

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Ульяновский государственный аграрный университет
им. П.А. Столыпина

На правах рукописи

Волкова Елена Сергеевна

**ВЛИЯНИЕ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ УДОБРЕНИЙ НА
УРОЖАЙНОСТЬ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ И СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМА
ТИПИЧНОГО В ЛЕСОСТЕПИ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ**

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение,
защита и карантин растений

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Научный руководитель:
доктор сельскохозяйственных наук,
профессор Куликова А.Х.

Ульяновск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. КРЕМНИЙ КАК ЭЛЕМЕНТ ПИТАНИЯ РАСТЕНИЙ.....	10
1.1. Роль кремния в системе «почва-растение».....	12
1.2. Удобрения на основе кремнийсодержащих веществ.....	17
1.3. Цеолит и цеолитсодержащие породы в качестве кремниевых удобрений озимой пшеницы.....	23
ГЛАВА 2. УСЛОВИЯ, МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ...30	
2.1. Почвенно-климатическая характеристика лесостепи Среднего Поволжья и опытного поля.....	30
2.2. Схема опыта и технология возделывания озимой пшеницы.....	38
2.3. Методология и методы.....	42
ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ЦЕОЛИТА И УДОБРЕНИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ НА СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМА ТИПИЧНОГО.....	47
3.1. Физические (структурно-агрегатный состав, плотность, водный режим почвы).....	47
3.2. Биологические (общая биологическая активность).....	61
3.3. Химические (питательный режим, реакция почвенного раствора).....	68
ГЛАВА 4. УРОЖАЙНОСТЬ И КАЧЕСТВО ЗЕРНА ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ЕЕ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ЦЕОЛИТА И УДОБРЕНИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ.....	81
4.1. Урожайность.....	81
4.2. Качество продукции.....	87
4.3. Экологическая безопасность.....	89
ГЛАВА 5. БАЛАНС ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ В ЧЕРНОЗЕМЕ ТИПИЧНОМ ПОД ПОСЕВАМИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ.....	96
ГЛАВА 6. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИИ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ.....	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	117

ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВУ.....	119
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ.....	121
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	122
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	141

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. По своим почвенно-климатическим условиям Поволжье является достаточно благоприятным регионом для возделывания озимой пшеницы. Озимая пшеница – одна из самых высокоурожайных зерновых культур как в Ульяновской области, так и Поволжье в целом. Однако средняя урожайность культуры в данной зоне далека от своей потенциальной возможности и часто не превышает 3,0 т/га.

Одним из наиболее перспективных направлений повышения продуктивности озимой пшеницы в условиях региона является использование кремниевых удобрений, улучшающих свойства и режимы почвы, активизирующих жизнедеятельность почвенных микроорганизмов и тем самым способствующих оптимизации питания сельскохозяйственных культур (Матыченков В.В. и др., 2002; Лобода Б.П. и др., 2003; Куликова А.Х., 2013; Zellener W. et. All, 2021). В качестве удобрений установлена высокая эффективность природных кремнийсодержащих пород таких, как диатомиты, цеолиты, бентониты и др. Тем не менее, большинство исследователей приходит к выводу, что агрономическую ценность названных пород можно значительно повысить совместным применением с органическими и минеральными удобрениями с тем, чтобы обеспечить растения всеми элементами питания в оптимальном соотношении (Арефьев А.Н., 2015; Куликова А.Х. и др, 2020; Матыченков В.В. и др., 2022; Оленин О.А., Зудилин С.Н., 2022; Ramesh, K et. all, 2011). Следует отметить, что свойства, в том числе кристалло-структурные характеристики кремнистых пород позволяют внедрить в них те или иные элементы и создать, таким образом, высокоэффективные безопасные удобрения нового поколения. В связи с этим представленная диссертационная работа посвящена изучению влияния цеолита и удобрений на его основе, а также сочетания их с минеральными удобрениями на плодородие чернозёма типичного и продуктивность озимой пшеницы в условиях лесостепи Среднего Поволжья.

Исследования являются составной частью плана научной работы ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина» (рег. № АААА–А16–116.041.110.183–9) и поддержаны Грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 19-416-730002 «Научные основы, разработка и испытание биомодифицированных удобрений сельскохозяйственных культур на основе кремнистых пород».

Степень разработанности темы. Необходимость применения цеолитов в производстве сельскохозяйственной продукции приобрела широкое значение за последние два десятилетия, о чем свидетельствует хронологически восходящая тенденция количества публикаций (Матыченков В.В. и др., 2002; Андроникашвили Т.Г., 2008; Гришин Г.Е., 2009; Титова В.И., 2014; Арефьев А.Н. и др., 2015; Белоусов В.С. и др., 2019; Биккинина, Л.М.-Х. и др., 2019; Чекаев Н.П. и др., 2019; Безручко Е.В., 2020; Козлов А.В., 2022; Куликова А.Х. и др., 2022; Ramesh K. et al, 2011; Jakkula V. et.al, 2018; Cataldo E., 2021 и др.). В более ранних публикациях также сообщалось о влиянии цеолитов на свойства почвы, а также об их способности удерживать влагу и питательные вещества в пахотном слое, повышать урожайность и снижать поступление тяжелых металлов в продукцию (Сафронов Г.В., 1989; Мустафаев Ю.Х., 1990; Буров А.В., 2000; Лобода Б.П., 2000; Rivero, L., Rodríguez-Fuentes, G., 1988; Mumpton F.A., 1999).

В условиях лесостепи Среднего Поволжья, характеризующейся специфическими почвенно-климатическими условиями, эффективность применения цеолитов в сельском хозяйстве, особенно в качестве носителя питательных веществ, остаётся практически не изученной. Поэтому исследование возможностей использования цеолита, обогащенного аминокислотами и карбамидом, в качестве удобрений нового поколения при возделывании озимой пшеницы в данном регионе является актуальным и перспективным. Это особенно важно в контексте повышения продуктивности и обеспечения экологической безопасности сельскохозяйственного

производства, учитывая растущее стремление к устойчивому земледелию и снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду.

Цель и задачи исследования. Целью исследований являлась комплексная оценка эффективности применения цеолита Юшанского месторождения Ульяновской области, а также удобрений на его основе при возделывании озимой пшеницы в условиях лесостепи Среднего Поволжья.

Задачи исследования:

- провести полевые опыты с использованием в технологии возделывания озимой пшеницы цеолита, а также удобрений на его основе, полученных обогащением его аминокислотами и карбамидом;

- установить влияние цеолита и удобрений на его основе на физические, биологические и химические свойства чернозёма типичного (структурно-агрегатный состав, плотность почвы, содержание продуктивной влаги, водопотребление, агрохимические показатели, микробиологическая активность);

- оценить влияние цеолита как в чистом виде, так и при обогащении его аминокислотами и карбамидом на урожайность и качество зерна озимой пшеницы, в том числе его экологическую безопасность;

- определить баланс элементов питания в черноземе типичном под посевами озимой пшеницы при использовании цеолита и цеолита, обогащенного аминокислотами и карбамидом, в качестве удобрения;

- дать энергетическую и экономическую оценку технологии возделывания озимой пшеницы с применением экспериментальных удобрений.

Научная новизна. Впервые в условиях лесостепи Среднего Поволжья изучено влияние цеолита и удобрений на его основе, обогащенных аминокислотами и карбамидом, на фундаментальные свойства чернозема типичного (физические, биологические, химические), урожайность и качество продукции озимой пшеницы (в том числе экологическую безопасность). Дана агрономическая, экологическая, экономическая и

энергетическая оценка технологии возделывания озимой пшеницы с использованием в качестве удобрения цеолита и цеолита, обогащенного аминокислотами и карбамидом.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования явился комплексный подход к изучению изменений свойств и режимов почвы при внесении в нее цеолитсодержащих удобрений, влияния их на формирование урожайности озимой пшеницы и качество продукции. Данная методология определила круг задач, приведенных выше. Использованы методы проведения полевых опытов, лабораторных анализов почвенных и растительных образцов; статистические методы обработки данных, табличное и графическое представление результатов.

Защищаемые положения:

– применение цеолита как в чистом виде, так и удобрений на его основе обогащением аминокислотами и карбамидом способствует улучшению агрофизического состояния почвы, деятельности почвенных микроорганизмов, её водного и питательного режимов. При этом содержание доступных форм элементов питания в пахотном слое (0-30 см) увеличивалось: азота на 1,9-6,8 мг/кг, фосфора на 2-39 мг/кг, калия на 6-35 мг/кг почвы;

- использование экспериментальных удобрений обеспечивает повышение урожайности озимой пшеницы на естественном фоне на 0,22-0,88 т/га (5-21 %), на фоне NPK на 0,16-0,95 т/га (3-18 %);

– внесение в почву цеолита, а также цеолита, обогащенного карбамидом и аминокислотами, способствует увеличению интенсивности баланса по азоту до 62 %, по фосфору до 121 %, по калию до 261 %;

– применение в технологии возделывания озимой пшеницы цеолитсодержащих удобрений экономически выгодно, экологически безопасно и энергетически эффективно.

Достоверность полученных результатов подтверждается большим количеством экспериментального материала, проведением полевых опытов и

лабораторных анализов в строгом соответствии с методическими требованиями и ГОСТами, математической обработкой данных и положительными результатами при использовании данной системы удобрения в ООО «Органические биосистемы».

Практическая значимость и реализация результатов исследований. Результаты исследования подтвердили эффективность цеолита как в чистом виде, так и обогащенного его аминокислотами и карбамидом, при применении в качестве удобрения озимой пшеницы и позволяют рекомендовать его сельхозтоваропроизводителям. Результаты используются в учебном процессе ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ при изучении дисциплин: агрохимия, нетрадиционные удобрения, системы удобрений, сельскохозяйственная экология.

Личный вклад соискателя. Автор непосредственно принимал участие в разработке программы исследований, им лично проведены полевые и лабораторные эксперименты, сделаны математическая обработка экспериментальных данных, анализ и обобщение полученных результатов, а также сформулированы выводы и рекомендация производству.

Апробация работы и публикации. Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на научных конференциях Ульяновского государственного аграрного университета им. П.А. Столыпина: Национальной научно-практической конференции «Актуальные вопросы аграрной науки» (Ульяновск, 2021-2024 гг.); XII Международной научно-практической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения П.А. Столыпина «Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения» (Ульяновск, 2022 г.); XIII Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию Ульяновского ГАУ «Аграрная наука и образование на современном этапе развития» (Ульяновск, 2023 г.). Представлены на 22-ой Российской агропромышленной выставке «Золотая осень 2020» и отмечены бронзовой медалью. Докладывались и обсуждались

на: Национальной научно-практической конференции с Международным участием «Кремний и жизнь. Кремнистые породы в сельском хозяйстве» (Ульяновск, 2021 г.); VIII Международном военно-техническом форуме «АРМИЯ-2022» Секция «Кремний в системе почва – растение» (Москва, 2022 г.); Международном форуме «Агробиотехнологии: достижения и перспективы развития» (Москва, 2023 г.); Международной научной конференция II Никитинские чтения «Актуальные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии в природных и антропогенных ландшафтах» (Пермь, 2023 г.); IV Международной научно-практической конференции «Диатомит – 21 век. Инновации и перспективы» (Камышлов, 2024); Молодежном форуме «Структурно-функциональное единство почв и сопредельных сред» в рамках международной научной конференции «Фундаментальные концепции физики почв: развитие, современные приложения и перспективы» (Москва, 2024 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах, 2 статьи в журналах, входящих в международную базу данных Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 172 страницах компьютерного текста, состоит из введения, 6 глав, выводов и предложений производству, содержит 24 таблицы, 40 рисунков, 27 приложений. Библиографический список включает 176 источников использованной научной литературы, в том числе 31 – иностранных авторов.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность и благодарность научному руководителю, доктору сельскохозяйственных наук, профессору Куликовой Алевтине Христофоровне за всестороннюю поддержку и помощь при выполнении работы; а также кандидату сельскохозяйственных наук, доценту Яшину Е.А. и всему коллективу кафедры почвоведения, агрохимии и агроэкологии.

ГЛАВА 1. КРЕМНИЙ КАК ЭЛЕМЕНТ ПИТАНИЯ РАСТЕНИЙ

За последнее столетие, особенно за последнее десятилетие, многочисленные исследования были сосредоточены на улучшении понимания механизмов, через которые кремний (Si) воздействует на производительность и качество сельскохозяйственных и садоводческих культур. Эти исследования охватывают такие темы, как Si-опосредованное смягчение различных форм абиотического и биотического стрессов, процессы поглощения, транспортировки и накопления Si, а также биогеохимию кремния в почве и его доступность для растений; на совершенствование аналитических методов определения содержания Si в почве, растениях и удобрениях; производство, применение и управление кремниевыми удобрениями (Дистанов У.Г. и др., 1990; Акимова С.В. и др., 2015; Медведева Ю.Д. и др., 2017; Куликова А.Х. и др., 2019; Матыченков В.В. и др., 2022; Datnoff E.L. and et. all, 2017; Greger M. and et. all, 2018).

Международное сообщество исследователей Si выросло за более, чем десятилетнюю историю, с тех пор, как прошла первая Международная конференция по кремнию в сельском хозяйстве, успешно проведенная во Флориде, США (1999 г.)

В настоящее время вопросы кремниевого питания растений и использование кремнийсодержащих веществ и пород в сельском хозяйстве в роли удобрений, мелиорантов, улучшителей почвы и стимуляторов роста обсуждаются на научных конференциях и Международных симпозиумах, организуемых в таких странах как США, Бразилия, Мексика, Южно-Африканская Республика, Индия, Япония, Китай, Колумбия и многих других. Так, результаты исследований, представленные на Международной конференции «International Conferences on Silicon in Agriculture» (ICSA), которая проходит каждые три года, охватывают множество аспектов

применения кремния в мировом сельском хозяйстве и подчеркивают его высокую агроэкологическую эффективность.

В последние десятилетия в России активно исследуются кремнийсодержащие вещества и их потенциал в сельском хозяйстве.

Кафедра «Почвоведение, агрохимия и агроэкология» Ульяновского государственного аграрного университета имени П.А. Столыпина проводит исследования в этой области уже более 20 лет. Эти исследования сосредоточены на возможности использования кремнистых пород в системе удобрения сельскохозяйственных культур. В этом контексте использование кремнистых пород может стать важным шагом к более устойчивым методам ведения сельского хозяйства. В апреле 2021 года на базе кафедры при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований проведена Национальная научно-практическая конференция с международным участием под названием «Кремний и жизнь. Кремнистые породы в сельском хозяйстве». Обсуждались такие темы, как роль кремния в организмах и почвах; кремний и кремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур; способы оптимизации применения кремнийсодержащих удобрений; кремний и кремниевые материалы в животноводстве, птицеводстве и рыбоводстве.

Крупные холдинги, производители кремниевых удобрений, почвенных улучшителей, биостимуляторов на основе кремния проводят ежегодные конференции для обмена опытом и знаниями в области кремниевых мелиорантов, удобрений и биостимуляторов. Такие, как ежегодная межрегиональная научно-практическая конференция «Биологически активный кремний в современных агротехнологиях», проводимая компанией АгроСил, Международная научно-практическая конференция «Диатомит - 21 век. Инновации и перспективы», проводимая ООО «Уральская диатомитовая компания», Всероссийская конференция «Использование кремния в современном сельском хозяйстве», прошедшая при поддержке ФОСАГРО на базе ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в 2024 году и др.

1.1 Роль кремния в системе «почва-растение»

Кремний (Si), атомный номер 14, молекулярная масса 28,0855, имеет 4 внешних валентных электрона и степени окисления +2, +4 и -4 с температурой плавления 1410 °С и температурой кипения 2355 °С (Gascho G. 2001). Интересно, что в периодической таблице элементов Si окружен такими близкими соседями, как бор (B), углерод (C), азот (N), кислород (O), фосфор (P) и сера (S) (все признаны «незаменимыми элементами»), а также алюминий (Al), галлий (Ga), германий (Ge) и мышьяк (As), которые признаны «несущественными элементами» или даже токсичными (Воронков М.Г. и др., 1978; Айлер Р., 1982; Mupton F.A., 1999; Liang Yo. end et. all, 2015).

Кремний (Si) занимает второе место по распространенности среди элементов в земной коре и почве, уступая только кислороду. Среднее содержание элементарного кремния в литосфере составляет около 28%. Однако, стоит отметить, что большая часть кремния в почвах представлена в виде кристаллических алюмосиликатов, которые нерастворимы и недоступны растениям напрямую.

Общее содержание Si в почве обычно колеблется от 25 до 35 %, в среднем 30 %, в значительной степени в зависимости от типа почвы. Однако в некоторых сильно выветренных почвах, где процессы десицификации и ферсиализации чрезвычайно активны, содержание Si может составлять менее 1 %. Si преимущественно присутствует в почвах, включающих различные категории алюмосиликатов и кварца (SiO₂), на долю которых может приходиться до 75–95 % неорганических составляющих почв.

Доступной для растений формой Si является монокремниевая кислота (H₄SiO₄), которая присутствует в почвенном растворе, омывающем корни растений, в концентрациях, обычно находящихся в диапазоне от 0,1 до 0,6 мМ, что примерно на два порядка выше, чем концентрация фосфора (P) в почвенных растворах (Epstein E., 1994, 1999). Во всех наземных растениях

кремний содержится в разных количествах: от 0,1 до 10 % сухой массы побегов.

Биологический круговорот кремния в наземных экосистемах характеризуется наибольшей интенсивностью, где поглощение кремния составляет от 20 до 7000 кг/га в год (Матыченков В.В. и др., 1994, 2012).

По общему содержанию элементов в растениях кремний занимает четвертое место после кислорода, углерода и водорода (Ковда В.А, 1956; Базилевич Н.И, 1993).

В.В. Матыченкову (2008) принадлежит большая роль в составлении схемы цикла кремния в системе «почва-растение», состоящего из нескольких звеньев и являющийся базовым в процессах миграции и трансформации кремния как биогеохимического элемента.

Возникновение дефицита кремния у растений во многом зависит от концентрации доступного для растений Si в почве, а не от общего содержания Si. Биодоступность Si в почвах тесно связана с биогеохимией Si в почве, включая биогеохимический круговорот Si, формы и растворимость Si в почвах.

Для того чтобы растения могли эффективно поглощать кремний, он должен находиться в растворимой форме, а именно в виде мономеров кремниевой кислоты и её анионов (Yoshida S., 1975; Ma J.F., Takahashi E., 2002). Этот процесс начинается в корневой системе, где корни активно всасывают кремний из почвы, а также через листья, что является важным этапом в биогеохимическом цикле кремния в экосистемах почва-растение. Поглощенный кремний не распределяется равномерно по растению; его концентрация варьируется в зависимости от внутренних физиологических потребностей. Например, в тех частях растения, где происходит активный рост, потребность в кремнии может быть выше, что влияет на его распределение. Кремний участвует в различных физиологических процессах, таких как фотосинтез, где он может укреплять клеточные стенки, улучшая механическую прочность и устойчивость к неблагоприятным условиям.

Монокремниевая кислота, которую поглощают растения, может подвергаться полимеризации, что приводит к образованию кремнийорганических соединений.

Поликремниевые кислоты, в свою очередь, являются важным компонентом почвенного раствора и играют ключевую роль в формировании свойств почвы. Они способны связывать почвенные частицы, прочно адсорбируясь на них и образуя силоксановые мостики (Cornelis J.T. et al., 2011).

В результате этого процесса образуются поликремниевые кислоты, которые могут дегидратироваться, формируя фитолиты — аморфные структуры диоксида кремния, обладающие сложной конфигурацией. Эти фитолиты могут находиться как внутри клеток, так и в межклеточном пространстве, выполняя несколько функций (Добровольский В.В., 1998; Гольева А.А., 2001). Фитолиты имеют важное значение в экосистемах, так как они служат источником кремния для других организмов, таких как животные, которые могут потреблять растения. Кроме того, фитолиты участвуют в циклах питательных веществ, способствуя поддержанию баланса элементов в экосистеме. Они могут сохраняться в почве даже после разложения растений, что способствует накоплению кремния в экосистеме. Размер, форма и количество фитолитов зависят не только от доступности кремния, но и от других факторов, таких как температура, влажность почвы и условия питания растения другими элементами. Например, в условиях высокой влажности и достаточного количества питательных веществ растения могут накапливать больше кремния, что, в свою очередь, приводит к образованию большего количества фитолитов (Гольева А.А., 2001; Hodson M.J. et al., 2005).

Миграция кремния внутри растения, вероятно, осуществляется в основном в форме поликремниевой кислоты, которая перемещается с помощью специализированных транспортных ферментов. Эти ферменты обеспечивают эффективное перемещение кремния от корней к другим частям растения, где он необходим для роста и развития. Недавние исследования

также показывают, что некоторые растения и микроорганизмы способны запасать часть поглощенного кремния в форме высокомолекулярных поликремниевых кислот. Это может быть особенно важно в условиях, где доступность кремния ограничена, так как такие запасы могут быть использованы растением в более поздние сроки. После отмирания растений или их частей, биогенный кремний (поликремниевые кислоты, фитоциты, кремний-органические соединения и т.д.) переходит в почву, где подвергается процессу растворения и/или разложения. Продуктом растворения становится монокремниевая кислота (Козлов А.В., 2016; Liang Y.C., 2015).

Монокремниевая кислота в почве контролирует, как отмечалось ранее, многие химические, физико-химические и биологические процессы. Монокремниевая кислота является исходным материалом для образования других растворимых форм кремния: олигомеров, низкомолекулярных и высокомолекулярных поликремниевых кислот, комплексов с органическими и неорганическими лигандами и органических соединений кремния. Также возможна вертикальная и горизонтальная миграция растворимых соединений кремния, и здесь опять же ведущую роль играет монокремниевая кислота. Завершает цикл поглощение монокремниевой кислоты живыми организмами.

Показано, что концентрации доступных для растений фракций Si в почве определяются процессами адсорбции Si на реакционноспособных почвенных материалах (прежде всего полуторных оксидах) и десорбции Si в виде растворимого Si в почвенном растворе. Таким образом, было показано, что свойства адсорбционного комплекса почвы (его сорбционные и десорбционные характеристики) в значительной степени влияют на доступную для растений фракцию кремния.

Десорбционные характеристики почв во многом зависят от типа почвы и внесения растворимого или аморфного Si. Было показано, что десорбция Si из суспензии известковистой, илистой, суглинистой почвы различна при обработке с добавлением Si и без него (Belanger R.R. 2005; Liang Yo., 2015).

Когда почвы вовлечены в использование в сельском хозяйстве начинается непрерывное и необратимое удаление биогеохимически активного кремнезема из верхнего слоя почвы с урожаем. Это, в свою очередь, приводит к нехватке кремния для сельскохозяйственных культур. Поскольку активные формы кремния важный компонент как в формировании плодородия почвы, так и в иммунной системе культурных растений, такой повышенный дисбаланс может вызвать деградацию почвы и уменьшить как биотическую, так и абиотическую устойчивость растений к стрессовым условиям. Данная ситуация подчеркивает необходимость восстановления биогеохимического цикла кремния путем его внесения в обработанные почвы (Матыченков В.В., 2002).

Также нужно сказать, что в работах вышеуказанных и других авторов (Аммосова Я.М. и др., 1990; Матыченков В.В. и др., 2001; Самсонова Н.Е., 2005; Панова Г.Г. и др., 2012; Лобода Б.П. и др., 2014; Чемерис М.С. и др., 2015; Соколова М.Г. и др., 2019; Janjgava N. et al, 2003; Ma J. et al., 2006; Chimney M.J. et al., 2007; Matichenkov V.V., Vocharnikova E.A., 2012) представлены данные о положительном воздействии соединений кремния на различные свойства почвы. Рассматриваются вопросы нейтрализации кислотности, повышения буферной способности почв (Матыченков В.В., Аммосова Я.М., 1994; Ермолаев С.А. и др., 2004; Матыченков В.В., и др., 2015; Васильева Н.Г., 2017), насыщения почвенного раствора биофильными элементами (NPK) и ионами SiO_4^{2-} , Ca^{2+} и Mg^{2+} (Гладкова К.Ф., 1982; Водяницкий Ю.Н., 1984; Иванов А.Л., 1992; Дорошкевич С.Г., Убугунов Л.Л., 2002; Шеуджен А.Х. и др., 2002; Лобода Б.П., Яковлева Н.Н., 2003; Самсонова Н.Е., 2005; Макеева Т.Ф., Гудилина М.В., 2008; Капранов В.Н., 2010; Лякина О.А., 2012; Матыченков И.В., Пахненко Е.П., 2013; Матыченков И.В., 2014), сохранения продуктивной влаги в пахотном слое и усиления его оструктуренности (Матыченков В.В. и др., 2002; Капранов В.Н., 2010; Бочарникова Е.А. и др., 2011; Куликова А.Х., 2013).

1.2 Удобрения на основе кремнийсодержащих веществ

История применения кремния в качестве удобрения уходит далеко в прошлое.

Применение удобрений на основе шлака в Европе можно проследить со средневековья (с пятого по пятнадцатый века), когда цистерцианцы (католический монашеский орден) в монастырях европейских стран таких, как Швейцария, Швеция, Франция и Германия, которые, как известно, были опытными металлургами, добывали железо (Fe) из месторождений железной руды и использовали побочный продукт металлургической промышленности — богатый фосфатами (а также силикатами и кальцием) шлак в качестве сельскохозяйственного удобрения.

Подобно навозу, шлак на протяжении веков широко использовался в качестве удобрения или известкового материала при выращивании кукурузы, картофеля и сахарной свеклы, для повышения урожайности сельскохозяйственных культур и улучшения кислотности почвы в Германии, Бельгии, Франции и Великобритании (Mumpton F.A., 1999).

В книге «Элементы сельскохозяйственной химии» под редакцией Г. Дэви (1819), роль кремния в обеспечении защиты от повреждений насекомыми была прокомментирована следующим образом: «Кремневый эпидермис растений служит опорой, защищает кору от действия насекомых и, по-видимому, играет роль, подобную той, которую в животном царстве выполняют панцири ракообразных насекомых».

Ю. Либих (1840), немецкий химик и ученый-агроном, впервые рекомендовал силикат натрия в качестве кремниевого удобрения для повышения урожайности сельскохозяйственных культур после того, как он провел новаторские эксперименты в теплице для изучения влияния силиката натрия на рост сахарной свеклы. Он пришел к выводу, что истинная цель удобрений - поставлять растениям аммиак и такие соли, как силикат калия, фосфат кальция и фосфат магния.

Используя технику выращивания в растворе примерно в 1860-х годах в Германии, Ю. Сакс (1865) определил, какие элементы необходимы для питания растений, и в своей книге (глава «Питательные вещества») отметил, что Si не принадлежит к числу элементов, необходимых для питания растений в том же смысле, что калий и фосфор, но кремний широко распространен в растениях. Это первая статья, исключая Si как необходимый элемент и подчеркивающий его широкое распространение в растениях.

С 1856 года на Ротамстедской экспериментальной станции в Англии проводился долгосрочный полевой эксперимент с целью проверить влияние силиката натрия на рост и урожайность трав и ячменя. Силикат натрия продолжал существенно повышать урожайность в период 2002–2005 годов на участках, в которых не хватало P или K, но не оказывал никакого влияния на участки, получавшие эти питательные вещества (Rothamsted Research, 2006).

Многочисленные европейские исследования были проведены в отношении Si-опосредованной устойчивости к стрессу, вызванному токсичностью металлов, включая алюминий (Al), марганец (Mn) и кадмий (Cd).

За последнее столетие по всей Европе были проведены многочисленные исследования физиологической роли Si и его агрономических эффектов. Некоторые из наиболее впечатляющих работ были проделаны Н. Marschner и его коллегами, которые раскритиковали заявления японских учёных о существенности Si для роста и развития растений (Marschner H. et al., 1990). Например, J. Ma и E. Takahashi (1978–1983) сообщили, что лишённые кремния огурцы и помидоры, выращенные на гидропонике, проявляют типичные симптомы дефицита, что приводит к предположению, что кремний является важным элементом для высших растений. Однако, что касается экспериментов с огурцом, Н. Marschner пришел к выводу, что симптомы наблюдаемого дефицита кремния, на самом деле были симптомами дефицита цинка (Zn), поскольку концентрации Zn в

питательном растворе были низкими, а концентрации фосфора (P) были излишними. Они могли бы исправить симптомы болезни за счет снижения концентрации P в питательном растворе или повышения концентрации Zn. Таким образом, наблюдение J. Ma и E. Takahashi является примером опосредованного Si улучшения неблагоприятной окружающей среды.

О другом важном открытии сообщили Fleck et al. (2011). В своей работе они показали, что Si снижает радикалы кислорода и окислительную способность риса, тем самым увеличивая опробкование экзодермы и лигнификацию склеренхимы. Эти изменения усиливались по мере поступления Si и были связаны с более высокой транскрипцией генов, связанных с синтезом суберина и лигнина.

Японские ученые начали исследовать роль Si в высших растениях, особенно в растениях риса, в начале двадцатого века. Рис является основным продуктом питания в Японии и других странах Азии. Монокультура риса приводит к вымыванию и дефициту питательных веществ и доступного кремния. Таким образом, на таких рисовых полях происходит деградация почвы и низкая продуктивность (Ma J., Takahashi E., 2002).

Чтобы решить эту проблему, Министерство сельского, лесного и рыбного хозяйства Японии в 1952 году начало общенациональные испытания использования шлака на рисовых полях на различных экспериментальных станциях. Результаты показали, что, помимо пополнения основных ионов (например, P, K, Fe, Mn и Zn), шлак содержит важный источник Si, необходимый для улучшения продуктивности деградированных рисовых почв. Следовательно, Si был первым среди удобрений, внесенных в список питательных веществ в 1950-х годах. Первый национальный стандарт на Si-удобрения на основе шлака был установлен в Японии в 1955 году. Это один из наиболее важных вкладов японских ученых в область исследований и применения кремния. Широкое применение кремнистых удобрений, изготовленных на основе шлаков, в деградировавших рисовых почвах с недостатком кремния значительно способствовало стабильной

продуктивности риса и обеспечению продовольственной безопасности после Второй мировой войны.

Потребление кремниевых удобрений в год на основе шлаков составляет в среднем 1 миллион тонн (максимум 3 миллиона тонн). Кроме того, после того, как K. Imaizumi и S. Yoshida (1958) провели интенсивное исследование способности рисовых почв поставлять Si с использованием различных растворителей, они обнаружили наилучшую связь между количеством Si, экстрагируемого ацетатным буфером, и количеством Si в рисовой соломе.

С 2000-х годов J. Ma и его коллеги совершили прорыв в области транспорта Si в растениях, который привел к идентификации, характеристике, клонированию и функциональному анализу ряда генов-переносчиков Si, отвечающих за поглощение, транслокацию и распределение Si сначала в рисе, затем в ячмене и кукурузе и, совсем недавно, в тыкве.

Китай имеет долгую историю вклада использования кремния в сельское хозяйство. Сжигание дров или соломы в Китае было довольно распространенной практикой для приготовления пищи в сельской местности. Возврат сгоревшей золы, содержащей большое количество минеральных элементов, включая Si и K, на поля сельскохозяйственных культур в качестве удобрения почвы является чрезвычайно эффективной добавкой питательных веществ и Si, удаленных при сборе урожая.

Исследования физиологической и биохимической роли Si в стимулировании роста растений, повышении урожайности и повышении устойчивости к полеганию, болезням растений, повреждению вредителями и различным формам экологического стресса продолжаются с 1970-х годов.

За последние десятилетия в журналах было опубликовано множество статей. Одним из ярких моментов в исследованиях Si в Китае является гипотеза, предложенная Liang Y. и его коллегами (Liang Y.C. et al., 2003-2011), что антиоксидантная защита, усиленная Si, является универсальной и основной стратегией для Si- опосредованной толерантности к абиотическим стрессам таким, как засоление, заморозки, засуха и наличие тяжелых

металлов в растениях. Прогресс также был достигнут в изучении механизмов поглощения и транспорта Si двудольными растениями такими, как огурец. Впервые было продемонстрировано, что поглощение и транспорт Si является активным процессом в огурце. Более того, они пришли к выводу, что как активные, так и пассивные процессы поглощения Si сосуществуют в рисе, кукурузе, подсолнечнике и тыкве, причем их относительный вклад зависит от вида растения и внешних концентраций Si. Например, с 1975 по 2000 год был проведен 26-летний полевой эксперимент по внесению удобрений Si в дозе 1,5 т/ га на рисовые поля с глинистыми суглинками. Наблюдалось, что средняя урожайность риса за каждые 5 лет постоянно увеличивается при внесении силикатных удобрений по сравнению с обработкой NPK (Kim G.B., Choi J.H., 2002).

Исследования использования кремния в США начинаются с получения патента на использование шлака в качестве удобрения в США в 1881 году (Zippicotte J., 1881). До 1950-х годов в США проводились многочисленные исследования, чтобы продемонстрировать, является ли Si важным элементом для растения. Они заключались в исключении Si из окружающей среды, но никакого вывода сделано не было, поскольку не было получено убедительных доказательств.

В 1969 году J. Lewin и В. Reimann (1969) опубликовали обзорную статью «Кремний и рост растений», в которой они подробно обсудили химические формы, поглощение и распределение Si в растениях, а также его влияние на рост растений, повышенную токсичность Mn и Fe и потери воды за счет транспирации при дефиците Si, а также взаимодействия Si с P.

Последние годы наиболее важными обзорными статьями, касающимися питания растений Si, являются, два обзора E. Epstein (1994–1999), которые значительно стимулировали во всем мире исследования Si в химических, физиологических и молекулярных аспектах.

Также были представлены доказательства того, что заражение пшеницы мучнистой росой, вызванное кремнием, было связано с клеточной реакцией на присутствие грибов (Belanger R.R., 2005).

Позже F. Fauteux et al. (2005) предположили, что Si может действовать как потенциатор защитных реакций растений или как активатор стратегических сигнальных белков для взаимодействия с несколькими ключевыми компонентами сигнальных систем растений, что в конечном итоге приводит к индуцированной устойчивости против патогенных грибов. Однако молекулярные механизмы связи такого прайминга с Si до сих пор остаются неясными.

Связь между Si и праймингом во взаимодействиях растение-патоген недавно была подтверждена J. Vivancos и др. (2015), но в то же время их работа предполагает, что задействованы механизмы, отличные от Si-зависимого защитного прайминга растений. Эти последние результаты могут быть полезны для определения объединяющей теории, объясняющей неуловимый и обсуждаемый механизм действия Si во взаимодействиях растений и патогенов.

В России внимание к кремнию как элементу начали проявлять почвоведы, такие как Д.А. Сабинин, А. Крылов, К. Гедройц и И.В. Тюрин (Крупеников И.А., 1971; Аммосова Я.М. и др., 1990). Их исследования указывали на потенциально высокую активность кремниевых соединений в почвенно-растительной системе. Особенно в то время их интересовало взаимодействие растворимых кремниевых форм с фосфором и алюминием (Аммосова Я.М. и др., 1990). Проблеме взаимодействия этих элементов в СССР в 30-е годы 20 века были посвящены работы таких ученых, как А.И. Литкевич и К.Л. Аскинази. Значительную роль сыграли исследования академика В.И. Вернадского (1938), который утверждал, что жизнь на Земле невозможна без кремния. Он подчеркивал цикличность этого элемента в природных процессах. В.И. Вернадский считал, что жизненные организмы играют важную роль в этом цикле. А.П. Виноградов (1935) продолжал

исследовать биогеохимический цикл кремния, что стало основой для изучения его роли в лимнологии и микробиологии.

С точки зрения многих ученых (Ермолаев С.А., 1987; Мустафаев Ю.Х., 1990; Лобода Б.П. и др., 2003; Капранов В.Н., 2006, 2009; Куликова А.Х. и др., 2007, 2013; Козлов А.В., 2013, 2021) наиболее изученными породами, содержащими большое количество аморфного кремния, являются цеолиты и диатомиты. И их применение в качестве силикатных удобрений является наиболее перспективным.

1.3 Цеолит и цеолитсодержащие породы в качестве кремниевых удобрений озимой пшеницы

Природные цеолиты все еще остаются минералами будущего или, как назвал их Филипп Рошар, - «непризнанными звездами» среди «наиболее интеллектуальных минералов» (Rocher F., 1990).

Открытие природных цеолитов начинает важную главу в минералогическом секторе, благодаря их удивительным поверхностным и структурным свойствам, которые нашли применение во многих областях: сельском хозяйстве, промышленных технологиях, животноводстве, косметической и биотехнологической промышленности (Сафронов Д.В., 1989; Cataldo E., 2021).

Цеолиты были впервые представлены шведским минералогом А.Ф. Кронстедтом в 1756 году, когда был открыт минерал стильбит. При нагревании пламенем газовой трубки этот минерал теряет воду. Он назвал этот минерал «цеолитом» от греческого «zeo» — кипеть и «litos» — камень. С момента своего открытия цеолиты являются одними из наиболее распространенных минералов на Земле, которые были выделены в отдельную группу минералов.

Структурно цеолит представляет собой алюмосиликат (AlO_2 и SiO_4) тетраэдров, объединенных в трехмерные каркасы и напоминающих сотовую структуру (рис.1).

Клетки в пористой структуре цеолита имеют диаметр около 12 ангстрем, соединены между собой каналами диаметром 8 ангстрем, включают 12 колец тетраэдров. В зависимости от минералов поры взаимосвязаны, образуя длинные широкие каналы, которые облегчают легкое движение молекул внутрь структуры цеолита и из нее. Отрицательный заряд ионов алюминия в структуре цеолита уравнивается положительно заряженными катионами.

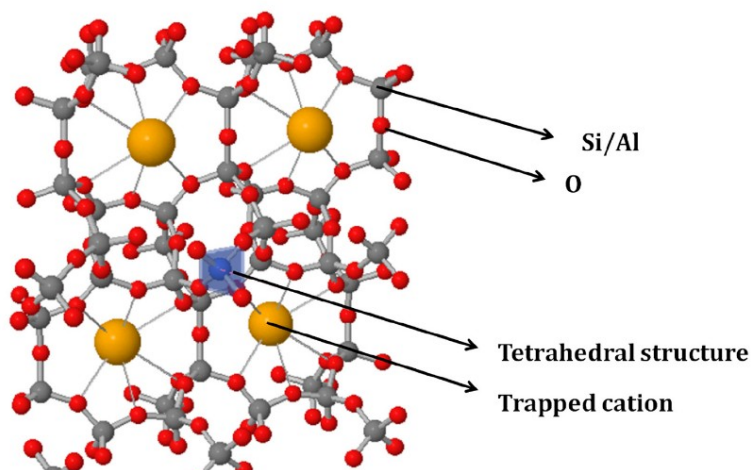


Рисунок 1. Тетраэдрический каркас цеолита (The International Zeolite Association (IZA))

Просторная пористая структура с крупными каналами в кристаллах цеолита делает его уникальным в природе по сравнению с другими силикатными минералами. Природные цеолиты содержат вышеупомянутые катионы с различными важными свойствами такими, как более высокая емкость катионного обмена (ЕКО), чем у обычной почвы, в диапазоне от 100 до 200 ммоль/100 г почвы, хранение свободной воды в своих структурных

каналах, а также обладание большей способностью адсорбции ионов на большой площади поверхности.

В 1930 году термин «молекулярное сито» был введен для обозначения материалов, обладающих селективными адсорбционными свойствами. Эти материалы могут содержать другие элементы в дополнение к кремнию и алюминию или вместо них.

Исследования по изучению возможности применения цеолитов в сельском хозяйстве и их коммерческое производство было начато в 1960-х годах. На долю Китая приходится около 75 % рынка от общего объема производства цеолитов, за ним следуют Корея (8 %), США (3 %) и Турция (2 %).

Динамика производства природного цеолита в Российской Федерации имеет положительный вектор и представлена на рисунке 2.

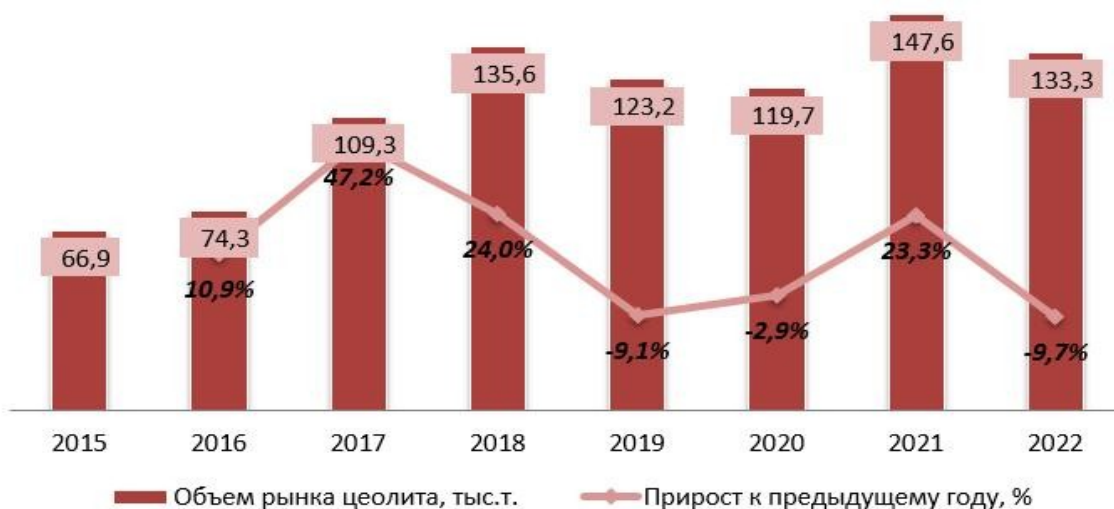


Рисунок 2. Динамика объемов производства природного цеолита в РФ (<https://gidmark.ru/news/trendyi-ryinka-prirodnogo-czeolita-v-rossii>)

В России изучением и практическим освоением природных цеолитов занимались десятки научно-исследовательских, производственных организаций и ведомств, объединенных в разные периоды научно-исследовательскими и научно-техническими программами, в том числе

«Цеолиты Сибири», «Опытно-промышленные испытания в определении масштабов использования природных цеолитов России», «Цеолиты России» («Природные цеолиты России», 1992).

В сельском хозяйстве значение цеолитов осозналось в большей степени с учетом их различной применимости.

Природные цеолиты рассматриваются как вещества:

- улучшающие почву, обладающие хорошей способностью удерживать влагу и питательные вещества;

- улучшающие скорость инфильтрации, насыщенную гидравлическую проводимость, емкость катионного обмена и предотвращающие потери воды из-за скорости просачивания и сокращения потери влаги из-за испарения.

Цеолиты можно использовать в качестве удобрения и хелатирующего агента. Цеолиты минимизируют скорость высвобождения питательных веществ как из органических, так и из неорганических удобрений и обеспечивают лучшую доступность питательных веществ на всех этапах роста сельскохозяйственных культур. Многие исследователи подтверждают улучшение широкого спектра агрономических и садовых культур в отношении роста, урожайности и качественных показателей при применении цеолитов (Арефьев, А.Н. и др., 2015, Куликова А.Х. и др., 2020).

Кроме того, цеолит может эффективно поглощать тяжелые металлы такие, как кадмий (Cd), свинец (Pb), никель (Ni); анионы такие, как хромат (CrO_4^{2-}) и арсенат (AsO_4^{3-}) и органические загрязнители такие, как летучие органические соединения (ЛОС), в том числе бензол, толуол, этилбензол и ксилол из почвы или водоема (Bhat J.A., 2019).

Признавая все вышеупомянутые преимущества, применение цеолитов в области сельскохозяйственных исследований приобрело широкое значение за последние два десятилетия, о чем свидетельствует хронологическая восходящая тенденция количества публикаций (Гришин Г.Е., 2009; Титова В.И., 2014; Арефьев, А.Н. и др., 2015; Биккинина, Л.М.-Х. и др., 2019;

Куликова А.Х. и др., 2023; Ramesh K. et al, 2011; Jakkula V. et al, 2018; Cataldo E., 2021; и др).

В нескольких более ранних исследованиях сообщалось о применимости цеолитов к улучшению свойств почвы, а также к способности удерживать влагу и питательные вещества, повышения урожайности и снижения токсичности тяжелых металлов (Сафронов Г.В., 1989; Мустафаев Ю.Х., 1990; Буров А.В., 2000; Лобода Б.П., 2000; Mumpton F.A., 1999).

Анализ экологомелиоративной эффективности цеолитов на агрочерноземе обыкновенном в условиях зауральской степной зоны Республики Башкортостан показал, что внесение в почву природных цеолитов приводит к восстановлению ухудшенных свойств агрочернозема обыкновенного. При дозах от 20 до 30 т/га произошло достоверное разуплотнение верхних слоев почвы на 0,02-0,03 г/см³, улучшение водных свойств почвы, экономное расходование влаги. При внесении цеолита в дозах от 15 до 30 т/га запасы продуктивной влаги увеличились на 75-88 мм (Суюндукова М.Б. и др., 2018).

Производственные испытания, проведенные в 2008 г. в ООО «Урицкое» (Орловская область), при внесении цеолита в дозе 2,5 ц/га под озимую пшеницу, показали ускорение прорастания и всхожести семян, улучшение перезимовки озимых, повышение урожайности и качества зерна. Прибавка урожайности зерна озимой пшеницы по сравнению с контролем составила 12,3 ц/га (Лобода Б.П., 2008).

Результаты исследования, проведенные в условиях Азербайджана, показали, что применение цеолита с удобрениями значительно повысило урожайность зерна озимой пшеницы. Наиболее эффективным из приведенных вариантов оказалось применение цеолита совместно с навозом (навоз 10 т/га +цеолит 5 т/га). При этом урожай зерна составил 23,8 ц/га, прибавка урожайности по сравнению с контрольным вариантом – 5,0 ц/га

или 26,6 %, а прибавка урожая за счет цеолита составила 1,3 ц/га или 5,8 %. (Асланов Г.А., 2016).

Использование на лугово-черноземной почве лесостепного Поволжья мелиоративных норм осадков сточных вод в комплексе с цеолитом обеспечивало повышение урожайности озимой пшеницы на 60,9-92,4 % в зависимости от дозы внесения. Содержание клейковины в зерне озимой пшеницы при этом повышалось на 4,8-7,8 % (Арефьев А.Н. и др., 2018).

В условиях дерново-подзолистых почв Нижегородской области установлено положительное влияние различных доз цеолитовой породы на эффективное плодородие дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы и содержание в ней биологически активного кремния. Охарактеризовано влияние породы на накопление различных кремниевых соединений в надземной биомассе сельскохозяйственных культур. Показано повышение их урожайности за счет действия цеолита и установлена оптимизация показателей качества основной части урожая. Урожайность основной продукции озимой пшеницы увеличивалась на 0,19 т/га. Оптимизация кремниевого питания культурных растений и подвижности элемента в почве за счет внесения высоких доз цеолита (12 т/га) положительно отражалась на качестве основной продукции. Накопление сырой клейковины в зерне озимой пшеницы достигало 35,3 % (Козлов А.В. и др., 2021).

Проведенные полевые испытания в Ньоне (Швейцария) на экспериментальной площадке Agroscope в 2022 и 2023 годах, где учитывались два экспериментальных фактора: уровень азотных удобрений и внекорневая подкормка цеолитом, также показали увеличение урожайности озимой пшеницы и повышение эффективности использования азота при самых низких дозах азотных удобрений. Результаты показывают, что средняя урожайность озимой пшеницы увеличилась на 6,7 % по всему градиенту азотных удобрений. Это объясняется средним увеличением количества зёрен на квадратный метр. Снижения концентрации азота в зерне не наблюдалось, что свидетельствует об увеличении поступления азота в зерно и большей

эффективности его использования (Fontana M. and et. all; 2024). Такие результаты позволяют рассматривать возможность сокращения количества азотных удобрений.

Таким образом, краткий обзор литературных сведений по теме диссертационной работы показывает:

- кремний, наряду с азотом, фосфором и калием, является незаменимым элементом питания растений;

- соединения кремния в почве контролируют важнейшие химические, физико-химические, биологические процессы и оказывают комплексное положительное действие на систему «почва-растение»;

- кремний способствует повышению устойчивости сельскохозяйственных культур к любым экологическим стрессам: полеганию, засухе, болезням и вредителям растений, действию любых токсикантов (тяжелые металлы, пестициды и др.). Обеспечивает повышение урожайности культур и качества продукции;

- постоянное отчуждение из почвы доступного кремния урожаем культур обуславливает необходимость применения кремниевых или силикатных удобрений. В качестве последних возможно применение кремнистых пород с высоким содержанием аморфного кремния;

- цеолиты, являясь одними из наиболее изученных пород, содержащие большое количество аморфного кремния наиболее перспективны для применения в качестве силикатных удобрений.

В условиях лесостепной зоны Среднего Поволжья приемы повышения эффективности цеолитсодержащих удобрений за счет обогащения их аминокислотами и карбамидом в технологии возделывания озимой пшеницы и внедрения их в сельскохозяйственное производство практически не изучено, что и послужило выбором направления проводимых исследований.

2. УСЛОВИЯ, МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Почвенно-климатическая характеристика лесостепи Поволжья и опытного поля Ульяновского ГАУ

Ульяновская область (рис. 3) находится на востоке Восточно-Европейской равнины. По своей площади (37, 18 тыс. км²) она находится на 59 месте среди 89 субъектов Российской Федерации. Область делится на холмистое Предволжье (3/4 территории), расположенное на Приволжской возвышенности, и равнинное Заволжье (1/4 территории), лежащее на древних террасах долины Волги (Милановский Е.В., 1940).



Рисунок 3. Карта районов Ульяновской области

Почвенный покров Ульяновской области демонстрирует значительное разнообразие, в основном включая черноземы (69,2 %), серые лесные (23 %) и перегнойно-карбонатные почвы, а также солонцы. Почвы региона обладают хорошими агрофизическими и водно-физическими характеристиками, а

также высоким потенциалом плодородия (Копосов И.П., 1948; Немцев С.Н. и др., 2015; Куликова А.Х. и др., 2017).

Опытное поле расположено на территории Чердаклинского района Ульяновской области, которая относится к левобережному агропочвенному району, расположенному на надпойменной террасе р. Волга.

Район находится в западной части лесостепного Левобережья. Протяженность территории с севера на юг — 60 км, с запада на восток — 60 км. Поверхность равнинная, с общим уклоном к Куйбышевскому водохранилищу.

Почвообразующие породы здесь представлены древнеаллювиальными отложениями в виде суглинистых осадков. Рельеф представляет собой слегка волнистую равнину с высотой 45-50 м над уровнем моря и включает комплексы древних террас. Микро- и мезорельеф — линейные и блюдцеобразные понижения.

Почва территории участка, где проводились опыты — чернозем типичный среднегумусный среднесуглинистый. Типичные черноземы получили большое распространение в регионе, по плато водоразделов, широким увалам и их склонам различных экспозиций. Типичные черноземы сформировались на желто — и коричнево-бурых глинах.

На опытном поле, где проводились исследования, содержание гумуса составляло 4,3 %, подвижных форм фосфора и калия (по Чирикову) 168 мг/кг и 150 мг/кг почвы, рН солевой 6,7. Средняя дата готовности почвы к проведению полевых работ — 20 апреля.

Морфологическое строение чернозёма типичного выражается следующими горизонтами:

Апах 0–28 см. Темно-серый, комковатый, среднесуглинистый, рыхлый от зяблевой вспашки, густо пронизан корнями растений, переход резкий по линии вспашки, не вскипает.

А1 28–72 см. Темно-серый, зернисто-комковатый, среднесуглинистый, уплотнен, переход постепенный, вскипает с 28 см.

АВ 72–91 см. Желтовато-грязно-серый, ореховатый, влажный, среднесуглинистый, структура укрупнена, корни, переход заметный. Белесая присыпка как правило отсутствует.

В 91–125 см. Серовато-желто-бурый, ореховато-комковатый, с потеками гумуса, слабо увлажненный, среднесуглинистый, уплотнен, слабые корни, бурно вскипает. Структура выражена неясно. Наблюдается максимальное скопление карбонатов.

ВС 125–161 см. Буровато-желтый, непрочно-крупно-комковатый, легкосуглинистый, гумусовые языки и потеки, бурно вскипает. Выделение карбонатов имеют форму прожилок и плесени.

С > 161 см. Светло-желтый однородный, бесструктурный, слабо увлажнен, легкосуглинистый, уплотнен, бурно вскипает. Выделение карбонатов имеет форму журавчиков.

Грунтовые воды располагаются на глубине 13-ти метров, а водоносный слой на глубине 34-54 метров. В целом почва опытного поля характеризуется достаточно высоким уровнем плодородия.

Лесостепная зона Ульяновской области характеризуется умеренно-континентальным климатом, который существенно влияет на сельское хозяйство региона. Среднегодовая температура колеблется от +2,7 до +3,8 °С, что отражает довольно суровые зимние условия и сравнительно короткий, но жаркий летний период. Июль, как самый теплый месяц, демонстрирует среднюю температуру +20,3 °С, в то время как январь, самый холодный месяц, опускается до -14,3 °С. Такой значительный температурный размах подчеркивает континентальность климата. Гидротермический коэффициент, отражающий соотношение осадков и испаряемости, составляет 0,8-1,0, что указывает на относительную достаточность влаги, хотя ее распределение во времени неравномерно, создавая периоды засух и избыточного увлажнения.

Сумма активных температур (температур выше +10 °С) достигает 2300-2600 °С, что определяет продолжительность вегетационного периода. Безморозный период длится 130-150 дней, период активной вегетации

растений – 130-140 дней, а период со средней суточной температурой выше +10 °С – 142 дня. Эти параметры критичны для сельскохозяйственных культур, определяя сроки посева, уборки и потенциальный урожай. Последний заморозок, как правило, наблюдается 14 мая, а первый – 22 сентября. Однако, эти даты могут существенно варьироваться из года в год, что увеличивает риски для земледелия.

Устойчивый снежный покров лежит 135-140 дней, устанавливаясь обычно в конце второй декады ноября и сходя во второй декаде апреля (данные Алисова Б.П., 1956). Наличие снежного покрова играет важную роль в регулировании почвенного режима, защищая почву от промерзания и обеспечивая запас влаги. Однако, его неравномерное распределение по территории области и нестабильность снежного покрова в отдельные годы могут приводить к негативным последствиям. Так, например, бесснежные зимы, особенно в южных районах, часто приводят к гибели озимых культур (Переведенцев Ю.П. и др., 2008; Шарипова Р.Б., 2021). Континентальность климата усиливается в восточном, южном и юго-восточном направлениях области, что объясняет повышенную уязвимость сельскохозяйственных культур в этих районах.

Весеннее возобновление вегетации озимых культур начинается при среднесуточной температуре +5 °С. Для ранних яровых и зернобобовых культур биологический минимум температуры прорастания семян составляет 2–5 °С. По наблюдениям А.Г. Галиакберова (1996), прогревание одного сантиметра почвы до средней температуры воздуха требует минимум два дня. Это значит, что даже незначительное похолодание весной может тормозить развитие растений и снизить урожайность.

Ульяновская область находится в зоне рискованного земледелия и погодные факторы существенно влияют на продуктивность сельскохозяйственных культур (Шарипова Р.Б. и др., 2011; Немцев С.Н. и др., 2012).

Для более полной характеристики закономерностей роста и развития сельскохозяйственных культур в зависимости от изменяющихся условий за годы проведения опыта по отдельным периодам проведена оценка климатических показателей. Наблюдения за метеорологическими условиями за годы исследований (2020-2023 гг.) проводились на электронной метеостанции, размещенной в непосредственной близости от опытного поля.

Оценка динамики метеорологических условий за 2020-2023 гг. показала значительную вариабельность суммы осадков и температур, как за вегетационный период, так и в целом за годы исследования (рис. 4,5, табл. 1).

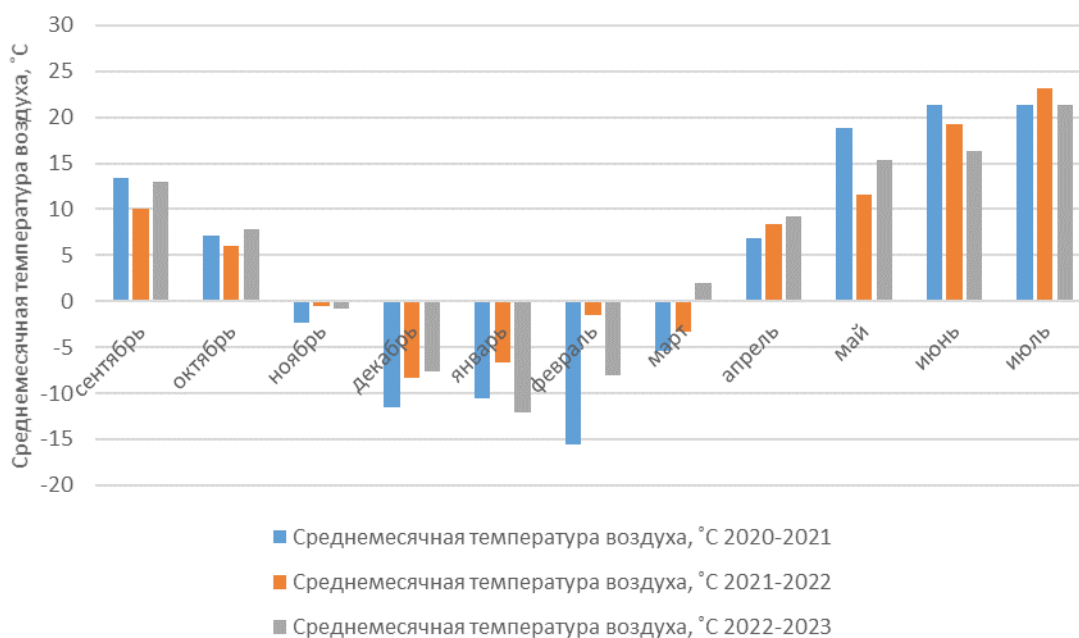


Рисунок 4. Среднемесячная температура воздуха за вегетационный период в годы исследований

Выпадение осадков в начале вегетации (осенний период), а в последствии и ее возобновления (весенний период) имеет важное значение для сохранения влаги в почве. Накопившаяся влага в осенне-зимний период в дальнейшем благоприятно влияет на фенологические фазы роста и развития озимой пшеницы (Постников П.А. и др., 2023).

2021 год был не очень благоприятным для возделывания зерновых культур, в том числе и озимой пшеницы: за период вегетации опытной культуры в весенне-летний период выпало 137 мм осадков, а сумма активных температур ($> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) составила 1888,8 $^{\circ}\text{C}$.

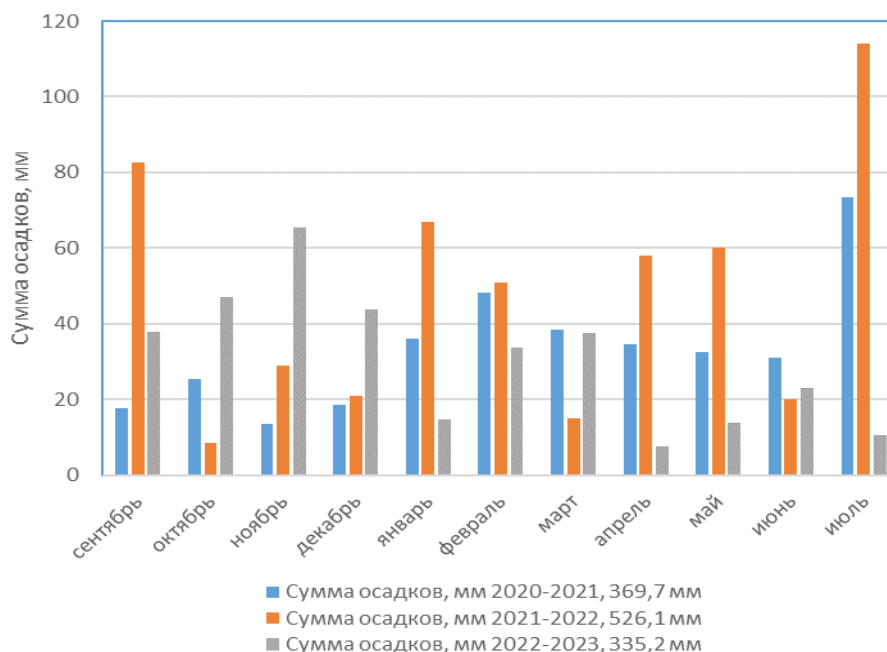


Рисунок 5. Сумма осадков за вегетационный период в годы исследований

2022 год отличался более благоприятными погодными условиями по сравнению с 2021, а в последствии и с 2023 годом. За период после возобновления вегетации выпало 194 мм осадков, сумма активных температур составила 1651,7 $^{\circ}\text{C}$. Но, так как интенсивно засушливая погода сместилась на август, на урожай она влияния не оказала, а достаточное количество осадков в апреле и мае (58 и 60 мм) в купе с оптимальным температурным режимом (8,4 $^{\circ}\text{C}$ и 11,6 $^{\circ}\text{C}$) позволили сформировать высокий урожай сельскохозяйственной культуры.

В 2023 году за этот же период вегетации озимой пшеницы сумма осадков составила 71,9 мм, что значительно меньше предыдущих лет

исследования. Кроме того, в начале вегетации (после всходов) в течение почти месяца осадки практически отсутствовали, что отразилось на динамике развития растений. В мае выпало только 13,9 мм осадков. Частично недостаток влаги возмещался запасами продуктивной влаги из почвы, сформированной в осенне-зимний период. Июнь и июль характеризовались наиболее высоким температурным режимом и низкими показателями осадков по сравнению со среднеголетними данными. Сумма активных температур составила 1629,7 °С.

Гидротермический коэффициент по Селянинову за исследуемые периоды составил 0,78 в 2021 году, 0,84 в 2022 году и 0,44 в 2023 году (рис. 6,7,8). Данный коэффициент показывает насколько засушливым был вегетационный период. Исходя из этого 2021 и 2022 годы характеризуются как засушливый, а 2023 год как очень засушливый.

Таблица 1. Количество осадков, сумма температур и показатели ГТК

Годы	Май			Июнь			Июль		
	Количество осадков, мм	Сумма температур, °С	ГТК	Количество осадков, мм	Сумма температур, °С	ГТК	Количество осадков, мм	Сумма температур, °С	ГТК
2021	32,6	585,9	0,55	31,0	639	0,49	73,4	663,4	1,11
2022	60	359,6	1,67	20	576	0,35	114	716,1	1,59
2023	13,9	477,4	0,29	22,9	492	0,47	35,1	660,3	0,53

Количество осадков в мае оказывает наибольшее влияние на продуктивность сельскохозяйственной культуры. В июле на фоне положительного действия атмосферных осадков большее внимание приобретает температурный фактор.



Рисунок 6. Климатограмма (2021 г.)

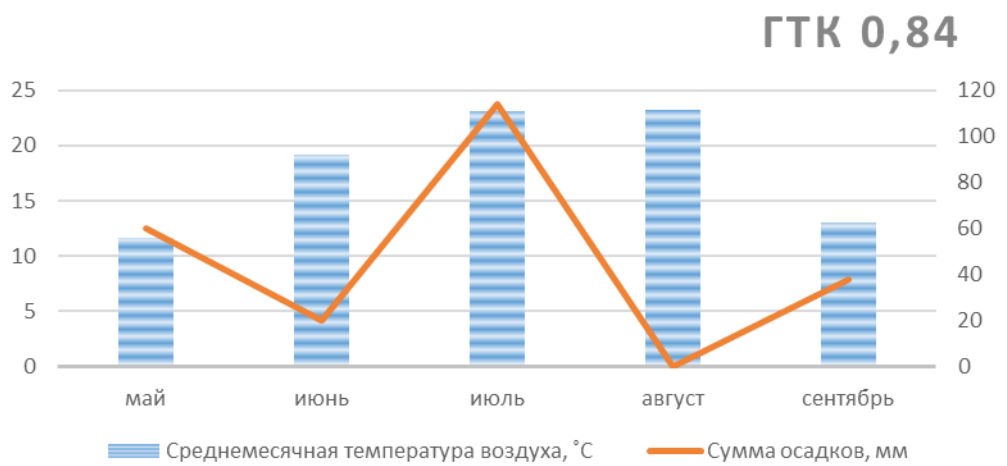


Рисунок 7. Климатограмма (2022 г.)

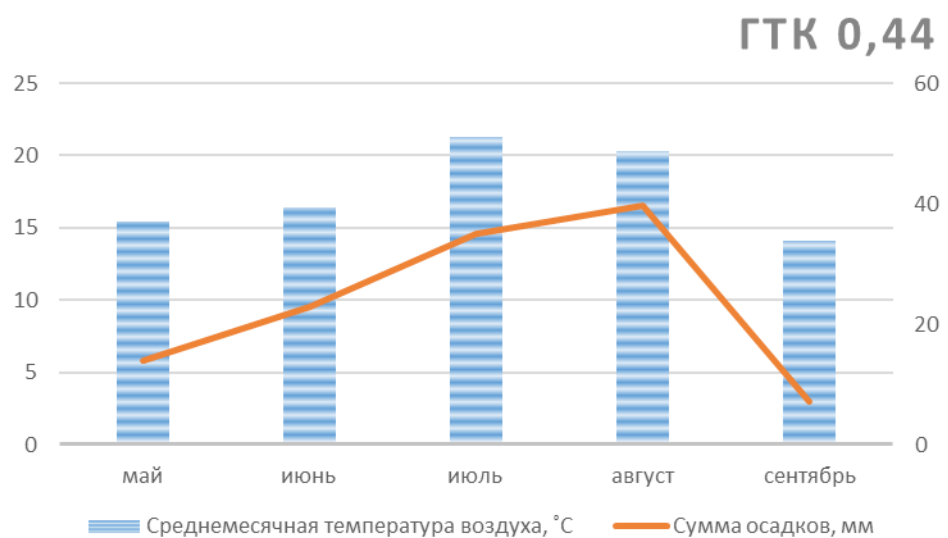


Рисунок 8. Климатограмма (2023 г.)

Таким образом, погодные условия в течение всей вегетации культуры, складывающиеся в 2022 году были наиболее благоприятными, по сравнению с 2023 годом, и, особенно, с 2021 годом, что непосредственно сказалось на урожайности экспериментальной культуры.

2.2 Схема опыта и технология возделывания озимой пшеницы

Как уже отмечалось, исследования по изучению эффективности цеолита и удобрений на его основе в повышении продуктивности озимой пшеницы проводились в течение 2020-2023 гг. на опытном поле Ульяновского государственного аграрного университета имени П.А. Столыпина.

Научные исследования проводили в двухфакторном полевом опыте по следующей схеме:

1. Контроль - фон 1 (Ф1);

1.1. Фон 1 + цеолит, 250кг/га (Ф1+Ц1);

1.2. Фон 1 + цеолит, 500кг/га (Ф1+Ц2);

1.3. Фон 1 + цеолит, обогащенный карбамидом, 250кг/га (Ф1+ЦК1);

1.4. Фон 1 + цеолит, обогащенный карбамидом, 500кг/га (Ф1+ЦК2);

1.5. Фон 1 + цеолит, обогащенный аминокислотами, 250 кг/га

(Ф1+ЦА1);

1.6. Фон 1 + цеолит, обогащенный аминокислотами, 500 кг/га

(Ф1+ЦА2)

2. N40P40K40 - фон 2 (Ф2)

2.1. Фон 2 + цеолит, 250кг/га (Ф2+Ц1);

2.2. Фон 2 + цеолит, 500кг/га (Ф2+Ц2);

2.3. Фон 2 + цеолит, обогащенный карбамидом, 250кг/га (Ф2+ЦК1);

2.4. Фон 2 + цеолит, обогащенный карбамидом, 500кг/га (Ф2+ЦК2);

2.5. Фон 2 + цеолит, обогащенный аминокислотами, 250 кг/га

(Ф2+ЦА1);

2.6. Фон 2 + цеолит, обогащенный аминокислотами, 500 кг/га

(Ф2+ЦА2)

Объектами исследования являлись:

- почва – чернозем типичный среднеспонгиозный среднесуглинистый с содержанием гумуса 4,6 %, обеспеченностью подвижным фосфором 155 мг/кг, подвижным калием 176 мг/кг, реакцией почвенного раствора 6,7;

- озимая пшеница (*Triticum aestivum L.*) сорта Саратовская 17. Относится к лютеценс. Колос цилиндрической формы с равномерной по всей длине плотностью (2,2-2,4 колоска/см). Короткие остевидные отростки возможны в верхней части колоса. Зерно полуудлиненной формы, крупное, но мельче, чем у стандартов. Средняя масса 1000 зерен - 42,7 г. Листья широкие, неопушенные, в период трубкования восковой налет отсутствует. Засухоустойчивость выше средней, морозоустойчива. Основным достоинством является сочетание высоких урожайных свойств с отличными показателями качества, а также толерантность к повреждению зерна ферментом клопа вредной черепашки;

- цеолит Юшанского месторождения Ульяновской области. Минералогический состав включает высокое содержание клиноптилолита, (обладает способностью к абсорбции, катионному обмену, катализу и дегидратации) и монтмориллонита (обладающий способностью к адсорбции различных ионов, в основном катионов, а также к ионному обмену). Наличие изоморфных замещений, огромная удельная поверхность (до 600-800 м²/г) и легкость проникновения ионов в межпакетное пространство обеспечивают значительную емкость катионного обмена (Куликова А.Х. и др., 2020; Рудмин М.А. и др., 2021) (рис.9).

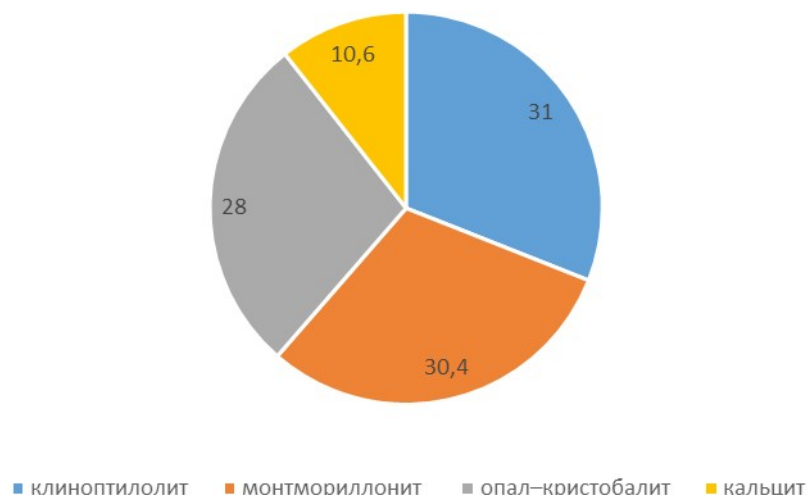


Рисунок 9. Минералогический состав цеолита, %

Цеолит содержит до 51,28 % аморфного (биодоступного кремния) (рис. 10).

Физико-химические свойства цеолита обладают своей уникальностью. Обменная емкость максимальная среди природных цеолитов – до 1,5 г-экв/кг, общая пористость составляет 23-53 %, рН водной вытяжки 6,4-7,9 единиц, обладает высокой влагоемкостью и способностью удерживать влагу, элементы питания и таким образом пролонгировать их влияние на систему «почва-растение»;

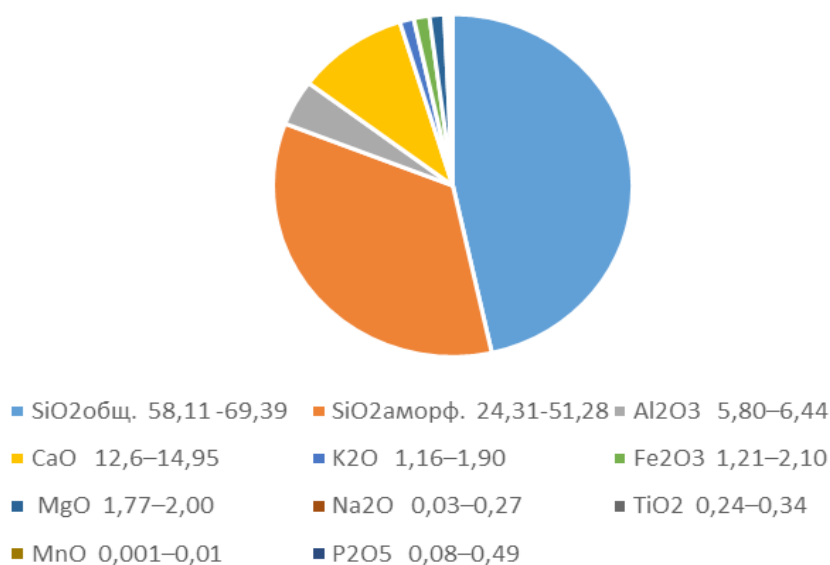


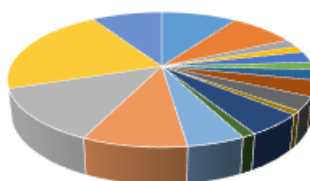
Рисунок 10. Химический состав цеолита, %

- цеолит, обогащенный карбамидом, предварительно подготовленный с помощью механической активации, термической активации и ультразвуковой активации;

- цеолит, обогащенный аминокислотами. Аминокислоты с низким молекулярным весом (менее 10-и ангстрем), обладающие высокой биологической активностью за счет карбоксильных и аммонийных групп (COO^- , NH_3^+). Они легко проникают в микроскопические поры цеолита и активно участвуют в электронно-ионных процессах внутри цеолитов.

Аминокислотный состав, используемый для модификации цеолита представлен на рисунке 11.

- минеральное удобрение, в состав которого входит азот, фосфор и калий по 16 % и мочевины с содержанием азота 46 %.



■ Аспарагиновая кислота 3,31±0,50	■ Глутаминовая кислота 2,88±0,43
■ Серин 0,70±0,11	■ Гистидин 0,52±0,08
■ Глицин 0,95±0,14	■ Треонин 0,60±0,09
■ Аргинин 0,89±0,13	■ Аланин 1,30±0,19
■ Тирозин 1,15±0,17	■ Цистин 0,32±0,05
■ Валин 1,82±0,27	■ Метионин 0,42±0,06
■ Фенилаланин 1,76±0,26	■ Изолейцин 3,18±0,48

Рисунок 11. Аминокислотный состав, %

Опыт проводили в четырехкратной повторности с рандомизированным расположением делянок. Посевная площадь делянки 40 м² (4x10), учетная — 20 м² (2x10).

Технология возделывания озимой пшеницы основывалась на общепринятых в Ульяновской области агротехнических приемах. Экспериментальные удобрения вносили вручную под культивацию перед посевом озимой пшеницы.

На минеральном фоне удобрения вносили дробно. Под предпосевную культивацию основную часть расчетной дозы удобрений – N10P40K40 в виде карбамида, двойного суперфосфата и хлористого калия, которые заделывали в почву дискатором БДМ-3×4 на глубину 10–12 см. Весной вначале возобновления вегетации озимой пшеницы производили подкормку аммиачной селитрой (30 кг азота).

Посев озимой пшеницы (сорт Саратовская-17) проводили в первой декаде сентября после предпосевной культивации. Посевы прикатывали кольчато-шпоровыми катками ЗККШ-6А.

При достижении полной спелости зерна (третья декада июля) урожай озимой пшеницы убирали комбайном «TERRION SP 2010».

2.3 Методология и методы

Методологической основой исследования явился комплексный подход к изучению изменений свойств и режимов почвы при внесении в нее цеолита и удобрений на его основе. Данная методология определила круг задач, приведенных выше. Используются методы проведения полевых опытов, лабораторных анализов почвенных и растительных образцов; статистические методы обработки данных, табличное и графическое представление результатов.

Полевые опыты сопровождали лабораторно-полевыми наблюдениями, анализами и исследованиями:

Фенологические наблюдения проводили по фазам развития на делянках двух несмежных повторностей опыта в соответствии с методикой ГСУ. Последовательность фенологических фаз от всходов до колошения и

цветения закономерна и необратима. Рост и развитие озимой пшеницы не происходит с фиксированной скоростью, а продолжительность межфазных периодов динамично меняется в течение всего жизненного цикла растений (Ефремова Т.Т., Чуманова Е.В.; 2023). У озимой пшеницы отмечали следующие фенологические фазы:

Всходы — скорость появления всходов зависит от температуры и влажности почвы, а также от глубины заделки семян. При температуре 14-16 °С и наличии влаги в поверхностном слое почвы они появляются через 7-9 дней после посева.

Кущение — через несколько дней после всходов растения пшеницы образуют 3-4 листа. С этого момента рост стебля и листьев замедляется и начинается новая фаза развития — кущение.

Выход в трубку — в конце фазы кущения (через 25-30 дней после весенней вегетации) междоузлия удлиняются, и стебель появляется над поверхностью почвы. Этот период развития растений называется выходом в трубку.

Колошение — эта стадия начинается, когда последний (флаговый) лист начинает выходить наружу. Этап важен, потому что флаговый лист составляет примерно 75 % эффективной фотосинтезирующей площади всего растения, которая способствует наполнению массы 1000 зерен. Поэтому важно защищать и поддерживать этот лист (без болезней и повреждений насекомыми) до и во время развития колоса. Когда появляется флаговый лист, над поверхностью почвы видны три узла.

Цветение — к моменту наступления этой стадии цветки на колосе бывают развиты неодинаково. Эта стадия характеризуется появлением пыльников из соцветий в центре колоса. Пшеница – самоопыляемая культура, и большинство цветков опыляется до того, как образуются пыльники.

Созревание — эта фаза проходит от водянистой (прозрачная жидкость выделяется из развивающейся зерновки), через молочную (жидкость, похожая на молоко, выделяется из зерен) и восковую (восковой или

мучнистый материал, получаемый при раздавливании зерен, имеет рыхлую консистенцию), к полной спелости (зерновка не проминается ногтем).

Почвенные образцы для агрохимической и агрофизической характеристики отбирали буром Малькова в пахотном слое каждого варианта I и III повторностей в пяти точках по двум диагоналям делянок.

В этих образцах определяли:

- обменную кислотность pH_{KCl} – потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-85),

- азот общий (N) ГОСТ 26107-84

- азот аммонийный (N-NH₄) ГОСТ 26489-85

- азот нитратный (N-NO₃) ГОСТ 26951-86

- подвижные формы фосфора и калия – по методу Ф.В. Чирикова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26204-91);

- медь (Cu) ГОСТ Р 50684-94, ГОСТ Р 50683-94

- цинк (Zn) ГОСТ Р 50686-94

- марганец (Mn) ГОСТ Р 50685-94

Структурно-агрегатный состав почвы определялся по методу Н.И. Савинова, фракционированием почвы в воздушно-сухом состоянии (сухое просеивание).

Плотность сложения почвы – с использованием бура Качинского для отбора образца почвы с ненарушенным сложением (Федоровский Д.В., 1985);

Отбор почвенных образцов для определения агрохимических показателей осуществляли в 3 этапа: перед посевом, весной при возобновлении вегетации и в фазу полной спелости.

Влажность почвы определяли термостатно-весовым методом согласно ГОСТ 27548-97. Пробы почвы отбирались почвенным буром через каждые 10 см на глубину до 1 метра в трехкратном повторении на 1-й и 3-й повторности опыта. Запасы влаги, общий расход и коэффициент водопотребления расчетным путем.

Биологическую активность почвы — методом аппликации (льняные полотна закладывали весной в начале возобновления вегетации озимой пшеницы в 4-х кратной повторности. Выемку их производили перед уборкой озимой пшеницы).

Учет урожая проводили комбайном «TERRION SP 2010» путем сплошного обмолота всей массы с учетной делянки с пересчетом на 100 % чистоту и 14 % влажность (ГОСТ 27548 – 97);

В растительных образцах определяли:

- содержание общего азота – по Къельдалю (ГОСТ 13496.4-93),
- содержание общего фосфора – фотометрическим методом (ГОСТ 26657–97),
- содержание общего калия – методом пламенной фотометрии (ГОСТ 30504-97),
- содержание тяжелых металлов атомно-абсорбционным методом (ГОСТ 30692–2000),
- содержание белка по ГОСТ–10846–91,
- содержание клейковины по ГОСТ – 10846 – 74.

Экономическую оценку технологий возделывания озимой пшеницы с использованием цеолита и экспериментальных удобрений на его основе, определяли по системе натуральных и стоимостных показателей с использованием нормативов и расценок, принятых для производственных условий опытного поля в 2023 году.

Энергетическую оценку эффективности технологий возделывания озимой пшеницы с применением экспериментальных удобрений проводили по методике Е.И. Базарова и др. (1983) и В.М. Володина (2000).

Результаты исследований статистически обрабатывали методами дисперсионного (Доспехов Б.А., 2011) и корреляционно-регрессионного анализов с использованием программ MS Excel 2019 и Statistik C-1.

Организацию полевого опыта и проведение наблюдений, агрохимические анализы почвы и растений выполняли по соответствующим

ГОСТам и общепринятым стандартным методикам. Все анализы проводили в аккредитованной лаборатории «САС «Ульяновская» (№РА.RU.510251) и испытательной лаборатории «Ульяновская ГСХА».

Технологическая линия обогащения цеолита состоит из 3 этапов: на 1 этапе производится каскадная механическая активация природного цеолита, в результате чего происходит очистка его от примесей, позволяющая получить продукт с максимальным содержанием основного компонента – клиноптилолита. 2 – этап – термическая активация, когда при расчетных температурах происходит дегидратация цеолита, удаление цеолитной воды, газообразных и органических примесей. На 3-м этапе производится обогащение подготовленного цеолита водным раствором аминокислотного комплекса или другими компонентами (при необходимости) на специально разработанном оборудовании по специальной технологии. Производство заканчивается сушкой и гранулированием продукта.

3. ВЛИЯНИЕ ЦЕОЛИТА И УДОБРЕНИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ НА СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМА ТИПИЧНОГО

3.1 Физические

Структурно-агрегатный состав, плотность почвы

Физические свойства почвы включают объемную плотность, плотность частиц, аэрацию, пористость почвы, водоудерживающую способность. При этом объемная плотность является основным свойством, влияющим на общую пористость и стабильность ее верхнего слоя почвы.

Уплотнение почвы является серьезной сельскохозяйственной проблемой, значительно влияющей на продуктивность сельскохозяйственных культур. Плотность почвы рассматривается как ключевой фактор, который коррелирует с уплотнением почвы и многими ее физическими, химическими и биологическими свойствами.

Применение цеолитов снижает объемную плотность, что изменяет водоудерживающую способность и воздушную пористость почвы.

Ухудшение агрофизических и агрохимических свойств почв лесостепи Поволжья в результате интенсивного их использования приводит к снижению продуктивности сельскохозяйственных культур (Чекаев Н.П. и др., 2019).

Регулирование физических свойств почвы, к которым относятся гранулометрический состав, структурное состояние, плотность и пористость, имеет важное значение для создания условий нормального протекания биологических и биохимических процессов, определяющих ее эффективное плодородие (Кафтан Ю.В. и др., 2019; Мамиев Д.М., 2023).

Большой интерес в этом отношении представляет использование кремнистых пород с высоким содержанием кремния, в частности цеолит как удобрение сельскохозяйственных культур. Цеолит, благодаря особенностям кристаллоструктурного строения и минералогического состава, отличается

высокой сорбционной и ионообменной способностями и каталитической активностью (Kulikova A.Kh. et al, 2023).

Цеолиты способны улучшать физическое состояние почвы, благодаря присутствию в них аморфного кремнезема (Куликова А.Х. и др., 2020; Cataldo E. et al, 2021).

Регулирование агрофизических свойств почвы имеет исключительно важное значение в создании оптимальных почвенных условий для роста и развития растений (Долгополова Н.В. и др., 2021). На рисунке 12 представлены агрофизические показатели чернозема типичного при возделывании озимой пшеницы с использованием в качестве удобрения цеолита, а также экспериментальных удобрений на его основе.

Исследования показали, что физическое состояние почвы опытного поля мало соответствует требованиям возделываемых культур: плотность пахотного слоя на контроле составляла $1,21 \text{ г/см}^3$, содержание агрономически ценных агрегатов размерами $10-0,25 \text{ мм}$ - $59,8 \%$, коэффициент структурности ниже оптимальных значений.

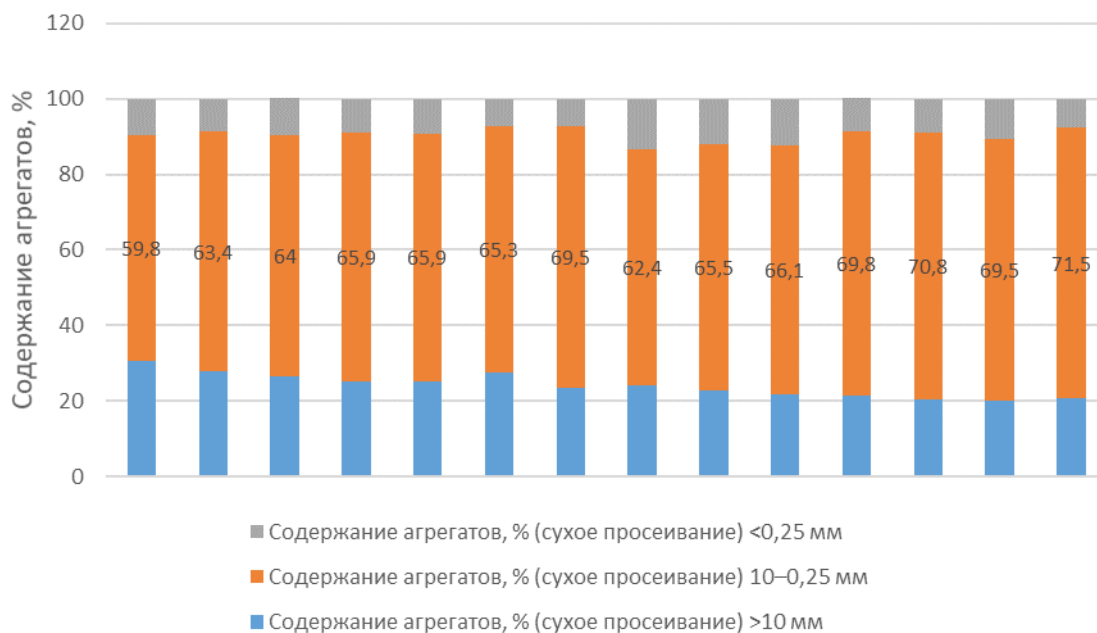


Рисунок 12. Структурно-агрегатный состав чернозема типичного под посевами озимой пшеницы за 2021-2023 гг.

Полученные данные свидетельствуют, что количество агрономически ценных агрегатов размерами 0,25-10 мм под посевами озимой пшеницы при применении цеолита, а также удобрений на его основе с обогащением его карбамидом и аминокислотами существенно повышалось: от 3,6 % (цеолит, 250 кг/га) до 9,7 % (цеолит, обогащенный аминокислотами, 500 кг/га) на естественном агрофоне и составило 63,4 и 69,5 % соответственно. На фоне минеральных удобрений количество агрономически ценных агрегатов также возрастало от 3,1 % (цеолит, 250 кг/га) до 9,1 % (цеолит, обогащенный аминокислотами, 500 кг/га) по отношению к фону и составило 65,5 и 75,5 % соответственно.

Таким образом, при внесении в почву экспериментальных удобрений на основе цеолита показатели агрофизического состояния пахотного слоя приобрели оптимальные для озимой пшеницы значения (рис. 13).



Рисунок 13. Влияние удобрений на плотность пахотного слоя почвы и коэффициент структурности чернозема типичного под посевами озимой пшеницы, 2021-2023 гг.

Плотность пахотного слоя на естественном фоне составила от 1,13 до 1,07 г/см³, коэффициент структурности от 1,89 до 2,28, на минеральном фоне от 1,09 до 1,06 г/см³, коэффициент структурности от 2,28 до 2,51. Применение цеолита в чистом виде также повлияло на агрофизическое состояние почвы под посевами озимой пшеницы, но в меньшей степени.

При анализе полученных экспериментальных данных установлена отрицательная связь между плотностью пахотного слоя и коэффициентом структурности (рис. 14), выражаемая уравнением регрессии: $y = -0,15x + 1,42$. Коэффициент корреляции составляет 0,96.

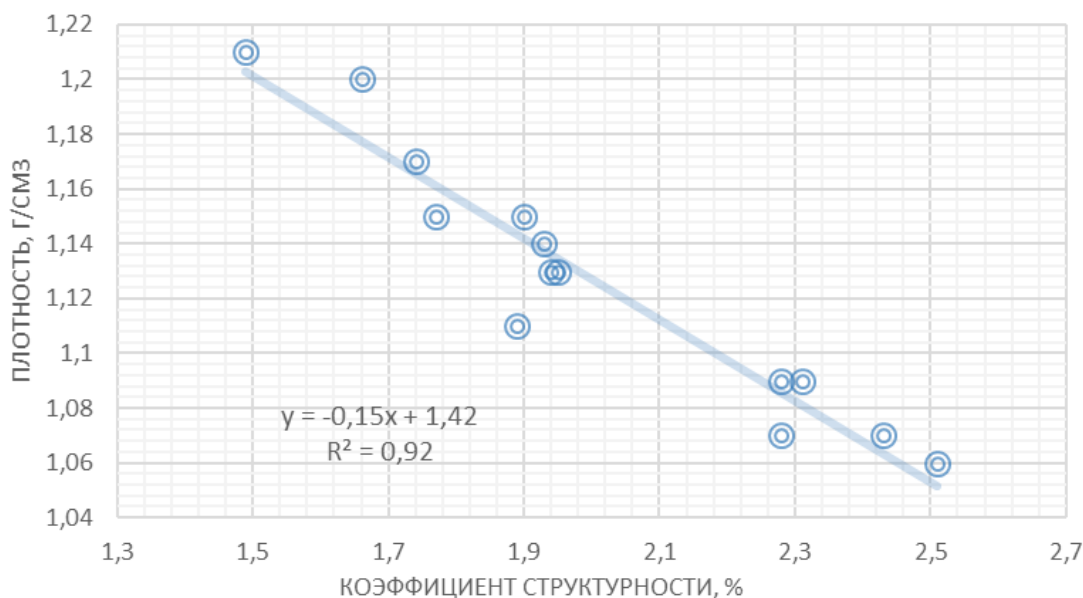


Рисунок 14. Зависимость плотности пахотного слоя почвы от коэффициента структурности

Таким образом, цеолит Юшанского месторождения при применении как в чистом виде, так и, особенно, при модификации его карбамидом и аминокислотами, оказал достоверное положительное влияние на агрофизические показатели пахотного слоя чернозема типичного, которые приобрели оптимальные для возделывания озимой пшеницы значения.

Анализ показателей корреляционной зависимости урожайности зерна от агрофизических показателей почвы позволяет установить, что степень влияния их высокая с показателями коэффициента корреляции 0,85; 0,85; -0,74; (табл. 2, рис. 15).

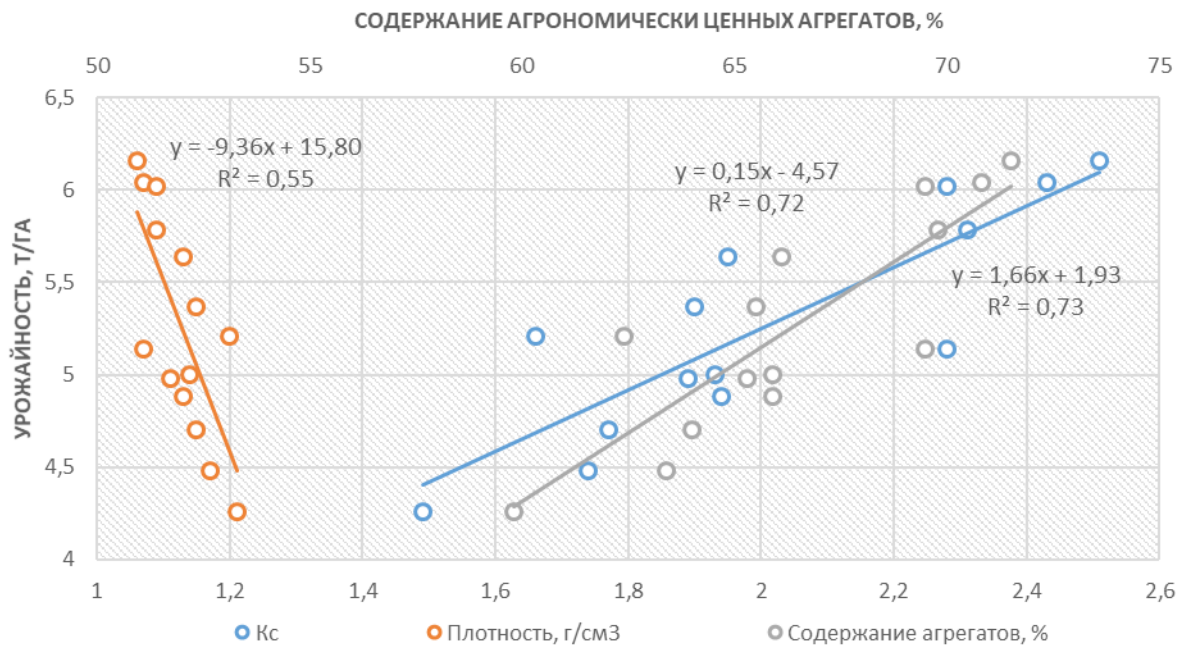


Рисунок 15. Корреляционная зависимость урожайности озимой пшеницы от агрофизических показателей почвы

Таблица 2. Связь агрофизических показателей почвы с урожайностью озимой пшеницы

Показатели	Коэффициент корреляции	Степень зависимости	Уравнение регрессии
Содержание агрономически ценных агрегатов	0,85	прямая, сильная	$y = 0,15x - 4,57$
Коэффициент структурности	0,85	прямая, сильная	$y = 1,66x + 1,93$
Плотность пахотного слоя	-0,74	обратная, сильная	$y = -9,36x + 15,80$

Водный режим почвы

Изучение водного режима почвы имеет первостепенное значение в связи с ее плодородием – почва является практически единственным источником влаги для растений.

Г.Н. Высоцкий (1960) сравнивал почвенную влагу с кровью живого организма. Движение веществ в почве осуществляется главным образом с почвенной влагой в растворенном виде, а минеральные вещества, поглощаемые растениями, проникают в их тела также с почвенным раствором.

Особенно важно знать не только содержание влаги в почве, а степень ее доступности для растений (табл. 3).

Запасы продуктивной влаги (ЗПВ) в весенний период, во время возобновления вегетации сельскохозяйственной культуры, характеризуются варьированием по годам (коэффициент вариации 17-26 % - мощность слоя почвы от 0 до 30 см и 12-17 % - мощность слоя почвы от 0 до 100 см), что может указывать на нестабильную обстановку по увлажнению в годы исследования и, как следствие, варьирование урожайности озимой пшеницы.

Изучение динамики продуктивной влаги почвы под посевами озимой пшеницы показало, что как весенние запасы продуктивной влаги, так и запасы влаги перед уборкой культуры были выше в 2022 году по сравнению с 2021 и 2023 годами. Так, содержание доступной влаги в пахотном слое почвы в 2022 году по отношению к 2021 году превышало на 18-28 % в весенний период и на 64-71 % перед уборкой в зависимости от применяемой системы удобрения. В метровом слое эти показатели достигали 20 и 23 % в весенний период и до 33 и 56 % в период перед уборкой в сравнении с 2021 и 2023 гг. соответственно.

При одностороннем действии цеолитов и их сочетании с карбамидом и аминокислотами в пахотном горизонте складывался более благоприятный режим влажности по сравнению с контролем.

Таблица 3. Запасы продуктивной влаги в почве под посевами озимой пшеницы в среднем за вегетацию, мм

Варианты	2021 г.				2022 г.				2023 г.				Средняя			
	возобновление вегетации		перед уборкой		возобновление вегетации		перед уборкой		возобновление вегетации		перед уборкой		возобновление вегетации		перед уборкой	
	0-30	0-100	0-30	0-100	0-30	0-100	0-30	0-100	0-30	0-100	0-30	0-100	0-30	0-100	0-30	0-100
1. Ф1	45	138	8	64	55	163	28	96	39	124	6	42	46	142	14	67
1.1. Ф1+Ц1	47	139	11	68	60	166	32	98	40	125	8	44	49	143	17	70
1.2. Ф1+Ц2	48	138	12	69	67	168	33	99	41	125	9	46	52	144	18	71
1.3. Ф1+ЦК1	49	138	10	68	65	171	32	98	40	125	7	46	51	145	16	71
1.4. Ф1+ЦК2	49	139	12	69	66	173	34	98	41	126	8	47	52	146	18	71
1.5. Ф1+ЦА1	50	140	11	69	65	170	33	97	39	124	8	46	51	145	17	71
1.6. Ф1+ЦА2	51	141	12	70	67	172	35	99	41	125	8	47	53	146	18	72
2. Ф2	48	138	9	66	65	164	30	97	39	124	6	43	51	142	15	69
2.1. Ф2+Ц1	50	139	10	67	64	168	32	98	39	125	7	44	51	144	16	70
2.2. Ф2+Ц2	51	140	12	69	68	169	34	98	41	125	8	46	53	145	18	71
2.3. Ф2+ЦК1	50	140	10	67	65	169	33	97	40	124	8	45	52	144	17	70
2.4. Ф2+ЦК2	52	141	11	69	67	170	33	98	41	125	9	45	53	145	18	71
2.5. Ф2+ЦА1	51	142	9	70	66	169	34	98	40	124	8	45	52	145	17	71
2.6. Ф2+ЦА2	51	142	12	70	67	170	34	98	41	125	9	46	53	146	18	71
Фактор А	1,05	0,78	Fφ<Fт	Fφ<Fт	Fφ<Fт	Fφ<Fт	Fφ<Fт	Fφ<Fт	Fφ<Fт	Fφ<Fт	Fφ<Fт	Fφ<Fт	1,32	Fφ<Fт	Fφ<Fт	Fφ<Fт
Фактор В	1,97	1,45	1,49	1,63	Fφ<Fт	2,91	1,73	Fφ<Fт	0,88	0,75	Fφ<Fт	1,49	2,47	1,25	1,05	1,23

Многими исследователями ранее было установлено, что внесение в почву цеолитов способствует улучшению влагоудерживающей способности почв (Бекузарова С.А. и др., 2003; Арефьев А.Н. и др., 2016; Суюндуков Я.Т. и др., 2017).

Действие кремнийсодержащих пород на повышение запасов продуктивной влаги обеспечивается не только благодаря пористой структуре строения, но и содержанием аморфного кремнезема, входящего в их состав. Например, в работе В.В. Матыченкова (2008) упоминается, что один атом кремния способен удерживать до 119 молекул воды. Исследования Р.К. Айлера (1982) показывают, что свежесформованный гель кремниевой кислоты может содержать до 330 молей воды (H_2O) на 1 моль диоксида кремния (SiO_2). Это указывает на то, что кремний не только способствует удержанию влаги, но и может служить своего рода резервуаром, который помогает растениям получать воду в периоды засухи.

В среднем за три года наблюдений было установлено, что в слое почвы на глубине от 0 до 30 см запасы продуктивной влаги колебались в пределах 49-53 мм. Эти значения варьировались в зависимости от дозы цеолита и его обогащения. Важно отметить, что в условиях применения цеолита запасы влаги превышали контрольные показатели на 3-7 мм на естественном фоне и на 5-7 мм при использовании минеральных удобрений.

В некоторых случаях присутствовало увеличение запасов продуктивной влаги в почве на фоне минеральных удобрений. По мнению И.Б. Годунова (1980), этому способствует то, что «... удобрения, систематически вносимые в почву, обогащают ее органическими коллоидами, образующимися за счет большего накопления корневых и пожнивных остатков растений». Тем самым повышается водопропускная способность структуры и общая порозность, создавая лучшие условия для прохождения воды по профилю почвы и ее накопления.

Перед уборкой озимой пшеницы использование удобрений на основе цеолита повышало ЗПВ в пахотном горизонте на 2-4 мм по сравнению с контролем как на естественном, так и на минеральном фоне. Минеральные

удобрения не оказали положительного влияния на ЗПВ в пахотном слое чернозема типичного.

В ходе проведенных исследований установлено, что влагообеспеченность почвы в весенний период в 2023 году удовлетворительная (близко к хорошей), а в 2021 и 2022 годах хорошая (табл. 4).

Таблица 4. Оценка запасов продуктивной влаги (по А.Ф Вадюниной, З.А. Корчагиной, 1986 г.)

Мощность слоя почвы, см	Запасы воды, мм	Оценка запасов продуктивной влаги
0...20	> 40	Хорошие
	20...40	Удовлетворительные
	< 20	Неудовлетворительные
0...100	> 160	Очень хорошие
	130...160	Хорошие
	90...130	Удовлетворительные
	60...90	Плохие
	< 60	Очень плохие

Оценка динамики запасов продуктивной влаги и трендов их изменений по годам и используемым системам удобрения дает возможность говорить о тенденции увеличения запасов влаги при внесении удобрений на основе цеолита и обогащении его карбамидом и аминокислотами (рис. 16).

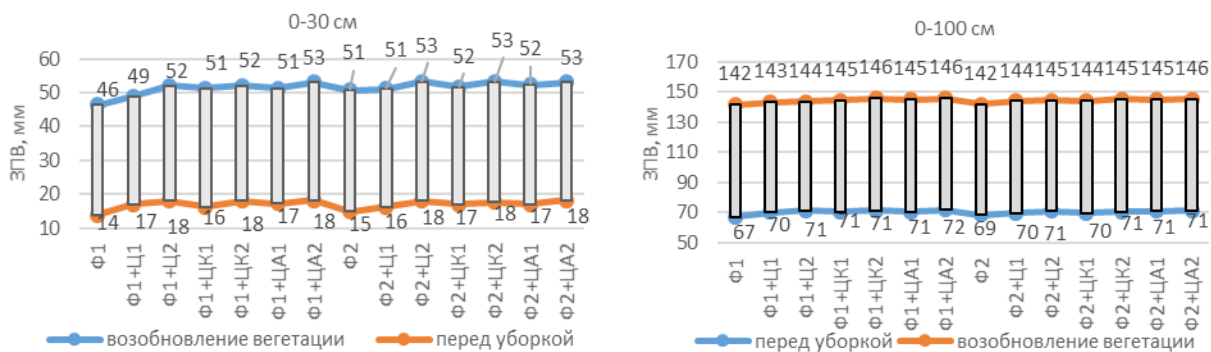


Рисунок 16. Динамика ЗПВ за вегетационный период, мм (2021-2023 гг.)

С целью получения высокой урожайности зерна озимой пшеницы необходима оптимизация водного и питательного режимов почвы. Структура суммарного водопотребления озимой пшеницы в среднем за 2021-2023 гг. сложилась следующим образом (табл. 5):

- водопотребление из почвы – (от 34,1 до 34,7 %);
- осадки – (от 65,3 до 65,9 %).

Расчеты баланса влаги в почве в период от возобновления вегетации до уборки озимой пшеницы показал, что общее расходуемое количество влаги варьируется не значительно как на естественном, так и на минеральном фоне.

Таблица 5. Суммарное водопотребление посевов озимой пшеницы, 2021-2023 гг.

№ п/п	Вариант	ЗПВ (0-100 мм), мм		Баланс влаги в почве, мм	Осадки, мм	Общий расход, м ³ /га
		возобновление вегетации	перед уборкой			
1.	Ф1	142	67	75	141,2	2162
1.1.	Ф1+Ц1	143	70	73	141,2	2142
1.2.	Ф1+Ц2	144	71	73	141,2	2142
1.3.	Ф1+ЦК1	145	71	74	141,2	2152
1.4.	Ф1+ЦК2	146	71	75	141,2	2162
1.5.	Ф1+ЦА1	145	71	74	141,2	2152
1.6.	Ф1+ЦА2	146	72	74	141,2	2152
2.	Ф2	142	69	73	141,2	2142
2.1.	Ф2+Ц1	144	70	74	141,2	2152
2.2.	Ф2+Ц2	145	71	74	141,2	2152
2.3.	Ф2+ЦК1	144	70	74	141,2	2152
2.4.	Ф2+ЦК2	145	71	74	141,2	2152
2.5.	Ф2+ЦА1	145	71	74	141,2	2152
2.6.	Ф2+ЦА2	146	71	75	141,2	2162

Тогда как и коэффициент водопотребления, или количество влаги, использованное на формирование 1 т зерна озимой пшеницы, по вариантам различался значительно. Так, в посевах озимой пшеницы на естественном фоне на формирование 1 тонны зерна было использовано от 419 м³/га на варианте с применением цеолита, обогащенного аминокислотами (500 кг/га), до 478 м³/га на варианте с применением цеолита в чистом виде (250 кг/га).

Отклонение от фона составляет от -30 до -89 м³/га. На минеральном фоне коэффициент водопотребления колебался от 351 м³/га до 401 м³/га на вариантах с применением цеолита, обогащенного аминокислотами (500 кг/га), и цеолита в чистом виде (250 кг/га) соответственно (табл. 6, рис. 17).

Таблица 6. Коэффициент водопотребления озимой пшеницей по вариантам опыта, 2021-2023 гг.

№ п/п	Вариант	Урожайность зерна, т/га	Коэффициент водопотребления, м ³ /т	Отклонение от фона		Средний по фону
				м ³ /т	%	
1.	Ф1	4,26	508	-	-	452,3
1.1.	Ф1+Ц1	4,48	478	-30	5,9	
1.2.	Ф1+Ц2	4,70	456	-52	10,2	
1.3.	Ф1+ЦК1	4,88	441	-67	13,2	
1.4.	Ф1+ЦК2	5,00	432	-76	15,0	
1.5.	Ф1+ЦА1	4,98	432	-76	15,0	
1.6.	Ф1+ЦА2	5,14	419	-89	17,5	
2.	Ф2	5,21	411	-	-	375,7
2.1.	Ф2+Ц1	5,37	401	-10	2,4	
2.2.	Ф2+Ц2	5,64	382	-29	7,1	
2.3.	Ф2+ЦК1	5,78	372	-39	9,5	
2.4.	Ф2+ЦК2	6,04	356	-55	13,4	
2.5.	Ф2+ЦА1	6,02	357	-54	13,1	
2.6.	Ф2+ЦА2	6,16	351	-60	14,6	

Таким образом, использование цеолита как в чистом виде, так и при обогащении его аминокислотами и карбамидом снижало коэффициент водопотребления. Последнее свидетельствует о том, что удобренные посеы полнее использовали почвенную влагу, что в свою очередь способствовало увеличению уровня урожайности зерна озимой пшеницы в данных вариантах.

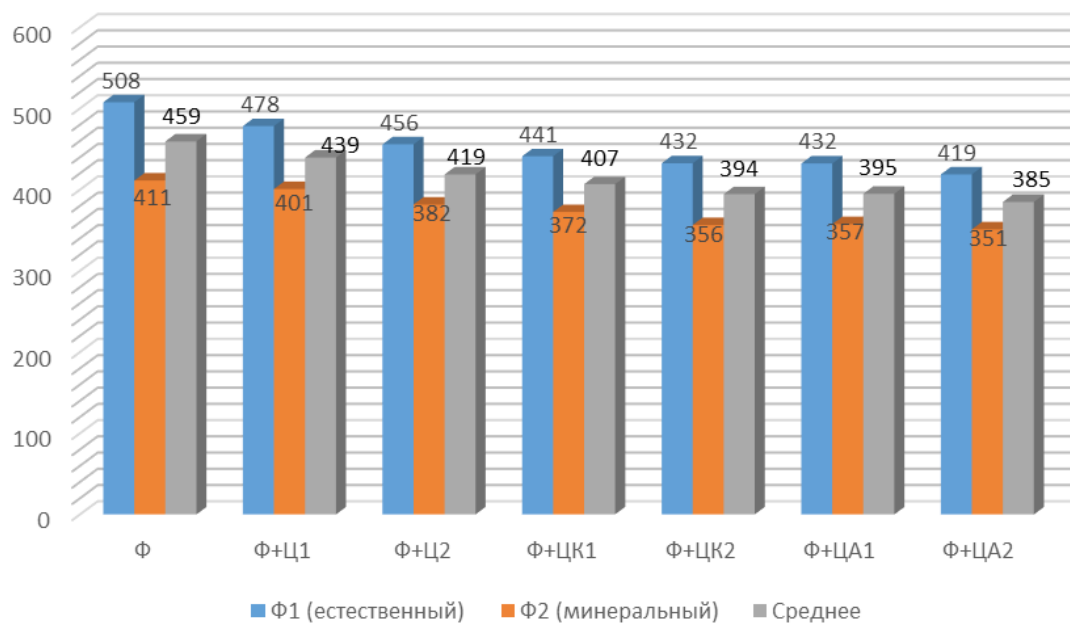


Рисунок 17. Коэффициент водопотребления зерна озимой пшеницы, 2021-2023 гг.

Большее уменьшение коэффициента водопотребления на фоне минеральных удобрений возможно обосновано тем, что они увеличивают корневую массу озимой пшеницы, что создает благоприятные условия для поглощения труднодоступной влаги и элементов питания.

За три года наблюдений за водным режимом отмечено, что в посевах озимой пшеницы коэффициент водопотребления значительно варьируется как по годам исследования, так и в зависимости от фона (рис. 18). Коэффициент водопотребления на вариантах по естественному фону выше по всем годам исследования и колеблется от 265 до 729 м³/га, на минеральном фоне он составляет от 229 до 590 м³/га.

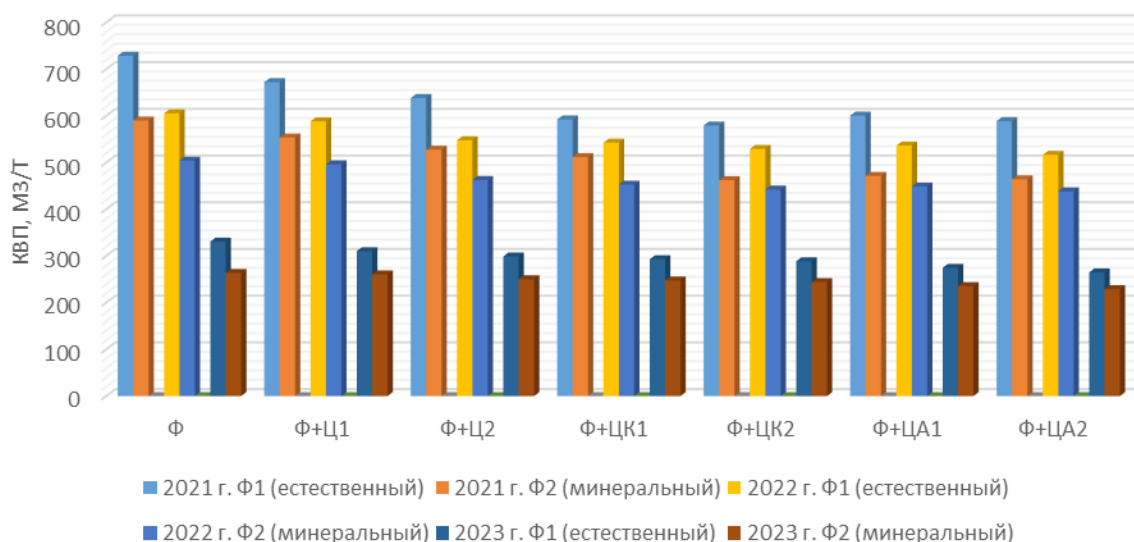


Рисунок 18. Коэффициент водопотребления зерна озимой пшеницы, по годам исследования в зависимости от фона

Оценка формирования запасов продуктивной влаги в черноземе типичном под посевами озимой пшеницы к началу вегетации культуры и перед ее уборкой позволяет определить их влияние на урожайность озимой пшеницы.

Характеризуя зависимость урожайности сельскохозяйственных культур от водного режима П.А. Костычев (1893) писал: «Если все другие факторы представляют эпизодические причины, снижающие урожай, то вода является постоянно действующим фактором».

Для оценки влияния запасов продуктивной влаги на формирование урожайности озимой пшеницы использован метод корреляционно-регрессионного анализа (рис. 19,20, табл. 7).

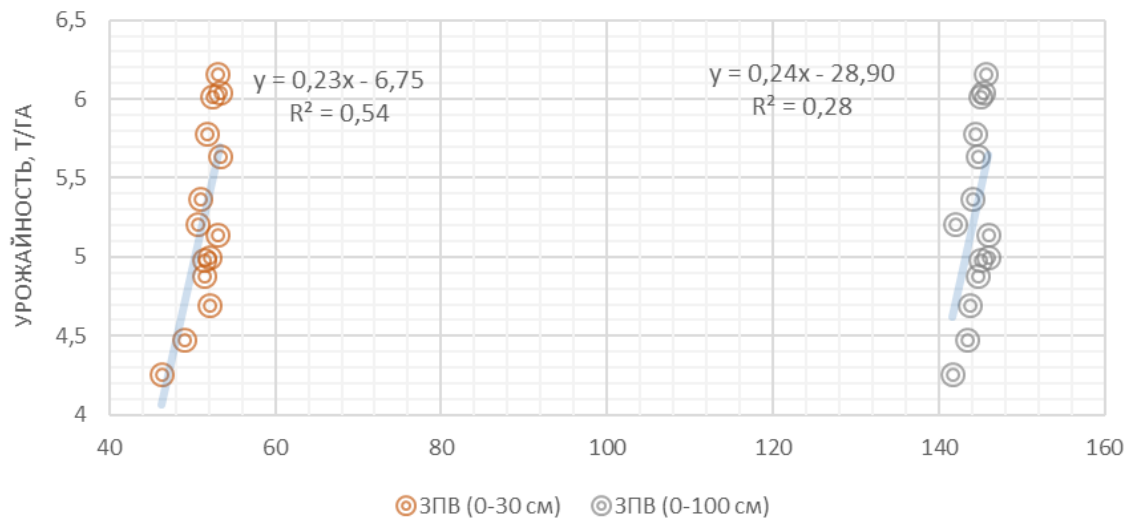


Рисунок 19. Корреляционная зависимость урожайности озимой пшеницы от запасов продуктивной влаги (ЗПВ) в период возобновления вегетации

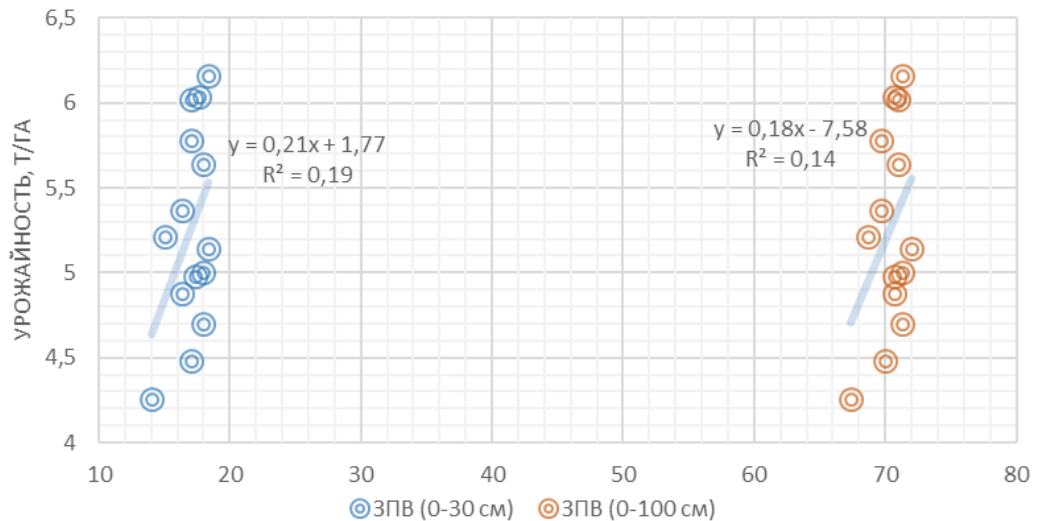


Рисунок 20. Корреляционная зависимость урожайности озимой пшеницы от запасов продуктивной влаги (ЗПВ) перед уборкой

Таблица 7. Связь запасов продуктивной влаги с урожайностью озимой пшеницы

Показатели	Коэффициент корреляции	Степень зависимости	Уравнение регрессии
ЗПВ (0-30 см) - возобновление вегетации	0,74	прямая, сильная	$y = 0,23x - 6,75$
ЗПВ (0-100 см) - возобновление вегетации	0,53	прямая, средняя	$y = 0,24x - 28,90$
ЗПВ (0-30 см) – перед уборкой	0,44	прямая, слабая	$y = 0,21x + 1,77$
ЗПВ (0-100 см) – перед уборкой	0,38	прямая, слабая	$y = 0,18x - 7,58$

Расчитанные нами коэффициенты корреляции между ЗПВ и урожайностью озимой пшеницы в среднем за три года свидетельствуют о значительном влиянии ЗПВ на формирование урожая озимой пшеницы в период возобновления вегетации и незначительно – в период перед уборкой.

3.2 Биологические (общая биологическая активность)

В процентном соотношении живое вещество почвы составляет 0,5-1 % от его массы. Однако оценка и значение биоразнообразия почвенной среды еще далеки от истины. Предполагается, что большинство организмов на Земле могут жить в почве. Численность и разнообразие биоты зависят от особенностей почвы. Большинство его обитателей незаметны для человеческого глаза. В почве одновременно развиваются анаэробы и аэробы, разные группы микроорганизмов по отношению к кислотности: ацидофилы, нейтрофилы, алкалофилы. Каждая группа организмов находит благоприятные условия для развития в определенной микроне со специфическим газовым составом, водным режимом и т.д. Важность биоты почвы вытекает из широкого спектра изучения ее функций.

Следует отметить, что нет четкого разграничения меж функциональной специализацией групп организмов. Чаще они образуют мозаику, где каждый последующий дополняет предыдущую. Этот факт подтверждает целостность в функционировании почвенной экосистемы. Разложение растительных и животных остатков, высвобождение и связывание элементов питания являются специализацией микроорганизмов. Биомасса растений выступает первоисточником органического вещества. Животные как консументы влияют на структуру популяций биоты, ее активность и численность (Козлов А.В., 2022).

Кроме функциональной нагрузки, биота как компонент почвы является чувствительным сенсором, отражающим состояние экосистемы. Быстрая реакция почвенной биоты является индикатором качества почвы, следствием изменений физикохимических и механических параметров, основанием для биологической оценки. Биологические индикаторы не универсальны. Они подвергаются сезонной динамике, зависят от типа почвы, климатической зоны и т.д. Поэтому каждая местность характеризуется индивидуальной биологической активностью (Аристовская Т.В., 1980; Добровольская Т.Г., 2009;).

Самым многочисленным и разнообразным является микрофлора почвы, в состав которой входят две основные группы: бактерии и грибы, продуцирующих внеклеточные ферменты и участвующих в разложении органических веществ. Около 80–90 % первичной продукции, поступающей в почву в виде отмерших растений, в основном разлагается микрофлорой. Эта функция обеспечивает круговорот веществ, минеральное питание растений, разрушение ксенобиотиков, очищение и восстановление почвенной экосистемы. Часть организмов может вступать в паразитические или мутуалистические отношения. Бактерии ризосферы относятся к промоторам роста растений, обеспечивая не только минеральное питание, но и антагонистическое угнетение фитопатогенов. При изучении биологических процессов в почве следует помнить тесные взаимосвязи между организмами.

Изменение активности популяции одного вида оказывает влияние на активность другого (Козлов А.В., 2022).

Примером могут служить две функциональные группы микроорганизмов: целлюлозоразрушающие и азотфиксаторы. Целлюлозоразрушающие бактерии получают углерод из разложенного органического вещества, но зависят от внешнего снабжения азотом. Исследователи подтверждают симбиотическое взаимодействие этих групп организмов в полевых условиях. Так, в почве со стерней, являющейся субстратом для целлюлозной микробиологической активности, наблюдали более высокую нитрогеназную активность, чем с сожженными остатками урожая (Аристовская Т.В., 1979). Таким образом, для оптимального функционирования почвенной, как и любой экосистемы необходимо сохранение взаимосвязей.

Рассматривая участие микроорганизмов в круговороте элементов питания, наибольшее внимание обращают на азот. В почве этот элемент часто выступает лимитирующим фактором развития растений. Нитрификация обеспечивается высокоспециализированными группами бактерий, которые очень чувствительны к изменениям в окружающей среде и наличию токсичных соединений. Поэтому оценка потенциальной нитрификационной активности микробиоты дает понимание качества почвы.

Микроорганизмы разлагают огромное количество соединений и участвуют в процессах самоочистки почвенных экосистем. Эта функция особенно важна в условиях загрязнения почвы ксенобиотиками. Известно, что микроорганизмы способны разлагать пестициды, углеводороды, включать в свой метаболизм тяжелые металлы. Микроорганизмы взаимодействуют с металлами с помощью различных механизмов, которые могут быть использованы в качестве основы для биоремедиации – биосорбция, биовывывание, биоминерализация, внутриклеточная аккумуляция (Mohamed I. et. all, 2023). Установлено, что специфические группы микроорганизмов доминируют при загрязнении почв, что свидетельствует об

их толерантности к конкретным условиям и способности использовать поллютант как источник энергии (Башмаков Д.И., 2009).

Активизация почвенных микроорганизмов – ключевой фактор повышения плодородия почвы. Эти микроскопические обитатели почвы играют роль незаменимых посредников в круговороте питательных веществ, трансформируя сложные, недоступные растениям соединения в легкоусвояемые формы. Этот процесс имеет критическое значение для обеспечения растений необходимыми элементами питания, такими как азот, фосфор, калий и микроэлементы. Кремниевые удобрения, например, оказывают благотворное влияние на доступность фосфора, одного из наиболее важных макроэлементов для роста и развития растений.

Оценка биологического состояния почвы представляет собой сложную задачу, учитывая огромную сложность и разнообразие почвенной биоты. Не существует единого универсального показателя, который бы адекватно отражал всю картину биологической активности. Тем не менее, скорость разложения целлюлозы широко используется как один из наиболее информативных и сравнительно простых в измерении показателей. Целлюлоза является важным источником углерода для многих почвенных микроорганизмов. Ее разложение – это показатель активности целлюлолитических бактерий и грибов, играющих ключевую роль в процессах минерализации органического вещества и высвобождения питательных элементов. Скорость этого процесса отражает общее состояние микробного сообщества и интенсивность биогеохимических циклов в почве (Станков Н.З., 1965; Власенко Н.Г. и др., 2015).

В полевых опытах под посевами озимой пшеницы биологическую активность почвы также определяли аппликационным методом. Он заключается в закладке в почву образцов органического материала (в данном случае льняного полотна) на определенный период времени, после чего определяется степень их разложения. Метод достаточно прост и нагляден, позволяя оценить суммарную активность целого комплекса

микроорганизмов. Льняные полотна, заложены весной и извлечены перед уборкой урожая. Результаты их представлены в таблице 8.

На контрольном варианте(естественное плодородие) степень разрушения льняного полотна составила 32 %. Внесение цеолита в чистом виде незначительно повысило этот показатель до 34 %. Более выраженный эффект наблюдался при обогащении цеолита аминокислотами и карбамидом: активность микроорганизмов, выраженная в степени разложения льняного полотна, увеличилась на 13-38 % относительно контроля. Минеральный фон способствовал ещё большему ускорению разложения – до 42 %.

Таблица 8. Интенсивность разложения льняного полотна под посевами озимой пшеницы (2021-2023 гг.), %

№ п/п	Варианты	Степень разложения целлюлозы	Отклонение от контроля		Средняя по фону	
			абсолютное значение	относительное значение		
1.	Ф1	32	-	-	36,7	
1.1.	Ф1+Ц1	34	+2	+6		
1.2.	Ф1+Ц2	34	+2	+6		
1.3.	Ф1+ЦК1	36	+4	+13		
1.4.	Ф1+ЦК2	37	+5	+16		
1.5.	Ф1+ЦА1	40	+8	+25		
1.6.	Ф1+ЦА2	44	+12	+38		
2.	Ф2	42	+10	+31		43,4
2.1.	Ф2+Ц1	43	+11	+34		
2.2.	Ф2+Ц2	42	+10	+31		
2.3.	Ф2+ЦК1	43	+11	+34		
2.4.	Ф2+ЦК2	45	+13	+41		
2.5.	Ф2+ЦА1	45	+13	+41		
2.6.	Ф2+ЦА2	44	+12	+38		
НСР ₀₅	Фактор А	2,74				
	Фактор В	Fф<Fт				

Применение активных форм кремния увеличивает численность такой физиологической группы микроорганизмов ризосферы зерновых культур, как азотобактер, относящийся к свободноживущим азотфиксаторам, а также стимулирует рост корней (Гордеева Т.Х., Масленникова С.Н., Гажеева Т.П., 2012; Матыченков И.В., 2014).

Использование цеолита в системе удобрения озимой пшеницы активизировало развитие биомассы микроорганизмов, принимающих участие в минерализации целлюлозы и трансформации промежуточных продуктов разложения клетчатки (Козлов А.В., 2022).

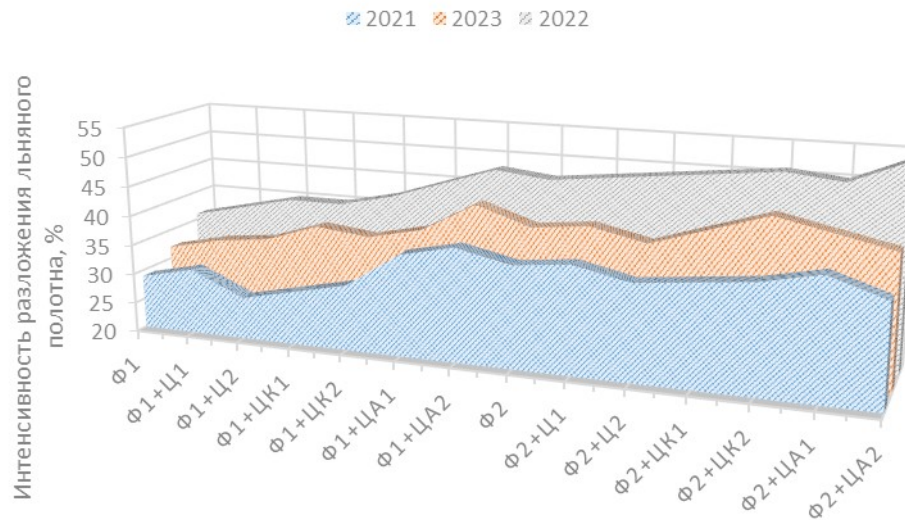


Рисунок 21. Диаграмма результатов разложения льняного полотна в годы исследований

Рассматривая интенсивность разложения льняного полотна по годам исследования (рис. 21) заметна значительная ее вариабельность. Так, 2022 год значительно превалирует над 2023, и, особенно, 2021 годом. Благодаря сложившимся благоприятным погодно-климатическим условиям в 2022 году и хорошим запасам продуктивной влаги как в пахотном, так и в метровом слое степень разложения льняного полотна на естественном фоне варьировала от 36 до 48 %. Применение удобрений на основе цеолита, повышало степень разложения от 6 до 33 % в зависимости от дозы и вариантов обогащения в сравнении с контролем. На фоне минеральных удобрений эта разница составила от 2 до 15 %. В среднем же по естественному фону степень разложения льняного полотна в 2022 году по

сравнению с 2021 и 2023 гг. была интенсивнее на 24 и 12 % соответственно. На минеральном фоне увеличение составило на 24 и 14 %.

Анализ показателей корреляционной зависимости содержания питательных элементов в почве от ее биологической активности позволил установить, что степень влияния высокая с показателями коэффициента корреляции 0,80; 0,92; 0,79; (табл. 9, рис. 22).

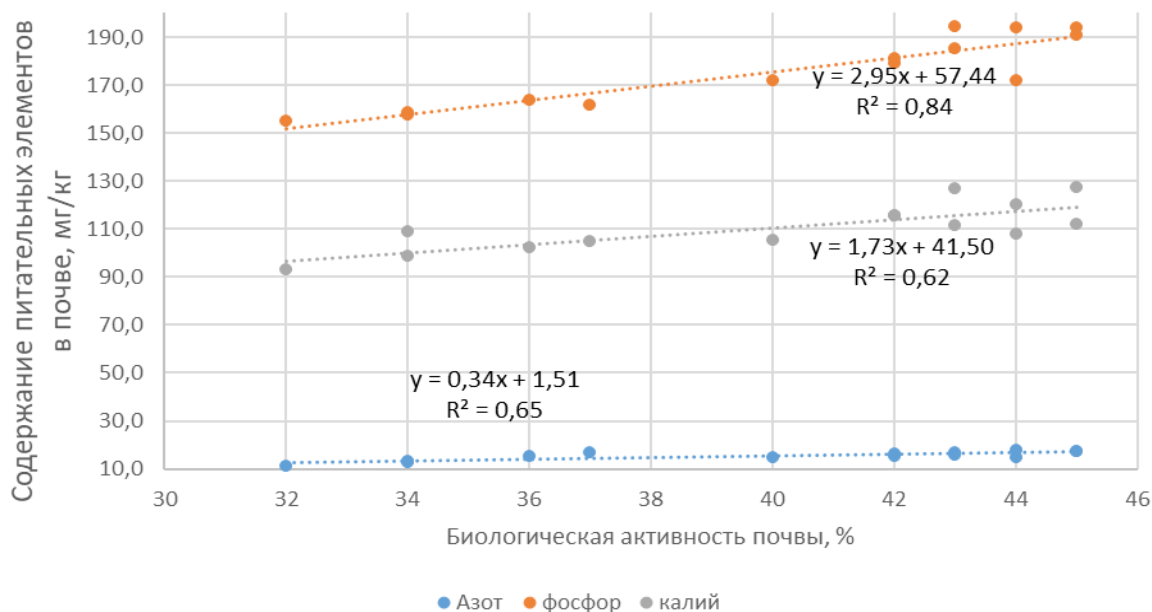


Рисунок 22. Корреляционная зависимость содержания питательных элементов в почве от ее биологической активности

Таблица 9. Связь биологической активности почвы под посевами озимой пшеницы и содержания питательных элементов в ней

Показатели	Коэффициент корреляции	Степень зависимости	Уравнение регрессии
N-NO ₃ +N-NH ₄ , мг/кг	0,80	прямая, сильная	$y = 0,34x + 1,51$
P ₂ O ₅ , мг/кг	0,92	прямая, сильная	$y = 2,95x + 57,44$
K ₂ O, мг/кг	0,79	прямая, сильная	$y = 1,73x + 41,50$

Таким образом, методом корреляционно-регрессионного анализа установлено высокое влияние биологической активности на содержание элементов питания в почве, прежде всего, фосфора, затем азота и калия.

Анализ показателей корреляционной зависимости урожайности зерна от биологической активности почвы позволяет установить, что степень влияния высокая с показателем коэффициента корреляции 0,9 (рис. 23).

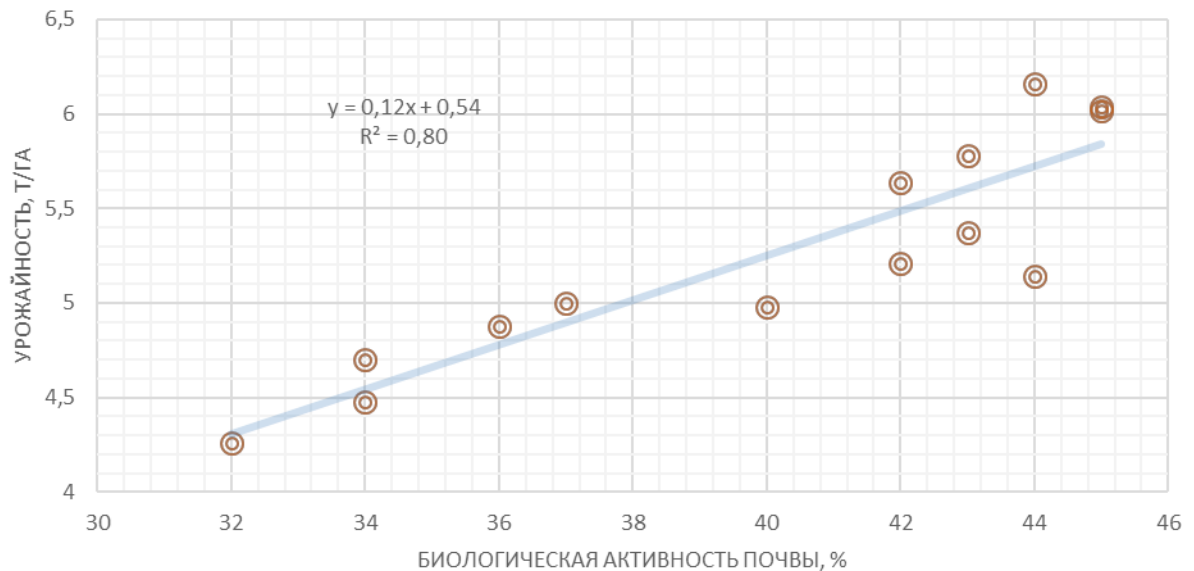


Рисунок 23. Корреляционная зависимость урожайности озимой пшеницы от биологической активности почвы

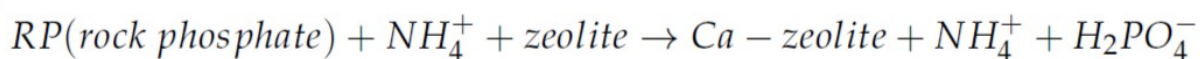
Создание оптимальных условий для жизнедеятельности микроорганизмов через улучшение физических и водно-физических свойств почвы обеспечивает улучшение питательного режима почвы и формирование (как будет показано ниже) более высокой урожайности сельскохозяйственных культур.

3.3 Химические (питательный режим, реакция почвенного раствора)

Мелкие поры в структуре кристаллической решетки цеолита, в которых легко адсорбируются катионы аммония, не открывают доступ нитрифицирующим микроорганизмам в поры. Таким образом, процессы

нитрификации в почве, обработанной цеолитами замедляются (Шеуджен А.Х., 2013).

Щелочная по своей природе и наличию отрицательных зарядов, цеолитомелиорированная почва улучшает доступность почвенного фосфора за счет снижения кислотности почвы, обмена в почве Al и Fe (Cataldo E., 2021). Это помогает уменьшить фиксацию фосфора оксигидроксидами металлов. Более того, добавление цеолитов вызывает большее поглощение P за счет усиления механизмов растворения, индуцированных обменом следующим образом (Moharami S., 2014):



В этой реакции высвободившийся Ca адсорбируется на поверхности цеолита из-за высокого ЕКО, и в результате больше фосфоритной руды будет растворяться при снижении Ca^{2+} активности в растворе.

Цеолиты, а не N и P, обладают сильной селективностью по отношению к K^+ , чем Na^+ , Ca^+ и Mg^{2+} , это затрудняет удаление K^+ из обменных центров, способствуя большему поглощению K^+ корневыми волосками растений посредством ионного обмена внутри корня и цеолита (Mondal M., 2021).

Цеолит считается нано-усовершенствованным экологически чистым продуктом, поскольку он адсорбирует молекулы при относительно низком давлении. Удобрения на основе цеолита обладают более высоким потенциалом поглощения и удержания воды, и замедляют скорость высвобождения питательных веществ из вносимых в почву удобрений.

Проведенные исследования показали значительное улучшение питательного режима почвы при внесении в почву цеолита как в чистом виде, так и обогащенного аминокислотами и карбамидом (табл. 10).

Таблица 10. Влияние цеолита и экспериментальных удобрений на его основе на агрохимические показатели чернозема типичного под посевами озимой пшеницы (2021-2023 гг.)

№ п/п	Варианты	N-NO ₃ , мг/кг	N-NH ₄ , мг/кг	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг
1.	Ф1	5,3	5,6	155	93
1.1.	Ф1+Ц1	6,5	6,3	157	99
1.2.	Ф1+Ц2	6,8	6,6	159	109
1.3.	Ф1+ЦК1	7,5	7,6	164	102
1.4.	Ф1+ЦК2	8,4	8,2	162	105
1.5.	Ф1+ЦА1	8,4	6,2	172	105
1.6.	Ф1+ЦА2	8,0	6,7	172	108
2.	Ф2	8,2	6,8	179	115
2.1.	Ф2+Ц1	8,3	7,3	185	127
2.2.	Ф2+Ц2	8,3	8,1	181	116
2.3.	Ф2+ЦК1	9,4	7,4	194	112
2.4.	Ф2+ЦК2	9,8	7,5	191	112
2.5.	Ф2+ЦА1	9,4	7,8	194	128
2.6.	Ф2+ЦА2	10,1	7,6	194	120
НСР ₀₅	Фактор А	0,49	0,71	2,93	7,00
	Фактор В	0,92	Fф<Fт	5,49	Fф<Fт

Результаты проведенного исследования демонстрируют влияние применения цеолита, обогащенного аминокислотами и карбамидом, на питательный режим почвы под посевами озимой пшеницей. В сравнении с использованием чистого цеолита, обогащенный вариант показал существенное увеличение содержания минерального азота (N-NO₃⁻+N-NH₄⁺) в почвенном растворе. Прирост составил от 0,8 до 1,8 мг/кг, что эквивалентно 10-22 % увеличению по сравнению с контролем. Это повышение объясняется несколькими факторами.

Аминокислоты, адсорбированные на поверхности цеолита, легко высвобождаются в почву, обеспечивая дополнительный источник доступного для растений азота. Структура цеолита, характеризующаяся наличием микро- и макропор, обеспечивает эффективное хранение и контролируемое высвобождение аминокислот. Внесение цеолита, особенно обогащенного

аминокислотами, стимулирует активность почвенных микроорганизмов, включая аммонификаторы и нитрификаторы. Повышение биологической активности почвы ускоряет минерализацию органических веществ, переводя связанный азот в формы, доступные для растений. Этот эффект усиливается за счет увеличения поверхности контакта между органическим веществом и микроорганизмами, обеспечиваемой высокой пористостью цеолита. Обогащение цеолита карбамидом (техническим азотом) также способствует повышению доступности азота, хотя и в меньшей степени, чем при использовании аминокислот.

Применение цеолита положительно влияет на доступность фосфора и калия для растений. Увеличение доступного фосфора в пахотном слое почвы составило от 2 до 10 мг/кг на естественном фоне и от 26 до 39 мг/кг на фоне минеральных удобрений. Это свидетельствует о способности кремниевых соединений, составляющих основу цеолита, улучшать мобильность фосфора в почве. В случае с калием максимальный прирост (128 мг/кг, или 37,6 % по отношению к контролю) был зафиксирован при использовании цеолита, обогащенного аминокислотами (250 кг/га) на фоне минеральных удобрений.

Динамика нитратного и аммонийного азота в период возобновления вегетации и до конца вегетационного периода подтверждает благоприятное влияние применения цеолита на азотный режим почвы, как на фоне внесения минеральных удобрений, так и без него (рис. 24, 25).

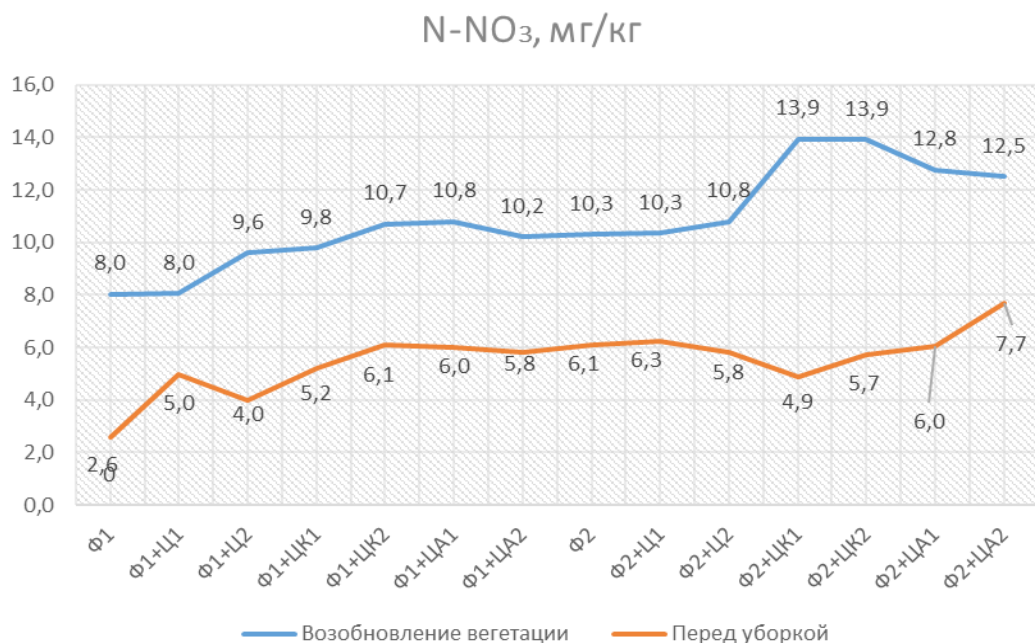


Рисунок 24. Динамика содержания N-NO₃ в черноземе типичном под посевами озимой пшеницы, 2021-2023 гг.

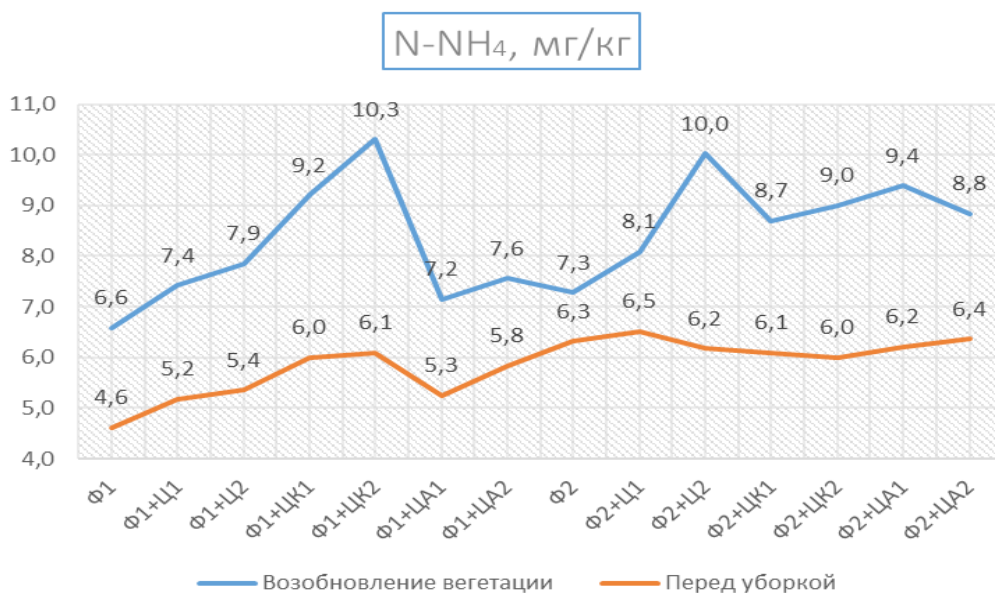


Рисунок 25. Динамика содержания N-NH₄ в черноземе типичном под посевами озимой пшеницы, 2021-2023 гг.

Динамика подвижного фосфора и подвижного калия представлена на рисунках 26 и 27. Использование цеолита как в чистом виде, так и при обогащении его аминокислотами и карбамидом оказало положительное влияние на фосфатный и калийный режимы почв. Несмотря на затраты

фосфора и калия на формирование прибавки урожайности зерна озимой пшеницы по сравнению с контролем, к концу вегетации остается достаточно высокий их уровень в почве.

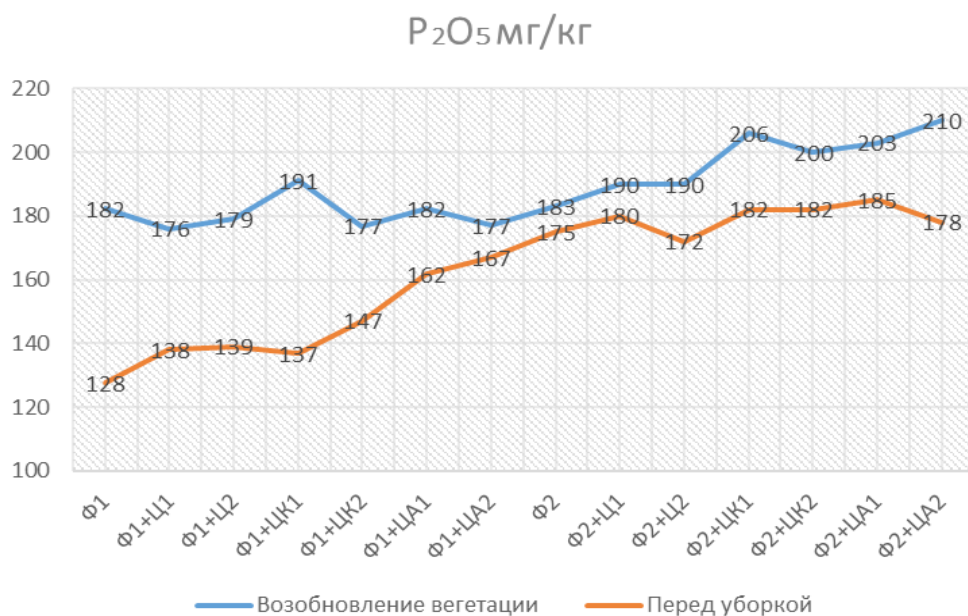


Рисунок 26. Динамика содержания подвижного фосфора в черноземе типичном под посевами озимой пшеницы, 2021-2023 гг.

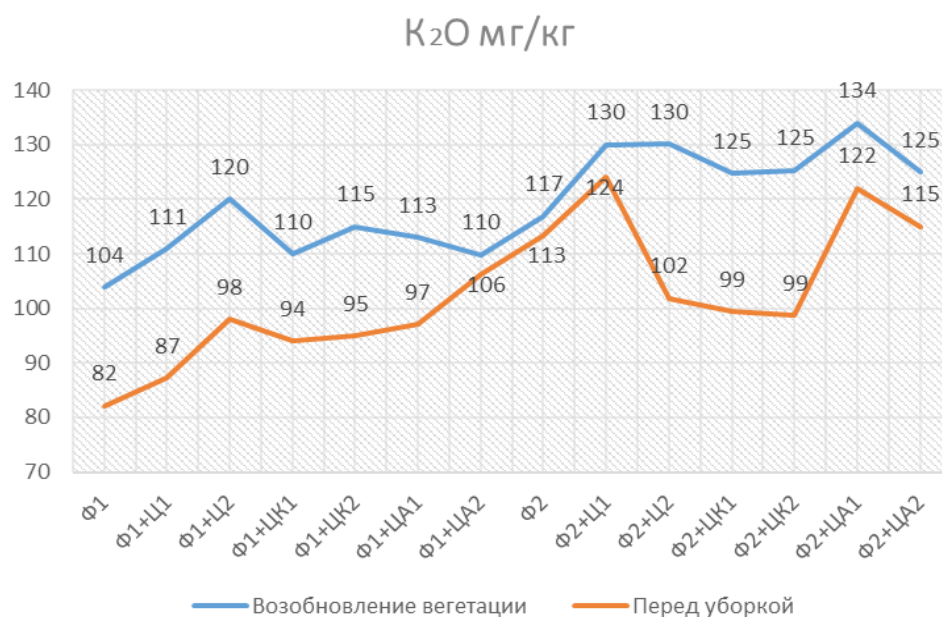


Рисунок 27. Динамика содержания подвижного калия в черноземе типичном под посевами озимой пшеницы, 2021-2023 гг.

Ниже представлена корреляционная зависимость урожайности озимой пшеницы от содержания элементов питания в пахотном слое почвы (рис. 28,29,30, табл. 9).

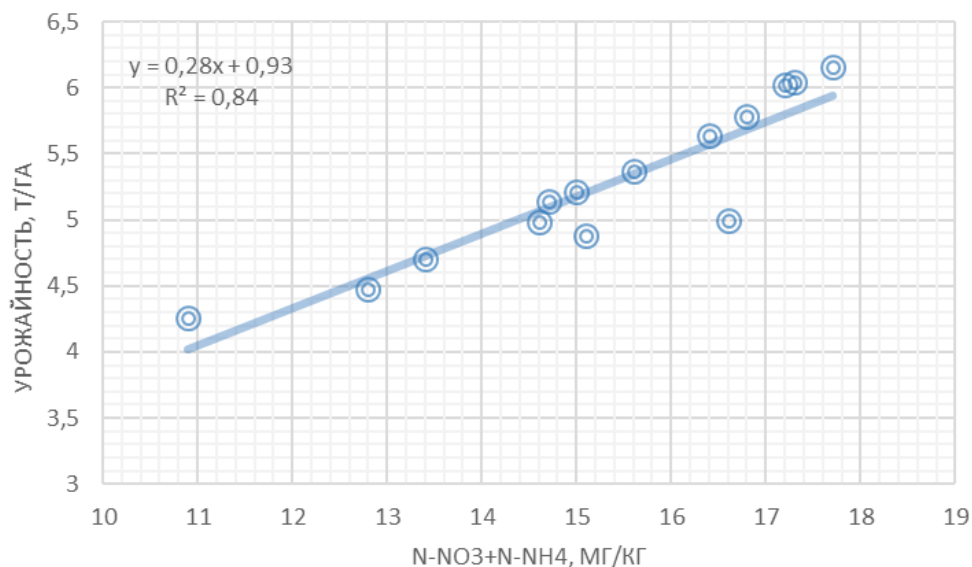


Рисунок 28. Корреляционная зависимость урожайности озимой пшеницы от содержания N-NO₃+N-NH₄ в пахотном слое чернозема типичного

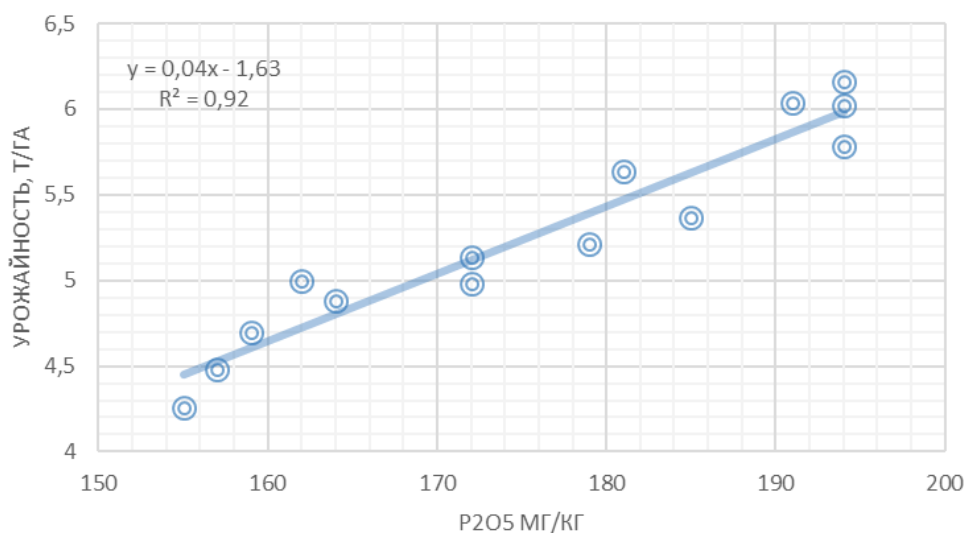


Рисунок 29. Корреляционная зависимость урожайности озимой пшеницы от содержания P₂O₅ в пахотном слое чернозема типичного

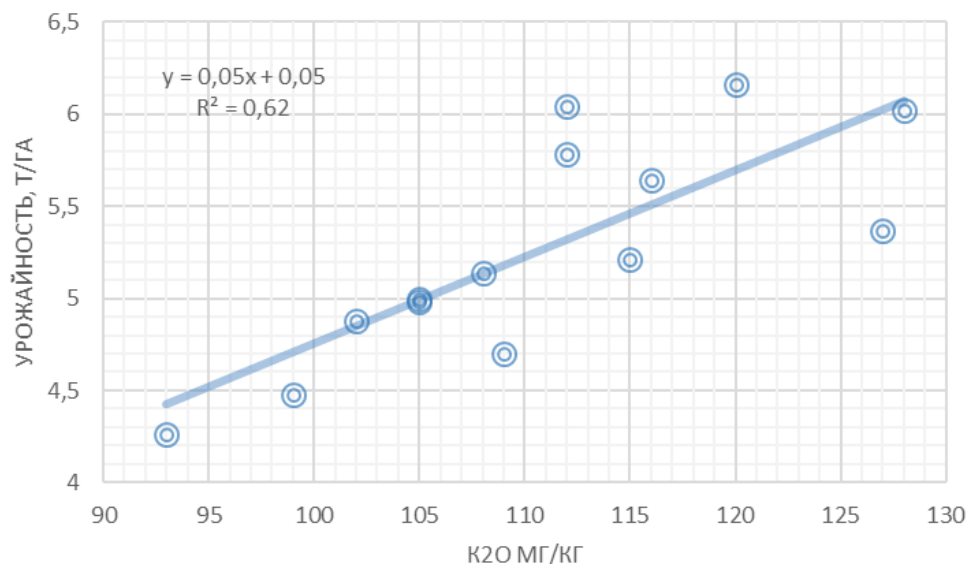


Рисунок 30. Корреляционная зависимость урожайности озимой пшеницы от содержания K_2O в пахотном слое чернозема типичного

Таблица 11. Связь урожайности зерна озимой пшеницы и содержания питательных элементов в почве

Показатели	Коэффициент корреляции	Степень зависимости	Уравнение регрессии
$N-NO_3+N-NH_4$, мг/кг	0,91	прямая, сильная	$y = 0,28x + 0,96$
P_2O_5 , мг/кг	0,95	прямая, сильная	$y = 0,04x - 1,59$
K_2O , мг/кг	0,78	прямая, сильная	$y = 0,05x + 0,02$

Таким образом, методом корреляционно-регрессионного анализа установлена высокая отзывчивость озимой пшеницы, возделываемой на черноземе типичном лесостепи Среднего Поволжья, на улучшение, прежде всего, фосфорного, затем азотного и калийного режимов почвы. Несмотря на изначально высокое плодородие чернозема типичного и высокую обеспеченность почвы подвижными формами биогенных элементов, применение цеолита и удобрений на его основе позволили улучшить минеральное питание растений и сформировать существенные прибавки урожая изучаемой культуры.

Увеличение эффективности использования микроэлементов при добавлении цеолитов и цеолитов, модифицированных аминокислотами и карбамидом, также отмечено в наших исследованиях и регистрируются в разных литературных источниках (табл. 12).

Таблица 12. Влияние цеолита и экспериментальных удобрений на его основе на содержание микроэлементов чернозема типичного под посевами озимой пшеницы, мг/кг (2021-2023 гг.)

№ п/п	Варианты	Cu	Zn	Mn
1.	Ф1	3,7	0,32	11,3
1.1.	Ф1+Ц1	3,9	0,36	12,1
1.2.	Ф1+Ц2	3,8	0,40	14,4
1.3.	Ф1+ЦК1	3,9	0,38	15,4
1.4.	Ф1+ЦК2	3,9	0,40	14,0
1.5.	Ф1+ЦА1	3,8	0,38	13,1
1.6.	Ф1+ЦА2	3,8	0,43	13,8
2.	Ф2	3,9	0,36	15,7
2.1.	Ф2+Ц1	4,0	0,39	14,8
2.2.	Ф2+Ц2	4,1	0,42	14,8
2.3.	Ф2+ЦК1	4,0	0,40	10,7
2.4.	Ф2+ЦК2	4,1	0,38	10,9
2.5.	Ф2+ЦА1	4,0	0,40	14,3
2.6.	Ф2+ЦА2	4,0	0,44	13,5
НСР ₀₅	Фактор А	0,06	0,02	Fф<Fт
	Фактор В	0,11	0,03	Fф<Fт

М. Yuvaraj и др. (2018) сообщили о способности природных цеолитов адсорбировать и высвободить цинк и железо, поскольку они имеют большее сходство с этими микроэлементами.

Взаимосвязь урожайности и микроэлементов таких, как цинк, медь и марганец, представлены на рисунке 31 и таблице 13.

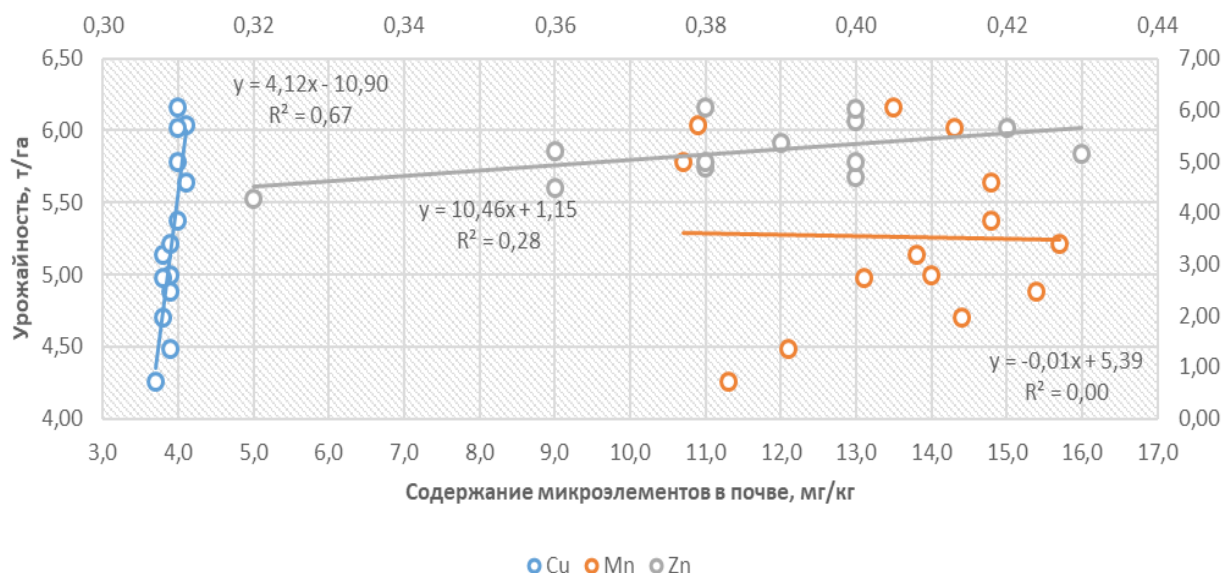


Рисунок 31. Корреляционная зависимость урожайности озимой пшеницы от содержания микроэлементов в почве

Таблица 13. Связь урожайности зерна озимой пшеницы и содержания микроэлементов в почве

Показатели	Коэффициент корреляции	Степень зависимости	Уравнение регрессии
Cu, мг/кг	0,82	прямая, сильная	$y = 4,12x - 10,90$
Zn, мг/кг	0,62	прямая, средняя	$y = 10,46x + 1,15$
Mn, мг/кг	-0,03	отсутствует	$y = -0,01x + 5,39$

Таким образом, методом корреляционно-регрессионного анализа также установлено высокое влияние микроэлементов в пахотном слое почвы, прежде всего, меди и цинка, на урожайность сельскохозяйственной культуры.

Из приведенного выше анализа можно сделать вывод, что внесение цеолита и удобрений на его основе повышает доступность макро- и микроэлементов в почвах и последующее их усвоение растениями и, соответственно, повышение их содержания в зерне озимой пшеницы.

Особо следует остановиться на изменении реакции почвенного раствора (pH_{KCl}) пахотного слоя при внесении цеолита в почву (рис. 32).

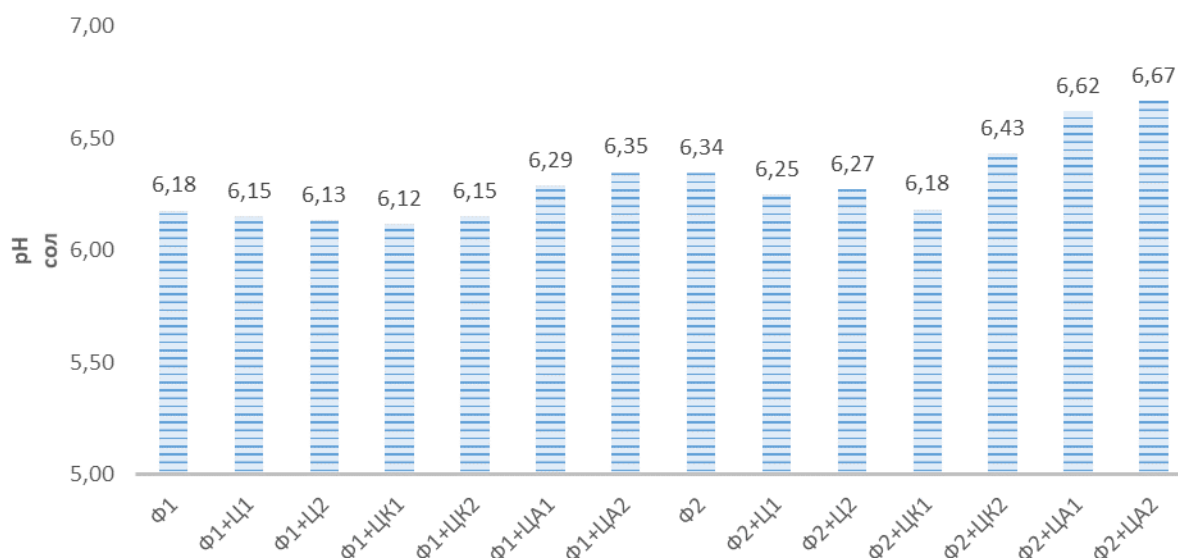


Рисунок 32. Влияние цеолита и экспериментальных удобрений на его основе на изменение реакции почвенного раствора (pH_{KCl}) пахотного слоя

Учитывая, что доза цеолита невысокая (250 и 500 кг/га), а почва опытного поля Ульяновского ГАУ чернозем типичный с нейтральной реакцией среды, обладает высокой буферностью в отношении подкисления, в связи с этим существенных изменений кислотности данных почв при внесении цеолита не происходит.

В ряде исследований, в том числе и работы Козлова А.В., Куликовой А.Х. и Румянцева Р.И. (2020), было показано, что применение цеолита в высоких дозах (6-12 т/га) на дерново-подзолистых почвах приводит к существенному снижению обменной кислотности, достигающему 1,11 ед. pH_{KCl} и более. Этот эффект объясняется высоким содержанием кальция и магния в цеолите Юшанского месторождения Ульяновской области (около 17%).

Однако, обогащение цеолита карбамидом несколько снижает его нейтрализующую способность. Это связано с биохимическими процессами, происходящими в почве после внесения данного удобрения. По-видимому, карбамид, попав в почвенную среду, быстро подвергается аммонификации

под действием уреазы, фермента, продуцируемого различными почвенными микроорганизмами, в том числе уреазными бактериями (например, родов **Bacillus**, **Pseudomonas**, **Arthrobacter**). Однако, аммонийный ион впоследствии подвергается нитрификации – окислению нитрифицирующими бактериями (такими как **Nitrosomonas** и **Nitrobacter**), сначала до нитритов (NO_2^-), а затем до нитратов (NO_3^-). Эта стадия нитрификации сопровождается образованием азотной кислоты (HNO_3), что вызывает подкисление почвы, компенсируя начальное подщелачивание.

Таким образом, изучение влияния цеолитсодержащих удобрений на свойства чернозема типичного показало:

– цеолит Юшанского месторождения при применении как в чистом виде, так и, особенно, при обогащении его карбамидом и аминокислотами, оказал достоверное положительное влияние на агрофизические свойства пахотного слоя. Улучшаются структура почвы, водно-воздушный режим, что создает оптимальные условия для выращивания озимой пшеницы. При одностороннем действии цеолитов и их сочетании с карбамидом и аминокислотами в пахотном горизонте складывался более благоприятный режим влажности по сравнению с контролем. Так, в начале вегетационного периода запасы продуктивной влаги в слое почвы 0-30 см составляли 49-53 мм в зависимости от дозы цеолита и его модификации, превышая контроль на 3-7 мм;

- под влиянием цеолита и удобрений на его основе происходит более полное и экономное расходование почвенной влаги посевами озимой пшеницы;

– при воздействии изучаемых факторов под посевами озимой пшеницы увеличивалась активность почвенных микроорганизмов. На контрольном варианте процент разрушения льняного полотна составил 32 %, при использовании цеолита в чистом виде – 34 %, обогащении цеолита аминокислотами и карбамидом увеличивало биологическую активность от 13 до 38 % (относительное значение) по отношению к контролю. Внесение НРК

ускорило интенсивность распада ткани до 42 %. Применение цеолита на удобренном фоне увеличило процент разложения льняной ткани до 39 %. Использование экспериментальных удобрений на основе цеолита – до 43-45 %, или на 35 и 41 % (относительное значение) больше, чем на контрольном варианте;

– под влиянием исследуемых приемов агрохимические показатели почвы также улучшились или остались на прежнем уровне. Положительное влияние цеолитсодержащих удобрений особенно заметно на фоне минеральных удобрений, способствуя поддержанию в пахотном слое среднего уровня содержания минерального азота (до 17,7 мг/кг почвы), высокого – подвижного фосфора (до 194 мг/кг почвы) и калия (до 128 мг/кг почвы). Такие показатели плодородия почвы, как кислотность, содержание гумуса под посевами озимой пшеницы в исследуемый период существенных изменений не претерпевали.

ГЛАВА 4. УРОЖАЙНОСТЬ И КАЧЕСТВО ЗЕРНА ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ЕЕ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ЦЕОЛИТА И УДОБРЕНИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ

4.1 Урожайность

Урожайность сельскохозяйственных культур служит показателем эффективности применяемых агротехнических методов. Внесение удобрений является одним из ключевых факторов, воздействующих на условия роста растений и их плодородия. Оптимизация использования удобрений способствует повышению не только количественных, но и качественных характеристик продукции. Кремнийсодержащие породы, в том числе цеолиты, способны существенно улучшить физико-химические свойства почвы, что положительно сказывается на биологических процессах и питательном режиме почвенного покрова.

Почва, индуцированная цеолитом, может значительно улучшать продуцирование, а также качественные характеристики грибного мицелия, положительно влияя на микробиологическое сообщество под посевами сельскохозяйственных культур, увеличивая микробную популяцию почвы (бактерии, грибы, актиномицеты) (Козлов А.В. и др., 2020; Susana S., 2015; Mondal M., 2021).

Урожайность зерна озимой пшеницы формируется под воздействием сложной совокупности морфологических и физиологических процессов, протекающих на различных этапах вегетации. Она определяется тремя основными факторами: количеством колосьев на единицу площади, числом зерен в колосе и весом тысячи зерен. Важно отметить, что отдельные компоненты урожая оказывают влияние на его формирование на разных стадиях роста – от посева до уборки. Поэтому для повышения продуктивности озимой пшеницы и получения более высоких урожаев необходимо глубокое понимание взаимосвязей между урожайностью, ее

составляющими и метеорологическими условиями в течение вегетационного периода.

Благоприятные климатические условия Среднего Поволжья способствуют формированию высокой урожайности озимой пшеницы (5-6 т/га) без применения удобрений, что связано с хорошей перезимовкой, оптимальным водным режимом и благоприятными температурными условиями вегетации, а также высоким содержанием доступных элементов питания в почве.

В многочисленных научных исследованиях были сделаны выводы о положительном влиянии цеолита на урожайность сельскохозяйственных культур, в том числе и озимой пшеницы (Безручко Е. В., 2020; Козлов А.В. и др., 2022; Куликова А.Х. и др., 2023).

Внесение цеолита и удобрений на его основе положительно влияет на физическое состояние и питательный режим почвы, что способствует увеличению урожайности зерна озимой пшеницы (табл. 14).

В среднем за три года естественное плодородие почвы позволило получить урожайность 4,26 т/га. Применение цеолита и экспериментальных удобрений на его основе повысило урожайность от 5,1 до 20,7 % (от 0,22 до 0,88 т/га) в зависимости от вариантов обогащения. Наибольший прирост урожайности был отмечен при внесении цеолита, обогащенного аминокислотами, в дозе 500 кг/га.

Анализ данных показал, что на минеральном фоне максимальный прирост урожайности также наблюдался при использовании цеолита, обогащенного аминокислотами (500 кг/га), который составил 6,16 т/га, превысив фоновый показатель на 0,95 т/га. Средняя урожайность по естественному агрофону составила 4,77 т/га, по минеральному – 5,75 т/га.

Таблица 14. Влияние цеолита и экспериментальных удобрений на его основе на урожайность зерна озимой пшеницы, т/га

№ п/п	Варианты	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Средняя за 3 года	Отклонение от фона		Средняя по фону
						т/га	%	
1.	Ф1	3,37	5,27	4,14	4,26	-	-	4,77
1.1.	Ф1+Ц1	3,61	5,44	4,38	4,48	+0,22	5	
1.2.	Ф1+Ц2	3,77	5,86	4,48	4,70	+0,44	10	
1.3.	Ф1+ЦК1	4,08	5,99	4,57	4,88	+0,62	15	
1.4.	Ф1+ЦК2	4,17	6,18	4,64	5,00	+0,74	17	
1.5.	Ф1+ЦА1	4,04	6,06	4,84	4,98	+0,72	17	
1.6.	Ф1+ЦА2	4,12	6,29	5,02	5,14	+0,88	21	
2.	Ф2	4,13	6,33	5,16	5,21	-	-	5,75
2.1.	Ф2+Ц1	4,40	6,49	5,22	5,37	+0,16	3	
2.2.	Ф2+Ц2	4,60	6,98	5,35	5,64	+0,43	8	
2.3.	Ф2+ЦК1	4,78	7,16	5,41	5,78	+0,57	11	
2.4.	Ф2+ЦК2	5,27	7,33	5,53	6,04	+0,83	16	
2.5.	Ф2+ЦА1	5,17	7,20	5,69	6,02	+0,81	16	
2.6.	Ф2+ЦА2	5,25	7,39	5,85	6,16	+0,95	18	
НСР ₀₅	Фактор А	0,14	0,15	0,14	0,10			
	Фактор В	0,25	0,28	0,26	0,15			
	Фактор АВ							
		$F_{\phi} < F_{\tau}$	$F_{\phi} < F_{\tau}$	$F_{\phi} < F_{\tau}$	$F_{\phi} < F_{\tau}$			

Если рассматривать урожайность по годам исследования, то очевидна достаточно высокая вариабельность в показателях. Так, 2022 год был высокопродуктивным и урожайность достигала 6,29 и 7,39 т/га на естественном и минеральном фонах соответственно. 2021 и 2023 годы в этом плане были менее благоприятными. Сложившиеся погодно-климатические условия такие, как недостаточное количество осадков после посева и во время возобновления вегетации, высокий температурный режим на протяжении всего периода вегетации, низкий гидротермический коэффициент увлажнения являлись лимитирующими урожайность факторами.



Рисунок 33. Вклад изучаемых факторов в формирование урожайности озимой пшеницы за 2021 год (по данным дисперсионного анализа)

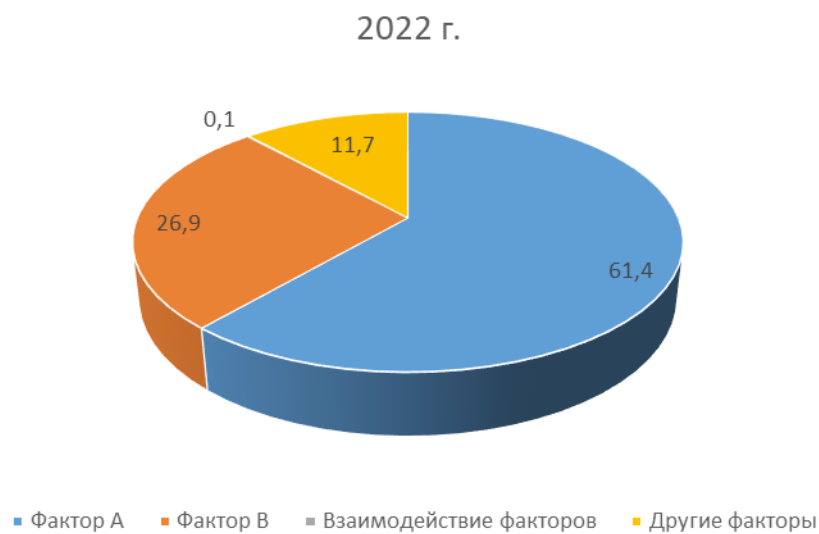


Рисунок 34. Вклад изучаемых факторов в формирование урожайности озимой пшеницы за 2022 год (по данным дисперсионного анализа)

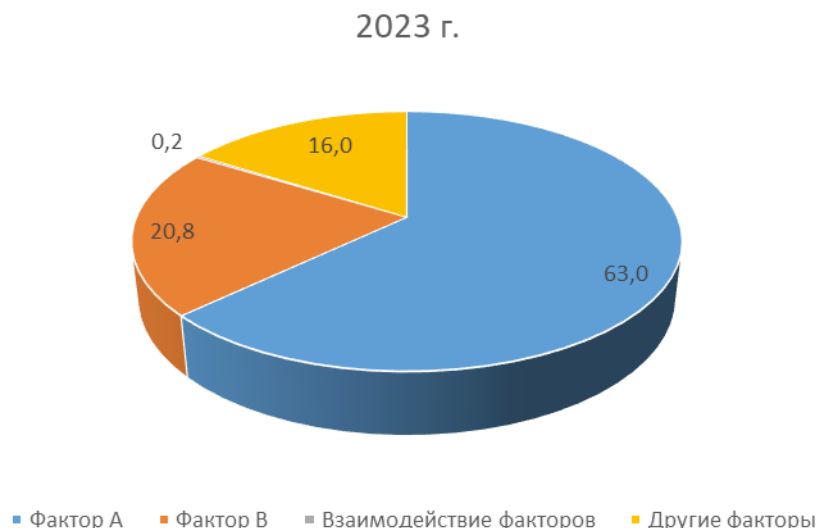


Рисунок 35. Вклад изучаемых факторов в формирование урожайности озимой пшеницы за 2023 год (по данным дисперсионного анализа)

Дисперсионный анализ урожайности озимой пшеницы за 2021-2023 годы показал, что 61-72,3 % изменений уровня урожайности вызваны влиянием фона, т.е. влияние экспериментальных удобрений составило от 23,2 до 33 % (рис. 33,34,35).

Для выявления важнейших факторных показателей и количественной оценки степени их влияния на результативный показатель, а также определения формы и тесноты связи между ними использован метод многофакторного (множественного) корреляционно-регрессионного анализа.

Факторами первого порядка, влияющими на урожайность зерна озимой пшеницы, являются:

X_1 – запасы продуктивной влаги (0-30 см), мм

X_2 – содержание $N-NO_3+N-NH_4$ в пахотном слое почвы, мг/кг

X_3 – содержание P_2O_5 в пахотном слое почвы, мг/кг

X_4 – содержание K_2O в пахотном слое почвы, мг/кг

Y – урожайность зерна озимой пшеницы, т/га

Оценочное уравнение регрессии выглядит следующим образом:

$$y = -2,418 + 0,032x_1 + 0,093x_2 + 0,028x_3 - 0,003x_4$$

Исходя из результатов построения корреляционной матрицы:

- коэффициент корреляции урожайности зерна озимой пшеницы и запасов продуктивной влаги составил 0,73, следовательно, связь между ними прямая (с ростом запасов продуктивной влаги повышается урожайность), сильная. Коэффициенты корреляции между урожайностью зерна озимой пшеницы и содержанием элементов питания в пахотном слое почвы составляют 0,91 ($N-NO_3+N-NH_4$, мг/кг), 0,95 (P_2O_5 , мг/кг) и 0,78 (K_2O , мг/кг) связь прямая (с увеличением содержания элементов питания в почве повышается урожайность), сильная.

Множественный R (коэффициент корреляции) составляет 0,99 и свидетельствует о том, что связь между урожайностью зерна озимой пшеницы и факторными показателями функциональная. Коэффициент детерминации (R-квадрат) характеризует качество модели и составляет 0,97. В нашем случае 99,0 % вариаций урожайности зерна озимой пшеницы могут быть объяснены содержанием запасов продуктивной влаги и элементов питания в пахотном слое почвы. При этом в формировании урожайности зерна озимой пшеницы доля запасов продуктивной влаги в пахотном слое почвы составляет 22 %, содержание доступного минерального азота 27 %, подвижных фосфора и калия 28 и 23 % соответственно (рис. 36).

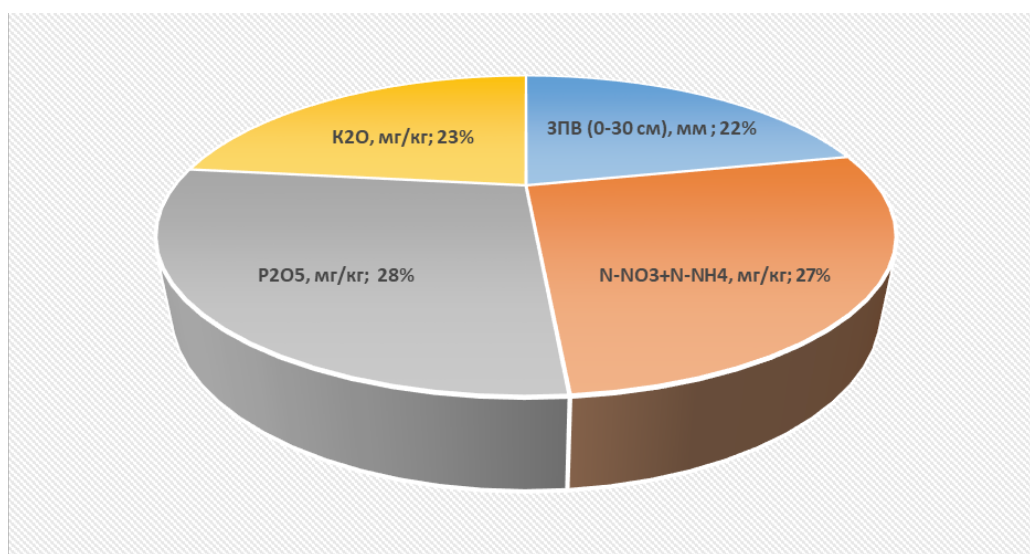


Рисунок 36. Факторный анализ урожайности зерна озимой пшеницы за 2021-2023 годы

4.2 Качество продукции

Согласно стандарту ГОСТ 9353–90, содержание белка в зерне пшеницы должно составлять от 11 % до 17 %. Превышение этого диапазона, как в сторону увеличения (свыше 17-19 %), так и в сторону уменьшения (ниже 11%), негативно сказывается на качестве хлеба.

Содержание белка тесно коррелирует с содержанием клейковины: увеличение содержания белка в 1,4 раза приводит к двукратному увеличению содержания клейковины. Например, при повышении содержания белка с 11 % до 17 %, содержание клейковины возрастает с 16 % до 32 %.

Клейковина играет решающую роль в хлебопекарных свойствах муки, полученной из пшеничного зерна. В соответствии с ГОСТ 9353–90, зерно высшего класса должно содержать не менее 36% клейковины, первого класса – 32 %, второго – 28 %, третьего – 23 % и четвертого – 18 %.

Качество зерна зависит от множества факторов, которые можно разделить на две группы: неконтролируемые (погодные условия) и управляемые (питание растений, защита от вредителей, болезней и сорняков, а также качественная доработка зерна).

Исследование влияния системы удобрения на качественные характеристики зерна озимой пшеницы (табл. 15) показало, что процент белка и клейковины варьировался от 10,94 % и 21,53 % на контроле до 12,43 % и 26,67 % соответственно на фоне минеральных удобрений при обогащении цеолита карбамидом (250 кг/га).

Роль азота в биосинтезе белка растений хорошо известна (Павлов А.Н., 1986 г.). Азотные удобрения повышают урожайность зерна и улучшают его качество за счет большего накопления белка и сырой клейковины (Завалин А.А. и др., 2018).

Таблица 15. Основные показатели качества зерна озимой пшеницы, % (2021-2023 гг.)

№ п/п	Варианты	Азот	Фосфор	Калий	Белок	Клейковина	ИДК. ед.
1.	Ф1	1,92	0,61	0,26	10,94	21,53	83
1.1.	Ф1+Ц1	1,99	0,68	0,27	11,34	23,20	86
1.2.	Ф1+Ц2	1,98	0,68	0,26	11,31	24,83	82
1.3.	Ф1+ЦК1	1,99	0,71	0,26	11,32	25,23	81
1.4.	Ф1+ЦК2	2,03	0,64	0,27	11,57	25,20	85
1.5.	Ф1+ЦА1	2,11	0,70	0,28	12,01	25,70	83
1.6.	Ф1+ЦА2	2,07	0,72	0,28	11,82	24,77	84
2.	Ф2	2,15	0,73	0,27	12,24	25,27	83
2.1.	Ф2+Ц1	2,12	0,71	0,28	12,07	25,47	82
2.2.	Ф2+Ц2	2,13	0,76	0,30	12,12	26,50	87
2.3.	Ф2+ЦК1	2,12	0,73	0,29	12,08	26,67	85
2.4.	Ф2+ЦК2	2,18	0,76	0,29	12,43	26,53	83
2.5.	Ф2+ЦА1	2,15	0,75	0,29	12,27	26,43	77
2.6.	Ф2+ЦА2	2,15	0,78	0,30	12,27	26,40	83
НСР ₀₅	Фактор А	0,05	0,03	0,01	0,27	0,78	3,26
	Фактор В	0,09	0,06	0,02	0,5	1,46	Fф<Fт

Оптимизация питательного режима за счет внесения цеолита с азотсодержащими соединениями (карбамид и аминокислоты) в критические фазы роста озимой пшеницы позволила повысить содержание белка и клейковины в зерне на 0,37-1,07 % и 1,67-4,17 % (абсолютное значение), соответственно, по сравнению с контрольной группой.

На фоне минеральных удобрений наиболее предпочтительными оказались варианты с использованием цеолита, обогащенного аминокислотами в дозе 250 кг/га, и цеолита, обогащенного карбамидом в дозе 500 кг/га (содержание белка 12,27 % и 12,43 %).

Рассматривая содержание белка в зерне озимой пшеницы (рис. 37) отмечается его варьирование по годам исследования. Замедление роста и снижение продуктивности растений озимой пшеницы в условиях недостаточной влагообеспеченности (2021, 2023 гг.) приводило к незначительному, но увеличению содержания белка в зерне. Это происходило не в результате усиления синтеза белка, а за счет замедления отложения

крахмала в эндосперме зерна, что увеличивало относительное содержание белка в зерне (Завалин А.А., Соколов О.А., 2018).

Также оказали влияние сложившиеся погодно-климатические условия в 2022 году. Так, в первой и второй декаде июля выпало значительное количество осадков (ГТК=1,59), что могло привести к частичному вымыванию азотистых веществ и снижению накопления белка в зерне озимой пшеницы.

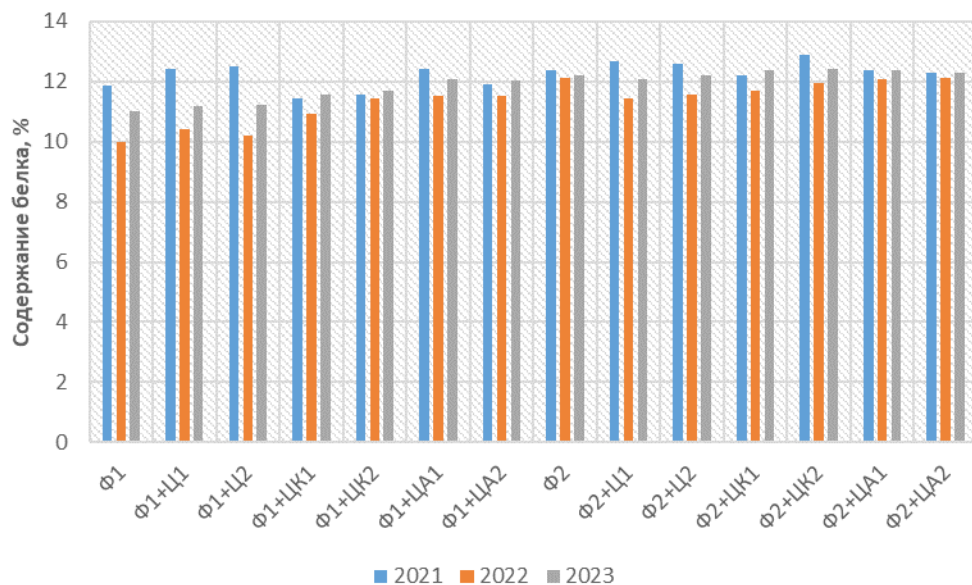


Рисунок 37. Содержание белка в зерне озимой пшеницы, 2021-2023

гг.

Полученные данные свидетельствуют о том, что наиболее эффективной системой удобрения является система с использованием цеолита, обогащенного аминокислотами в дозе 250 кг/га. При этом варианте также наблюдалось увеличение содержания таких элементов питания, как азот, фосфор и калий.

4.3 Экологическая безопасность

Увеличение загрязнения почв тяжелыми металлами является одной из основных проблем современного сельского хозяйства. На повышенное

накопление металлов в почвах большое влияние оказывает деятельность человека и связанное с этим развитие промышленности и нерациональное использование удобрений. Тяжелые металлы могут сохраняться в почве сотни лет, что связано с риском их включения в трофическую цепь.

Кадмий (Cd). Обычное содержание кадмия в земной коре составляет 0,1 и 0,41 мг/кг соответственно. Кадмий считается одним из наиболее вредных металлов, отрицательно влияющих на все биологические процессы живого организма, включая человека, животных и растения. Из-за высокой растворимости в воде и высокой токсичности кадмий занял 7-е место среди 20 основных токсинов (Prasad M.N.V., 1995). Токсичность кадмия можно легко определить по задержке роста, хлорозу, потемнению кончиков корней и, в конечном итоге, гибели растений. Также установлено, что наличие избытка кадмия в почве вызывает подавление поглощения железа растениями.

Никель (Ni) в низких концентрациях (от 0,01 до 5 мкг) считается жизненно важным компонентом для растений. Высокая концентрация никеля вызывает изменение физиологических процессов и различные симптомы токсичности такие, как хлороз, некроз и увядание. Снижение потребления воды является индикатором повышения токсичности никеля в растениях. Уровень воздействия Ni увеличивает концентрацию малонового диальдегида (MDA), что может нарушить функцию мембран и баланс цитоплазматических ионов, особенно K^+ , самый подвижный ион клеточной мембраны (Jakkula V., 2018).

Среднее содержание *свинца (Pb)* в земной коре оценивается в 15 мг/кг. В земной среде известны два типа свинца: первичный и вторичный. Первичный Pb на момент своего формирования подвергается геогенной активизации и включается в состав минералов, а вторичный Pb имеет радиогенное происхождение в результате урана и тория. Доступность свинца в почве во многом зависит от условий почвы таких, как кислотность почвы, размер частиц и способность к катионному обмену. Кроме того, на доступность и

поглощение свинца также влияют некоторые другие факторы такие, как площадь поверхности корня, корневая экссудация, микоризация и степень транспирации. Накопление свинца в растениях оказывает прямое или косвенное пагубное воздействие на морфологические, физиологические и биохимические функции растений. Когда свинец попадает в клетки, токсичность вызывается изменением проницаемости клеточной мембраны, реакцией с активными группами метаболических ферментов, заменой незаменимых ионов и образованием комплекса с фосфатной группой АДФ или АТФ. Токсичность свинца вызывает угнетение активности ферментов, нарушение минерального питания, водный дисбаланс, гормональные нарушения, угнетение продукции АТФ, перекисное окисление липидов, изменение проницаемости мембран и повреждение ДНК за счет перепроизводства активных форм кислорода (АФК) (Bhat J.A., 2019).

Цинк и медь играют важную роль в жизнедеятельности растений, будучи компонентами ферментов, регулирующих ключевые процессы жизнедеятельности. Однако при избыточном накоплении эти элементы оказывают токсическое действие.

Цинк (Zn) считается жизненно важным микроэлементом для растений, поскольку в идеальной концентрации он имеет решающее значение для нормального клеточного метаболизма и роста растений (Liang Yo., 2015). Во многих физиологических процессах таких, как метаболизм множества биомолекул, экспрессия и регуляция генов, активация ферментов, синтез белка и репродуктивное развитие, он играет важную роль в качестве кофактора. Однако в высоких концентрациях цинк накапливается в растениях и вызывает физиологические изменения и задержку роста. Избыток цинка также вызывает дефицит в побегах других незаменимых элементов таких, как марганец и медь, что затрудняет передачу этих незаменимых микроэлементов от корня к побегу. Возможная причина этого транслокационного вмешательства этих микроэлементов заключается в том, что концентрация

железа и марганца у растения, выращенного на богатой цинком среде, выше в корне, чем в побегах (Liang Yo., 2015).

Растворимость тяжелых металлов в почве напрямую зависит от уровня pH: низкий pH способствует их повышенной растворимости (Перцовская А.Ф., 1987; Karczewska, A., 2010). Также важным фактором, влияющим на удержание ионов тяжелых металлов в почве, является сорбционная способность почв, которая определяется типом и количеством компонентов почвенного сорбционного комплекса.

В качестве одного из способов снижения биодоступности тяжелых металлов в почве используются природные и синтетические цеолиты (Bhat J., 2019). Благодаря своим ионообменным свойствам, цеолиты могут не только служить переносчиками питательных веществ в удобрениях, но и связывать, улавливать токсичные металлы, предотвращая их попадание в пищевую цепь.

Перенос тяжелых металлов, добавляемых в удобрения, таких, как медь, кадмий, свинец, цинк и никель из почвы в растения, можно уменьшить путем применения удобрений на основе цеолита (Bhat J., 2019; Jakkula V., 2018; Ramesh K., 2011), что подтверждают наши исследования (табл. 16).

Исследования показали, что внесение цеолита в качестве удобрения для озимой пшеницы способствует снижению содержания тяжелых металлов в зерне: меди на 11-16 %, цинка на 6-25 %, никеля на 11-36 %, свинца на 27-64 % и кадмия на 27-50 % (в зависимости от дозы цеолита и его обогащении аминокислотами и карбамидом). На фоне минеральных удобрений также наблюдалось снижение поступления тяжелых металлов в продукцию, но в меньшей степени.

Содержание в зерне озимой пшеницы исследуемых тяжелых металлов не превышало предельно допустимые концентрации химических веществ (за исключением содержания Ni на варианте с применением минеральных удобрений, где уровень содержания никеля в продукции составил 0,5 мг/кг, что является границей предельно допустимой концентрации). Наибольшее

содержание практически по всем изучаемым элементам отмечено на фоне минеральных удобрений (N₄₀P₄₀K₄₀) и контрольном варианте (без удобрений).

Таблица 16. Содержание тяжелых металлов в зерне озимой пшеницы, мг/кг (2021–2023 гг.)

№ п/п	Варианты	Zn	Cu	Pb	Cd	Ni
1.	Ф1	19,7	1,9	0,33	0,030	0,47
1.1.	Ф1+Ц1	18,2	1,7	0,15	0,018	0,31
1.2.	Ф1+Ц2	17,1	1,7	0,23	0,018	0,33
1.3.	Ф1+ЦК1	17,8	1,8	0,17	0,018	0,39
1.4.	Ф1+ЦК2	18,6	1,8	0,18	0,022	0,31
1.5.	Ф1+ЦА1	16,7	1,6	0,19	0,016	0,30
1.6.	Ф1+ЦА2	14,8	1,7	0,24	0,015	0,31
2.	Ф2	17,1	1,9	0,44	0,030	0,50
2.1.	Ф2+Ц1	17,7	1,7	0,32	0,017	0,35
2.2.	Ф2+Ц2	14,9	1,7	0,29	0,022	0,33
2.3.	Ф2+ЦК1	16,3	1,7	0,29	0,021	0,39
2.4.	Ф2+ЦК2	15,7	1,6	0,27	0,021	0,37
2.5.	Ф2+ЦА1	16,3	1,6	0,23	0,023	0,34
2.6.	Ф2+ЦА2	17,3	1,6	0,22	0,017	0,32
НСР ₀₅	Фактор А	$F_{\phi} < F_{\tau}$	0,07	0,05	0,002	0,02
	Фактор В	$F_{\phi} < F_{\tau}$	0,13	0,10	0,004	0,04
<i>ПДК*</i>		<i>50</i>	<i>10</i>	<i>0,50</i>	<i>0,10</i>	<i>0,50</i>

*СанПиН 42-123-4089-85 "Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах"

Снижение поступления тяжелых металлов в продукцию объясняется способностью монокремниевой кислоты, содержащейся в цеолите,

образовывать с тяжелыми металлами труднорастворимые силикаты (Матыченков В.В. и др., 2002; Курбаков Д.Н. и др. 2022; Bhat J.A., 2019).

В то же время, использование минеральных удобрений может привести к увеличению поступления тяжелых металлов в растения. Это связано с тем, что минеральные удобрения часто содержат примеси тяжелых металлов из горнорудных месторождений (Бузетти К.Д. и др., 2020; Greger M. et. all, 2018), а также могут подкислять почву, повышая подвижность токсичных элементов.

Цеолит – незаменимый носитель удобрений, который трансформирует методы ведения сельского хозяйства. Цеолиты способны эффективно удерживать и постепенно высвобождать жизненно важные питательные вещества для растений, благодаря своей особой пористой структуре. Цеолит улучшает плодородие почвы, служа резервуаром для удобрений и обеспечивая постоянный и регулируемый приток питательных веществ и воды. Снижая вероятность стока удобрений и улучшая усвоение питательных веществ растениями, этот метод способствует экологической устойчивости. Повышая урожайность сельскохозяйственных культур, оказывает положительное влияние на более эффективные и экологически устойчивые методы ведения сельского хозяйства.

Подводя итог вышеизложенному, можно сделать следующие выводы:

– использование цеолитсодержащих удобрений в технологии возделывания озимой пшеницы способствовало повышению ее продуктивности. Внесение в почву цеолита и экспериментальных удобрений на его основе увеличило урожайность зерна от 5,1 до 20,7 % или от 0,22 до 0,88 т/га соответственно, в зависимости от вариаций обогащения. При анализе данных на минеральном фоне максимальная прибавка урожайности наблюдалась также при применении цеолита, обогащенного аминокислотами (500 кг/га) и составляла 6,16 т/га, что на 0,95 т/га больше по сравнению с фоном. Средняя урожайность по естественному агрофону составила 4,77 т/га, по минеральному – 5,75 т/га.

– применение цеолитсодержащих удобрений способствовало увеличению выноса азота и калия с зерном озимой пшеницы. На вариантах с внесением минерального удобрения основные макроэлементы усваивались растениями более интенсивно;

– цеолит и удобрения на его основе позволяют увеличить содержание белка и клейковины в зерне озимой пшеницы. Процент содержания белка колебался по вариантам опыта от 10,38 на контроле до 12,32 % с применением цеолита, обогащенного аминокислотами в дозе 250 кг/га, а клейковины – от 20,47 на контроле до 25,2 % варианте с применением цеолита, обогащенного карбамидом в дозе 250 кг/га на фоне минеральных удобрений;

– использование цеолитсодержащих удобрений в технологии возделывания озимой пшеницы позволяет получать экологически более безопасную продукцию. Под их действием наблюдалось снижение накопления в зерне озимой пшеницы меди на 10,5-15,8 %, цинка – на 5,6-24,9 %, никеля на 11,4-36,2 %, свинца – на 27,3-64,5 % и на 26,7-50 % кадмия в зависимости от дозы и обогащении аминокислотами и карбамидом.

Использование цеолитсодержащих удобрений позволяет не только снизить содержание тяжелых металлов в зерне озимой пшеницы, но и повысить его питательную ценность за счет увеличения содержания белка и клейковины.

Наиболее эффективными при выращивании озимой пшеницы являются варианты с внесением цеолита, обогащенного аминокислотами как на естественном, так и на минеральном фоне.

ГЛАВА 5. БАЛАНС ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ В ЧЕРНОЗЕМЕ ТИПИЧНОМ ПОД ПОСЕВАМИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

В сельскохозяйственной практике вопрос сохранения и повышения плодородия почв всегда был приоритетным. Оценка обеспеченности почвы усвояемыми элементами минерального питания растений является одним из ключевых факторов при характеристике любой почвы. В связи с этим, изменение количества биофильных элементов в почве под воздействием антропогенной нагрузки представляет значительный интерес (Азаров В.Б., 2012). Баланс элементов питания в почве при различных системах удобрения служит показателем данного изменения. Длительное сельскохозяйственное использование пахотных земель без адекватных мероприятий по сохранению и воспроизводству плодородия приводит к его снижению.

Баланс азота

В черноземах лесостепной зоны Среднего Поволжья вследствие недостаточного внесения органических и азотных удобрений баланс азота является дефицитным (Куликова А.Х. и др., 2012; Никитин С.Н. и др., 2019, Обущенко С.В., Шевченко С.Н., 2020; Волкова Е.С., 2021).

Азот, являясь одним из ключевых макроэлементов, выполняет главную роль в ускорении роста растений, участвуя в синтезе белка, хлорофилла и ферментов. Азотные удобрения восполняют дефицит азота в почве и позволяют получить более высокую урожайность сельскохозяйственных культур. Азот обеспечивает бесперебойное поступление к растениям других необходимых питательных веществ таких, как фосфор и калий. Удобрение, содержащее азотный компонент, позволяет восполнить дефицит питательных веществ. Однако избыток азота может оказывать вредное воздействие на окружающую среду и рост растений (Einarsson R., 2021).

Поступление и вынос азота под посевами озимой пшеницы представлены в таблицах 17 и 18 соответственно. Основным источником поступления азота являлись минеральные удобрения, а также фиксация

молекулярного азота (Гилязов М.Ю. и др., 2024). На варианте с применением цеолита, обогащенного карбамидом, поступление его с данными удобрениями (5 и 10 кг/га).

Таблица 17. Поступление азота в почву в зависимости от применения цеолита, в том числе обогащенного аминокислотами и карбамидом, под посевами озимой пшеницы, кг/га

№ п/п	Вариант	С семенами	С осадками	С удобрениями	Фиксация молекулярного азота	Всего
1.	Ф1	5	9		20	34
1.1.	Ф1+Ц1	5	9		20	34
1.2.	Ф1+Ц2	5	9		20	34
1.3.	Ф1+ЦК1	5	9	5	20	39
1.4.	Ф1+ЦК2	5	9	10	20	44
1.5.	Ф1+ЦА1	5	9		20	34
1.6.	Ф1+ЦА2	5	9		20	34
2.	Ф2	5	9	40	20	74
2.1.	Ф2+Ц1	5	9	40	20	74
2.2.	Ф2+Ц2	5	9	40	20	74
2.3.	Ф2+ЦК1	5	9	45	20	79
2.4.	Ф2+ЦК2	5	9	50	20	84
2.5.	Ф2+ЦА1	5	9	40	20	74
2.6.	Ф2+ЦА2	5	9	40	20	74

Таблица 18. Вынос азота из почвы в зависимости от применения цеолита, в том числе обогащенного аминокислотами и карбамидом, под посевами озимой пшеницы, кг/га

№ п/п	Вариант	С урожаем	Газообразные потери	Инфильтрация с осадками	Всего
1.	Ф1	80,37	8	3	91,37
1.1.	Ф1+Ц1	87,51	8	3	98,51
1.2.	Ф1+Ц2	90,71	8	3	101,71
1.3.	Ф1+ЦК1	93,53	8	3	104,53
1.4.	Ф1+ЦК2	96,67	8	3	107,67
1.5.	Ф1+ЦА1	99,77	8	3	110,77
1.6.	Ф1+ЦА2	101,26	8	3	112,26
2.	Ф2	105,24	8	3	116,24
2.1.	Ф2+Ц1	109,01	8	3	120,01
2.2.	Ф2+Ц2	113,36	8	3	124,36
2.3.	Ф2+ЦК1	116,76	8	3	127,76
2.4.	Ф2+ЦК2	125,03	8	3	136,03
2.5.	Ф2+ЦА1	123,81	8	3	134,81
2.6.	Ф2+ЦА2	126,07	8	3	137,07

Потери азота с урожаем являются существенным фактором в расходах на этот элемент. Чем выше урожайность основной продукции, тем больше вынос азота. В экспериментах без внесения удобрений вынос азота составил 91,37 кг/га, в то время как при использовании удобрений на основе цеолита, обогащенного аминокислотами и карбамидом, этот показатель увеличился до 98,51 - 112,26 кг/га. На фоне минеральных удобрений вынос азота варьировался от 116,24 до 137,07 кг/га.

Таблица 19. Баланс азота в почве в зависимости от применения цеолита, в том числе обогащенного аминокислотами и карбамидом под посевами озимой пшеницы, кг/га

№ п/п	Вариант	Поступление азота	Вынос азота	Баланс, ±
1.	Ф1	34	91,37	-57,37
1.1.	Ф1+Ц1	34	98,51	-64,51
1.2.	Ф1+Ц2	34	101,71	-67,71
1.3.	Ф1+ЦК1	39	104,53	-65,53
1.4.	Ф1+ЦК2	44	107,67	-63,67
1.5.	Ф1+ЦА1	34	110,77	-76,77
1.6.	Ф1+ЦА2	34	112,26	-78,26
2.	Ф2	74	116,24	-42,24
2.1.	Ф2+Ц1	74	120,01	-46,01
2.2.	Ф2+Ц2	74	124,36	-50,36
2.3.	Ф2+ЦК1	79	127,76	-48,76
2.4.	Ф2+ЦК2	84	136,03	-52,03
2.5.	Ф2+ЦА1	74	134,81	-60,81
2.6.	Ф2+ЦА2	74	137,07	-63,07

Как следует из данных таблицы 19, на всех вариантах как на естественном фоне, так и минеральном наблюдался отрицательный баланс по азоту. Повышенное азотное питание озимой пшеницы, обусловленное применением удобрений, позитивно сказалось на урожайности, что свидетельствует об активном использовании растениями поглощенного азота в обменных процессах и достаточном его количестве для формирования высокой урожайности.

Следует отметить, что дополнительное внесение азота в почву не компенсировало его потери. Положительный баланс питательных веществ обеспечивает сохранение и воспроизводство плодородия почвы и способствует поддержанию общего содержания азота в пахотном слое за счет повышенного поступления питательных веществ в ризосферу растений.

Баланс фосфора

Фосфор, являясь одним из важнейших элементов питания, оказывает многостороннее влияние на жизнедеятельность растений. Исследования многих ученых показали значительную зависимость урожайности зерновых культур от уровня содержания подвижного фосфора в почве. При недостатке этого элемента наблюдается слабое действие азотных удобрений.

Основатель отечественной агрохимической школы академик Д.Н. Прянишников в первой половине прошлого века писал, что в черноземах имеется «... большой запас азота, пока хватит и калия: нужно добавить только один элемент – фосфор, чтобы обновить чернозем, истощенный многовековой культурой без удобрений». Поэтому уровень обеспеченности растений доступным фосфором является одним из основных показателей плодородия почвы.

Длительное выращивание озимой пшеницы без внесения фосфорных удобрений приводит к дефициту фосфора в почве. Систематическое применение удобрений способствует накоплению подвижного фосфора в пахотных и подпахотных горизонтах почвы (Чекмарев П. А. и др., 2010; Шафран С.А. и др., 2021; Лукин С.В., 2023).

Баланс фосфора в зависимости от применения цеолита, а также при обогащении его аминокислотами и карбамидом, представлен в таблице 20.

Таблица 20. Баланс фосфора в почве в зависимости от применения цеолита, в том числе обогащенного аминокислотами и карбамидом, под посевами озимой пшеницы, кг/га

№ п/п	Вариант	Поступление фосфора			Вынос фосфора		Баланс, ±
		с семенами	с удобрениями	с осадками	с урожаем	инфильтрация с осадками	
1.	Ф1	1,7		0,4	31,95	0,3	-30,15
1.1.	Ф1+Ц1	1,7	4,43	0,4	30,61	0,3	-24,38
1.2.	Ф1+Ц2	1,7	8,86	0,4	32,12	0,3	-21,46
1.3.	Ф1+ЦК1	1,7	4,43	0,4	34,81	0,3	-28,58
1.4.	Ф1+ЦК2	1,7	8,86	0,4	31,83	0,3	-21,17
1.5.	Ф1+ЦА1	1,7	4,43	0,4	34,69	0,3	-28,46
1.6.	Ф1+ЦА2	1,7	8,86	0,4	36,84	0,3	-26,18
2.	Ф2	1,7	40	0,4	38,03	0,3	3,77
2.1.	Ф2+Ц1	1,7	44,43	0,4	38,13	0,3	8,1
2.2.	Ф2+Ц2	1,7	48,86	0,4	42,68	0,3	7,98
2.3.	Ф2+ЦК1	1,7	44,43	0,4	42,00	0,3	4,23
2.4.	Ф2+ЦК2	1,7	48,86	0,4	45,70	0,3	4,96
2.5.	Ф2+ЦА1	1,7	44,43	0,4	44,95	0,3	1,28
2.6.	Ф2+ЦА2	1,7	48,86	0,4	47,84	0,3	2,82

В наших исследованиях источником фосфора являлись минеральные удобрения, а также незначительная часть его поступала в составе кремниевых удобрений. Из данных таблицы следует, что вынос фосфора компенсируется внесением удобрений и поступлением его в почву на минеральном фоне. Наблюдается не большой, но положительный баланс, который составляет от 1,28 кг/га до 8,1 кг/га в зависимости от применяемой системы удобрения.

На естественном фоне баланс фосфора отрицательный, но использование удобрений на основе цеолита позволило сократить разницу от 5 % до 28 % в зависимости от дозы вносимого удобрения по отношению к контрольному варианту.

Баланс калия

Основным источником калийного питания сельскохозяйственных культур является подвижный калий, который поступает в почву с удобрениями, большая часть которых переходит в поглощенное состояние. При длительном выращивании растений без внесения калийных удобрений, калий мобилизуется из менее доступных форм. Систематическое применение удобрений способствует накоплению подвижного калия в пахотных и подпахотных горизонтах почвы.

Изменение содержания калия в почвах агроценозов при различной интенсивности калийного баланса, связь показателя с продуктивностью выращиваемых культур изучали в ряде работ (Прокошев В.В и др., 2021; Замятин С.А. и др., 2013; Якименко В.Н., 2019; Сычев В.Г. и др., 2021). Анализ литературных сведений показывает неоднозначность складывающегося калийного состояния почв в различных исследованиях, что, обуславливается действием совокупности факторов, прежде всего почвенно-климатических условий и степени нагрузки на почву (уровня применения агротехники и сортов выращиваемых культур).

В.П. Середина (2003) отмечает положительное влияние цеолита на свойства дерново-подзолистой почвы, выраженное в повышении содержания обменных катионов, увеличении степени насыщенности почвы основаниями, понижении гидролитической кислотности и улучшении калийного режима почвы.

Баланс калия в зависимости от применения цеолита и его обогащенных форм представлен в таблице 21.

Таблица 21. Баланс калия в почве в зависимости от применения цеолита, в том числе обогащенного аминокислотами и карбамидом, под посевами озимой пшеницы, кг/га

№ п/п	Вариант	Поступление калия			Вынос калия		Баланс, ±
		с семенами	с удобрениями	с осадками	с урожаем	инфильтрация с осадками	
1.	Ф1	1		4	11,22	3	-9,22
1.1.	Ф1+Ц1	1	6	4	11,95	3	-3,95
1.2.	Ф1+Ц2	1	12	4	12,06	3	1,94
1.3.	Ф1+ЦК1	1	6	4	12,85	3	-4,85
1.4.	Ф1+ЦК2	1	12	4	13,33	3	0,67
1.5.	Ф1+ЦА1	1	6	4	13,78	3	-5,78
1.6.	Ф1+ЦА2	1	12	4	14,22	3	-0,22
2.	Ф2	1	40	4	14,24	3	27,76
2.1.	Ф2+Ц1	1	46	4	15,04	3	32,96
2.2.	Ф2+Ц2	1	52	4	16,92	3	37,08
2.3.	Ф2+ЦК1	1	46	4	16,95	3	31,05
2.4.	Ф2+ЦК2	1	52	4	17,52	3	36,48
2.5.	Ф2+ЦА1	1	46	4	17,26	3	30,74
2.6.	Ф2+ЦА2	1	52	4	18,48	3	35,52

Анализ баланса питательных веществ показал, что выращивание озимой пшеницы на естественном фоне приводит к дефициту калия в черноземе типичном, и составляет -9,22 кг/га на контроле. Применение удобрений на основе цеолита способствует снижению этого дефицита до -0,22 кг/га. При внесении цеолита в дозе 500 кг/га баланс калия становится положительным (1,94 кг/га). На фоне минеральных удобрений баланс калия остается положительным во всех вариантах благодаря применению минеральных соединений. Наиболее благоприятный баланс калия

наблюдается при внесении цеолита в дозе 500 кг/га (37,08 кг/га) и цеолита, обогащенного аминокислотами в той же дозе (35,52 кг/га).

Необходимое количество питательных веществ для растений определяется их содержанием в урожае. При созревании озимой пшеницы основная часть азота и фосфора переходит в зерно, в то время как большая часть калия остается в вегетативной массе. Расчеты выноса питательных элементов с урожаем зерна показали, что на черноземе типичном наибольшие значения выноса наблюдаются для азота, за ним следуют фосфор и калий (рис.38).

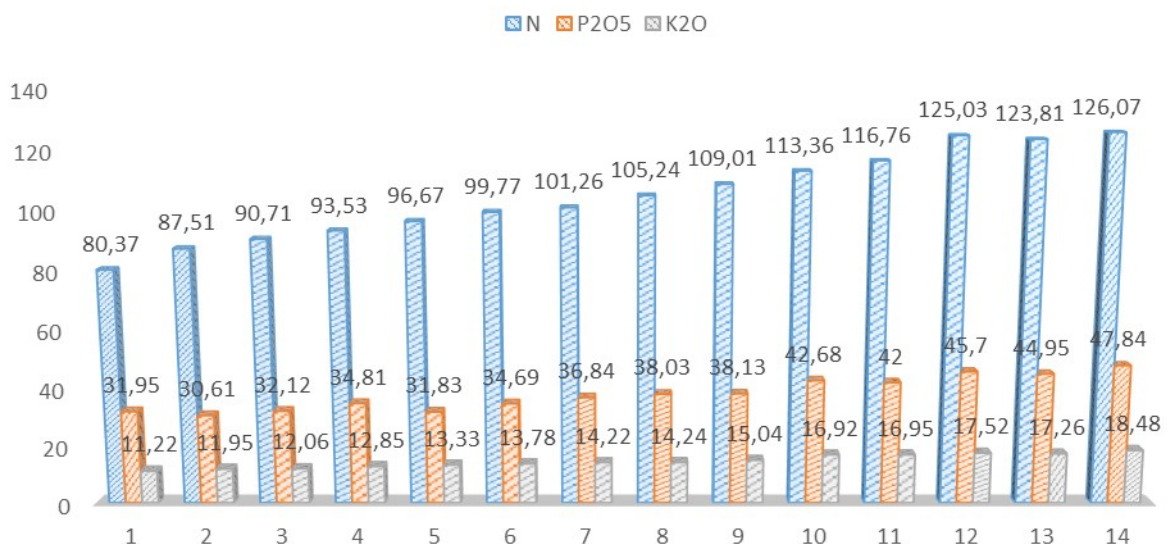


Рисунок 38. Вынос азота, фосфора и калия урожаем зерна озимой пшеницы на фоне применения цеолитсодержащих удобрений, кг/га (2021-2023 гг.)

Вынос питательных веществ из почвы возрастает с увеличением урожая. Однако, прямо пропорциональной зависимости между величиной урожая и объемом выноса основных питательных элементов не всегда наблюдается. Наибольший вынос элементов на естественном фоне отмечен при внесении цеолита, обогащенного аминокислотами в дозах 250 и 500 кг/га (азота – 99,77 и 101,26 кг/га, фосфора – 34,69 и 36,84 кг/га, калия – 13,78 и 14,22 кг/га соответственно).

На фоне минеральных удобрений наибольший вынос наблюдается при внесении цеолита, обогащенного аминокислотами, и цеолита, обогащенного карбамидом в дозе 500 кг/га.

Интенсивность баланса – это отношение поступления питательных веществ к их выносу с урожаем, выраженное в процентах или коэффициентах. Величина интенсивности менее 100% указывает на дефицит, 100% - на бездефицитный (нулевой) или поддерживающий баланс, а более 100% - на положительный баланс.

Таким образом, на естественном фоне наблюдается дефицит азота и фосфора. Внесение цеолита, а также цеолита, обогащенного карбамидом и аминокислотами, способствует увеличению интенсивности баланса по азоту, несмотря на высокий его вынос с урожаем (табл. 22).

Таблица 22. Интенсивность баланса питательных элементов в почве, %

№ п/п	Вариант	Интенсивность баланса		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1.	Ф1	37	7	35
1.1.	Ф1+Ц1	35	21	74
1.2.	Ф1+Ц2	33	34	113
1.3.	Ф1+ЦК1	37	19	69
1.4.	Ф1+ЦК2	41	34	104
1.5.	Ф1+ЦА1	31	19	66
1.6.	Ф1+ЦА2	30	30	99
2.	Ф2	64	110	261
2.1.	Ф2+Ц1	62	121	283
2.2.	Ф2+Ц2	60	119	286
2.3.	Ф2+ЦК1	62	110	256
2.4.	Ф2+ЦК2	62	111	278
2.5.	Ф2+ЦА1	55	103	252
2.6.	Ф2+ЦА2	54	106	265

Интенсивность баланса по фосфору варьировалась от 13 до 28% на естественном фоне и от 103 до 121% при использовании минеральных

удобрений. Интенсивность баланса по калию достигала наибольших значений, составляя до 286% при внесении цеолита в количестве 500 кг/га на фоне минерального удобрения.

Применение цеолита, включая обогащенный аминокислотами и карбамидом, способствовало увеличению выноса NPK возделываемой культуры. Данный эффект обусловлен ростом урожайности и повышением содержания указанных элементов в продукции.

Изучение влияния систем удобрения на баланс элементов питания позволяет сделать следующие выводы:

– внесение цеолита в почву увеличило вынос NPK возделываемой культурой на 3,9–6,5 кг/га, 2,3–3,4 кг/га и 3,9–6,8 кг/га соответственно, что связано с ростом урожайности;

– применение цеолита, а также цеолита, обогащенного аминокислотами и карбамидом на фоне минеральных удобрений, оказывало положительное влияние на агрохимические показатели пахотного слоя чернозема типичного;

– внесение в почву цеолита, как в чистом виде, так и обогащенного аминокислотами и карбамидом, повышало интенсивность баланса NPK, в большей степени на фоне минеральных удобрений. При этом интенсивность баланса по азоту увеличивалась до 62 %, по фосфору - до 121 %, по калию - до 286 %.

ГЛАВА 6. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИИ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Плодородие сельскохозяйственных земель является ключевым фактором, определяющим современные агротехнологии. Под современными агротехнологиями подразумевается применение методов возделывания, обеспечивающих производство высококачественной продукции с низкой себестоимостью и максимальной рентабельностью при условии сохранения или повышения плодородия почв.

Оценивая экономическую эффективность технологий, мы можем прогнозировать устойчивость функционирования сельскохозяйственных предприятий. В условиях конкуренции и экономических ограничений предприятиям необходимо производить продукцию высокого качества с минимальными затратами. Это особенно актуально для технологий, использующих минеральные удобрения, поскольку их стоимость постоянно растет, что увеличивает расходы на производство.

Основная цель растениеводства – повышение урожайности и увеличение валового сбора продукции при одновременном сокращении трудозатрат и материальных ресурсов. Рентабельность предприятия напрямую зависит от себестоимости производимой продукции. Чем больше разница между себестоимостью и ценой реализации, тем выше прибыль и уровень рентабельности (Солошенко В.М. и др., 2015; Рыкова И.Н. и др., 2022).

В ходе экономического анализа технологий возделывания озимой пшеницы (табл. 23) использовались действующие нормативы и расценки, принятые для производственных условий опытного поля Ульяновского государственного аграрного университета. Стоимость продукции была определена на основе рыночных цен 2023 года. Все расчеты были проведены на основании технологических карт.

Таблица 23. Экономическая эффективность применения в технологии возделывания озимой пшеницы кремнийсодержащих материалов и минерального удобрения

№ п/п	Варианты	Урожайность, т/га	Стоимость продукции, руб.с 1 га, руб.	Производственные затраты на 1 га, руб.	Себестоимость 1 т, руб.	Условный чистый доход, руб.	Уровень рентабельности, %
1.	Ф1	4,26	46860	33364,0	7832,0	13496,0	40
1.1.	Ф1+Ц1	4,48	49280	36627,2	8175,7	12652,8	35
1.2.	Ф1+Ц2	4,70	51700	39917,6	8493,1	11782,4	30
1.3.	Ф1+ЦК1	4,88	53680	37085,7	7599,5	16594,3	45
1.4.	Ф1+ЦК2	5,00	55000	40250,6	8050,1	14749,4	37
1.5.	Ф1+ЦА1	4,98	54780	37433,0	7516,8	17347,0	46
1.6.	Ф1+ЦА2	5,14	56540	39906,4	7763,9	16633,6	42
2.	Ф2	5,21	57310	40503,4	7774,2	16806,6	41
2.1.	Ф2+Ц1	5,37	59070	43713,2	8140,3	15356,8	35
2.2.	Ф2+Ц2	5,64	62040	47045,4	8341,4	14994,6	32
2.3.	Ф2+ЦК1	5,78	63580	44669,4	8016,9	18910,6	42
2.4.	Ф2+ЦК2	6,04	66440	48490,5	8028,2	17949,5	37
2.5.	Ф2+ЦА1	6,02	66220	44686,5	7423,0	21533,5	48
2.6.	Ф2+ЦА2	6,16	67760	47624,1	7731,2	20135,9	42

Основным показателем, определяющим эффективность производства, являются производственные затраты. На контроле в годы проведения исследований затраты на производство зерна озимой пшеницы составили 33364,0 руб./га, тогда как на варианте с внесением минеральных удобрений – 40503,4 руб. Одной из основных причин повышения производственных затрат являлась достаточно высокая стоимость минеральных удобрений. Наибольшие затраты 48490,5 и 47624,07 руб./га отмечались на вариантах с применением цеолита, обогащенного аминокислотами и карбамидом на минеральном фоне в дозе 500 кг/га. Однако увеличение производственных затрат на вариантах с использованием цеолита как в чистом виде, так и обогащенного аминокислотами и карбамидом на естественном и минеральном фоне сопровождалось не только затратами на удобрения, но и значительным

приростом урожайности. И там, где прибавка урожая, стоимость которой компенсировала возрастающие затраты, приводила к увеличению дохода и соответственно рентабельности производства. И, наоборот, стоимость прибавки урожая, не компенсирующая возрастающие производственные затраты, приводила к увеличению себестоимости продукции, снижению прибыли и рентабельности. Это видно на вариантах с применением цеолита в чистом виде. Так, прибавка урожая на 0,22-0,44 т/га не покрывала затраты, возросшие на 3263,2-6553,6 руб./га, снижая условно чистый доход на 843,2-1713,6 рублей.

Доля затрат на минеральные удобрения в формировании затрат на производство озимой пшеницы составляла от 10 до 12 % по вариантам опыта. Затраты на удобрения на основе цеолита в общей структуре затрат составляли 5-12 % на естественном фоне и 5-10 % на фоне минеральных удобрений (рис. 39).

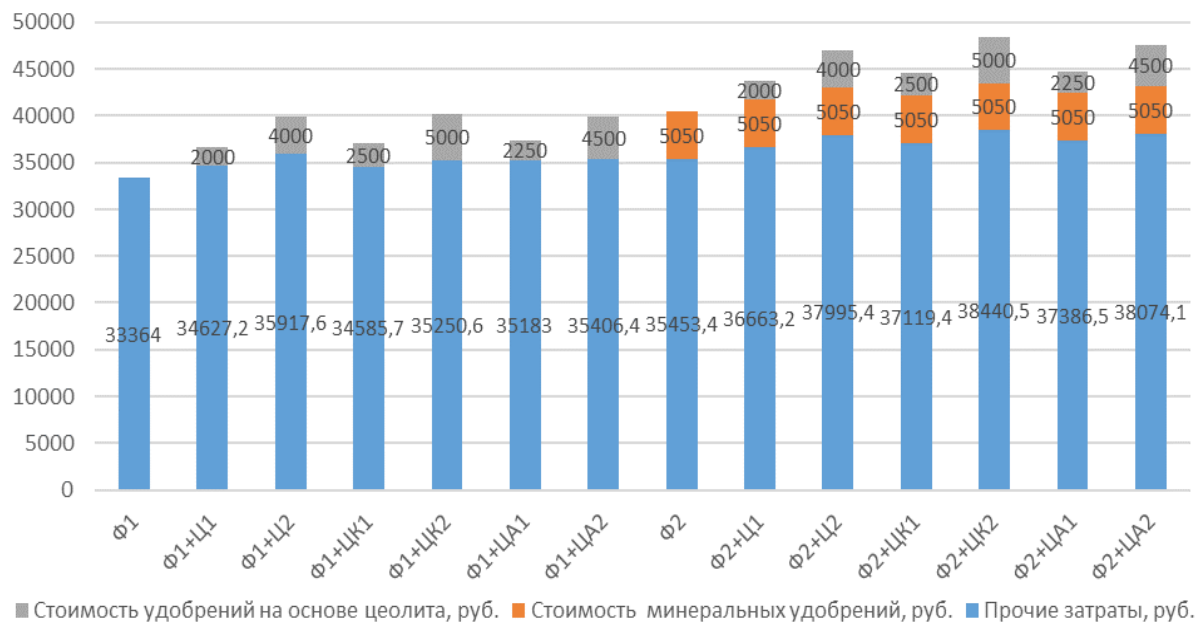


Рисунок 39. Вклад удобрений в формирование затрат на выращивание озимой пшеницы, руб./га (2021-2023 гг.)

Современные аграрные технологии по всему миру, включая системы удобрений, ориентированы не только на увеличение объема производства, но и

на рост трудовой эффективности. В ходе наших исследований мы выяснили (см. рис. 40), что с ростом производственных затрат наблюдается закономерное снижение трудозатрат на единицу продукции. То есть, чем дороже технология, тем меньше требуется человеческого труда. К примеру, на контрольной площадке затраты труда составили 1,83 чел./час, в то время как в наиболее затратном варианте с внесением цеолита, обогащенного аминокислотами и минеральными удобрениями, они уменьшились на 9 %, достигнув 1,68 чел./час на тонну зерна.

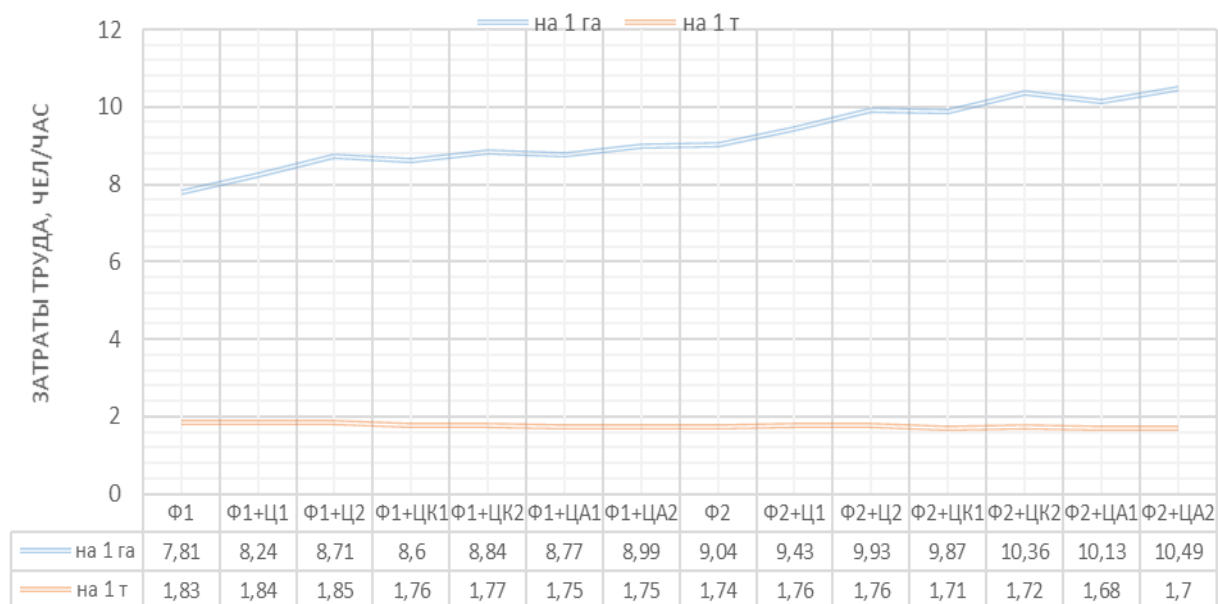


Рисунок 40. Затраты труда на производство озимой пшеницы, чел./час (2021-2023 гг.)

Условный чистый доход в варианте без удобрений составил 13496 руб./га, а применение цеолита с аминокислотами и карбамидом увеличивало его до 14749,4-17347,0 руб., в зависимости от дозы. Максимальный доход был получен при использовании 250 кг/га цеолита, обогащенного аминокислотами, и составил 21533,5 руб. на минеральном фоне.

Применение обогащенного аминокислотами цеолита (250 кг/га) на естественном фоне, а также на фоне минеральных удобрений обеспечило наиболее низкую себестоимость производства 1 тонны зерна данной культуры и

составило 7516 и 7423 рублей, несмотря на значительно возросшие производственные затраты (благодаря значительному приросту урожайности), тогда как на контроле она составляла 7832 руб./т. Увеличение условно чистого дохода составило 3851 и 8038 рублей с гектара.

В среднем за 2021-2023 гг. экономическая оценка возделывания озимой пшеницы с использованием удобрений на основе цеолита, в том числе и на фоне минерального питания показала, что посеvy формировали стоимость валовой продукции на уровне 46860-67760 руб./га. Внесение минеральных удобрений повышало стоимость на 22-45 %.

Исследование экономической эффективности выращивания озимой пшеницы с применением удобрений на основе цеолита выявило, что наивысшую рентабельность показывает использование цеолита, обогащенного карбамидом и аминокислотами в дозе 250 кг/га с уровнем рентабельности 45 и 46 % (контроль – 40 %). При этом система удобрения с использованием только минеральных добавок демонстрирует рентабельность 41 %. В комбинации с минеральными удобрениями наилучший экономический результат был достигнут при внесении цеолита, содержащего аминокислоты (250 кг/га), где рентабельность составила 48 %.

Таким образом, анализ полученных данных говорит о целесообразности использования цеолита с аминокислотами в дозе 250 кг/га как в естественных условиях, так и с минеральными удобрениями для экономически обоснованного возделывания озимой пшеницы. Важно подчеркнуть, что применение цеолита с аминокислотами не приводит к максимальному увеличению урожайности, однако позволяет снизить производственные расходы и повысить уровень рентабельности, что является ключевым фактором в современных условиях агробизнеса.

4.2 Энергетическая эффективность технологии возделывания озимой пшеницы

Сельское хозяйство является самым крупным потребителем энергии среди всех отраслей экономики страны. На долю этой сферы приходится значительная часть расхода дизельного топлива (40-45 %), бензина (30–35 %) и электроэнергии (7 %).

Агроландшафты на всех этапах производства сельскохозяйственной продукции, помимо солнечной радиации, для обеспечения своей функциональности и повышения устойчивости к неблагоприятным экологическим факторам, потребляют антропогенную энергию в виде минеральных удобрений, пестицидов, орошения, топлива и других энергоносителей (Голомолзин Р.С., 2011).

Повышение урожайности культурных растений сопровождается ростом энергетических затрат. В связи с этим, для обеспечения устойчивости современного сельскохозяйственного производства крайне важно оптимизировать управление потоками энергии в агрофитоценозах.

Биоэнергетический анализ позволяет оценить энергетический потенциал агроэкосистем и целесообразность применения антропогенной энергии при выращивании культурных растений. Этот метод помогает выявить статьи расхода невозобновляемой энергии и измерить в сопоставимых единицах затраты живого и прошлого труда (Абрамов Н.В., Селюкова Г.П., 2001; Карпухин М.Ю., 2011).

Более глубокий анализ систем земледелия возможен с помощью системно-энергетического подхода. Он позволяет количественно определить энергозатраты, степень их окупаемости при производстве растениеводческой продукции, а также сравнить агроценозы по расходу энергии в зависимости от типа севооборотов, применяемой системы удобрения и технологий возделывания сельскохозяйственных культур (Коринец В.В., 1985).

Энергетический анализ технологических процессов позволяет получать объективные оценки их эффективности по критериям, свободным от временных рыночных изменений цен, например, на энергоносители. Энергетическая оценка применяется наряду с традиционными методами оценки эффективности сельскохозяйственного производства через стоимостные показатели и затраты труда в рамках обеспечения продовольственной безопасности. Такой подход основан на том, что согласно фундаментальному закону сохранения энергии совокупность ресурсов, вовлеченных в производство, сводится к единому измерителю — энергии. При этом сельскохозяйственное производство рассматривается как сложная система, где на входе учитывается природная и антропогенная энергия, а на выходе — энергия, накопленная живыми организмами, растениями, микроорганизмами в почве и т. д. (Иванов П.В., Ткаченко И.В., 2013).

Проведённые исследования демонстрируют, что экономическая и биоэнергетическая эффективность в значительной степени определяется объёмом урожая.

В ходе исследования энергозатраты определяли на основе технологических карт с использованием энергетических эквивалентов. Оценка энергетической эффективности систем удобрения проводилась путём сравнения затрат энергии на производство зерна озимой пшеницы с количеством полученной энергии от основного продукта.

Анализ показал, что энергозатраты на выращивание озимой пшеницы по изучаемым технологиям имеют различия. Несмотря на то, что затраты энергии на производство зерна полностью компенсировались валовой энергией урожая во всех экспериментальных вариантах, их эффективность варьировалась (см. таблица 24).

В ходе исследований было установлено, что суммарные энергетические затраты на естественном агрофоне варьировались от 24,07 до 29,04 ГДж/га. Минимальные значения наблюдались на контроле, максимальные — при внесении цеолита, обогащенного карбамидом (500 кг/га). Применение

минеральных удобрений сопровождалось ростом энергозатрат до 29,22-34,99 ГДж/га, что на 20-21 % превышало аналогичные показатели на вариантах с естественным агрофоном.

Эффективность технологии возделывания озимой пшеницы с биоэнергетической точки зрения определяется не только суммарным потреблением энергии, но и объемом энергии, аккумулированной в продукции. Согласно данным, представленным в таблице 24, этот показатель варьировался от 70,08 до 101,33 ГДж/га. Максимальные значения наблюдались при внесении цеолита, обогащенного аминокислотами (500 кг/га), и коррелировали с урожайностью озимой пшеницы.

Таблица 24. Биоэнергетическая оценка технологий возделывания озимой пшеницы в зависимости от применения цеолита и экспериментальных удобрений на его основе

№ п/п	Варианты	Затраты энергии, ГДж/га	Содержание энергии в урожае, ГДж/га	Биоэнергетический коэффициент	Чистый энергетический доход, ГДж/га	Энергетическая себестоимость урожая, ГДж/га	Коэффициент чистой эффективности
1.	Ф1	24,07	70,08	2,91	46,01	5,65	1,91
1.1.	Ф1+Ц1	26,43	73,70	2,79	47,27	5,90	1,79
1.2.	Ф1+Ц2	28,80	77,32	2,68	48,52	6,13	1,68
1.3.	Ф1+ЦК1	26,76	80,28	3,00	53,52	5,48	2,00
1.4.	Ф1+ЦК2	29,04	82,25	2,83	53,21	5,81	1,83
1.5.	Ф1+ЦА1	27,01	81,92	3,03	54,91	5,42	2,03
1.6.	Ф1+ЦА2	28,79	84,55	2,94	55,76	5,60	1,94
2.	Ф2	29,22	85,70	2,93	56,48	5,61	1,93
2.1.	Ф2+Ц1	31,54	88,34	2,80	56,8	5,87	1,80
2.2.	Ф2+Ц2	33,94	92,78	2,73	58,84	6,02	1,73
2.3.	Ф2+ЦК1	32,23	95,08	2,95	62,85	5,58	1,95
2.4.	Ф2+ЦК2	34,99	99,36	2,84	64,37	5,79	1,84
2.5.	Ф2+ЦА1	32,24	99,03	3,07	66,79	5,36	2,07
2.6.	Ф2+ЦА2	34,36	101,33	2,95	66,97	5,58	1,95

Максимальный коэффициент биоэнергетической эффективности как на естественном, так и на минеральном фоне был у варианта с использованием цеолита обогащением его аминокислотами (250 кг/га) и составил 3,03 и 3,07 соответственно, т.е. достигнуто оптимальное соотношение энергозатрат.

Наименьшую энергетическую эффективность показали варианты с применением цеолита в дозе 500 кг/га как на естественном, так и на минеральном фоне.

При оценке биоэнергетической эффективности агротехнологий необходимо учитывать энергетический потенциал почвы, который может существенно повлиять на функционирование всей агроэкосистемы. Проведенный анализ свидетельствует об эффективности использования цеолитсодержащих удобрений при выращивании озимой пшеницы как на естественном, так и на минеральном фоне.

Экономическая оценка применения цеолитсодержащих удобрений показала их экономическую целесообразность и обоснованность при возделывании озимой пшеницы. Данный агроприем способствует повышению уровня рентабельности на 6-8 % по сравнению с контрольным вариантом.

Таким образом, применение цеолита и удобрений на его основе в технологии возделывания озимой пшеницы является экономически оправданным. Совместное использование цеолита с минеральными удобрениями не менее эффективно, однако дополнительное внесение последних обеспечивает поддержание оптимального уровня плодородия почвы для сельскохозяйственных культур.

Анализ биоэнергетической оценки технологий возделывания озимой пшеницы с применением цеолитсодержащих удобрений на естественном и минеральном фоне позволяет сделать следующие выводы:

- увеличение продуктивности, а, следовательно, энергетической эффективности технологий возделывания озимой пшеницы свидетельствуют о достаточно высокой эффективности их применения;

- исследования показали, что технологии с применением цеолита, обогащенного аминокислотами в дозе 250 кг/га, демонстрируют наибольшую энергетическую эффективность при выращивании озимой пшеницы как на естественных, так и на минеральных почвах (коэффициенты биоэнергетической эффективности – 3,03 и 3,07 соответственно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение цеолита и экспериментальных удобрений на его основе в системе удобрения озимой пшеницы способствовало улучшению структурного состояния и разуплотнению пахотного слоя чернозема типичного (0-30 см): содержание агрономически ценных агрегатов увеличивалось от 59,8 % до 69,5 % на естественном фоне и от 62,4 % до 70,8 % на фоне минеральных удобрений. Плотность пахотного слоя почвы составила от 1,17 до 1,06 г/см³ в зависимости от дозы цеолитсодержащих удобрений.

2. Внесение удобрений на основе цеолита обогащением его карбамидом и аминокислотами сопровождалось увеличением запасов продуктивной влаги. В начале возобновления вегетации озимой пшеницы запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы (0-30 см) составляли в зависимости от дозы цеолита и удобрений на его основе 49-53 мм, превышая контроль на 3-7 мм, а в метровом слое почвы на 1-4 мм. Экспериментальные удобрения способствовали более рациональному расходованию влаги на формирование урожая культуры.

3. Внесение в почву цеолита и удобрений на его основе сопровождалось увеличением активности почвенных микроорганизмов. Наиболее высокую активность микроорганизмов наблюдали на вариантах с внесением цеолита, обогащенного аминокислотами, и на аналогичных вариантах на фоне минеральных удобрений, где превышение показателей составило 8-12 % и 12-13 % соответственно.

4. Цеолитсодержащие удобрения, внесенные в почву как отдельно, так и на минеральном фоне способствовали увеличению содержания в ней доступных форм основных элементов минерального питания. В среднем за 3 года в пахотном слое (0-30 см) под посевами озимой пшеницы повышение составило: азота на 1,9-6,8 мг/кг, фосфора на 2-39 мг/кг, калия на 6-35 мг/кг почвы.

5. Использование цеолита и цеолита, обогащенного карбамидом и аминокислотами, в системе удобрения озимой пшеницы обеспечило повышение урожайности зерна экспериментальной культуры на 0,22 до 0,88 т/га на естественном фоне и на 0,16-0,95 т/га на минеральном. Наибольшие прибавки урожайности зерна по отношению к фонам отмечали на вариантах с применением цеолита в дозе 500 кг/га как в чистом виде (0,88 т/га), так обогащенного аминокислотами (0,95 т/га).

6. При использовании цеолита и удобрений на его основе в технологии возделывания озимой пшеницы происходило улучшение показателей качества зерна и составило: содержание белка 12,3 %, клейковины 23,9 % на естественном фоне и 12,1 % и 24,2 % соответственно на минеральном фоне на варианте с применением цеолита, обогащенного аминокислотами (250 кг/га).

7. Применение цеолита в качестве удобрения является экологически безопасным приемом, способствующим снижению поступления тяжелых металлов в основную продукцию: меди на 11-16 %, цинка – на 6-25 %, никеля на 11-36 %, свинца – на 27-65 % и на 27-50 % кадмия в зависимости от дозы и обогащения аминокислотами и карбамидом. На фоне минеральных удобрений наблюдали такую же закономерность, но в меньшей степени.

8. Внесение в почву цеолита, а также цеолита, обогащенного карбамидом и аминокислотами, способствовало увеличению интенсивности баланса по азоту до 41 % и 62 % на естественном и минеральном фонах соответственно. Интенсивность баланса по фосфору составила 19-34 % на естественном фоне и 103-121 % на минеральном. Интенсивность баланса по калию наиболее высокая и составила 261 % на минеральном и 113 % на естественном фонах.

9. Экономически эффективно использование цеолита при обогащении его аминокислотами. Наиболее высокий уровень рентабельности производства зерна озимой пшеницы в 46 % и 48 % обеспечило использование цеолита, обогащенного аминокислотами, в дозе 250 кг/га на

естественном и минеральном фонах. Условный чистый доход на варианте без применения удобрений составлял 13496 руб./га. При внесении цеолита, обогащенного аминокислотами и карбамидом, он возрастал до 14749-17347 руб. в зависимости от дозы внесения. Максимальный доход с одного гектара как на естественном, так и минеральном фонах обеспечивает система удобрения с применением цеолита, обогащенного аминокислотами в дозе 250 кг/га и составил 17347,0 и 21533,5 руб.

10. Наиболее энергетически эффективными являлись технологии с применением цеолита, обогащенного аминокислотами, в дозе 250 кг/га как на естественном фоне, так и на фоне минеральных удобрений (коэффициенты биоэнергетической эффективности – 3,03 и 3,07 соответственно).

ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВУ

При возделывании озимой пшеницы на черноземе типичном в условиях лесостепи Среднего Поволжья с целью оптимизации системы удобрения и повышения урожайности и качества зерна сельскохозяйственным товаропроизводителям рекомендуем использовать цеолит, обогащенный аминокислотами, в дозе 250 кг/га.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

В дальнейшем актуально изучение эффективности действия и последствия цеолита и экспериментальных удобрений на его основе на фундаментальные свойства почвы, влияния их на урожайность зерновых культур в севообороте. Исследование данных аспектов целесообразно проводить не только в условиях лесостепной, но лесной и степной зонах Поволжья.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамов, Н.В. Оптимизация структуры посевных площадей на биоэнергетической основе / Н.В. Абрамов, Г.П. Селюкова. – Екатеринбург: УрГСХА, 2001. – 143 с.
2. Азаров, В. Б. Баланс элементов питания в почве в зависимости от технологии возделывания сельскохозяйственных культур в ЦЧЗ / В. Б. Азаров // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 77. – С. 760-769.
3. Айлер, Р. Химия кремнезема. – М.: Мир, 1982. – В 2-х ч. – Ч. 1, Ч. 2. – 1128 с.
4. Аканова, Н.И. Значение химической мелиорации в земледелии и потери кальция и магния из почвы / Н.И. Аканова, И.А. Шильников, С.Ю. Ефремова, М.С. Аваков // Проблемы агрохимии и экологии. – 2017. – № 1. – С. 28-35.
5. Акимова, С.В. Влияние биологически активных веществ кремнийорганической природы на укореняемость и дальнейшее развитие одревесневших и зеленых черенков винограда межвидового происхождения / С.В. Акимова, А.К. Раджабов, 402 Д.А. Бухтин, М.С. Трофимова // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 4. – С. 36-48.
6. Алисов, Б.П. Климат СССР: учебное пособие для вузов / Б.П. Алисов. – Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1956. – 127 с.
7. Аммосова, Я.М. Кремнезем в системе почва – растение / Я.М. Аммосова, П.Н. Балабко, В.В. Матыченков, Н.А. Аветян // Агрохимия. – 1990. – № 10. – С. 103-108.
8. Андроникашвили Т.Г. Применение цеолитсодержащих горных пород в растениеводстве / Т.Г. Андроникашвили, Т.Ф. Урушадзе // Агрохимия. – 2008. – № 12. – С. 63-79.
9. Асланов, Г. А. Эффективность совместного применения цеолита с удобрениями под озимую пшеницу в Гянджа-Казахской зоне Азербайджана /

Г. А. Асланов // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2016. – № 3(31). – С. 8-11.

10. Арефьев, А.Н. Влияние природных цеолитов и удобрений на агрохимические свойства чернозема выщелоченного / А.Н. Арефьев, Е.Е. Кузина, Е.Н. Кузин // Нива Поволжья. – 2015. – № 3(36). – С. 18-26.

11. Арефьев, А.Н. Влияние природных цеолитов на водоудерживающую способность и режим влажности чернозема выщелоченного / А.Н. Арефьев, Е.Е. Кузина, Е.Н. Кузин // Нива Поволжья. – 2016. – № 1(38). – С. 2-9.

12. Арефьев, А.Н. Изменение плодородия чернозема выщелоченного и урожайности сельскохозяйственных культур под влиянием природных цеолитов и удобрений / Арефьев А.Н., Кузин Е.Н., Ефремова Е.Н., Калмыкова Е.В. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2015. – № 2 (38). – С. 80-84.

13. Арефьев, А.Н. Изменение урожайности культур звена зернопаропропашного севооборота и качества растениеводческой продукции под влиянием осадков сточных вод и цеолита / А.Н. Арефьев, Е.Н. Кузин // Нива Поволжья. – 2018. – № 3(48). – С. 9-15.

14. Аристовская, Т.В. Микробиология процессов почвообразования / Т.В. Аристовская. – Л.: Наука, 1980. – 187 с.

15. Аристовская, Т.В. Микроорганизмы как индикаторы процессов аккумуляции железа, алюминия и марганца в почвах / Т.В. Аристовская, Л.В. Зыкина // Почвоведение. – 1979. – № 1. – С. 88-96.

16. Аскинази, Д.Л. Пути повышения на красноземе доступности растениям P_2O_5 / Д.Л. Аскинази, Н.М. Санникова // Новое в удобрении. М.: Сельхозгиз, 1937. С. 88-103.

17. Атлас почв Российской Федерации. Режим доступа: <https://soil-db.ru/soilatlas/razdel-8-ispolzovanie-zemelnyh-resursov-i-pochv/8-2-regiony-rossiyskoi-federacii/ulyanovskaya-oblast>

18. Базаров, Е.И. Эффективность использования совокупной энергии в сельском хозяйстве / Е.И. Базаров // Экономика сельского хозяйства. – 1983. – №12. – С. 32-37.
19. Базаров, Е.И. Методика биоэнергетической оценки технологий производства продукции растениеводства / Е.И. Базаров, Е.В. Глинка. – Москва, 1983. – 31 с.
20. Базилевич, Н.И. Географические закономерности структуры и функционирования экосистем / Н.И. Базилевич, О.С. Гребенщиков, А.А. Тишков. – М.: Наука, 1986. – 298 с.
21. Башмаков, Д.И. Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределение тяжелых металлов у высших растений / Д.И. Башмаков, А.С. Лукаткин. – Саранск: Изд-во Мордовского университета, 2009. – 236 с.
22. Безручко, Е.В. Кремний – недооцененный элемент питания растений / Е.В. Безручко // Земледелие. – 2020. № 4. – С. 40-46.
23. Безуглова, О.С. Биогеохимия / О.С. Безуглова, Д.С. Орлов. – Ростов н/Д: «Феникс», 2000. – 320 с.
24. Бекузарова, С.А. Цеолитсодержащие удобрения на склоновых землях / С.А. Бекузарова, М.А. Бзиков, В.И. Гасиев // Вестник РАСХН. – 2003. – №1. – С. 62-63.
25. Белоус, Н.М. Влияние различных систем удобрения на накопление тяжелых металлов в сельскохозяйственной продукции / Н.М. Белоус, В.Ф. Шаповалов, Ф.В. Моисеенко, М.Г. Драганская // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – Брянск. – 2006. – С. 22-29.
26. Белоусов, В.С. Пролонгирующее влияние цеолитсодержащих пород Краснодарского края на азотные удобрения / В.С. Белоусов, В.В. Тараненко, Л.В. Дядюченко // Агрехимия. – 2019. – № 2. – С. 37-42.
27. Биккинина, Л.М.-Х. Перспективы использования цеолита в растениеводстве / Л.М.-Х. Биккинина, И.А. Яппаров, Р.Р. Ильясов, М.М. Газизов, И.М. Суханова, Н.Л. Шаронова // Эффективное

растениеводство. – 2019. – №2. – С. 58-59.

28. Битюцкий, Н.П. Влияние кремния на проявление хлороза растений в условиях дефицита железа и марганца / Н.П. Битюцкий, К.П. Якконен, М.М. Злотина // *Агрохимия*. – 2010. – №2. – С. 45-51.

29. Бочарникова, Е.А. Влияние бурого угля, монокремниевой кислоты и кремнийорганического мелиоранта на их основе на поглощение кадмия и ячменя и горохом / Е.А. Бочарникова // *Агрохимия*. – 2016. – № 5. – 41-46.

30. Будилова, Е.В. О целлюлозолитической активности *Bacillus Mucilaginosus* / Е.В. Будилова, Н.А. Родионова, Л.И. Мартинович, А.М. Безбородов, Г.Г. Няникова, Н.Г. Домонон // *Микробиология*. – 1987. – Т. 56. – Вып. 5. – С. 778-782.

31. Бузетти, К.Д., Иванов М.В. Воздействие минеральных и органических удобрений на экосистему, качество сельскохозяйственной продукции и здоровье человека / К.Д. Бузетти, М.В. Иванов // *Аграрная наука*. – 2020. – № 338 (5). – С. 80-84.

32. Буров, А.В. Цеолитсодержащая порода Татарстана и ее применение. Казань: ФЭН, 2000. – 176 с.

33. Буров, А.И. «Живой» камень Татарстана / А.И. Буров // *Научно-технический журнал «Георесурсы»*. – 2013. – № 3(53). – С. 5-7.

34. Вадюнина, А.Ф. Методы исследования физических свойств почв / А.Ф. Вадюнина, З.А. Корчагина // Москва. Агропромиздат, 1986. – 416 с.

35. Вернадский, В.И. Биосфера (Избранные труды по биогеохимии) / В.И. Вернадский – М.: Мысль. – 1967. – 374 с.

36. Виноградов, Е.Я. Биологические свойства и систематическое положение *Bacillus Mucilaginosus*: дисс. ...канд. биол. наук: 03.00.07 / Виноградов Евгений Яковлевич. – Москва, 1973. – 272 с.

37. Власенко, Н.Г. Интенсивность разложения целлюлозы под влиянием технологии возделывания и предшественника / Н.Г. Власенко, О.И. Теплякова, Н.А. Коротких // *Плодородие*. – 2015. – №4. – С. 35-38.

38. Водяницкий, Ю.Н. Дефицит кремния в некоторых почвах и пути его устранения / Ю.Н. Водяницкий // Агрохимия. – 1984. – № 8. – С. 127-132.
39. Володин, В.М. Методика определения и оценки энергопотенциала органического вещества почвы в агроландшафтах: методические рекомендации / В.М. Володин, Н.П. Масютенко, В.В. Шеховцова, С.Я. Гатинова, А.И. Шеховцов. – Курск: Юмэкс, 2000. – 29 с.
40. Воронков, М.Г. Кремний и жизнь / М.Г. Воронков, Г.И. Зелчан, А.Ю. Лукевиц. – Рига: Зинатне, 1978. – 578 с.
41. Высоцкий, Г.Н. Избранные труды. М.: Сельхозгиз, – 1960. – 435 с.
42. Гельцер, Ю.Г. Показатели биологической активности в почвенных исследованиях / Ю.Г. Гельцер // Почвоведение. – 1990. – № 9. – С. 47-59.
43. Годунов, И.Б. Роль удобрений в условиях неустойчивого и недостаточного увлажнения юго-востока ЦЧП / И.Б. Годунов // Агротехнические основы улучшения использования черноземов. – Каменная Степь, 1980. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 52-59.
44. Голомолзин, Р.С. Биоэнергетическая эффективность севооборотов в условиях лесостепи Поволжья / Р.С. Голомолзин // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2011. – № 2. – С. 31–34.
45. Гольева, А.А. Фитолиты и их информационная роль в изучении природных и археологических объектов / А.А. Гольева. – М.: Сыктывкар; Элиста, 2001. – 120 с.
46. Гришин, Г.Е. Изменение урожая и качества продукции под влиянием цеолита и удобрений / Г.Е. Гришин, Е.Е. Кузина, Л.А. Кузина // Нива Поволжье. – 2009. – № 2. – С. 7-12.
47. Дистанов, У.Г. Природные сорбенты и охрана окружающей среды / У.Г. Дистанов, Т.П. Конюхова // Химия в с.-х., 1990. – № 9. – С. 35-39.
48. Добровольская, Т.Г. Оценка бактериального разнообразия почв: Эволюция подходов и методов / Т.Г. Добровольская // Почвоведение. – 2009. – №10. – С. 1222-1232.

49. Добровольский, В.В. Основы биогеохимии / В.В. Добровольский. – Москва: Высшая школа, 1998. – 413 с.
50. Долгополова, Н.В. Об агрофизических свойствах почвенного слоя / Н.В. Долгополова, Е.В. Малышева, А.В. Нагорных // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – №7. – С. 18-25.
51. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований: учебник / Б.А. Доспехов. – М.: ИД Альянс, 2011. – 352 с.
52. Дудкина, Т. А. Влияние различных севооборотов, доз минеральных удобрений и погодных условий на урожай и качество зерна озимой пшеницы в Центральном Черноземье / Т.А. Дудкина // Таврический вестник аграрной науки. – 2022. – № 1(29). – С. 3-40.
53. Ермолаев, С.А. Эффективность применения силикатных форм химических мелиорантов / С.А. Ермолаев, И.А. Шильников, Н.И. Аканова // Плодородие. – 2004. – № 2. – С. 13-16.
54. Ефремова, Т.Т. Стадии роста и развития пшеницы и их значение в формировании элементов продуктивности / Т.Т. Ефремова, Е.В. Чуманова // Письма в Вавилонский журнал генетики и селекции. – 2023. – №9(2). – С.54-80.
55. Завалин, А.А. Азот в агросистеме на черноземных почвах / А.А. Завалин, О.А. Соколов, Н.Я. Шмырева. – М.: РАН, 2018. – 180 с.
56. Завалин, А.А. Азот и качество зерна пшеницы / А.А. Завалин, О.А. Соколов // Плодородие. – №3. – 2018. – С. 14-17.
57. Замятин, С. А. Баланс калия в почве в полевых севооборотах / С.А. Замятин, В. М. Изместьев // Владимирский земледелец. – 2013. – № 3(65). – С. 17-18.
58. Иванов, П.В. Экономико-математическое моделирование в сельском хозяйстве / П.В. Иванов, И.В., Ткаченко. Ростов н/Д: Феникс 2013. – 254 с.
59. Исламгулова, Г.Е. Влияние природных цеолитов на плодородие

почв и продуктивность сельскохозяйственных культур / Г.Е. Исламгулова и др. // Аграрная наука. – 2008. – № 7. – С. 21-23.

60. Капранов, В.Н. Использование природных агрохимических средств в качестве источников минерального питания полевых культур: автореф. дисс.докт. с.-х. наук: 06.01.04 / Капранов Владимир Николаевич. – Москва, 2009. – 43 с.

61. Карпухин, М.Ю. Энергетическая эффективность приемов предпосадочной обработки почвы под поукосный картофель на Среднем Урале / М.Ю. Карпухин // Аграрный вестник Урала. – 2011. – № 1. – С. 56–59.

62. Кафтан, Ю. В. Агрофизические свойства почвы и урожайность сельскохозяйственных культур в севооборотах / Ю.В. Кафтан, Н.А. Зенкова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 3(77). – С. 27-30.

63. Качинский, Н.А. Почва, ее свойства и жизнь / Н.А. Качинский. Издательство Академии наук, Москва. – 1956. – 215 с.

64. Коваль, Т. А. Учение П. А. Костычева о борьбе с засухой / Т.А. Коваль // Агробиология. – 1949. – № 4. – С. 46–61.

65. Козлов, А.В. Влияние высококремнистых пород на структуру, численность и ферментативную активность целлюлозосапротрофного микробного пула дерново–подзолистой почвы в условиях выращивания озимой пшеницы и картофеля / А.В. Козлов, А.Х. Куликова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 1 (33). – С. 56-65.

66. Козлов, А.В. Подвижность силикатов, показатели плодородия дерново-подзолистой почвы, биоаккумуляция кремния и продуктивность сельскохозяйственных культур под действием цеолита / А.В. Козлов, А.Х. Куликова, И.П. Уромова // Сельскохозяйственная биология. – 2021. – Т. 56. – №. 1. – С. 183-198.

67. Козлов, А.В. Роль и значение кремния и кремнийсодержащих веществ в агроэкосистемах / А.В. Козлов, А.Х. Куликова, Е.А. Яшин //

Вестник Мининского университета. – 2015. – № 4. – С.13-17.

68. Козлов, А.В. Соединения кремния и их химическая трансформация в дерново-подзолистых почвах Нижегородской области / А. В. Козлов, А. Х. Куликова. – Москва: Плодородие, 2022. – 266 с.

69. Копосов, И.П. Агрочувственные районы Ульяновской области. / И.П. Копосов. – Ульяновск, 1948. – 96 с.

70. Коринец, В.В. Энергетическая оценка севооборотов / В.В. Коринец // Земледелие. – 1990. – № 4. – С. 58–60.

71. Крупеников, И.А. История почвоведения / И.А. Крупеников. М.: Наука, – 1971. – 329 с.

72. Кузина, Е.Е. Использование мелиоративных норм осадков городских сточных вод и цеолита на малогумусных почвах лесостепного Поволжья / Е. Е. Кузина, А. Н. Арефьев, Е. Н. Кузин. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – 238 с.

73. Куликова, А.Х. Кремнистые породы в системе удобрения озимой пшеницы / А.Х. Куликова Е.А. Яшин, Е.С. Волкова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. –2020. –№3 (51). – С. 53-59.

74. Куликова, А.Х. Агроэкологическая оценка физических и биологических свойств почв Среднего Поволжья / А.Х. Куликова, Н.Г. Захаров, А.В. Карпов [и др.]. – Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2017. – 244 с.

75. Куликова, А.Х. Влияние кремнийсодержащих материалов на свойства почвы, состояние посевов и урожайность зерновых культур в условиях Среднего Поволжья / А.Х. Куликова, А.В. Козлов, В.С. Смывалов // Агрохимия. – 2019. – № 4. – С. 60–69.

76. Куликова, А.Х. Влияние систем удобрения на плодородие чернозема типичного и урожайность озимой пшеницы / А. Х. Куликова, Е. С. Волкова, Е. А. Яшин, Е. А. Черкасов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 4(60). – С. 32-37.

77. Куликова, А.Х. Воспроизводство биогенных ресурсов в агроэкосистемах и регулирование плодородия чернозема лесостепи Поволжья / А.Х. Куликова // Диссертация доктора с.-х. наук, 1997. – 362 с.

78. Куликова, А.Х. Кремний и высококремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур / А.Х. Куликова // Ульяновск, 2013. – 176 с.

79. Куликова, А.Х. Кремнистые породы в системе удобрения озимой пшеницы / А.Х. Куликова, Е.А. Яшин, Е.С. Волкова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – №3 (51). – С. 53-59.

80. Куликова, А.Х. Кремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур / А.Х. Куликова, А.В. Карпов, Е.А. Яшин. Ульяновск: Ульяновский ГАУ, 2020. – 176 с.

81. Курбаков, Д.Н. Накопление тяжелых металлов в урожае зерновых культур при длительном применении минеральных удобрений / Д.Н. Курбаков, В.К. Кузнецов., М.С. Хлопук, Е.В. Сидорова // Агрехимия. – 2022. – № 3. – С. 74–80.

82. Либих, Ю. Химия в приложении к земледелию / Ю. Либих. Спб., 1864. – 324 с.

83. Литкевич, С.В. Влияние кремнекислоты на развитие растений / С.В. Литкевич // По вопросам фосфатных и калийных удобрений и известкования. Л., 1936. – С. 29-53.

84. Лобода, Б.П. Диатомиты и трепелы как почвоулучшители и источники биогенных элементов / Б.П. Лобода, Н.Н. Яковлева // Плодородие. – 2003. – №5. – С. 11–14.

85. Лобода, Б.П. Орловский цеолит – перспективный компонент тепличных субстратов для малообъемного выращивания огурца / Б.П. Лобода, В.М. Ходырев, И.А. Гористова // Гавриш. – 2002. – №2. – С. 12–13.

86. Лобода, Б.П. Применение цеолитсодержащего минерального сырья в растениеводстве / Б.П. Лобода // Агрехимия. – 2000. – № 6. – С. 78–91.

87. Лобода, Б.П. Применение цеолитсодержащего минерального сырья в растениеводстве / Б.П. Лобода // *Агрохимия*. – 2000. – № 6. – С. 78-91.
88. Лобода, Б.П. Цеолит–кремнийсодержащие трепела – улучшающий компонент тепличных субстратов / Б.П. Лобода, В.М. Ходырев // *Гавриш*, 2006. №3. – С. 22–23.
89. Лукин, С. В. Агроэкологическое состояние почв Центрально-Черноземного района / С. В. Лукин. – Белгород: Общество с ограниченной ответственностью "КОНСТАНТА", 2023. – 372 с.
90. Макеева, Т.Ф. Роль Сосковского цеолита в повышении агроэкологической эффективности органических и минеральных удобрений на серых лесных почвах Орловской области / Т.Ф. Макеев, М.В. Гудилина // *Вестник ОрелГАУ*. – 2008. – № 4. – С. 36-39.
91. Мамиев, Д. М. Агрофизические свойства почвы в зависимости от культур травопольного севооборота / Д. М. Мамиев // *Аграрная наука*. – 2023. – № 10. – С. 84-87.
92. Матыченков, В.В. Использование некоторых отходов металлургической промышленности для улучшения фосфорного питания и повышения засухоустойчивости растений / В.В. Матыченков, Е.А. Бочарникова // *Агрохимия*. – 2003. – №5. – С. 50–56.
93. Матыченков, И.В. Взаимное влияние кремниевых, фосфорных и азотных удобрений в системе почва – растение / Диссертация на соискание уч. степени канд. биол. наук. М., 2014. 136 с.
94. Матыченков, И.В. Подвижные кремниевые соединения в системе почва-растение и методы их определения / И.В. Матыченков, Д.М. Хомяков, Е.П. Пахненко, Е.А. Бочарникова, В.В. Матыченков // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. – 2016. – № 3. – С. 37-46.
95. Матыченков, В.В. Влияние кремниевых удобрений на растение и почву / В.В. Матыченков, Е.А. Бочарникова, Е.Н. Аммосова // *Агрохимия*. –

2002. – № 9. – С. 86-93.

96. Матыченков, В.В. Градация почв по дефициту доступного растениям кремния / В.В. Матыченков // *Агрохимия*, 2007. №7. С. 20-27.

97. Матыченков, В.В. Перспективы использования кремниевых препаратов в сельском хозяйстве (обзор научной литературы) / В.В. Матыченков, Е.А. Бочарникова, Г.В. Пироговская, И.Е. Ермолович // *Почвоведение и агрохимия*. – 2022. – № 1 (68). – С. 219-234.

98. Матыченков, В.В. Роль подвижных соединений кремния в растениях и системе почва–растение: дисс. ...докт. биол. Наук: 03.00.12, 03.00.27. Пущино, 2008. 313 с.

99. Матыченков, В.В. Роль подвижных соединений кремния в растениях и системе почва-растение / В.В. Матыченков // Автореф. дисс. доктора биологических наук. Пущино, 2008. – 34 с.

100. Матыченков, И.В. Подвижные кремниевые соединения в системе почва-растение и методы их определения / И.В. Матыченков, Е.П. Пахненко, Е.А. Бочарникова, В.В. Матыченков // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. – 2016. – № 3. – С. 37-46.

101. Медведева, Ю.Д. Кремнийбиоорганические соединения и области их применения / Ю.Д. Медведева, В.О. Медведев // *Совр. научн. исследования и разработки*. – 2017. – №7 (51). – С. 233–238.

102. Милановский, Е.В. Очерк геологии Среднего и Нижнего Поволжья / Е.В. Милановский. – М – Л., Гостоптехиздат, 1940. – 634 с.

103. Минаков, И.А. Экономика сельского хозяйства. - 3-е изд., перераб. и доп. / И.А. Минаков. М: Инфра-м, 2014. – 352 с.

104. Мустафаев, Ю.Х. Эффективность минеральных удобрений на фоне цеолита под озимым ячменем на эродированных горных серо-коричневых почвах юго-восточного склона Большого Кавказа: автореферат дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук: 06.01.04 / АН АзССР. Ин-т почвоведения и агрохимии. - Баку, 1990. - 20 с.

105. Немцев, С.Н. Агрофизические свойства почв агроландшафтов в южной зоне Ульяновской области / С.Н. Немцев, А.В. Карпов, Г.В. Сайдяшева // Вестник УГСХА. 2015. – № 2. – С. 18-24.

106. Немцев, С.Н. Тенденции изменений климата и их влияние на продуктивность зерновых культур в Ульяновской области / С.Н. Немцев, Р.Б. Шарипова // Земледелие. – 2012. – № 1. – С. 3-5.

107. Никитин, С. Н. Баланс основных элементов питания при применении минеральных и модифицированных удобрений при возделывании овса в среднем Поволжье / С. Н. Никитин, Г. В. Сайдяшева, С. А. Захаров // Экология, ресурсосбережение и адаптивная селекция : Сборник докладов 3-й Всероссийской научно-практической интернет-конференции молодых ученых и специалистов с международным участием, Саратов, 20–22 марта 2019 года. – Саратов: Издательство «Научная книга», 2019. – С. 178-181.

108. Обущенко, С. В. Пути сохранения и воспроизводство плодородия почв Самарской области / С.В. Обущенко, С.Н. Шевченко. – Самара: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, 2020. – 220 с.

109. Оленин, О.А. Элементы органической технологии возделывания ярового ячменя в лесостепи Среднего Поволжья / О.А. Оленин, С.Н. Зудилин // Аграрный вестник Урала. – 2022. – № 3(218). – С. 13-23.

110. Основания земледельческой химии, изложенные сиром Гумфри Дэви. – СПб, 1832. – 48 с.

111. Павлов, А.Н. Повышение содержания белка в зерне / А.Н. Павлов – М.: Наука, 1984. –120 с.

112. Переведенцев, Ю.П. Климатические условия и ресурсы Ульяновской области / Ю.П. Переведенцев, Б.Г. Шерстюков, Р.Х. Салахова, Ю.П. Переведенцев, Б.Г. Шерстюков, Р.Х. Салахова. – Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 2008. – 208 с.

113. Перцовская, А.Ф. Влияние тяжелых металлов на биосистемы почвы в зависимости от ее Ph / А.Ф. Перцовская, Е.Л. Паникова, Н.Л. Великанов // Гигиена и санитария. – 1987. – С. 15-16.

114. Полевщиков, С.И. Биоэнергетическая эффективность возделывания сахарной свеклы / С.И. Полевщиков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т. 11. – № 2. – С. 495-498.

115. Постников, П.А. Изменение погодных условий на Среднем Урале и их воздействие на урожайность яровой пшеницы / П.А. Постников, В.В. Попова, П.Ю. Овчинников, Е.Л. Тиханская // Достижения науки и техники АПК. – 2023. – Т. 37, № 3. – С. 4-9.

116. Природные цеолиты России: Геология, Геохимия, физико-химические свойства и применение в промышленности и охране окружающей среды. Т.1: Тез. Респуб. совещания «Природные цеолиты России», 25-27 ноября 1991 г., Новосибирск РАН, Сиб. отделение, Объед. ин-т геологии, геофизики и минералогии. Науч. ред. И.А.Белицкий, Б.А.Фурсенко. - Новосибирск, 1992. - 171 с.

117. Прокошев, В.В. Калий и калийные удобрения / В.В. Прокошев, И.П. Дерюгин М.: Ледум, 2000. – 185 с.

118. Прянишников, Д.Н. Азот в жизни растений и земледелии СССР. - М.: Изд-во АН СССР, 1945. - 200 с.

119. Роде, А.А. Водный режим почв и его регулирование / А.А. Роде. Издательство Академии наук СССР, Москва. – 1963. – 119 с.

120. Рудмин, М.А. Монтмориллонит как перспективный композитный минерал для создания современных удобрений пролонгированного действия / М.А. Рудмин, И.В. Рева, Т.Ю. Якич, Б.Р. Соктоев, А.С. Буяков, Р.Б. Табакаев, К.Ибраева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 14–22.

121. Рыкова, И.Н. Оценка себестоимости и рентабельности производства пшеницы в Российской Федерации / И.Н. Рыкова, А.А. Юрьева, В.А. Морина // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 8 (135). – С. 87-103.

122. Салтыкова, О. Л. Возделывание озимой пшеницы для получения зерна высокой белковости в условиях Среднего Поволжья / О. Л. Салтыкова, С. Н. Зудилин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 1. – С. 3-9.

123. Самсонова, Н.Е. Кремний в растительных и животных организмах / Н.Е. Самсонова // Агрехимия. – 2019. – №1. – С. 86-96.

124. Сафронов, Г.В. Эффективность цеолитов в народном хозяйстве и прикладные проблемы внедрения / Г.В. Сафронов // Применение природных цеолитов в народном хозяйстве: Докл. Респ. Конф. М., 1989. С. 3-9.

125. Середина, В.П. Агрэкологические аспекты использования цеолитов как почвоулучшителей сорбционного типа и источника калия для растений / В.П. Середина // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 3. – С. 56-60.

126. Справочник агрохимика / М.Ю. Гилязов, А.А. Лукманов, А.В. Ивойлов. Казань: Логос-Пресс, 2024. – 372 с.

127. Станков, Н.З. Корневая система растений / Н.З. Станков // М.: Колос, 1964. – С. 217.

128. Суюндукова, М.Б. Природные цеолиты как элемент экологизации земледелия башкирского Зауралья / М.Б. Суюндукова, Я.Т. Суюндуков, Х.М. Сафин [и др.] // Достижения науки и техники АПК. – 2018. – Т. 32, № 4. – С. 25-30.

129. Суюндуков, Я.Т. Использование природных цеолитов Зауралья Башкортостана для повышения плодородия почв и урожайности сельскохозяйственных культур (рекомендации производству) / Я.Т. Суюндуков, Х.М. Сафин, М.Б. Суюндукова, Р.Ф. Хасанова– Сибай, СИЦ – филиал ГУП РБ Издательский дом «Республика Башкортостан», 2017. - 40 с.

130. Сычев, В. Г. Калийный режим суглинистых дерново-подзолистых почв / В. Г. Сычев, Л. В. Никитина // Таврический вестник аграрной науки. – 2021. – № 2(26). – С. 233-243.

131. Титова, В.И. Сравнительное изучение влияния цеолита и минеральных удобрений на продуктивность зерновых культур и агрохимическую характеристику светло-серой лесной легкосуглинистой почвы / В.И. Титова, Н.В. Забегалов // Почвоведение и агрохимия, 2014. – № 1(52). – С. 190-197.

132. Цхакая, Н.Л., Квашам Н.Ф. Японский опыт по использованию природных цеолитов. Тбилиси, 1985. – С. 25-30.

133. Чевердин, Ю. И. Изменение влагообеспеченности чернозёмных почв под различными компонентами агроландшафта / Ю. И. Чевердин, В. А. Беспалов, Т. В. Титова // Орошаемое земледелие. – 2023. – № 2(41). – С. 12-18.

134. Чекаев, Н.П. Изменение агрофизических свойств чернозема выщелоченного в зависимости от применения местных кремнийсодержащих пород и удобрений / Н.П. Чекаев, А.Е. Рябов, Т.А. Власова, Ю.В. Корягин // Нива Поволжья. – 2019. – № 4 (53). – С. 93-101.

135. Чекмарев, П. А. Фосфатный режим черноземов / П.А. Чекмарев, С.В. Лукин, Н.П. Юмашев // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2010. – № 6. – С. 28-30.

136. Шарипова, Р. Б. Климатические условия Ульяновской области и их изменение/ Р.Б. Шарипова // Трешниковские чтения – 2021. Современная географическая картина мира и технологии географического образования: Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвящённой памяти знаменитого российского океанолога, исследователя Арктики и Антарктики, академика Алексея Фёдоровича Трешникова и 175-летию Русского географического общества. УлГПУ Ульяновск: Ульяновский государственный педагогический университет имени И.Н. Ульянова, 2021. – С. 239-241.

137. Шарипова, Р.Б. Агроклиматическая оценка атмосферных засух и урожайности на территории ГНУ Ульяновский НИИСХ / Р.Б. Шарипова, А.Г. Галиакберов, С.Н. Никитин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 3(15). – С. 35-39.

138. Шафран, Н.А. Динамика содержания подвижного фосфора в почвах нечерноземной зоны и его регулирование / С. А. Шафран, Н. А. Кирпичников, А. А. Ермаков, А. И. Семенова // Агрохимия. – 2021. – № 5. – С. 14-20.

139. Шеуджен, А.Х. Агрохимические основы применения удобрений / А.Х. Шеуджен, Т.И. Бондарева, С.В. Кизинюк. Майкоп. Полиграф-Юг, 2013. – 572 с.

140. Ягодин, Б.А. Агрохимия / Б.А. Ягодин, Ю.П. Жуков, В.И. Кобзаренко. – Лань, – 2023. – 584 с.

141. Якименко, В. Н. Баланс калия, урожайность культур и калийное состояние почвы в длительном полевом опыте в лесостепи Западной Сибири / В. Н. Якименко // Агрохимия. – 2019. – № 10. – С. 16-24.

142. Яшин, Е.А. Системы удобрения озимой пшеницы в Среднем Поволжье (органическая, органоминеральная и минеральная) / Е.А. Яшин, А.Х. Куликова, А.Е. Яшин. Ульяновск: УлГАУ, 2021. – 196 с.

143. Artyszak, A. Effect of Silicon Fertilization on Crop Yield Quantity and Quality-A Literature Review in Europe / A. Artyszak // Plant. – 2018. – 7(3):54.

144. Belanger, R.R. The role silicon in plant–pathogen interaction: toward universal model / R.R. Belanger // III Silicon in Agriculture Conference. Umlandia: Universodate Federal de Uberlandia, 2005. P. 34–40.

145. Bhat, J.A. Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants / J.A. Bhat // Plants. – 2019. – Vol. 8. – №3. – P. 71.

146. Cataldo, E. Application of Zeolites in Agriculture and Other Potential / E. Cataldo, L. Salvi, F. Paoli // Agronomy. – 2021. – №11. – P. 1547.

147. Cornelis, J. T. Tracing the origin of dissolved silicon transferred from various soil-plant systems towards rivers: a review / J.T. Cornelis, B. Delvaux,

R.B. Georg, Y. Lucas, J. Ranger, S. Opfergelt // *Biogeosciences*. 2011. V. 8(1). P. 89-112.

148. Datnoff, E.L. Why is silicon still not used routinely for managing plant health and enhancing plant growth under greenhouse and field conditions? / E.L. Datnoff, S.B. Tubona // *Inter. Conf. Silicon Agricult. Proced. Abstracts. India, 2017.* – 150 p.

149. Einarsson, R. Crop production and nitrogen use in European cropland and grassland 1961-2019 / R. Einarsson, A. Sanz-Cobena, E. Aguilera, G. and et. All // *Scientific Data* 8(1), 2021. – 30 p.

150. Epstein, E. Silicon: its manifold roles in plants / E. Epstein // *Annals of Applied Biology.* – 2009. – V. 155. – P. 155–160.

151. Fontana, M. Effects of a Zeolite-based Foliar Biostimulant on Winter Wheat and Maize / Fontana M., Borgatti D., Elfouki S., Grosjean Y., Brancaloni L., Bragazza L. <https://www.agrarforschungschweiz.ch/en/2024/06/effects-of-a-zeolite-based-foliar-biostimulant-on-winter-wheat-and-maize/>

152. Greger, M. Plant uptake of silicon nanoparticles / M. Greger, T. Landberg, S. Nazaralian // *7th Int. Conf. Silicon Agricult. Proced. Abstracts.* – 2017. – 68 p.

153. Greger, M. Silicon Influences Soil Availability and Accumulation of Mineral Nutrients in Various Plant Species / M. Greger, T. Landberg, Vaculík M. // *Plants.* – 2018. – №7. – P. 41.

154. Hodson, M.J. Phylogenetic variation in the silicon (Si) composition of plants / M.J. Hodson, P.J. White, A. Mead, M.R. Broadley // *Annals of Botany.* – 2005. – V. 96. – P. 1021046.

155. International Zeolite Association (IZA) <https://www.iza-online.org/>

156. Jakkula, V. Zeolites: Potential soil amendments for improving nutrient and water use efficiency and agriculture productivity / V. S. Jakkula, S.P. Wani // *Sci Revs Chem Commun.* – 2018. – 8(1):119.

157. Karczewska, A. The soils polluted with heavy metals and arsenic in Lower Silesia-the need and methods of reclamation / A. Karczewska, C. Kabała // *Zesz. We Wrocławiu Rol.* – 2010. – № 96. – P. 59-79.

158. Kulikova, A.Kh. The yield formation of winter wheat under the influence of fertilization systems using two field experiments as an example / A.Kh. Kulikova, E.S. Volkova, E.A. Yashin [et al.] // II International Conference on Current Issues of Breeding, Technology and Processing of Agricultural Crops, and Environment (CIBTA-II-2023), Ufa, Russia, 03–05 июля 2023 года. Vol. 71. – Les Ulis Cedex A, France: EDP SCIENCES S A. – 2023. – P. 1053.

159. Leggo, P.J. The efficacy of the organo-zeolitic bio-fertilizer / P.J. Leggo // *Agrotechnology.* – 2015. – №4. – 1000130.

160. Liang, Yo. Silicon in Agriculture From Theory to Practice / Yo. Liang, M. Nikolic, R. Bélanger, H. Gong, A. Song // Chinese Academy of Agricultural Sciences Beijing. – China, 2015. – 250 p.

161. Malav, J.K. Effect of silicon on nitrogen use efficiency, yield and nitrogen and silicon contents in rice under loamy sand soil / J.K. Malav, V.P. Ramani, *Res J Chem // Environ.* – 2017. – V. 21. – № 4.

162. Mohamed, I. Microbial bioremediation as a tool for the removal of heavy metals / Mohamed I. Abo-Alkasem, Ne'mat H. Hassan & Mostafa Mostafa Abo Elsoud // *Bulletin of the National Research Centre* v47, Article number: 31 (2023)

163. Moharami, S. Phosphorus leaching from a sandy soil in the presence of modified and un—modified adsorbents / S. Moharami, M. Jalali // *Environ. Monit. Assess.* – 2014. – №.186. – P. 6565-6576.

164. Mondal, M. Zeolites Enhance Soil Health, Crop Productivity and Environmental Safety / Mondal M. Biswas B., Garai S. et al. // *Agronomy.* – 2021. – №11. – P. 448.

165. Mumpton F.A. La roca magica: Uses of natural zeolites in agriculture and industry / F.A. Mumpton // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* – 1999. – V. 96. – P. 3463-3470.

166. Norton, L.D. Mineralogy of high calcium/sulfur-containing coal combustion by-products and their effect on soil surface sealing / L.D. Norton // Agriculture Utilization of Urban and Industrial By-products: Proceed. Ohio, 7-12 Nov. 1993. ASA Special Publication № 58. –1995. – P.87-106.

167. Prasad, M.N.V. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants / M.N.V. Prasad // Environ. – 1995. – Exp. Bot. 35. – P. 525-540.

168. Ramesh, K. Zeolites and their potential uses in agriculture / K. Ramesh, D. Reddy // Agronomy. –2011. – V. 113. – P. 21-241.

169. Rivero, L. Rodríguez-Fuentes, G. Cuban experience with the use of natural zeolite substrates in soilless culture / L. Rivero, G. Rodríguez-Fuentes // Proc. Int. Congr. Soil. Cult. Wagening. Neth. – 1988. – 405-416.

170. Rothamsted Experimental Station Guide to the Classical Field Experiment. Nozfolk: Lawes Agricultural Trust, 1991. – 31 p.

171. Schaller, J. Silicon increases the phosphorus availability of Arctic soils / J. Schaller et al. // Scientific reports. – 2019. – V. 9. – № 1. – P. 1-11.

172. Susana, S. Researches Influence of Zeolite on Productivity Elements and Microbiological Activity on Spring Barley, Soybeans and Maize at Ardsturda. Ph.D. Thesis, University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca, Cluj-Napoca, Romania, 2015.

173. Yamaji N. A cooperative system of silicon transport in plants / N. Yamaji, N. Mitani-Veno, G. Sakurai and J. Ma // 7 th Inter. Conf. Silicon Agricult. Proceed. Abstracts. P. 36.

174. Yuvaraj, M. Development of slow release Zn fertilizer using nano-zeolite as carrier / M. Yuvaraj, K.S. Subramanian // J. Plant. Nutr. 2018. – №41. – 311-320.

175. Zippicotte, J. Fertilizer. Pat. USA N238240. Publ. Official Gazette of the Anted Stares Patent Office, 1881. V.19. № 9. P. 496.

176. Zellener, W. Silicon's Role In Plant Stress Reduction And Why This Element Is Not Used Routinely For Managing Plant Health / W. Zellener, B. Tubana, F. Rodrigues, L. Datnoff // Plant Disease. – 2021. – 105. – P. 2033-2049.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Метеорологические условия проведения исследования (2021 год) по данным метеостанции (метеопост Октябрьский)

Месяц	Декада	Температура, °С		Норма	Осадки, мм		Норма
		Среднее	Отклонение		Среднее	Отклонение	
Январь	1	-7,6	4,6	-12,2	0	-7,2	7,2
	2	-18,7	-3,4	-15,3	0	-10,3	10,3
	3	-5,8	7,8	-13,6	12	-1,5	13,5
	мес.	-10,7	3	-13,7	12	-19,0	31,0
Февраль	1	-11,4	4,9	-16,3	12,4	3,5	8,9
	2	-16,6	-6	-10,6	0,4	-8,8	9,2
	3	-15,2	-6,9	-8,3	4,2	-2,0	6,2
	мес.	-14,4	-26,1	11,7	17	-7,3	24,3
Март	1	-12,2	-6,6	-5,6	0,6	-7,0	7,6
	2	-7,3	-3	-4,3	0,6	-4,7	5,3
	3	-1,1	1	-2,1	2,8	-7,3	10,1
	мес.	-6,9	-2,9	-4	3,4	-19,6	23,0
Апрель	1	3,8	1,2	2,6	19,2	9,2	10,0
	2	9,6	2,8	6,8	1	-9,0	10,0
	3	7,1	-2,1	9,2	14,4	4,4	10,0
	мес.	6,8	0,6	6,2	34,6	4,6	30,0
Май	1	14,7	2,1	12,6	20	6,0	14,0
	2	22,2	7,7	14,5	3	-17,0	20,0
	3	20,0	3,8	16,2	9,6	-0,4	10,0
	мес.	18,9	4,5	14,4	32,6	-11,4	44,0
Июнь	1	18,3	0,7	17,6	0	-17,0	17,0
	2	21,3	2,7	18,6	8,6	-11,4	20,0
	3	24,4	4,9	19,5	22,4	2,4	20,0
	мес.	21,3	2,8	18,5	31	-26,0	57,0
Июль	1	22,7	2,4	20,3	10,6	-9,4	20,0
	2	19,0	-1	20	30	10,0	20,0
	3	22,5	1,9	20,6	32,8	22,8	10,0
	мес.	21,4	0,8	20,6	73,4	23,4	50,0
Август	1	24,0	4,1	19,9	6,8	-13,2	20,0
	2	24,5	5,7	18,8	1,2	-8,8	10,0
	3	20,8	3,8	17	3,2	-16,8	20,0
	мес.	23,1	4,6	18,5	11,2	-38,8	50,0

Сентябрь	1	12,7	-2	14,7	34,4	19,4	15,0
	2	10,8	-1,7	12,5	2,6	-7,4	10,0
	3	8,3	-2	10,3	40	20,0	20,0
	мес.	10,6	-1,9	12,5	77	32,0	45,0
Октябрь	1	5,2	-4	9,2	0,8	-14,5	15,3
	2	7,7	4,7	3	0	-13,7	13,7
	3	5,1	5,3	-0,2	7,6	-4,4	12,0
	мес.	6,4	2,4	4	8,4	-32,6	41,0
Ноябрь	1	3,0	0	3	5,7	1,6	4,1
	2	-2,2	-0,2	-2	9,5	-2,1	11,6
	3	-2,1	0,5	-2,6	16,2	-0,1	16,3
	мес.	0,4	-0,1	0,5	31,4	-0,6	32,0
Декабрь	1	-1,9	3,3	-5,2	2,7	-2,3	5,0
	2	-5,1	1,4	-6,5	13,9	4,7	9,2
	3	-14,5	-3,7	-10,8	6,1	-9,7	15,8
	мес.	-7,4	0,1	-7,5	22,7	-7,3	30,0

Метеорологические условия проведения исследования (2022 год) по данным метеостанции (метеопост Октябрьский)

Месяц	Декада	Температура, °С		Норма	Осадки, мм		Норма
		Среднее	Отклонение		Среднее	Отклонение	
Январь	1	-2,2	10,0	-12,2	17,0	9,8	7,2
	2	-4,6	10,7	-15,3	20,0	9,7	10,3
	3	-13,8	-0,2	-13,6	30,0	16,5	13,5
	мес.	-6,7	7,0	-13,7	67,0	36,0	31,0
Февраль	1	-3,1	13,2	-16,3	14,0	5,1	8,9
	2	-2,4	8,2	-10,6	16,0	6,8	9,2
	3	1,1	9,4	-8,3	21,0	14,8	6,2
	мес.	-1,5	-13,2	11,7	51,0	26,7	24,3
Март	1	-5,8	-0,2	-5,6	0,0	-7,6	7,6
	2	-6,7	-2,4	-4,3	15,0	9,7	5,3
	3	2,6	4,7	-2,1	0,0	-10,1	10,1
	мес.	-3,3	0,7	-4,0	15,0	-8,0	23,0
Апрель	1	5,1	2,5	2,6	10,0	0,0	10,0
	2	8,7	1,9	6,8	18,0	8,0	10,0
	3	11,3	2,1	9,2	30,0	20,0	10,0
	мес.	8,4	2,2	6,2	58,0	28,0	30,0
Май	1	10,2	-2,4	12,6	20,0	6,0	14,0
	2	10,9	-3,6	14,5	25,0	5,0	20,0
	3	13,7	-2,5	16,2	15,0	5,0	10,0
	мес.	11,6	-2,8	14,4	60,0	16,0	44,0
Июнь	1	19,1	1,5	17,6	20,0	3,0	17,0
	2	19,5	0,9	18,6	0,0	-20,0	20,0
	3	19	-0,5	19,5	0,0	-20,0	20,0
	мес.	19,2	0,7	18,5	20,0	-37,0	57,0
Июль	1	21,9	1,6	20,3	60,0	40,0	20,0
	2	23,9	3,9	20,0	54,0	34,0	20,0
	3	23,5	2,9	20,6	0,0	-10,0	10,0
	мес.	23,1	2,5	20,6	114,0	64,0	50,0
Август	1	23,3	3,4	19,9	0,3	-19,7	20,0
	2	21,7	2,9	18,8	0,0	-10,0	10,0
	3	24,5	7,5	17,0	0,0	-20,0	20,0
	мес.	23,2	4,7	18,5	0,3	-49,7	50,0

Сентябрь	1	12,4	-2,3	14,7	0,0	-15,0	15,0
	2	13,5	1,0	12,5	0,0	-10,0	10,0
	3	13,2	2,9	10,3	38,0	18,0	20,0
	мес.	13,0	0,5	12,5	38,0	-7,0	45,0
Октябрь	1	13,1	3,9	9,2	23,0	7,7	15,3
	2	8,1	5,1	3,0	10,0	-3,7	13,7
	3	2,6	2,8	-0,2	14,0	2,0	12,0
	мес.	7,9	3,9	4,0	47,0	6,0	41,0
Ноябрь	1	1,6	-1,4	3,0	8,2	4,1	4,1
	2	0	2,0	-2,0	40,2	28,6	11,6
	3	-4	-1,4	-2,6	17,1	0,8	16,3
	мес.	-0,8	-1,3	0,5	65,5	33,5	32,0
Декабрь	1	-13,4	-8,2	-5,2	0,2	-4,8	5,0
	2	-5,6	0,9	-6,5	22,1	12,9	9,2
	3	-3,7	7,1	-10,8	21,6	5,8	15,8
	мес.	-7,6	-0,1	-7,5	43,9	13,9	30,0

Метеорологические условия проведения исследования (2023 год) по
данным метеостанции (метеопост Октябрьский)

Месяц	Декада	Температура, °С		Норма	Осадки, мм		Норма
		Среднее	Отклонение		Среднее	Отклонение	
Январь	1	-14,0	-1,8	-12,2	12,9	5,7	7,2
	2	-14,6	0,7	-15,3	0,0	-10,3	10,3
	3	-7,6	6,0	-13,6	1,7	-11,8	13,5
	мес.	-12,1	1,6	-13,7	14,6	-16,4	31,0
Февраль	1	-9,3	7,0	-16,3	6,2	-2,7	8,9
	2	-8,6	2,0	-10,6	14,4	5,2	9,2
	3	-6,2	2,1	-8,3	13,1	6,9	6,2
	мес.	-8,0	-19,7	11,7	33,7	9,4	24,3
Март	1	-2,1	3,5	-5,6	7,6	0,0	7,6
	2	1,2	5,5	-4,3	25,0	19,7	5,3
	3	7	9,1	-2,1	5,0	-5,1	10,1
	мес.	2,0	6,0	-4,0	37,6	14,6	23,0
Апрель	1	6,7	4,1	2,6	0,0	-10,0	10,0
	2	7,4	0,6	6,8	0,0	-10,0	10,0
	3	13,5	4,3	9,2	17,5	7,5	10,0
	мес.	9,2	3,0	6,2	17,5	-12,5	30,0
Май	1	11	-1,6	12,6	5,6	-8,4	14,0
	2	14,6	0,1	14,5	5,0	-15,0	20,0
	3	20,6	4,4	16,2	3,3	-6,7	10,0
	мес.	15,4	1,0	14,4	13,9	-30,1	44,0
Июнь	1	16	-1,6	17,6	2,3	-14,7	17,0
	2	16,6	-2,0	18,6	2,8	-17,2	20,0
	3	16,5	-3,0	19,5	17,8	-2,2	20,0
	мес.	16,4	-2,1	18,5	22,9	-34,1	57,0
Июль	1	23,8	3,5	20,3	5,0	-15,0	20,0
	2	18,7	-1,3	20,0	0,0	-20,0	20,0
	3	21,5	0,9	20,6	30,1	20,1	10,0
	мес.	21,3	0,7	20,6	35,1	-14,9	50,0
Август	1	23,1	3,2	19,9	5,0	-15,0	20,0
	2	23,2	4,6	18,6	4,5	-5,5	10,0
	3	14,5	-2,5	17,0	30,1	10,1	20,0
	мес.	20,3	1,8	18,5	39,6	-10,4	50,0

Сентябрь	1	14,3	-0,4	14,7	1,4	-13,6	15,0
	2	13,2	0,7	12,5	5,8	-4,2	10,0
	3	14,9	4,6	10,3	0,0	-20,0	20,0
	мес.	14,1	1,6	12,5	7,2	-37,8	45,0
Октябрь	1	9,4	0,2	9,2	14,6	-0,7	15,3
	2	7,3	4,3	3,0	8,2	-5,5	13,7
	3	1,6	1,8	-0,2	63,7	51,7	12,0
	мес.	6,1	2,1	4,0	86,5	45,5	41,0
Ноябрь	1	5,4	2,4	3,0	34,6	30,5	4,1
	2	-1,4	0,6	-2,0	10,3	-1,3	11,6
	3	3,8	6,4	-2,6	38,7	22,4	16,3
	мес.	0,5	0,0	0,5	83,6	51,6	32,0
Декабрь	1	-12,1	-6,9	-5,2	21,4	16,4	5,0
	2	-9,8	-3,3	-6,5	9,0	-0,2	9,2
	3	1,8	12,6	-10,8	22,1	6,3	15,8
	мес.	-7,7	-0,2	-7,5	52,5	22,5	30,0

Влияние удобрений на плотность пахотного слоя почвы и коэффициент структурности чернозема типичного под посевами озимой пшеницы

№ п/п	Варианты	Содержание агрегатов, % (сухое просеивание)			K _c	Плотность, г/см ³
		>10 мм	10–0,25 мм	<0,5 мм		
1.	Ф1	30,6	59,8	9,6	1,49	1,21
1.1.	Ф1+Ц1	27,9	63,4	8,7	1,74	1,17
1.2.	Ф1+Ц2	26,4	64	9,7	1,77	1,15
1.3.	Ф1+ЦК1	25,2	65,9	8,9	1,94	1,13
1.4.	Ф1+ЦК2	25	65,9	9,1	1,93	1,14
1.5.	Ф1+ЦА1	27,6	65,3	7,1	1,89	1,11
1.6.	Ф1+ЦА2	23,3	69,5	7,2	2,28	1,07
2.	Ф2	24,2	62,4	13,4	1,66	1,20
2.1.	Ф2+Ц1	22,7	65,5	11,8	1,9	1,15
2.2.	Ф2+Ц2	21,7	66,1	12,2	1,95	1,13
2.3.	Ф2+ЦК1	21,5	69,8	8,8	2,31	1,09
2.4.	Ф2+ЦК2	20,4	70,8	8,8	2,43	1,07
2.5.	Ф2+ЦА1	20	69,5	10,4	2,28	1,09
2.6.	Ф2+ЦА2	20,8	71,5	7,7	2,51	1,06
НСР ₀₅	Фактор А	1,37	0,97	1,42	0,11	0,02
	Фактор В	2,57	1,82	2,66	0,2	0,03

Эвапотранспирация и коэффициент водопотребления озимой пшеницы в зависимости от фона и применяемой системы удобрения, 2021-2023 гг.

Вариант	Урожайность сухой надземной массы, т/га	Урожайность зерна, т/га	ЗПВ (0-100 мм)		Осадки, мм	Общий расход, мм	Квп, м ³ /т
			возобновление вегетации	перед уборкой			
2021 год							
Ф1	3,88	3,37	138	64	171,6	245,6	729
Ф1+Ц1	4,15	3,61	139	68	171,6	242,6	672
Ф1+Ц2	4,34	3,77	138	69	171,6	240,6	638
Ф1+ЦК1	4,69	4,08	138	68	171,6	241,6	592
Ф1+ЦК2	4,80	4,17	139	69	171,6	241,6	579
Ф1+ЦА1	4,65	4,04	140	69	171,6	242,6	600
Ф1+ЦА2	4,74	4,12	141	70	171,6	242,6	589
Ф2	4,75	4,13	138	66	171,6	243,6	590
Ф2+Ц1	5,06	4,4	139	67	171,6	243,6	554
Ф2+Ц2	5,29	4,6	140	69	171,6	242,6	527
Ф2+ЦК1	5,50	4,78	140	67	171,6	244,6	512
Ф2+ЦК2	6,06	5,27	141	69	171,6	243,6	462
Ф2+ЦА1	5,95	5,17	142	70	171,6	243,6	471
Ф2+ЦА2	6,04	5,25	142	70	171,6	243,6	464
2022 год							
Ф1	6,06	5,27	163	96	252	319	605
Ф1+Ц1	6,26	5,44	166	98	252	320	588
Ф1+Ц2	6,74	5,86	168	99	252	321	548
Ф1+ЦК1	6,89	5,99	171	98	252	325	543
Ф1+ЦК2	7,11	6,18	173	98	252	327	529
Ф1+ЦА1	6,97	6,06	170	97	252	325	536
Ф1+ЦА2	7,23	6,29	172	99	252	325	517
Ф2	7,28	6,33	164	97	252	319	504
Ф2+Ц1	7,46	6,49	168	98	252	322	496
Ф2+Ц2	8,03	6,98	169	98	252	323	463
Ф2+ЦК1	8,23	7,16	169	97	252	324	453
Ф2+ЦК2	8,43	7,33	170	98	252	324	442
Ф2+ЦА1	8,28	7,2	169	98	252	323	449
Ф2+ЦА2	8,50	7,39	170	98	252	324	438
2023 год							
Ф1	4,76	4,14	124	42	54,9	136,9	331
Ф1+Ц1	5,04	4,38	125	44	54,9	135,9	310
Ф1+Ц2	5,15	4,48	125	46	54,9	133,9	299
Ф1+ЦК1	5,26	4,57	125	46	54,9	133,9	293

Φ1+ЦК2	5,34	4,64	126	47	54,9	133,9	289
Φ1+ЦА1	5,57	4,84	124	46	54,9	132,9	275
Φ1+ЦА2	5,77	5,02	125	47	54,9	132,9	265
Φ2	5,93	5,16	124	43	54,9	135,9	263
Φ2+Ц1	6,00	5,22	125	44	54,9	135,9	260
Φ2+Ц2	6,15	5,35	125	46	54,9	133,9	250
Φ2+ЦК1	6,22	5,41	124	45	54,9	133,9	248
Φ2+ЦК2	6,36	5,53	125	45	54,9	134,9	244
Φ2+ЦА1	6,54	5,69	124	45	54,9	133,9	235
Φ2+ЦА2	6,73	5,85	125	46	54,9	133,9	229

Степень разложения льняного полотна под посевами озимой пшеницы, %, (2021 - 2023 г.)

№ п/п	Вариант	Годы исследований			В среднем за 2021 – 2023 гг.
		2021	2022	2023	
1.	Ф1	29	36	32	32
1.1.	Ф1+Ц1	31	38	34	34
1.2.	Ф1+Ц2	27	40	35	34
1.3.	Ф1+ЦК1	29	40	38	36
1.4.	Ф1+ЦК2	31	42	37	37
1.5.	Ф1+ЦА1	37	45	39	40
1.6.	Ф1+ЦА2	39	48	44	44
2.	Ф2	37	47	41	42
2.1.	Ф2+Ц1	38	48	42	43
2.2.	Ф2+Ц2	36	49	40	42
2.3.	Ф2+ЦК1	37	50	43	43
2.4.	Ф2+ЦК2	38	51	46	45
2.5.	Ф2+ЦА1	40	50	44	45
2.6.	Ф2+ЦА2	37	54	42	44
НСР ₀₅	Фактор А	3,19	1,82	3,12	2,74
	Фактор В	Fφ<Fт	3,4	Fφ<Fт	Fφ<Fт

Влияние цеолита и экспериментальных удобрений на его основе на агрохимические показатели чернозема типичного под посевами озимой пшеницы, 2021 г.

№ п/п	Варианты	pH _{ксл} ед.	N-NO ₃ , мг/кг	N-NH ₄ , мг/кг	P ₂ O ₅ мг/кг	K ₂ O мг/кг
1.	Ф1	6,0	4,9	6,3	153	96
1.1.	Ф1+Ц1	6,1	6,2	7,3	164	99
1.2.	Ф1+Ц2	6,2	6,8	6,9	166	100
1.3.	Ф1+ЦК1	6,3	7,5	7,8	172	96
1.4.	Ф1+ЦК2	6,1	8,8	8,4	176	93
1.5.	Ф1+ЦА1	6,4	8,1	7,3	178	91
1.6.	Ф1+ЦА2	6,2	7,3	8,1	180	96
2.	Ф2	6,3	6,6	7,9	179	102
2.1.	Ф2+Ц1	6,2	6,8	8,8	195	109
2.2.	Ф2+Ц2	6,6	7	9	200	109
2.3.	Ф2+ЦК1	6,4	7,8	9,6	210	111
2.4.	Ф2+ЦК2	6,5	8,5	9,9	199	113
2.5.	Ф2+ЦА1	6,5	7,6	9,8	201	128
2.6.	Ф2+ЦА2	6,5	7,7	8,6	200	122
НСР0 ₅	Фактор А	0,11	0,58	0,51	5,4	8,98
	Фактор В	0,21	1,09	0,95	10,11	Fф<Fт

Влияние цеолита и экспериментальных удобрений на его основе на агрохимические показатели чернозема типичного под посевами озимой пшеницы, 2022 г.

№ п/п	Варианты	pH _{ксл} ед.	N-NO ₃ , мг/кг	N-NH ₄ , мг/кг	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг
1.	Ф1	6,5	5,4	6	152	95
1.1.	Ф1+Ц1	6,8	6,4	6,3	142	100
1.2.	Ф1+Ц2	6,9	6,6	7,1	146	112
1.3.	Ф1+ЦК1	6,8	6,3	7,2	152	102
1.4.	Ф1+ЦК2	6,9	5,7	6,6	140	106
1.5.	Ф1+ЦА1	6,8	6,8	5,9	146	129
1.6.	Ф1+ЦА2	7,	5,5	5,9	150	130
2.	Ф2	6,7	6,4	5,8	158	140
2.1.	Ф2+Ц1	6,9	6,7	6,2	172	163
2.2.	Ф2+Ц2	6,9	6,9	6,1	178	108
2.3.	Ф2+ЦК1	6,6	7,5	6,8	184	110
2.4.	Ф2+ЦК2	6,7	7,8	7,6	188	119
2.5.	Ф2+ЦА1	6,9	7,2	7,4	192	132
2.6.	Ф2+ЦА2	7,0	7,8	7,2	194	120
НСР0 ₅	Фактор А	0,12	0,69	Fφ<Fτ	11,77	22,01
	Фактор В	Fφ<Fτ	Fφ<Fτ	Fφ<Fτ	Fφ<Fτ	Fφ<Fτ

Влияние цеолита и экспериментальных удобрений на его основе на агрохимические показатели чернозема типичного под посевами озимой пшеницы, 2023 г.

№ п/п	Варианты	pH _{кел} ед.	N-NO ₃ , мг/кг	N-NH ₄ , мг/кг	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг
1.	Ф1	6,1	5,6	4,5	160	96
1.1.	Ф1+Ц1	5,7	6,9	5,2	165	98
1.2.	Ф1+Ц2	5,4	7,0	5,8	165	115
1.3.	Ф1+ЦК1	5,4	8,8	7,8	168	108
1.4.	Ф1+ЦК2	5,6	10,8	9,5	170	109
1.5.	Ф1+ЦА1	5,8	10,2	6,2	193	95
1.6.	Ф1+ЦА2	6,0	11,3	5,9	186	98
2.	Ф2	6,1	11,5	6,5	178	106
2.1.	Ф2+Ц1	5,8	11,6	6,8	187	119
2.2.	Ф2+Ц2	5,5	11,0	9,2	165	110
2.3.	Ф2+ЦК1	5,7	12,9	4,0	180	103
2.4.	Ф2+ЦК2	6,3	13,1	5,1	186	104
2.5.	Ф2+ЦА1	6,7	13,5	7,4	189	124
2.6.	Ф2+ЦА2	6,7	14,8	6,9	188	118
НСР0 ₅	Фактор А	0,12	0,69	Fφ<Fτ	11,77	Fφ<Fτ
	Фактор В	Fφ<Fτ	Fφ<Fτ	Fφ<Fτ	Fφ<Fτ	Fφ<Fτ

Влияние цеолита и экспериментальных удобрений на его основе на содержание микроэлементов чернозема типичного под посевами озимой пшеницы, мг/кг (2021 г.)

№ п/п	Варианты	Cu	Zn	Mn
1.	Ф1	3,9	0,3	8,6
1.1.	Ф1+Ц1	4,2	0,4	9,9
1.2.	Ф1+Ц2	4,3	0,5	10,4
1.3.	Ф1+ЦК1	4,3	0,5	10,1
1.4.	Ф1+ЦК2	4,3	0,5	10,3
1.5.	Ф1+ЦА1	4,1	0,5	10,3
1.6.	Ф1+ЦА2	3,8	0,6	10,4
2.	Ф2	4,0	0,4	9,1
2.1.	Ф2+Ц1	4,2	0,5	11,8
2.2.	Ф2+Ц2	4,2	0,5	12,2
2.3.	Ф2+ЦК1	4,3	0,5	11,5
2.4.	Ф2+ЦК2	4,4	0,5	12,2
2.5.	Ф2+ЦА1	4,3	0,5	11,9
2.6.	Ф2+ЦА2	4,3	0,5	12,1
НСР0 ₅	Фактор А	0,16	0,06	0,4
	Фактор В	0,3	0,11	0,75

Влияние цеолита и экспериментальных удобрений на его основе на содержание микроэлементов чернозема типичного под посевами озимой пшеницы, мг/кг (2022 г.)

№ п/п	Варианты	Cu	Zn	Mn
1.	Ф1	3,80	0,280	12,25
1.1.	Ф1+Ц1	4,05	0,310	14,25
1.2.	Ф1+Ц2	3,80	0,340	17,55
1.3.	Ф1+ЦК1	3,95	0,300	18,05
1.4.	Ф1+ЦК2	3,90	0,300	16,70
1.5.	Ф1+ЦА1	4,00	0,295	15,45
1.6.	Ф1+ЦА2	4,05	0,320	16,50
2.	Ф2	3,95	0,295	19,85
2.1.	Ф2+Ц1	4,25	0,305	18,60
2.2.	Ф2+Ц2	4,10	0,320	14,75
2.3.	Ф2+ЦК1	4,10	0,325	8,75
2.4.	Ф2+ЦК2	4,05	0,315	9,55
2.5.	Ф2+ЦА1	4,15	0,335	13,05
2.6.	Ф2+ЦА2	4,10	0,365	12,45
НСР ₀₅	Фактор А	0,06	0,02	F ϕ <F τ
	Фактор В	0,11	0,04	F ϕ <F τ

Влияние цеолита и экспериментальных удобрений на его основе на содержание микроэлементов чернозема типичного под посевами озимой пшеницы, мг/кг (2023 г.)

№ п/п	Варианты	Cu	Zn	Mn
1.	Ф1	3,45	0,335	12,90
1.1.	Ф1+Ц1	3,35	0,345	12,10
1.2.	Ф1+Ц2	3,35	0,380	15,20
1.3.	Ф1+ЦК1	3,55	0,385	18,05
1.4.	Ф1+ЦК2	3,55	0,365	15,00
1.5.	Ф1+ЦА1	3,45	0,390	13,65
1.6.	Ф1+ЦА2	3,45	0,380	14,60
2.	Ф2	3,65	0,365	18,15
2.1.	Ф2+Ц1	3,6	0,375	14,05
2.2.	Ф2+Ц2	3,85	0,425	17,55
2.3.	Ф2+ЦК1	3,60	0,370	11,90
2.4.	Ф2+ЦК2	3,80	0,335	10,80
2.5.	Ф2+ЦА1	3,65	0,340	17,85
2.6.	Ф2+ЦА2	3,50	0,415	16,05
НСР ₀₅	Фактор А	0,12	0,03	F _ф <F _т
	Фактор В	F _ф <F _т	0,06	F _ф <F _т

Урожайность озимой пшеницы, т\га

2021 г.

Фон	Ф	Ф+Ц1	Ф+Ц2	Ф+ЦК1	Ф+ЦК2	Ф+ЦА1	Ф+ЦА2
Ф1	3,46	3,67	3,29	4,08	4,11	4,05	4,24
Ф1	3,28	3,85	3,77	3,72	4,45	3,89	3,69
Ф1	3,12	3,66	4,22	4,12	4,21	4,15	4,15
Ф1	3,62	3,24	3,8	4,38	3,9	4,05	4,38
Ф2	4	4,56	4,32	4,59	5,58	5,39	5,14
Ф2	4,22	4,46	4,26	4,38	5,01	5,11	5,58
Ф2	4,21	3,98	4,98	5,17	5,32	4,83	5,28
Ф2	4,1	4,59	4,84	4,96	5,17	5,34	4,98

2022 г.

Фон	Ф	Ф+Ц1	Ф+Ц2	Ф+ЦК1	Ф+ЦК2	Ф+ЦА1	Ф+ЦА2
Ф1	4,78	5,05	5,4	6,11	6,19	5,77	6,02
Ф1	5,47	5,61	5,66	5,72	5,98	6,24	6,11
Ф1	5,26	5,96	6,14	6,27	6,44	5,92	6,47
Ф1	5,58	5,15	6,22	5,84	6,11	6,32	6,54
Ф2	6,07	6,32	6,55	7,17	7,23	6,87	7,28
Ф2	6,48	6,24	7,34	6,98	7,41	7,54	7,45
Ф2	6,51	6,57	7,11	7,38	7,25	6,95	7,61
Ф2	6,24	6,81	6,92	7,11	7,43	7,45	7,23

2023 г.

Фон	Ф	Ф+Ц1	Ф+Ц2	Ф+ЦК1	Ф+ЦК2	Ф+ЦА1	Ф+ЦА2
Ф1	4,4	4,45	4,51	4,25	4,51	4,69	5,11
Ф1	4,28	4,36	4,42	4,81	5,02	5,14	5,01
Ф1	4,03	4,08	4,38	4,32	4,73	5,02	4,81
Ф1	3,85	4,62	4,61	4,89	4,29	4,52	5,15
Ф2	5,34	5,33	5,28	5,18	5,55	6,11	5,64
Ф2	5,11	5,37	5,29	5,42	5,2	5,08	6,01
Ф2	4,93	4,98	5,64	5,62	5,42	5,97	5,81
Ф2	5,17	5,21	5,17	5,41	5,94	5,58	5,92

Основные показатели качества зерна озимой пшеницы, % (2021)

№ п/п	Варианты	Азот,	P ₂ O ₅	Калий,	Белок	Клейковина,	ИДК, ед.
1.	Ф1	2,08	0,61	0,39	11,86	23,4	98
1.1.	Ф1+Ц1	2,18	0,73	0,34	12,43	25,2	97
1.2.	Ф1+Ц2	2,19	0,66	0,33	12,48	25,2	98
1.3.	Ф1+ЦК1	2,01	0,69	0,35	11,46	25,6	93
1.4.	Ф1+ЦК2	2,03	0,6	0,37	11,57	25,8	102
1.5.	Ф1+ЦА1	2,18	0,66	0,38	12,43	25,2	101
1.6.	Ф1+ЦА2	2,09	0,69	0,37	11,91	25,2	93
2.	Ф2	2,17	0,69	0,38	12,37	24,4	92
2.1.	Ф2+Ц1	2,22	0,71	0,37	12,65	27,2	96
2.2.	Ф2+Ц2	2,21	0,78	0,41	12,60	27,8	98
2.3.	Ф2+ЦК1	2,14	0,8	0,42	12,20	27,2	94
2.4.	Ф2+ЦК2	2,26	0,78	0,39	12,88	27	98
2.5.	Ф2+ЦА1	2,17	0,78	0,36	12,37	27	96
2.6.	Ф2+ЦА2	2,16	0,8	0,39	12,31	27,2	96
НСР0 ₅	Фактор А	0,07	0,05	0,03	0,37	0,44	2,74
	Фактор В	Fф<Fт	Fф<Fт	Fф<Fт	Fф<Fт	0,84	Fф<Fт

Основные показатели качества зерна озимой пшеницы, % (2022)

№ п/п	Варианты	Азот	Фосфор	Калий	Белок	Клейковина	ИДК, ед
1.	Ф1	1,75	0,65	0,18	9,98	20,4	74
1.1.	Ф1+Ц1	1,83	0,72	0,21	10,43	22,1	80
1.2.	Ф1+Ц2	1,79	0,64	0,22	10,20	24,3	75
1.3.	Ф1+ЦК1	1,92	0,65	0,19	10,94	23,7	77
1.4.	Ф1+ЦК2	2,01	0,61	0,21	11,46	23,3	76
1.5.	Ф1+ЦА1	2,02	0,68	0,23	11,51	24,1	74
1.6.	Ф1+ЦА2	2,02	0,66	0,21	11,51	22,8	79
2.	Ф2	2,13	0,75	0,22	12,14	22,7	83
2.1.	Ф2+Ц1	2,01	0,72	0,25	11,46	22,4	79
2.2.	Ф2+Ц2	2,03	0,74	0,24	11,57	23,5	77
2.3.	Ф2+ЦК1	2,05	0,68	0,24	11,69	23,8	80
2.4.	Ф2+ЦК2	2,1	0,74	0,26	11,97	23,4	78
2.5.	Ф2+ЦА1	2,12	0,76	0,28	12,08	23,2	75
2.6.	Ф2+ЦА2	2,13	0,78	0,26	12,14	23,1	77
НСР ₀₅	Фактор А	0,09	0,04	0,01	0,48	0,86	2,91
	Фактор В	Fφ<Fτ	Fφ<Fτ	0,02	Fφ<Fτ	Fφ<Fτ	Fφ<Fτ

Основные показатели качества зерна озимой пшеницы, % (2023)

№ п/п	Варианты	Азот	Фосфор	Калий	Белок	Клейковина	ИДК, ед.
1.	Ф1	1,93	0,75	0,22	11,00	20,8	77
1.1.	Ф1+Ц1	1,96	0,60	0,25	11,17	22,3	81
1.2.	Ф1+Ц2	1,97	0,75	0,22	11,23	25	74
1.3.	Ф1+ЦК1	2,03	0,80	0,25	11,57	26,4	74
1.4.	Ф1+ЦК2	2,05	0,70	0,22	11,69	26,5	75
1.5.	Ф1+ЦА1	2,12	0,75	0,22	12,08	27,8	75
1.6.	Ф1+ЦА2	2,11	0,80	0,25	12,03	26,3	81
2.	Ф2	2,14	0,75	0,22	12,20	28,7	74
2.1.	Ф2+Ц1	2,12	0,70	0,22	12,08	26,8	72
2.2.	Ф2+Ц2	2,14	0,75	0,25	12,20	28,2	85
2.3.	Ф2+ЦК1	2,17	0,70	0,22	12,37	29	82
2.4.	Ф2+ЦК2	2,18	0,75	0,22	12,43	29,2	74
2.5.	Ф2+ЦА1	2,17	0,70	0,22	12,37	29,1	60
2.6.	Ф2+ЦА2	2,16	0,75	0,25	12,31	28,9	75
НСР ₀₅	Фактор А	0,05	0,05	0,02	0,28	1,75	Fφ<Fτ
	Фактор В	0,09	0,10	0,03	0,53	Fφ<Fτ	Fφ<Fτ

Содержание тяжелых металлов в зерне озимой пшеницы (2021 г.)

№ п/п	Варианты	Zn	Cu	Pd	Cd	Ni
1.	Ф1	17,5	1,8	0,36	0,035	0,74
1.1.	Ф1+Ц1	15,5	1,6	0,25	0,015	0,73
1.2.	Ф1+Ц2	16,5	1,3	0,20	0,015	0,7
1.3.	Ф1+ЦК1	17,0	1,6	0,20	0,027	0,66
1.4.	Ф1+ЦК2	16,6	1,6	0,25	0,025	0,62
1.5.	Ф1+ЦА1	15,0	1,5	0,31	0,018	0,66
1.6.	Ф1+ЦА2	14,0	1,6	0,32	0,015	0,64
2.	Ф2	15,0	1,7	0,55	0,04	0,8
2.1.	Ф2+Ц1	13,6	1,7	0,45	0,032	0,66
2.2.	Ф2+Ц2	13,0	1,7	0,40	0,025	0,58
2.3.	Ф2+ЦК1	13,0	1,5	0,41	0,03	0,66
2.4.	Ф2+ЦК2	15,0	1,5	0,36	0,024	0,55
2.5.	Ф2+ЦА1	17,0	1,4	0,40	0,028	0,62
2.6.	Ф2+ЦА2	17,0	1,2	0,34	0,022	0,48
НСР ₀₅	Фактор А	Fφ<Fτ	Fφ<Fτ	0,06	0,0047	0,060
	Фактор В	Fφ<Fτ	Fφ<Fτ	0,11	0,0088	0,112

Содержание тяжелых металлов в зерне озимой пшеницы (2022 г.)

№ п/п	Варианты	Zn	Cu	Pb	Cd	Ni
1.	Ф1	20,9	1,95	0,29	0,025	0,30
1.1.	Ф1+Ц1	19,9	1,80	0,10	0,020	0,10
1.2.	Ф1+Ц2	17,5	1,90	0,20	0,015	0,15
1.3.	Ф1+ЦК1	18,3	1,85	0,15	0,010	0,25
1.4.	Ф1+ЦК2	19,8	1,75	0,15	0,020	0,20
1.5.	Ф1+ЦА1	17,6	1,60	0,12	0,015	0,10
1.6.	Ф1+ЦА2	15,3	1,65	0,20	0,020	0,15
2.	Ф2	21,0	2,03	0,35	0,025	0,35
2.1.	Ф2+Ц1	19,3	1,75	0,20	0,010	0,20
2.2.	Ф2+Ц2	16,5	1,70	0,18	0,020	0,15
2.3.	Ф2+ЦК1	16,9	1,75	0,25	0,015	0,25
2.4.	Ф2+ЦК2	15,7	1,60	0,20	0,020	0,25
2.5.	Ф2+ЦА1	15,5	1,75	0,15	0,020	0,20
2.6.	Ф2+ЦА2	17,7	1,80	0,15	0,015	0,25
НСР ₀₅	Фактор А	Fφ<FТ	Fφ<FТ	0,047	Fφ<FТ	0,037
	Фактор В	Fφ<FТ	Fφ<FТ	0,087	Fφ<FТ	0,069

Содержание тяжелых металлов в зерне озимой пшеницы (2023 г.)

№ п/п	Варианты	Zn	Cu	Pb	Cd	Ni
1.	Ф1	20,6	1,95	0,35	0,030	0,38
1.1.	Ф1+Ц1	19,1	1,80	0,10	0,020	0,10
1.2.	Ф1+Ц2	17,3	1,90	0,30	0,025	0,15
1.3.	Ф1+ЦК1	18,0	1,80	0,15	0,018	0,25
1.4.	Ф1+ЦК2	19,4	1,95	0,15	0,020	0,10
1.5.	Ф1+ЦА1	17,4	1,55	0,15	0,015	0,15
1.6.	Ф1+ЦА2	15,0	1,75	0,20	0,011	0,15
2.	Ф2	15,3	1,85	0,43	0,025	0,35
2.1.	Ф2+Ц1	20,2	1,70	0,32	0,010	0,20
2.2.	Ф2+Ц2	15,2	1,65	0,28	0,020	0,25
2.3.	Ф2+ЦК1	19,0	1,70	0,22	0,017	0,25
2.4.	Ф2+ЦК2	16,3	1,55	0,25	0,020	0,30
2.5.	Ф2+ЦА1	16,4	1,70	0,15	0,020	0,20
2.6.	Ф2+ЦА2	17,2	1,80	0,18	0,015	0,23
НСР ₀₅	Фактор А	2,18	0,14	0,07	0,004	0,06
	Фактор В	Fφ<Fт	Fφ<Fт	Fφ<Fт	0,008	Fφ<Fт



**Опытное поле Ульяновский ГАУ
Состояние озимой пшеницы в опытах по изучению цеолита и
экспериментальных удобрений на его основе**



**Опытное поле Ульяновский ГАУ
Состояние озимой пшеницы в опытах по изучению цеолита и
экспериментальных удобрений на его основе**



**Опытное поле Ульяновский ГАУ
Состояние озимой пшеницы в опытах по изучению цеолита и
экспериментальных удобрений на его основе**

Влияние цеолита и экспериментальных удобрений на его основе на урожайность зерна озимой пшеницы, т/га с математической обработкой, 2021 г.

Фактор А - фон	Фактор В - цеолитсодержащие удобрения							В среднем по фактору А ((НСР ₀₅ =0,14)
	Ф	Ф+Ц1	Ф+Ц2	Ф+ЦК1	Ф+ЦК2	Ф+ЦА1	Ф+ЦА2	
Фон 1	3,37	3,61	3,77	4,08	4,17	4,02	4,12	3,88
Фон 2	4,13	4,40	4,60	4,78	5,27	5,17	5,25	4,80
В среднем по фактору В (НСР ₀₅ =0,25)	3,75	4,00	4,19	4,43	4,72	4,60	4,68	

НСР₀₅ = F_ф<F_т для сравнения частных средних

Дисперсионный анализ

<i>Источник вариации</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-Значение</i>	<i>F критическое</i>
Выборка	11,88643	1	11,88643	187,1668	4,51E-17	4,072654
Столбцы	6,5591	6	1,093183	17,21355	6,38E-10	2,323994
Взаимодействие	0,440221	6	0,07337	1,155307	0,348219	2,323994
Внутри	2,6673	42	0,063507			
Итого	21,55305	55				

Уровни действия факторов различаются значимо

Влияние цеолита и экспериментальных удобрений на его основе на урожайность зерна озимой пшеницы, т/га с математической обработкой, 2022 г.

Фактор А - фон	Фактор В - цеолитсодержащие удобрения							В среднем по фактору А (НСР ₀₅ = 0,15)
	Ф	Ф+Ц1	Ф+Ц2	Ф+ЦК1	Ф+ЦК2	Ф+ЦА1	Ф+ЦА2	
Фон 1	5,27	5,44	5,86	5,99	6,18	6,06	6,29	5,87
Фон 2	6,33	6,49	6,98	7,16	7,33	7,20	7,39	6,98
В среднем по фактору В (НСР ₀₅ =0,28)	5,80	5,96	6,42	6,57	6,76	6,63	6,84	

НСР₀₅ = F_ф < F_т для сравнения частных средних

Дисперсионный анализ

<i>Источник вариации</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-Значение</i>	<i>F критическое</i>
Выборка	17,34944	1	17,34944	147,8443	2,41E-15	4,072654
Столбцы	7,599171	6	1,266529	10,7928	3,06E-07	2,323994
Взаимодействие	0,029493	6	0,004915	0,041888	0,999659	2,323994
Внутри	4,928675	42	0,117349			
Итого	29,90678	55				

Уровни действия факторов различаются значимо.

**Влияние цеолита и экспериментальных удобрений на его основе на урожайность зерна озимой пшеницы,
т/га с математической обработкой, 2023 г.**

Фактор А - фон	Фактор В - цеолитсодержащие удобрения							В среднем по фактору А ((НСР ₀₅ =0,14)
	Ф	Ф+Ц1	Ф+Ц2	Ф+ЦК1	Ф+ЦК2	Ф+ЦА1	Ф+ЦА2	
Фон 1	4,14	4,38	4,48	4,57	4,64	4,84	5,02	4,58
Фон 2	5,16	5,22	5,35	5,41	5,53	5,69	5,85	5,46
В среднем по фактору В (НСР ₀₅ =0,26)	4,65	4,80	4,91	4,99	5,08	5,26	5,43	

НСР₀₅ = F_ф<F_т для сравнения частных средних

Дисперсионный анализ

Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Выборка	10,736257	1	10,73626	723,4442	4,22E-28	4,072654
Столбцы	3,4436107	6	0,573935	38,67363	1,44E-15	2,323994
Взаимодействие Внутри	0,0555179 0,6233	6 42	0,009253 0,01484	0,623496	0,710398	2,323994
Итого	14,858686	55				

Уровни действия факторов различаются значимо.

Влияние цеолита и экспериментальных удобрений на его основе на урожайность зерна озимой пшеницы, т/га с математической обработкой, 2021-2023 гг.

Фактор А - фон	Фактор В - цеолитсодержащие удобрения							В среднем по фактору А ((НСР ₀₅ = 0,10)
	Ф	Ф+Ц1	Ф+Ц2	Ф+ЦК1	Ф+ЦК2	Ф+ЦА1	Ф+ЦА2	
Фон 1	4,26	4,48	4,70	4,88	5,00	4,98	5,14	4,77
Фон 2	5,21	5,37	5,64	5,78	6,04	6,02	6,16	5,75
В среднем по фактору В (НСР ₀₅ =0,15)	4,73	4,92	5,17	5,33	5,52	5,50	5,65	
НСР ₀₅ = F _ф < F _т								

Дисперсионный анализ

<i>Источник вариации</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-Значение</i>	<i>F критическое</i>
Выборка	13,14352	1	13,14352	558,7152	6,9E-26	4,072654
Столбцы	5,478887	6	0,913148	38,81683	1,35E-15	2,323994
Взаимодействие	0,050621	6	0,008437	0,358643	0,900764	2,323994
Внутри	0,988031	42	0,023525			
Итого	19,66106	55				

Уровни действия факторов различаются значимо.

Корреляционная матрица

	Урожайность, т/га	ЗПВ (0-30 см), мм	N-NO3+N-NH4, мг/кг	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг
Урожайность, т/га	1				
ЗПВ (0-30 см), мм	0,734982911	1			
N-NO3+N-NH4, мг/кг	0,917799011	0,825655258	1		
P ₂ O ₅ , мг/кг	0,958115041	0,601867597	0,824286767	1	
K ₂ O, мг/кг	0,787328959	0,601163568	0,711862851	0,815032	1

ВЫВОД ИТОГОВ

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,986052555
R-квадрат	0,972299641
Нормированный R-квадрат	0,959988371
Стандартная ошибка	0,119660082
Наблюдения	14

Дисперсионный анализ

	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	4	4,523304611	1,130826153	78,97638469	5,26733E-07
Остаток	9	0,128866818	0,014318535		
Итого	13	4,652171429			

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
Y-пересечение	-2,418427788	1,402534456	-1,724326827	0,118737243	-5,591181154	0,754325578	-5,59118115	0,754325578
Переменная X 1	0,031682345	0,032655997	0,970184577	0,357303719	-0,042190653	0,105555342	-0,04219065	0,105555342
Переменная X 2	0,093212779	0,044320711	2,103142685	0,064786997	-0,007047635	0,193473193	-0,00704763	0,193473193
Переменная X 3	0,02823342	0,005182358	5,447987031	0,000406731	0,016510111	0,039956728	0,016510111	0,039956728
Переменная X 4	-0,002994488	0,005911741	-0,506532414	0,624658557	-0,016367776	0,010378799	-0,01636778	0,010378799