параметры плодородия почв*. – М.: Колос.1984. – С. 162 – 171.
99. Колесниченко, Л.С., Биологическая роль макроэлементов – Mg, Ca, P (лекция 3) [Текст] / Л.С. Колесниченко, В.И. Кулинский // *Сибирский медицинский журнал (Иркутск)*. – 2004. – №6. – Т. 47. – С. 96 – 99.
100. Коломиец, Н.Э. Растения как источники элементов, необходимых для здоровья костей и суставов [Текст] / Н.Э. Коломиец, Т.В. Полуэктова, Н.Ю. Абрамец, И.В. Федько, И.М. Смолякова, С.Н. Авдеенко // *Фундаментальные исследования*. 2014. – № 8. – С. 1635 – 1639.

101. Комиссарова, В.С. Влияние последствия известкования на продуктивность культур пятой ротации севооборота и содержание подвижных форм фосфора и калия в пахотном слое светло-серой лесной почвы [Текст] / В.С. Комиссарова, Л.Д. Варламова // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – №2 (18). – С. 10 – 15.
102. Коновалова, О.Н. Формы нахождения тяжелых металлов в почвенно-растительном покрове г. Архангельска [Текст] / О.Н. Коновалова. Дис... канд. хим. наук. – Архангельск, 2018. – 202 с.
103. Коровина, Н.А. Коррекция дефицита витаминов и микроэлементов у детей [Текст] / Н.А. Коровина, И.Н. Захарова, А.Л. Заплатников, Е.Г. Обычная // Медицинский совет. – 2013. – №8. – С. 94 – 98.
104. Косарев, В.В. Профессиональные болезни: Учеб. пособие [Текст] / В.В. Косарев, С.А. Бабанов. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 252 с.
105. Костылева, М.Н. Место препаратов, содержащих кальций в профилактике гипокальциемии у детей (обзор литературы) [Текст] / М.Н. Костылева // Русский медицинский журнал. – 2008. – №25. – Том 16. – С. 1699 – 1703.
106. Котова, С.М. Формирование скелета у детей и подростков в норме и патологии [Текст] / Н.А. Карлова, И.М. Максимцева и др. – СПб. – 2002. – 49 с.
107. Кошелев, Ю.А. Влияние агрохимических средств на плодородие чернозема выщелоченного и состояние тяжелых металлов в почве и растениях [Текст] / Ю.А. Кошелев. Дис... канд. с/х наук. – Воронеж, 2009. – 315 с.
108. Кудрявцева, Е.А. Экологическая оценка содержания цинка в экосистеме на территории Оренбургской области [Текст] / Е.А. Кудрявцева, Е.В. Сальникова, С.Н. Кузьмин, А.С. Кустова, А.М. Мирошников // Вестник ОГУ. 2012. – №10 (146). – С. 153 – 155.
109. Кузнецов, В.В. Физиология растений [Текст] / В.В. Кузнецов, Г.А. Дмитриева. – М.: Высш. шк., 2006. – 742 с.
110. Кук, Дж.У. Регулирование плодородия почв [Текст] / Дж.У. Кук. – М.: Колос, 1970. – 520 с.

111. Куликов, Ю.А. Тяжелые металлы – миграция в системе почва-растение и влияние на потери основных элементов питания из дерново-подзолистой почвы и урожай амаранта [Текст] / Ю.А. Куликов, А.С. Галиуллина // Ученые записки Казанского государственного университета. – 2006. – т.148. – кн. 4. – С. 90 – 99.

112. Кундлер, П. Минеральные удобрения [Текст] / Х. Ансорге, В. Митцель и др. / перевод с нем. Н.С. Корогодова и Г.П. Шульцева. – М.: Колос, 1975.– 400 с.

113. Литвинович, А.В. Моделирование изменений химического состава зеленой массы гречихи при возрастающих дозах калийных удобрений [Текст] / А.В. Литвинович, В.Ф. Дричко // Агрофизика. – 2012. – №1. – С. 26-34.

114. Литвинович, А.В. Продолжительность действия известковых мелиорантов в почвах и эффективность известкования [Текст] / А.В. Литвинович, З.П. Небольсина // Агрохимия. – 2012. – № 10. – С. 79 – 94.

115. Литвинович, А.В. Миграционная подвижность органического вещества и Са в дерново-подзолистой супесчаной почве, произвесткованной различными дозами мела [Текст] / А.В. Литвинович, О.Ю. Павлова, В.М. Буре // Агрохимия. – 2020. - №8. – С. 3 – 12.

116. Лихочвор, В. Роль кальция и магния при интенсивном земледелии [Текст] / В. Лихочвор, А. Демчишин // "Пропозиція". – 2016. – №1.; URL: <https://propozitsiya.com/rol-kalciya-i-magniya-pri-intensivnom-zemledelii>

117. Лукьянчиков, В.С. Кальций: физиология. Онтогенетический и клинический аспект [Текст] / В.С. Лукьянчиков // Новые исследования.– 2012. – №2 (31). – С.5 – 13.

118. Магницкий, К.П. Магниеые удобрения [Текст] / К.П. Магницкий. – М.: Колос, 1967. – 200 с.

119. Мазаева, М.М. Магниевое питание растений и магниевые удобрения [Текст] / М.М. Мазаева. Автореф. дис... докт. с.-х. наук. Москва, 1967. – 42 с.

120. Макарова, В.Г. Экологические и медико-социальные аспекты охраны природной среды и здоровья населения [Текст] / В.Г. Макарова, А.Р. Цыганов, Ю. А. Мажайский. – Минск: БИТ «Хата», 2002. – 286 с.

121. Мальцев, С.В. Нарушение баланса цинка при хроническом гастродуодените у детей [Текст] / С.В. Мальцев, Р.А. Файзуллина // Педиатрия. – 2002. – №3. – С. 49 – 51.
122. Марков, Ю.И. // Бюллетень экспериментальной биологии [Текст] / Ю.И. Марков, Н.И. Берзинь, А.Р. Вальдман. – 1992. –Т. 113. – № 3. – С. 324 – 327.
123. Медведев, К.К. Кальциевая сигнальная система [Текст] / К.К. Медведев // Физиология растений. – 2005. – №52 (2). С. – 282 – 305.
124. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. – М., 2003. – 195 с.
125. Минеев, В.Г. Экологические проблемы агрохимии [Текст] / В.Г. Минеев. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 282 с.
126. Минеев, В.Г. Биологическое земледелие и минеральные удобрения [Текст] / В.Г. Минеев, Д. Добрецени, Т. Мазур. – М.: Колос, 1993. – 415 с.
127. Минеев В.Г. Агрохимия Учебник. - 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / В.Г. Минеев. – М.: Изд-во МГУ, Изд-во «Колос», 2004. – 720 с.
128. Минкина Т.М. Соединения тяжелых металлов в почвах Нижнего Дона, их трансформация под влиянием природных и антропогенных факторов [Текст] / Т.М. Минкина. Дис... докт. биол. наук. Ростов н/д, 2008. – 441 с.
129. Митрофанова, Е.М. Кальций и магний в дерново-подзолистых почвах Предуралья [Текст] / Е.М. Митрофанова // Аграрный вестник Урала. – 2011. – №2 (81). – С. 9 – 11.
130. Митрофанова, Е.М. Роль агрохимических приемов в снижении кислотности дерново-подзолистых почв Предуралья [Текст] / Е.М. Митрофанова // Аграрный вестник Урала. – 2012. – №5 (97). – С. 8 – 10.
131. Михайлова, Л.А. Удобрение и диагностика минерального питания плодово-ягодных культур: учебное пособие [Текст] / Л.А. Михайлова, М.Г. Субботина, М.А. Алёшин. – Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2019. – 247 с.
132. Мотылева, С.М. Особенности содержания биогенных элементов в плодах и ягодах [Текст] / С.М. Мотылева // Современные тенденции науки и технологий. – 2015. – №2-1. – С. 128 – 131.

133. Мотузова, Г.В. Экологический мониторинг почв: учебник [Текст] / Г.В. Мотузова, О.С. Безуглова. – М.: Академический проект; Гаудеамус, 2007. – 237 с.
134. Мухина, Ю.Г. Клиническое значение нарушений метаболизма цинка [Текст] / Ю.Г. Мухина, С.О. Ключников, О.К. Нетребенко [и др.] // Авторские лекции по педиатрии. – Москва. – 2005.
135. Небольсин, А.Н. Теоретические основы известкования почв [Текст] / А.Н. Небольсин, З.П. Небольсина. – СПб. ЛНИИСХ, 2005. – 252 с.
136. Небольсин, А.Н. Известкование почв (рез-ты 50-летних полевых опытов) [Текст] / А.Н. Небольсин, З.П. Небольсина. – ГНУ ЛНИИСХ Россельхозакадемии, 2010. – 241 с.
137. Нечаева, Т.В. Магний в почвах и растениях в условиях склонового агроландшафта на юго-востоке Западной Сибири [Текст] / Т.В. Нечаева, Н.В. Гопп, О.А. Савенков, Н.В. Смирнова // Почвы и окружающая среда. 2019. – №2 (4). URL <https://soils-journal.ru/index.php/POS/issue/view/8/14>.
138. Нуриев, С.Ш. Кислотность почв и баланс кальция и магния в земледелии Республики Татарстан [Текст] / С.Ш. Нуриев, В.З. Шакиров, А.А. Лукманов // Агрехимический вестник. – 2006. – № 3. – С. 3 – 4.
139. Овчаренко, М.М. Тяжелые металлы в системе «почва-растение» [Текст] / М.М. Овчаренко. – М., 1997. – 290 с.
140. Окорков, В.В., Механизмы взаимодействия извести и гипса с поглощающим комплексом кислых почв [Текст] / В.В. Окорков, Л.А. Окоркова // Российская сельскохозяйственная наука. – 2013. – №3. – С. 39 – 43.
141. Орлов, Д.С. Химия почв: Учебник / Д.С. Орлов, Л.К. Садовникова, Н.И. Суханова. – М.: Высш. шк., 2005. – 558 с.
142. Отчет о научно-исследовательской работе. В условиях микрополевого эксперимента установить зависимость кислотно-основных свойств дерново-подзолистой почвы, урожайности и химического состава сельскохозяйственных культур от дозы химического мелиоранта / Витковская С.Е. – СПб. АФИ, 2014. – 21 с.

143. Отчет о научно-исследовательской работе. В условиях многолетнего микрополевого эксперимента установить закономерности динамики кислотно-основных свойств дерново-подзолистой почвы в зависимости от дозы мелиоранта / Витковская С.Е., Шаврина К.Ф. – СПб. АФИ, 2015. – 12 с.

144. Отчет о научно-исследовательской работе. В условиях многолетнего микрополевого эксперимента установить закономерности поведения тяжелых металлов в системе почва-растение в зависимости от дозы мелиоранта / Витковская С.Е., Шаврина К.Ф. – СПб. АФИ, 2016. – 32 с.

145. Отчет о научно-исследовательской работе. В условиях многолетнего микрополевого эксперимента установить закономерности взаимодействий Ca-Zn и Mg-Zn в системе почва-растение в зависимости от дозы мелиоранта / Витковская С.Е., Шаврина К.Ф. – СПб. АФИ, 2017. – 31 с.

146. Отчет о научно-исследовательской работе. В условиях многолетнего микрополевого эксперимента изучить закономерности изменения содержания кальция и магния в различных видах сельскохозяйственных культур в зависимости от дозы известкового мелиоранта / Витковская С.Е., Шаврина К.Ф. – СПб. АФИ, 2020. – 17 с.

147. Пейве, Я.В. Микроэлементы в растениеводстве [Текст] / Я.В. Пейве. – изд. Латв ССРС, 1958. – 45 с.

148. Переверзев, В.Н. Динамика легкорастворимого и обменного кальция в окультуренных подзолистых почвах Мурманской области [Текст] / В.Н. Переверзев, Е.А. Кошлева, М.М. Логвинова // Агрохимия. 1997. – №5. – С. 28 – 31.

149. Пигарова, Е.А. Синдром хронической усталости: современные представления об этиологии [Текст] / Е.А. Пигарова, А.В. Плещеева, Л.К. Дзеранова, Л.Я. Рожинская // Журнал ожирение и метаболизм. – 2010. – Вып. №3. – С. 46 – 48.

150. ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011. Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами. – М., 2011. – 39 с.



151. Полномочнов, А.В. Горох – проблемы и перспективы увеличения семенной и кормовой продуктивности в Иркутской области [Текст] / А.В. Полномочнов, Бажанов Ю.С. // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2006. – №10. – С. 121 – 124.

152. Попова, Л.Ф. Трансформация подвижных форм цинка в почвах г. Архангельска [Текст] / Л.Ф. Попова, О.Н. Репницына, М.В. Никитина // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. – 2010. – №4. – С. 65 – 71.

153. Попова, В.И. О зонально-секториальном распределении стабильных изотопов кальция в минералах [Текст] / В.И. Попова, В.Т. Тимошин // Уральский минералогический сборник. – 1997. – №7. – С. 99 – 107.

154. Прокошев, В.В. Магниевые удобрения в интенсивном земледелии [Текст] / В.В. Прокошев, О.В. Неугодова, Ю.А. Смирнов, З.И. Государева. – М.: ВНИИТЭИагропром, 1987. – 53 с.

155. Прохоров, В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах: физикохимические механизмы и моделирование. Под ред. Р.М. Алексахина. [Текст] / В.М. Прохоров. – М.: Энергоиздат, 1981. – 99 с.

156. Прохорова, Н.В. Аккумуляция тяжелых металлов дикорастущими и культурными растениями в лесостепном и степном Поволжье [Текст] / Н.В. Прохорова, Н.М. Матвеев, В.А. Павловский. – Самара: Изд-во Самарского университета, 1998. – С. 46–48.

157. Раскатов, А.В. Агроэкологические аспекты транслокации тяжелых металлов в почве и растениях: на примере дерново-подзолистых почв Ивановской области [Текст] / А.В. Раскатов. Дис... канд. с/х наук. - Москва, 2000. - 175 с.

158. Ребров, В.Г. Витамины и микроэлементы [Текст] / В.Г. Ребров, О.А. Громова. – М.: АЛЕВ–В, 2003. – 670 с.

159. Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов [Текст] / Рос. акад. мед. наук. Ин-т питания.– М.: Брандес: Медицина, 1998. – 341 с.

160. Рустембекова, С.А. Микроэлементозы и факторы экологического риска [Текст] / С.А. Рустембекова, Т.А. Барабошкина. – М.: Университетская книга. Логос, 2006. – 112 с.

161. Сальникова, Е.В. Цинк – эссенциальный микроэлемент (обзор) [Текст] / Е.В. Сальникова // Вестник ОГУ (Оренбургского государственного университета). – 2012. – №10 (146). – С. 170 – 172.

162. Сальникова, Е.В., Экологическая оценка содержания цинка в экосистеме (почва, вода, продукты питания) на территории Оренбургской области [Текст] / Е.В., Сальникова, Т.И. Бурцева, Е.А. Кудрявцева, А.С. Кустова // Вестник ОГУ. 2012. – №6 (142). – С. 184 – 187.

163. Сальникова, Е.В. Экологическая оценка распределения цинка на территории Оренбургской области [Текст] / Е.В. Сальникова, Е.А. Осипова // Вестник ОГУ. – 2015. – №10 (185). – С. 312 – 315.

164. Сальникова, Е.В. Проблемная статья. Потребность человека в цинке и его источнике (обзор) [Текст] / Е.В. Сальникова // Микроэлементы в медицине. – 2016. – №17 (4). – С. 11 – 15.

165. Самофалова, И.А. Химический состав почв и почвообразующих пород. [Текст] / И.А. Самофалова. – Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА», 2009. – 132 с.

166. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности продуктов». Утв. 06 ноября 2001. – 269 с.

167. Святова, Н.В. Влияние магния на организм детей [Текст] / Н.В. Святова, Ф.Г. Ситдилов, Е.С. Егерев, А.В. Косов, А.А. Гайнуллин // Фундаментальные исследования. – 2013. – №8. – С. 1092 – 1096.

168. Семишин, В.И. Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева [Текст] / В.И. Семишин. – М.: Химия, 1972. – 188 с.

169. Серегина, И.И. Продуктивность и фотосинтетическая деятельность растений пшеницы при применении цинка в условиях дефицита влаги в почве [Текст] / И.И. Серегина // Агрохимический вестник. – 2011. – №6. – С. 15 – 18.

170. Система применения удобрений: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по специальностям «Агрохимия и почвоведение», «Защита растений и карантин» / В.В. Лапа [и др.]; под ред. В.В. Лапы. Гродно: ГГАУ, 2011. – 418 с.

171. Симакин, А.И. Удобрение, плодородие почв и урожай [Текст] / А.И. Симакин. – Краснодар: Краснодар. кн. изд-во, 1988. – 276 с.

172. Скальная, М.Г. О пределах физиологического (нормального) содержания Са, Mg, P, Fe, Zn и Cu в волосах человека [Текст] / М.Г. Скальная, В.А. Демидов, А.В. Скальный // Микроэлементы в медицине. – 2003. – №4 (2). – С. 5 – 10.

173. Скальный, А.В. Цинк и здоровье человека [Текст] / А.В. Скальный. – Оренбург: РИО ГОУ ОГУ, 2003. – 80 с.

174. Скальный, А.В., Биоэлементы в медицине [Текст] / А.В. Скальный, И. А. Рудаков. – М.: ОНИКС 21 век; Мир, 2004. – 100 с.

175. Скальный, А.В. Изучение взаимосвязи биоаккумуляции цинка в продуктах питания и организме человека на территории оренбургской области [Текст] / А.В. Скальный, Е.В. Сальникова, О.В. Кван, А.Н. Сизенцов, И.А. Сальников // Вестник ОГУ. – 2016. – №10 (198). – С. 79–81.

176. Сладкова, Н.А. Распределение цинка и кадмия в системе торфяная почва-растение под влиянием фосфорных и калийных удобрений [Текст] / Н.А. Сладкова. Дис... канд. биол. наук. СПб-Пушкин, 2016. – 187 с.

177. Сладкова, Т.В. Цинк в пахотных почвах степной части Кузнецкой котловины и влияние сульфата цинка на урожайность и качество яровой пшеницы [Текст] / Т.В. Сладкова. Дис...канд. с/х наук. Барнаул, 2012. – 177 с.

178. Сокаев, К.Е. Кальций и магний в почвах РСО-Алания [Текст] / К.Е. Сокаев, В.В. Бестаев // Агрохимический вестник. – 2014. – №3. – С. 10 – 11.

179. Солдатов, В.П. Обеспеченность почв РСФСР микроэлементами [Текст] / В.П. Солдатов, И.Н. Чумаченко // Химия в сельском хозяйстве. – 1987. – №1. – С. 30 – 32.

180. Спицына, С.Ф. Зависимость содержания цинка в растениях от его содержания в почвах Алтайского края [Текст] / С.Ф. Спицына, А.А. Томаровский,

Г.В. Оствальд // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – №9 (107). – С. 20–23.

181. Станилевич, И.С. Эффективность возделывания гороха на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве с разной обеспеченностью обменным магнием [Текст] / И.С. Станилевич, И.М. Богдевич, Ю.В. Путятин // Почвоведение и агрохимия. 2019. № 1 (62). С. 168–179.

182. Стенникова, О.В. Патологические клинические аспекты дефицита кальция у детей. Принципы его профилактики [Текст] / О.В. Стенникова, Н.Е. Санникова // Вопросы современной педиатрии. – 2007. – №4. – Т.6. – С. 58 – 65.

183. Теличко, О.Н., Влияние видового состава травосмесей на урожайность зеленой массы и засоренность посевов [Текст] / О.Н. Теличко, А.Н. Емельянов // Дальневосточный аграрный вестник. – 2017. – №4 (44). – С. 74–79.

184. Тиво, П.Ф. К вопросу известкования кислых почв [Текст] / П.Ф. Тиво, В.Н. Филлипов // Мелиорация. – 2018. – №2. – С. 33 – 42.

185. Тильба, В.А. Система применения удобрений. Система земледелия Амурской области [Текст] / В.А. Тильба, И.Г. Ковшик, И.П. Волохин и др. – Благовещенск: ИПК «Приамурье», 2003. – С. 49 – 61.

186. Титов, А.Ф. Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам: учебное пособие [Текст] / А.Ф. Титов, В.В. Таланова, Н.М. Казнина. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011. – 77 с.

187. Тихомирова, В.Я. Взаимодействие магния, кальция и калия при поступлении в молодые растения льна-долгунца [Текст] / В.Я. Тихомирова, О.Ю. Сорокина // Агрохимия. – 2007. – №3. – С. 28 – 33.

188. Тихомирова, В.Я. Влияние свойств почв, удобрений, извести и погодных условий на обеспеченность магнием сельскохозяйственных растений [Текст] / В.Я. Тихомирова // Агрохимия. – 2011. – №5. – С. 84 – 89.

189. Ткаченко, А.В. Влияние магния и кальция на здоровье человека и их содержание в продуктах питания. Материалы научно-практической конференции «Проблемы и перспективы научных исследований» [Текст] / А.В. Ткаченко, К.А. Данильчук. – Краснодар, 2010. – С. 199–202.

190. Ткаченко, А.В. Синдром хронической усталости и его зависимость от содержания магния в организме и пище [Текст] / А.В. Ткаченко, О.М. Дробышева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. – №4. – С. 291 – 292.

191. Тома, С.И. Микроэлементы и урожай [Текст] / С.И. Тома, И.З. Рабинович, С.Г. Великсар. – Кишинев, «Штиинца», 1980 – 172 с.

192. Троегубова, Н.А. Метаболизм магния и цинка у спортсменов [Текст] / Н.А. Троегубова, Н.В. Рылова, Р.Р. Гильмутдинов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №4. – С. 323.

193. Файзуллина, Р.А. Клинико-патогенетическое значение нарушений обмена микроэлементов при хронической гастродуоденальной патологии у детей школьного возраста и разработка методов их коррекции [Текст] / Р.А. Файзуллина. Автореф. дис... докт. мед. наук. Н. Новгород, 2002. – 43 с.

194. Федосеенко, М.В. Биологическая роль магния, кальция и цинка в регуляции функций и развитии заболеваний пищеварительной системы у детей [Текст] / М.В. Федосеенко, Р.Р., Шиляев О.А. Громова, О.А. Петрова, Е.Б. Копилова, И.В. Князева // Вопросы современной педиатрии. – 2003. –Т. 2. – №6. –С. 67 – 72.

195. Флоринский, М.А. Методические указания по проведению комплексного агрохимического обследования почв сельскохозяйственных угодий. [Текст] / М.А. Флоринский, М.И. Лунев, А.В. Кузнецов. и др. – М.: Центр. научн.-техн. информ., пропаганды и рекламы, 1994. – 96 с.

196. Фролова, Т.В. Региональный профиль обеспеченности цинком детей Харьковского региона [Текст] / Т.В. Фролова, О.В. Охупкина // Здоровье ребенка. – 2010. – Т. 4. – №25. – С. 63 – 66.

197. Халиуллина, С.В. Клиническое значение дефицита цинка в организме ребенка (обзор литературы) [Текст] / С.В. Халиуллина // Вестник современной клинической медицины. – 2013. – том 6. – вып. 3. – С. 72 – 78.

198. Хафф, Л.С. Аномальное содержание меди, свинца и цинка в почвах близ рудных жил // Геохимические методы поисков рудных месторождений. [Текст] / Л.С. Хафф. – М.: Изд-во иностр. лит., 1954. – С. 191 – 223.

199. Хижняк, Р.М. Экологическая оценка микроэлементов (Zn, Cu, Co, Mo, Cr, Ni) в агроэкосистемах лесостепной зоны Юго-Западной части ЦЧО [Текст] / Р.М. Хижняк. Дис... канд. биол. наук. Белгород, 2015. – 129 с.

200. Черницкий, А.Е. Функциональное становление дыхательной системы у новорожденных телят с разной жизнеспособностью [Текст] / А.Е. Черницкий, М.И. Рецкий, А.И. Золотарев // Сельскохозяйственная биология. – 2013. – №4. – С. 99 – 104.

201. Черных, Н.А. Тяжелые металлы и радионуклиды в биоценозах [Текст] / Н. А. Черных, М. М. Овчаренко. – М.: Агроконсалт, 2002. – 200 с.

202. Чертко, Н.К. Геохимия и экология химических элементов: Справочное пособие [Текст] / Н.К. Чертко, Э.Н. Чертко. – Мн.: Издательский центр БГУ, 2008. – 140 с.

203. Чикенева, И.В. Особенности накопления тяжёлых металлов в изучаемых растительных сообществах и их воздействие на окружающую среду [Текст] / И.В. Чикенева // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2013. – №2 (40). – С. 228 – 231.

204. Шаврина, К.Ф. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка в растениях ячменя [Текст] / К.Ф. Шаврина, С.Е. Витковская // Сборник трудов конференции «Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях: от теоретической модели к практике прецизионного управления». ФГБНУ АФИ, СПб. – 2016. – С. 382 – 386.

205. Шаврина, К.Ф. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка, кальция и магния в растениях овощных бобов ячменя [Текст] / К.Ф. Шаврина, С.Е. Витковская // Актуальные вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси и сопредельных государств. Сборник материалов. – 2018. – Ч. 2. – С. 151 – 154.

206. Шаврина, К.Ф. Влияние возрастающих доз мелиоранта на распределение Zn, Ca, Mg в почве и растениях [Текст] / К.Ф. Шаврина, С.Е. Витковская // сборник научных трудов по материалам конференции «Развитие агропромышленного комплекса на основе современных научных достижений и цифровых технологий». Ч. I. – СПбГАУ. СПб. – 2019. – С. 94 – 97.

207. Шаврина, К.Ф. Влияние возрастающих доз мелиоранта на конкурентные взаимодействия Zn, Ca, Mg в системе «почва-растение» [Текст] / К.Ф. Шаврина, С.Е. Витковская // Материалы Всероссийской научной конференции «Вклад агрофизики в решение фундаментальных задач сельскохозяйственной науки». – СПб.: ФГБНУ АФИ. 2020. – С. 560 – 566.

208. Шамрикова, Е.В. Кислотность почв таежной и тундровой зон европейского северо-востока России [Текст] / Е.В. Шамрикова. – СПб: Наука, 2013. –157 с.

209. Шантырь, И.И., Цинк-дефицитные состояния у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС в Северо-Западном регионе России [Текст] / И.И. Шантырь, М.В. Яковлева, М.А. Власенко // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2016. – №2. – С. 89 – 92.

210. Швартау, В.В. Кальций в растительных клетках [Текст] / В.В. Швартау, П.А. Вирыч, Т.И. Маковейчук, А.Ю. Артеменко // Вестник Днепропетровского университета. – 2014. – №22 (1). – С. 19 – 32.

211. Шейбак, М.П. Недостаточность цинка у детей [Текст] / М.П. Шейбак, Л.Н. Шейбак // Российский вестник перинатологии и педиатрии. – 2000. – №1. – С. 48 – 51.

212. Шеуджен, А.Х. Агробиогeoхимия [Текст] / А.Х. Шеуджен. – Краснодар: КубГАУ, 2010. – 877 с.

213. Шеуджен, А.Х. Агрoхимические основы применения удобрений [Текст] / А.Х. Шеуджен, Т.Н. Бондарева, С.В. Кизинек. – Майкоп: Полиграф-ЮГ, 2013. – 572 с.

214. Шеуджен, А.Х. Содержание и формы соединений кальция в черноземе выщелоченном западного Предкавказья в условиях агрогенеза [Текст] / А.Х. Ше-

уджен, Т.Ф. Бочко, Л.М. Онищенко, Т.Н. Бондарева, М.А. Осипов, С.В. Есипенко. – КубГАУ. – 2015. – №105 (01); URL <http://ej.kubagro.ru/2015/01/pdf/035.pdf>.

215. Шильников, И.А. Экологически безопасные и энергоресурсосберегающие приемы известкования почв в земледелии [Текст] / И.А. Шильников, Г.Е. Гришин, Н.А. Зеленев, Н.И. Аканова, Е.В. Курсонова // Нива Поволжья. – 2010. – №2 (15). – С. 40 – 44.

216. Шильников, И.А. Потребность в известковании и удобрениях магнием и кальцием в зависимости от свойств почв [Текст] / И.А. Шильников, М.Н. Мельников // Варшава, 1984. – С. 39–54.

217. Шильников, И.А. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия [Текст] / И.А. Шильников, В.Г. Сычѐв, Н.А. Зеленев, Н.И. Аканова, Л.С. Федотова. – М.:ВНИИА, 2008. – 340 с.

218. Шильников, И.А. Потери элементов питания растений в агробиогеохимическом круговороте веществ и способы их минимизации [Текст] / И.А. Шильников, В.Г. Сычев, А.Х. Шеуджен, Н.И. Аканова, Т.Н. Бондарева, С.В. Кизинек. – М.: ВНИИА, 2012. – 351 с.

219. Шильников, И.А. Вопросы известкования почв в современных условиях [Текст] / И.А. Шильников, Н.И. Аканова // Плодородие. – 2011. – №3. – С. 22 – 24.

220. Школьник, М. Я. Микроэлементы в жизни растений [Текст] / М.Я. Школьник. – Л.: Наука, 1974. – 324 с.

221. Щеплягина, Л. А. Дефицит цинка и его влияние на здоровье матери и ребенка. Возможности коррекции [Текст] / Л. А. Щеплягина, Т. И. Легонькова. – М.: Научный центр здоровья детей РАМН, 2004. – 30 с.

222. Эмсли, Дж. Элементы. Пер. с англ. [Текст] / Дж. Эмсли. – М.: Мир, 1993. – 256 с.

223. Яковлева, Л.В. Экологические аспекты известкования дерново-подзолистых почв Северо-Запада России [Текст] / Л.В. Яковлева. Автореф. дисс... докт. с.-х. наук. СПб.-Пушкин, 2009. – 45 с.



224. Якушев, В.П. К вопросу об известковании кислых почв в России [Текст] / В.П. Якушев, А.И. Осипов, Р.М. Миннулин, С.В. Воскресенский // *Агрофизика*. – 2013. – №2. – С. 18 – 22.

225. Янковская, Л.В. Риск развития и возможности коррекции ряда заболеваний при дефиците микроэлементов: акцент на магний и калий [Текст] / Л.В. Янковская // *Международные обзоры: клиническая практика и здоровье*. – 2015. – №6. – С. 23 – 36.

226. Яхияев, М.А. Содержание магния в окружающей среде и заболеваемость населения артериальной гипертензией [Текст] / М.А. Яхияев, Ш.К. Салихов, С.О. Абдулкадырова, А.Ш. Асельдерова и др. // *Гигиена и санитария*. – 2019. – Т. 98. – №5. С. – 494 – 497.

227. Яхияев М.А., Валовые и подвижные формы цинка в почвах южной экспозиции предгорного Дагестана [Текст] / М.А. Яхияев, А.Ш. Рамазанов, А.И. Аджиева // *Вестник ДГУ*. – 2011. – Вып. 6. С. 162–165.

228. Abdel-Saheb, J.A. Chemical characterization of heavy-metal contaminated soils transekto in Southeast Kansas. / J.A. Abdel-Saheb, A.P. Schwab, M.K. Banks, B.A. Hetrick *Amer. Soc. // Agron. Annu. Meet.* – 1992. Minneapolis. – 30 p.

229. Berridge, M.J. et al. Calcium signaling: dynamics, homeostasis and remodeling / M.J. Berridge // *Nat. Rev. Mol. Cell. Biol.* – 2003. – №4. – P. 517 – 529.

230. Bruemmer, G.W. Sorbtion and diffusion processes of heavy metals in soils / G.W. Bruemmer // *Wplyw zanieczyszczenia pierwiastkami sladowymi na przyrodnicze warunki rolnictwa. Pulawy.* – 1985. – Cz. 1. – P. 73 – 77.

231. Cavan, K.R. Growth and body composition of periurban Guatemalan children in relation to zinc status: a cross-sectional study / K.R. Cavan, R.S. Gibson, C.F. Grazioso, A.M. Isolgue, M. Ruz, N.W. Solomons // *Am. J. Clinical Nutrition.* – 1993. – Vol. 57. – P. 334 – 343.

232. Chen, X.C. Low levels of zinc in hair and blood, pica, anorexia, and poor growth in Chinese preschool children / X.C. Chen, T.A. Yin, J.S. He, Q.Y. Ma, J.M. Han, L.X. Li // *Am. J. Clinical Nutrition.* – 1985. – V. 42. – P. 694 - 700.

233. Colenan, I.E. Zinc proteins: enzymes, storage proteins, transcription factors and replication proteins / I.E. Colenan // *Annu. Rev. Biochem.* – 1992. – Vol. 61. – P. 897 - 946.

234. *Environmental Geochemistry and Health* / Ed. S.Bowie, I.Thornton. - Dordrecht; Boston; Lancaster: Reidel Publishing Company, 1984. –140 p.

235. *Encyclopedia of Food and Culture*. Ed. Solomon H. Katz. New York, Charles Scribner & Sons, 2003. 3. – 699 p.

236. Fukuda, K. The chronic fatigue syndrome: a comprehensive approach to its definition and study / K. Fukuda, S.E. Straus, I. Hickie, M.C. Sharpe et al // *Ann Intern Med.* – 1994. – V. 121 – P. 953 - 959.

237. Harper, J.F. Decoding Ca<sup>2+</sup> signals through plant protein kinases / J.F. Harper, G. Breton, A. Harmon // *Annual Review of Plant Biology.* – 2004. – Volume 55. P. 263 – 288.

238. Holmes, G.P. Chronic fatigue syndrome: a working case definition / G.P. Holmes, J.E. Kaplan, N.M. Gantz et al. // *Ann Intern Med.* – 1988. –108. – P. 387 – 389.

239. Jakovljeviã, Miodrag D. The availability of base elements (Ca, Mg, Na, K) in some important soil types in Serbia / Miodrag D. Jakovljeviã, Nikola M. Kostiã, Svetlana B. Antiã-Mladenoviã // *Зборник Матице српске за природне науке (Proceedings for Natural Sciences, Matica Srpska Novi Sad).* – 2003. – No.104. – p. 11 – 21.

240. Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants / A. Kabata-Pendias. – L.: CRC Press, 2011. – 505 p.

241. King, J.C. Effect of acute zinc depletion on zinc homeostasis and plasma zinc kinetics in men / J.C. King, D.M. Shames, N.M. Lowe [et al.] // *Am. J. Clin. Nutr.* 2001. –Vol. 74. – №1. – P. 116 – 124.

242. Krebs, N.F. Overview of zinc absorption and excretion in the human gastrointestinal tract / N.F. Krebs // *J. Nutr.* – 2000. – Vol. 130 (suppl. 5). – P. 1374 - 1377.

243. Krebs, J. Calcium: a matter of life or death / J. Krebs, M. Michalek // *New comprehensive biochemistry.* – V.41. Amsterdam, 2007. – 584 p.

244. Lindsay, W. L. *Chemical Equilibria in Soils* / W. L. Lindsay. – Blackburn Press. 2001. – 449 p.
245. Maret, W. Zinc requirements and the risks and benefits of zinc supplementation / W. Maret, H.H. Sandstead // *J. Trace Elem. Med. Biol.* – 2006. – Vol. 20. – №1. – P. 3 – 18.
246. Manuel B y Keenoy. Magnesium status and parametres of the oxidant-antioxidant balance in patients with chronic fatigue: effects of supplementation with magnesium / B y Keenoy. Manuel, B., G. Moorkens, J. Vertommt, M. Noe, J. Neve, I. De Leeuw // *J. Am Coll Nutr.* 2000. Jun; P. 67 80.
247. Martin J.P. Influence of Exchangeable Ca and Mg and of Percentage Base Saturation on Growth of Citrus Plants / J.P. Martin, A.H. Page // *Soil Sci.* – 1969. – № 107. – P. 39 – 46.
248. Marschner H. *Mineral nutrition of higher plants* / H. Marschner. – 3rd ed. London, 2011. – 672 p.
249. Metson, A. J. Magnesium in New Zealand soils. I. Some factors governing the availability of soil magnesium / A. J. Metson // *N. Z. J. Exp. Agric.* – 1974. – Vol. 2. – P. 277 – 319.
250. Prasad, A.S. Deficiency of zinc in man and its toxicity / A.S. Prasad // *Trace elements in human health and disease*: Acad. Press, 1976. P. 1 – 20.
251. Prasad, A.S. Zinc deficiency / A.S. Prasad // *B. M. J.* – 2003. – Vol. 326. – P. 409 – 410.
252. Summerfield, R.J. *Advances in Legumes Science. Proceedings of the International Legume Conference* / R.J. Summerfield, A.H. Bunting, M.C. Saxena // *Agronomy of faba beans, lentils and chickpeas.* – 1985. – P. 229 – 244.
253. Schnetze, rH. L. Auswirkung von Klarschlamm and Klarchlamm kompost auf den Schwermetallgehalt von Futterpflanzen im Gefapversuch / rH. L. Schnetze, A. Chetelat. on J.-M Bess // *Landwirtschaftliche Forchung.* – 1980. – S.-H. 36. – P. – 343 – 352.

254. Swinkels, J.W. Biology of zinc and biological value of dietary organic zinc complexes and chelates / J.W. Swinkels, E.T. Kornegay, M.W. Verstegen // *Nutr. Res. Rev.* –1994. – Vol. 7, – N 1. –P. 129 – 149.

255. Vallee, B.L. The Biochemical Basis of Zinc / B.L. Vallee, K.H. Falchuk // *Physiology Physiol Reviews.* – 1993. –73(1). – P. 79 – 118.

256. Wessells, K.R. Estimating the global prevalence of zinc deficiency: results based on zinc availability in national food supplies and the prevalence of stunting / K.R. Wessells, K.H. Brown // *PLoS One.* – 2012. –Vol. 7. – № 11. – P. 505 – 568.

257. White, P. Genes for calcium-permeable channels in the plasma membrane of plant root cells / P. White, H. Bowen, V. Demidchik, C. Nichols, J. Davies // *Biochim. Biophys. Acta.* – 2002. – P. 299 – 309.

258. Williams R. Calcium: the developing role of its chemistry in biological evolution / R. Williams // *Biochim. Biophys. Acta.* – 2006. – V. 1763. – №11. P. – 1139 – 1146.

259. <http://www.lniish.ru/sorts/grain/leningradskiy.html> ФГБНУ “Ленинградский НИИСХ Белогорка”. Иванова и др.: патент № 3858 от 28.01.2008 с датой приоритета 08.12.2005.