МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ - МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

На правах рукописи

Куприянов Алексей Николаевич

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ ПИТАНИЯ КУКУРУЗЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖИДКИХ УДОБРЕНИЙ ДЛЯ РАЗНЫХ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ГРУПП ЗЕМЕЛЬ ЗАПАДНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук

Научный руководитель:
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент
Ефимов Олег Евгеньевич

Москва – 2025 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ 9
1.1 Современные представления об оценке земель, понятие агроландшафта, исторические аспекты 10
1.2 Характеристика современных подходов к проектированию агроландшафтов и разработке агротехнологий 18
1.3 Зональные особенности факторов ограничивающих продуктивность агроценозов 30
1.4 Оценка сельскохозяйственных культур на основе вегетационных индексов 42
1.5 Анализ аспектов разработки систем минерального питания в адаптивных системах земледелия 46
1.6 Методические основы применения жидких минеральных удобрений в агротехнологиях 57
ГЛАВА 2. УСЛОВИЯ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ 62
2.1 Агроэкологические условия территории проведения исследований 63
2.1.1 Климатические условия 63
2.1.2 Общая характеристика рельефа 73
2.1.3 Почвенный покров 77
2.2 Объекты исследования 78
2.3 Методы проведения исследования 83
2.3.1 Технология возделывания кукурузы 83
2.3.2 Схема и описание опыта 88
2.3.3 Методы исследования 89
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ 92
3.1 Агроэкологическая оценка земель 92
3.1.1 Оценка геоморфологических условий на основе геоинформационных систем 92
3.1.2 Структура почвенного покрова. Характеристика агроэкологических групп и видов земель 101
3.1.3 Цифровые методы дистанционного агроэкологического мониторинга 116
3.2 Урожайность кукурузы в зависимости от группы земель и системы питания 123

3.3 Оценка вклада изучаемых факторов в формирование урожайности кукурузы 128
3.4 Качественные показатели и химический состав зерна кукурузы 134
3.5 Вынос элементов питания кукурузой на зерно 138
3.6 Экономическая эффективность 140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 144
ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ 147
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 148
ПРИЛОЖЕНИЯ 174

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований.

Современные вызовы, стоящие перед сельским хозяйством, требуют инновационных подходов к управлению природными ресурсами и увеличению продуктивности агроландшафтов, путем разработки подходов к рациональному повышению уровня интенсификации агротехнологий в системе земледелия. Снижение плодородия почв, изменение климата, деградация земель, требуют комплексного подхода к решению данных проблем. В этой связи особую актуальность приобретают исследования, направленные на изучение агроэкологической оценки земель, разработку адаптивных систем земледелия и применение цифровых технологий для мониторинга и управления земельными ресурсами (Кирюшин 2005, 2011; Коробка, Орленко, Алексеенко и др., 2015; Муха, Картамышев, 1994).

Особое внимание необходимо уделять агроэкологической оценке земель, которая позволяет выявить производственный потенциал и лимитирующие факторы. В этой связи исследование эффективности удобрений должно учитывать агроэкологические особенности почв, рельеф, степень развития деградационных процессов и агрохимические показатели (Кирюшин, 2024; Прохоров, Борисов, Ефимов и др., 2024).

В последние годы жидкие комплексные удобрения (ЖКУ) привлекают всё больше внимания как перспективное средство повышения урожайности и улучшения качества продукции (Янишевский, 1978; Тишков, Ерёмин, 2020, Шеуджен, 2006). Разработка научно обоснованных рекомендаций по их применению в адаптивно-ландшафтных системах земледелия позволит не только повысить урожайность и качество зерна, но и рационально использовать ресурсный потенциал почв.

Степень разработанности темы исследований.

Вопрос агроэкологической оценки земель занимает ключевое место в современных исследованиях, связанных с рациональным землепользованием и

устойчивым развитием сельского хозяйства. Важность агроэкологической оценки земель и адаптивного подхода к земледелию неоднократно подчеркивали множество авторов (Кирюшин 2005, 2011, 2024; Коробка, Орленко, Алексеенко и др., 2015; Борин, Лошинина, 2020; Черкасов, 2005; Altieri, 2011; Duru, 2015). Особое внимание уделяется применению адаптивных методов оценки, которые позволяют учитывать особенности почвенных и климатических условий. Во многих исследованиях подчеркивается необходимость сочетания агроэкологических и агрохимических данных для разработки технологий питания, адаптированных к различным группам земель (Кирюшин, 2015, 2020; Кочагина, Тугуз, 2013; Беленков, Матюк, Мазиров, 2013; Карманов, 2012).

Одним из перспективных направлений в системах питания является применение жидких комплексных удобрений (ЖКУ), которые обеспечивают высокую доступность элементов питания для растений и равномерное распределение в почвенном профиле (Янишевский, 1977; Тишков, Ерёмин, 2020; Назаренко, Субботина, 2017; Slack, 1955; Weeks, Hettiarachchi, 2019). Однако, в работах отмечается недостаточная изученность влияния ЖКУ на урожайность и качество продукции на разных агроэкологических группах земель.

Таким образом, изучение эффективности применения жидких удобрений ЛиквиФорс (марок NPK 7:23:7 и NS 8:9) и разработка адаптивных систем питания кукурузы, с учетом агроэкологической оценки земель, представляет собой актуальное научное исследование.

Цель исследования: изучить эффективность жидких удобрений на разных агроэкологических группах земель и разработать систему питания кукурузы на зерно в условиях Западного Предкавказья.

В соответствии с поставленной целью решали следующие задачи:

1. Выделить основные агроэкологические группы земель на основе почвенно-ландшафтного картографирования и геоинформационных систем.
2. Изучить влияние различных систем питания на урожайность и качество зерна кукурузы на разных агроэкологических группах земель.

3. Разработать математическую модель, описывающую вклад агроэкологических факторов в формирование урожайности зерна кукурузы.

4. Рассчитать экономическую эффективность систем питания кукурузы на разных агроэкологических группах земель.

Научная новизна проведенных исследований.

Выполнена комплексная агроэкологическая оценка земель, включающая построение моделей на основе данных дистанционного зондирования и почвенно-ландшафтного картографирования. Проанализированы многовременные индексы вегетации (NDVI, AOLNDVI), выявлена высокая степень корреляции изучаемых индексов со структурой почвенного покрова, в условиях Западного Предкавказья.

Впервые, в условиях Западного Предкавказья, установлено, что разработанная система питания, с комбинированным применением жидких удобрений (ЖУ) ЛиквиФорс и междурядной подкормкой (марки NPK 7:23:7 и NS 8:9), на разных агроэкологических группах земель, обеспечивает максимальную прибавку урожайности зерна кукурузы: до 80,1 ц/га на плакорных землях, 67,5 ц/га на эрозионных и 72,3 ц/га на переувлажненных землях. Установлено, что применение ЖУ ЛиквиФорс, совместно с подкормкой, достоверно увеличивало содержание азота в зерне кукурузы на всех группах земель: плакорные – 1,51 %, эрозионные – 1,43 % и переувлажненные – 1,53 %.

Разработана математическая модель, количественно оценивающая влияние ключевых агроэкологических и агротехнических факторов (уклон местности, количество осадков, дозы азотных и фосфорных удобрений) на урожайность кукурузы. Модель обладает высокой объясняющей способностью ($R^2 = 0.791$) и позволяет оценивать вклад каждого из исследуемых факторов в формирование урожайности.

Теоретическая и практическая значимость результатов проведенных исследований.

Получены новые научные данные о влиянии жидких удобрений ЛиквиФорс марки NPK 7:23:7 и NS 8:9 на продуктивность кукурузы на разных агроэкологических группах земель. Впервые проведена интеграция методов

агроэкологической оценки земель с разработкой адаптивных систем питания кукурузы с использованием жидких удобрений ЛиквиФорс. Полученные данные дополняют теоретические основы применения жидких удобрений, уточняют их влияние на урожайность и качество зерна кукурузы, а также раскрывают особенности их действия на разных агроэкологических группах земель Западного Предкавказья. Результаты исследований могут быть использованы в учебном процессе при изучении дисциплин, связанных с агропочвоведением и агрохимией.

Практическая значимость работы определяется возможностью дифференцированного внедрения в производство разработанных систем питания кукурузы на разных группах земель, что способствует повышению урожайности зерна кукурузы и улучшения ее качества. Разработанные подходы позволяют повысить экономическую эффективность производства. Полученные рекомендации могут быть использованы сельскохозяйственными предприятиями при разработке системы питания кукурузы.

Методология и методы диссертационного исследования.

Исследования проводились в условиях полевого производственного опыта в Новокубанском и Отрадненском районах Краснодарского края в течении 3-х лет (2021-2023 гг.). Изучаемые жидкие удобрения ЛиквиФорс марки NPK 7:23:7 и NS 8:9 входят в «Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов», разрешенных к применению на территории Российской Федерации (Свидетельство о Государственной регистрации № 800-10-3590-1 и № 800-15-3589-1, соответственно). Полевые и лабораторные методы исследований проведены в соответствии со стандартными методиками и ГОСТ. Более подробное описание представлено в главе «Условия, объекты и методы исследований».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Геоинформационные технологии в сочетании с почвенно-ландшафтным картографированием дают возможность учитывать различия в продуктивности агроландшафтов и обоснованно выделять агроэкологические группы земель.

2. Системы питания с использованием ЖУ ЛиквиФорс марки NPK 7:23:7, NS 8:9 и КАС-32, увеличивают урожайность и положительно влияют на качество зерна кукурузы на всех агроэкологических группах земель.

3. Математическая модель описывает вклад основных и фоновых факторов в формирование урожайности зерна кукурузы в условиях Западного Предкавказья.

4. Экономическая эффективность систем питания кукурузы зависит от агроэкологической группы земель.

Степень достоверности и апробация результатов.

Результаты и выводы работы обоснованы и подтверждены статистической обработкой экспериментальных данных в программах Microsoft Excel 2019 и STATISTICA 8.0. Основные результаты работы доложены на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Агрометеорология XXI века» (Москва, 19 декабря 2023 года), Международной научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященная 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (Москва, 05-07 июня 2023 года) и Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием IX Вильямсовские чтения (Москва, 27-28 ноября 2024 года).

По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе 3 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы.

Диссертация изложена на 184 страницах компьютерного текста, состоит из введения, обзора литературы (глава 1), описания условий, объектов и методов исследования (глава 2), результатов исследования (глава 3), заключения, предложения производству, приложений (10). Включает 19 таблиц и 42 рисунка. Библиографический список состоит из 265 наименований, в том числе 160 иностранных.

Личный вклад соискателя.

Диссертационное исследование выполнено автором в процессе обучения в аспирантуре и работе в компании ООО «Ликвифорс» в период с 2021 по 2023 гг.

Планирование и разработка программы производственных опытов выполнены совместно с руководством компании ООО «Ликвифорс». Автор принимал личное участие в проведении агроэкологического анализа территории, почвенно-ландшафтного картографирования, закладке производственного опыта, проведению части сопутствующих наблюдений, анализе и обобщению результатов исследований, представленных в диссертации.

Благодарности.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, и.о. заведующего кафедрой почвоведения, геологии и ландшафтоведения ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, к.с.-х.-н, доценту Ефимову Олегу Евгеньевичу за ценные рекомендации, профессиональное руководство и всестороннюю поддержку на всех этапах выполнения диссертационного исследования.

Особая благодарность компании ООО "ЛиквиФорс" и всем её сотрудникам, за время работы в которой, был получен уникальный опыт и знания, легшие в основу этой работы. Отдельно хочу поблагодарить Директора компании Кирюшина Сергея Валерьевича за бесценные советы, поддержку, практическую помощь и доверие, а также предоставленную возможность проводить исследования.

Автор выражает благодарность и.о. директора института Агробиотехнологии, д.с.-х.н. А.В. Шитиковой, и.о. заведующего кафедрой агрономической, биологической химии и радиологии, д.с.-х.н., профессору Налиухину А.Н., д.б.н., профессору Серегиной И.И., д.б.н., профессору Мазирову М.А., д.с.-х.н., профессору Савоськиной О.А. за бесценную помощь, научные консультации и всестороннее содействие, а также своей семье, родным и друзьям за поддержку, понимание и веру в период выполнения диссертационной работы.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Современные представления об оценке земель, понятие агроландшафта, исторические аспекты

Термин "агроландшафт" в своем современном виде представляет собой синтез двух категорий — термина "агро", - как области сельского хозяйства, и "ландшафт", то есть совокупности природных элементов, таких как рельеф, почвы, климат и водные ресурсы. Концепция агроландшафта отражает комплексное взаимодействие между природными ресурсами и хозяйственной деятельностью человека, особенно в сельскохозяйственной сфере (Yuanyuan et al., 2014).

Идеи, касающиеся взаимосвязи человека с природной средой, можно проследить ещё с античных времен. В античной философии, например у Аристотеля и Платона, наблюдались взаимосвязи влияния природных условий на благосостояние общества и его развитие. Платон в своих трудах упоминал о необходимости бережного отношения к земле и природным ресурсам, отмечая важность климатических и топографических особенностей в определении возможностей для земледелия (Bunch et al., 1999).

В период Просвещения философы, такие как Жан-Жак Руссо и Джон Локк, уделяли внимание земле как источнику богатства и ресурсов, рассматривая её как основу для формирования социальных институтов и политической системы. Оценка земельных ресурсов в этот период приобретала экономическое значение, а развитие науки о почвах (почвоведение) постепенно выходило на первый план (Altieri, 1995).

В XIX веке, с развитием капитализма, земля становилась важным экономическим активом. Агроландшафт начал рассматриваться через призму рыночных отношений. Земельная рента и экономическая оценка земельных угодий стали ключевыми категориями, на основе которых определялась стоимость земли. Английский экономист Дэвид Рикардо, классик политической экономии, ввел концепцию дифференциальной ренты, что подчеркивало разницу в

продуктивности земель в зависимости от их природных характеристик (Chambers et al., 1989; Uphoff, 1998)

Классики социалистической теории, такие как Карл Маркс и Фридрих Энгельс, уделяли большое внимание земельным вопросам, особенно в контексте аграрных отношений. Маркс рассматривал землю как один из факторов производства, наряду с трудом и капиталом, подчеркивая, что природные ресурсы и их распределение играют ключевую роль в классовой борьбе. Он указывал на неравномерное распределение земельных ресурсов в капиталистических обществах и роль земли в эксплуатации рабочего класса. Однако, в отличие от коммунистической идеологии, Маркс сосредотачивался на экономических аспектах, таких как рентабельность и производство (Pretty et al., 2001).

В XX и XXI веках термин "агроландшафт" приобретает более специализированное значение благодаря трудам таких ученых, как Кирюшин В.И. Агроландшафты стали рассматриваться как системы, включающие природные и антропогенные элементы, где важную роль играют устойчивость экосистем и рациональное использование ресурсов (Кирюшин, 2005, 2010).

В работах В.И. Кирюшина (2005, 2020) агроландшафты оцениваются с точки зрения их экологической устойчивости и оптимизации агропроизводственных процессов, вводя понятия, связанные с адаптацией сельскохозяйственных практик к природным условиям. Рассматриваются вопросы сохранения почв, водных ресурсов и биоразнообразия в условиях интенсивного использования агроландшафтов. Современные исследования акцентируют внимание на необходимости баланса между продуктивностью агроландшафта и его экологической функцией, включая борьбу с деградацией почв и изменением климата.

Концепция агроландшафта претерпела значительные изменения от античных философских размышлений о взаимодействии человека с природой до современных научных подходов к управлению и оценке сельскохозяйственных ландшафтов.

Как отмечают в своей работе Yuanyuan (2014) за последние столетия антропогенное воздействие на ландшафт чрезвычайно возросло как по уровню интенсивности, так и по масштабам, в основном за счет расширения площадей земель, используемых в целях сельского хозяйства, что стало самым значительным историческим изменением почвенно-растительного покрова в биосфере (de Sherbinin, 2002; Schneider, 2007). В этом контексте планирование рационального землепользования приобретает все большее значение (Кирюшин, 2011, 2020). Большинство агроландшафтов, формирующихся с течением времени в процессе, связывающем человеческие потребности с природными ресурсами в конкретном топографическом и пространственном окружении, обладают рядом уникальных особенностей, что позволяет производить их классификацию с точки зрения природопользования (Кирюшин, 2020).

Техногенное воздействие оставило определенный отпечаток на природных ландшафтах и экосистемах, а некоторые следы остаются заметными на протяжении тысячелетий. Таким образом, нынешняя структура и особенности почвенно-растительного покрова являются частью наследия прошлого, и анализ исторических изменений землепользования, и исторической оценки изменения свойств почв и структуры покрова, необходимы для понимания текущей динамики взаимодействия человека и окружающей среды и прогнозирования развития всех будущих изменений в землепользовании (Marcucci, 2000; Foster et al., 2003; DeFries et al., 2004).

Исторически основы оценки земель, с точки зрения ее продуктивности, были заложены в Тимирязевской академии В.Р. Вильямсом. Рассматривая почвоведение как основу земледелия, он утверждал, что единство науки и практики характеризуются единой целью: «*выявлением условий непрерывного и беспредельного повышения урожаев сельскохозяйственных культур*» (Кауричев, 2003). Как отмечено в работе В.И. Кирюшина (2014) В.Р. Вильямс внес значительную роль в развитие агрономического почвоведения, его работы стали во многом основой для дальнейшей методической разработки методик оценки земель

(Кирюшин, 2005), бонитировки почв, оценки агроклиматического потенциала (Карманов, 2012) и отмечалась многими выдающимися учеными.

Несмотря на то, что на протяжении всей истории человечества люди использовали широкий спектр технологий и методов, которые сегодня мы бы назвали устойчивыми, только в последние десятилетия понятия, связанные с устойчивым развитием (стратегиями устойчивого развития), вошли в обыденный обиход. Озабоченность этим вопросом начала развиваться в 1960-х годах, и особенно сильно она была вызвана работой Рейчел Карсон (Bignall et al., 1996). Как и другие популярные и научные исследования того времени, работа была посвящена оценке уровня деградации земельных угодий и оценке вреда наносимого в следствии техногенного воздействия на естественные экосистемы.

В 1970-х годах были определены основные экономические проблемы, с которыми столкнется общество в случае чрезмерного использования, истощения или нанесения ущерба экологическим ресурсам, в частности, почвам. В 1980-х годах Всемирная комиссия по окружающей среде и развитию под председательством Гру Харлем Брундтланд опубликовала работу - «Наше общее будущее», ставшую первой серьезной попыткой увязать борьбу с бедностью с управлением природными ресурсами и состоянием окружающей среды. Устойчивое развитие было определено как «удовлетворение потребностей настоящего времени без ущерба для способности будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности». Эта концепция подразумевает как пределы роста, так и идею различных моделей роста (Brethour et al., 2001).

Под руководством академика А.И. Бараева (1975) в 1985 году на территории Казахстана была развернута кампания по разработке интенсивных технологий ведения сельского хозяйства, по модели западных стран. К этому времени мировая агротехнологическая революция, начало которой было заложено в 40-50-ых годах XX века в Южной Америке, благодаря созданию интенсивных сортов пшеницы, неуклонно нарастала.

К концу XX века экологическая ситуация в мире значительно осложнилась как из-за издержек интенсификации сельского хозяйства в виде загрязнения

ландшафтов, так и в результате экстенсивного земледелия в виде истощения и деградации почв, не говоря уже о последствиях гидромелиорации и промышленной деятельности. Угроза глобальной экологической катастрофы побудила сменить природоохранную парадигму природопользования на биосферную, которая первоначально была представлена в виде концепции устойчивого развития, представленной в виде идеологии устойчивого развития на конференции ООН в 1992 году. В том же году постановлением сессии Российской сельскохозяйственной академии был определен курс на развитие Докучаевской методологии землепользования и создание устойчивых сельскохозяйственных ландшафтов. Этот призыв сразу же вызвал активный отклик в виде ряда концепций, возникших в результате переосмысления и развития зональных систем земледелия: «адаптивное растениеводство» (Жученко, 2008-2009), «контурно-мелиоративное сельское хозяйство» (Каштанов, 1992), «эколого-ландшафтное сельское хозяйство» (Лопырев, 1995), «адаптивно-ландшафтное сельское хозяйство» (Кирюшин, 2011) и ряд других, отражающих различные аспекты сельского хозяйства.

Методология адаптивно-ландшафтного земледелия основана на результатах многолетних полевых экспериментов в различных ландшафтах лесостепной и степной зон Сибири и Казахстана, получила наиболее полное развитие (Кирюшин, 2011).

Как ранее уже было отмечено, в 1992 году в Рио-де-Жанейро состоялась Конференция ООН по окружающей среде и развитию. Основным соглашением стала Повестка дня на XXI век - документ из 41 главы, определяющий приоритеты и практические действия во всех экономических и социальных секторах, а также то, как они должны соотноситься с окружающей средой (Кирюшин, 2018). Были согласованы принципы устойчивых форм сельского хозяйства, способствующих минимизации вреда для окружающей среды и здоровья человека (Bunch et al., 1999).

После саммита в Рио-де-Жанейро был принят ряд важных положений, которые в глобальном масштабе оказали влияние на сельское хозяйство:

1. Подписание Конвенции о биоразнообразии в 1995 году.

2.Создание в 1995 году Глобального фонда ИПМ ООН, который обеспечивает международное руководство и техническую помощь в области интегрированной борьбы с вредителями.

3. Подписание Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях в 2001 году, что позволило решить проблему некоторых пестицидов.

Концепция сельскохозяйственной устойчивости выросла из первоначального фокуса на экологических аспектах и стала включать в себя сначала экономические, а затем более широкие социальные и политические аспекты (Foster et al., 2003; Cernea, 1999).

На сегодняшний день теория оценки земель сформировала основные концепции, в основе которых лежит не агрономическая, а биосферная парадигма (Кирюшин, 2015). Процесс перехода от первой ко второй был обусловлен развитием теорий и представлений В.И. Вернадского, изложенных в его поздних трудах. С позиций новой биосферной парадигмы пересмотрены базовые понятия рационального природопользования, которые ранее отражали в основном потребительский характер.

Существующее понятие земля в рамках землеустроительного проектирования и кадастровой оценки несет в себе несколько иной смысл нежели в рамках концепции эко-биофизической (Кирюшин, 2015). Земля – это поверхность суши, природный ресурс, характеризующийся пространством, рельефом, почвенным покровом, растительностью, недрами, водами, а также объект социально-экономических отношений, являющийся главным средством производства в сельском хозяйстве и пространственным базисом размещения и развития всех отраслей народного хозяйства.

Между тем с позиций изменившейся парадигмы природопользования с точки зрения агроэкологического подхода к оценке земель и экологических факторов, под понятием земля понимают: природно-территориальный комплекс, характеризующийся определенными экологическими и социально-экономическими условиями (геологическими, климатическими, литологическими, биоценотическими, социально-инфраструктурными) выполняющими различные

функции: экологические, хозяйственные, социально-экономические и др (Кирюшин, 2011).

В настоящее время, снижение плодородия почв, низкий уровень доступных элементов минерального питания, неадекватные стратегии управления производством, а также отсутствие генотипов растений, обладающих высокой устойчивостью к дефициту питательных веществ, являются факторами, дестабилизирующими продовольственную безопасность и обуславливающими проявление деградации агроэкосистем (Кирюшин, 2011).

В целом, исследования в области питания растений могут предоставить очень ценную информацию, которая может быть использована для устранения вышеупомянутых ограничений, и, таким образом, может привести к повышению устойчивости продовольственной безопасности без ущерба для окружающей среды. Тот факт, что по крайней мере около 60% обрабатываемых почв характеризуются наличием проблем, ограничивающих рост растений связанных с дефицитом элементов минерального питания, повышение эффективности использования удобрения - одно из основных перспективных направлений для удовлетворения глобального спроса на производство (Loneragan, 1977; Cakmak, 2002; White et al., 2010).

Прогнозируемый высокий рост мирового потребления удобрений (ФАО, 2018), достигающий 200 или даже 300 млн. тонн в 2020 году, вызывает озабоченность из-за низкой эффективности использования макро- и микроэлементов и нерационального управления почвой. Анализ баланса NPK и микроэлементов на различных уровнях, получил широкое распространение в качестве инструмента для перехода к более устойчивому сельскому хозяйству.

Общепринятые методы оценки плодородия почвы, подходы к исследованию и применению удобрений могут оказаться недостаточными для достижения требуемого повышения эффективности, поскольку они либо слишком общие, либо слишком эмпиричны. Оценка интенсивных систем производства зерна в США и Азии выявила следующие основные проблемы: урожайность на фермах в настоящее время составляет от 40 до 65% от достижимого потенциала

урожайности, и реализуемые системы земледелия в основном опираются на подходы, которые не учитывают динамическую природу реакции сельскохозяйственных культур на окружающую среду (агроэкологические условия). Поэтому необходимо использовать комплексные подходы, основанные на междисциплинарных исследованиях (химия почвы, физиология растений, агрохимия, почвоведение, молекулярная биология и информационные технологии) для разработки систем земледелия и управления, повышения рентабельности, сохранения качества почвы и защите природных ресурсов (Cassman et al., 2020).

Задачей и вызовом является разработка новых стратегий для более точных систем управления элементами минерального питания, включая, научно обоснованные принципы и эффективные инструменты для конкретных агроэкосистем и условий. Исследования по диагностике и оптимизации минерального питания растений, проведение оценки качества и бонитировке земель, учете агроклиматического потенциала, проведенные в 1950-2005 гг., привели к разработке комплексного метода Агроэкологической оценки земель и проектирования агроландшафтов (Кирюшин, 2005).

Агроэкологический подход можно охарактеризовать как точную стратегию управления производством на конкретном участке, в основном учитывая потребности растений в агроэкологических факторах (свет, влага, питание и т.д.) Следует подчеркнуть, что разработка точных методов внесения удобрений для управления сельскохозяйственными культурами в зависимости от конкретного участка рассматривается как одна из важнейших задач в XXI веке.

Основной принцип агроэкологического подхода заключается в том, что все основные факторы, влияющие на рост и развитие растений, являются взаимосвязаны, одинаково важны и необходимы. Влажность, температура, свет и физико-химические свойства почв влияют как на доступность NPK в почве и их поглощение, так и на их накопление в растении. Поэтому оптимизация одного из этих факторов, например, минерального питания, без нормализации других условий окружающей среды и агротехнических мероприятий, все равно может

привести к ограничению роста и урожайности сельскохозяйственных культур (Reynolds et al., 2009).

1.2 Характеристика современных подходов к проектированию агроландшафтов и разработке агротехнологий

Проектирование агроландшафтов и разработка агротехнологий это сравнительно новое направление в агрономической науке и практике, которое основывается на целостном подходе к использованию сельскохозяйственных земель. Оно включает в себя ряд экологических, социальных и экономических аспектов для создания устойчивых, продуктивных и сбалансированных агроландшафтов (Кирюшин, 2020). Исторически агроландшафты развивались стихийно, и управление ими сводилось к простой оценке земель для их максимальной сельскохозяйственной продуктивности. С ростом населения и развитием аграрных технологий в 19 веке, возникла необходимость в систематическом подходе к управлению агроландшафтами. В эпоху индустриализации и капитализма земля стала рассматриваться не только как источник пищи, но и как важный экономический ресурс, который необходимо было эффективно распределять для увеличения производительности сельского хозяйства. Оценка земель в этот период включала такие факторы как плодородие почвы, водные ресурсы и возможности механизации (Kravchenko et al., 2000).

Сегодня проектирование агроландшафтов продиктовано необходимостью устойчивого использования земель, которое учитывает как продуктивность, так и экологические аспекты. Изменение климата, деградация почв, утрата биоразнообразия и повышение спроса на продовольствие подталкивают учёных и землепользователей к интеграции экологических принципов в сельскохозяйственное производство (Кирюшин, 2020).

Исторически оценка земельных ресурсов включала сбор данных о плодородии почв, климатических условиях и водных ресурсах, что позволяло определить их пригодность для определённых культур и технологий обработки

(Spomer et al., 1982). Этот подход не учитывал долгосрочные последствия интенсивного земледелия для экосистем. В работе Jones (1989) авторы впервые указали на то, что происходит смещение от простой оценки земель в сторону проектирования агроландшафтов с учётом экологических, экономических и социальных факторов.

В работе В.И. Кирюшина (2005) – предложена концепция, основанная на разработке адаптивных систем земледелия, где в основу всего заложена типизация земель по категориям, с последующим внедрением соответствующих агротехнологий. Аналогичной концепции придерживались авторы (Васенев и др., 2004). В большей степени они сделали акцент на моделировании продукционного процесса и прогнозировании урожайности по основным факторам, обеспечивающим продуктивность растений в агроландшафтах.

Рисунок 1 – Агроэкологическая типизация земель (Кирюшин, 2005)

Проектирование агроландшафтов основывается на принципах ландшафтного планирования, которые включают в себя:

- Определение зон устойчивого и интенсивного сельского хозяйства;
- Сохранение природных экосистем и биоразнообразия;
- Интеграцию сельскохозяйственных территорий с природными и водными ресурсами;
- Управление ландшафтом с целью минимизации негативных последствий изменения климата и деградации почв.

1. **Экологические факторы**:

- Почвенные и водные ресурсы: плодородие, эрозия, засоление, дренаж.

- Климатические условия: температура, осадки, опасные агроклиматические явления (засухи, наводнения).

- Биоразнообразие: необходимость сохранения природных экосистем и видов, интеграция природных зон в агроландшафты.

2. **Экономические факторы**:

- Продуктивность: потенциал земель для различных культур и их рентабельность.

- Инвестиции: затраты на создание и поддержание устойчивых агроландшафтов, включая инфраструктуру и технологии.

- Рыночные условия: спрос на сельскохозяйственные продукты, цены на рынке и доступ к технологиям.

3. **Социальные факторы**:

- Социальные потребности местного населения, включая продовольственную безопасность.

- Традиционные знания и опыт земледелия, которые могут быть полезны при проектировании устойчивых агроландшафтов.

- Вовлечённость местных сообществ в процессы управления агроландшафтами.

Проектирование агроландшафтов представляет собой важный шаг к устойчивому сельскому хозяйству, которое учитывает как экономические интересы сельхозпроизводителей, так и экологические потребности общества. Переход от оценки земель к проектированию открывает новые возможности для

рационального использования природных ресурсов и поддержания биологического баланса в аграрных регионах (Jones et al., 1989).

По мнению, выраженному в работах (Roe et al., 2019; Cassman et al., 2020), сельское хозяйство должно быстро и радикально измениться, чтобы устойчиво удовлетворять будущий спрос на продовольствие. Согласно прогнозам, спрос на продовольствие увеличится на 50% к 2050 году, поэтому необходимо значительно повысить производительность и эффективность производства, разработать базис для внедрения интенсивных и высоких агротехнологий, обеспечить их внедрение в производство (Кирюшин, 2020). Однако рост производительности должен быть согласован с экологическими рисками поскольку интенсивное сельское хозяйство уже оказывает радикальное воздействие на функционирование экосистем за счет изменения биогеохимического круговорота, выброса парниковых газов и резкой потери биоразнообразия при формировании агроландшафтов (Zhang, 2007; Steffen, 2015).

Агроэкология возникла как научная область, набор сельскохозяйственных практик и общественное движение, целью которого является целостное преобразование сельского хозяйства для решения вышеупомянутых проблем. Агроэкология использует экологические концепции и принципы для проектирования и управления агроландшафтами с целью оптимизации ресурсного потенциала биосферы (Altieri, 1995; Wezel et al., 2014). Агроэкология зародилась в первой половине двадцатого века как синтез направлений агрономии и экологии, изучая экологию и взаимодействия сельскохозяйственных культур, вредителей, болезней в полевых условиях, а также разрабатывая стратегии рационального применения средств защиты растений и удобрений для минимизации рисков нанесения вреда нативным экосистемам (Wezel et al., 2014; HLPE, 2019).

Из этих скромных истоков научная дисциплина агроэкология стала более широкой, междисциплинарной, и все более популярной (Wezel et al., 2014). В ответ на «зеленую революцию» в США и других развитых странах фермеры начали внедрять «агроэкологические практики», такие как мульчирование, покровные

культуры, более длинные и диверсифицированные севообороты (Silici, 2014; HLPE 2019).

С 1980-х годов агроэкология развивалась с целью создания альтернативы капиталоемкому, промышленному сельскому хозяйству с целью расширить возможности мелких фермеров (Altieri et al., 2021). Под понятием капиталоёмкости в первую очередь следует понимать высокие уровни интенсификации и химизации, высокие уровни техногенных нагрузок на агроландшафты с целью получения максимально возможной прибыли с единицы площади пашни (Кирюшин, 2005, 2020).

Современные агроэкологические движения охватывают разнообразные экологичные методы ведения сельского хозяйства такие как практика минимизации почвообработок (также и работе по системе no-till), использование покровных культур, диверсификация севооборотов или ведение практик органического сельского хозяйства (Pretty et al., 2018).

Однако агроэкология как направление также имеет прочные корни в самоопределении продовольственного суверенитета (Silici, 2014). Например*, Zero Budget Natural Farming* – это набор методов ведения сельского хозяйства и движение, охватывающее несколько миллионов гектар земельного фонда в Индии, которое нацелено на сокращение задолженности фермеров путем замены химических средств производства традиционными знаниями и экологическими процессами (Khadse et al., 2018).

В 2014 году Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (ФАО) признала агроэкологию как путь к целостному преобразованию продовольственных систем и активно продвигает агроэкологию в глобальных и национальных стратегиях развития сельского хозяйства (ФАО, 2018; HLPE, 2019). Хотя агроэкология в основном сосредоточена на выявлении устойчивых методов ведения сельского хозяйства на полевом уровне, эта дисциплина все чаще рассматривает многочисленные встроенные параметры, различные экологические и управленческие масштабы, на которых происходят процессы, от поля до ландшафта (Altieri, 1999; Duru et al., 2012). Это связано с тем,

что развитие многих экосистемных функций, обеспечивающих экосистемные услуги, необходимые в рамках агроэкологического подхода, таких как: опыление сельскохозяйственных культур, регулирование численности вредителей, эффективность использования минеральных удобрений и т.д., может регулироваться на уровне процессов, происходящих в масштабе единого ландшафта или агроландшафта (Tscharntke et al., 2005).

Фактически, акцент сместился на вопрос о перепроектировании сельскохозяйственных ландшафтов, с точки зрения более эффективного их использования в производстве. Как показывает практика, в большинстве случаев за счет нерационального использования наиболее продуктивных земель Краснодарского края ежегодно в нашей стране валовый сбор по зерновой кукурузе и сое остаются ниже на 20-25% в силу следующих наиболее распространённых причин:

- недополучения урожая за счет нерационального использования тепла и влаги;

- недополучения урожая за счет использования сортов и гибридов, не созданных под интенсивные технологии на землях с высоким агроэкологическим потенциалом;

- недополучения урожая за счет возделывания культур на землях с агроэкологическими ограничениями;

- недополучения урожая за счет нерациональной системы питания (Кирюшин, 2005, 2010, 2022; Васенев, 2004).

На рисунке 2, представленном в работе В.И. Кирюшина (2007), показаны условия, определяющие качество земель и их производительность.

Рисунок 2 – Условия, определяющие качество земель (Кирюшин, 2007)

В центре схемы выделяются агроэкологические условия, которые делятся на несколько категорий:

- Агроклиматические — факторы, связанные с климатом и его воздействием на сельское хозяйство.

- Геоморфологические — особенности рельефа, влияющие на формирование почвенного покрова.

- Почвенные — характеристики самих почв, их структура и свойства.

- Гидрогеологические — условия водного режима и подземных вод.

- Биоценотические — влияние растительности и экосистем на почвы.

Из почвенных условий выделяется структура почвенного покрова, которая может быть описана через сложность и контрастность. Далее, схема связывает эти условия с производственными факторами. Подразделение на технологические и социально-экономические аспекты показывает, как системы земледелия, выбор сортов, севооборот и другие агрономические практики влияют на показатели производительности земель, такие как: урожайность, качество продукции, удельные энергозатраты, экономическая эффективность и экологическая устойчивость агроландшафта. Эта схема подчеркивает сложные взаимосвязи

между природными условиями и агрономическими практиками, влияющими на качество земель и их производительность.

Вопрос рационального использования земельных ресурсов никогда не стоял так остро в политической и исследовательской повестке как на сегодняшний день (Landis, 2017). Рационализации природопользования можно достичь только совместными усилиями почвоведов, экологов, агрономов, агрохимиков и других специалистов области АПК, объединенных общей целью - запроектировать устойчивые и высокопродуктивные сельскохозяйственные ландшафты (Кирюшин, 2022; DeFries et al., 2004; Perfecto et al., 2010; Sayer, 2013; Bu¨rgi et al., 2017).

Для решения некоторых ключевых задач, таких как: предотвращение распространения болезней сельскохозяйственных культур, обеспечение устойчивости культур к патогенам и ограничение распространения видов вредителей, повышение эффективности использования минеральных удобрений, получение урожая высокого качества, основой является агроэкологическая оценка земель (Fabre et al., 2012).

Агроэкология и агроэкологическая оценка земель предполагает разработку систем, основанных на учете природных факторов, потенциально вносящих свой вклад в параметр урожайности и качества продукции с единицы площади пашни. Продвижение этого функционального метода оценки земель требует подхода, выходящего за границы рассмотрения конкретного поля, как минимальной структурной единицы, предполагая оперирование терминами агроэкологическая группа земель и категория земель в масштабах выходящих за рамки контуров полей (Кирюшин, 2005, 2020).

С момента своего появления как дисциплины агроэкология внесла вклад в развитие целостных и трансдисциплинарных подходов, направленных на выработку практических управленческих решений в масштабах ландшафта (Кирюшин, 2005; Naveh, 2007; Wu, 2013; Helfenstein et al., 2014; Gergel et al., 2017). Такие подходы привели к разработке алгоритмов и инструментов, которые в полной мере охватывают сложные экологические, экономические и социальные

взаимодействия, определяя принятие решений, направленных на максимальную экономическую эффективность и экологическую безопасность (Collins et al., 2011).

Агроландшафты и связанное с ними биоразнообразие состоят из видов и сортов сельскохозяйственных культур, каждый из которых сочетается с широким спектром потенциальных методов управления, создавая сложную мозаику ареалов обитания сельскохозяйственных культур. Агроландшафты особенно динамичны, и изменения в них происходят в гораздо более короткие сроки, чем в большинстве несельскохозяйственных ландшафтов.

Много различных выражений стало использоваться для обозначения большей устойчивости некоторых сельскохозяйственных систем по сравнению с преобладающими системами. К ним относятся: биодинамические, экологические, экологически чувствительные, экстенсивные, интенсивные, органические, высокие и др. системы управления и возделывания культур в производственных циклах (Кирюшин, 2005, 2020; Pretty, 1995; Conway, 1997; NRCS, 2012; McNeely et al., 2003; Clements et al., 2004; Thomasson et al., 2001; Gliessman, 2004, 2008).

Продолжаются активные споры о том, могут ли сельскохозяйственные системы, использующие некоторые из этих терминов, считаться устойчивыми по отношению к факторам окружающей среды и внутренним компонентам системы (Balfour, 1943; Lampkin et al., 1994; Altieri, 1995). При этом термин устойчивость агроэкосистемы следует понимать в двух частных аспектах:

- к первому следует отнести устойчивость внутренних свойств системы, ее статичность по отношению к процессам деградации, обусловленные внешним техногенным воздействием человека (Altieri, 1995; Pretty, 1995). К наиболее распространённым факторам деградации агроэкосистем относят процессы сокращение биоразнообразия, проявления эрозии и разрушения слоя почвы под действием экзогенных факторов, опустынивание территории, проявление процессов вторичного засоления и т.д. (Кирюшин, 2005);

- ко второму аспекту относится устойчивость агроэкосистемы к внешним факторам (неблагоприятные атмосферные явления, развитие болезней и вредителей). К системам с высоким уровнем устойчивости можно отнести те,

которые нацелены на улучшение использование экологических товаров и услуг, не нанося при этом ущерба экосистеме (Altieri, 1995; Pretty, 1995, 1998, 2005; Conway, 1997; Hinchliffe et al., 1999; NRCS, 2012; Li, 2001; Jackson et al., 2002; Tilman, 2002; McNeely et al., 2003; Swift, 2004; Tomich et al., 2004; Gliessman, 2004, 2008). Ключевыми принципами устойчивости по мнению McNeely (2003) являются:

1. интегрирование биологических и экологических процессов: фиксация азота, аллелопатия, конкуренция, хищничество и паразитизм, в процессы производства продуктов питания;

2. свод к минимуму использования невозобновляемых ресурсов, которые наносят вред окружающей среде или здоровью потребителей;

3. продуктивное использование знаний и навыков с целью, повышения капитала хозяйств.

Однако в работах (Кирюшин, 2005, 2022) авторы отмечают несколько иной подход, где понятие устойчивой агроэкосистемы в большей степени связано с уровнем интенсификации хозяйств. При этом высокоинтенсивные технологии направленные на реализацию агроклиматического потенциала, с разработанными и обоснованными системами применения минеральных удобрений, где учитываются сроки, формы, способы и нормы их внесения, являются ключевым фактором устойчивости производства как в экономическом, так и в экологическом аспектах.

Рисунок 3 – Алгоритм комплексной оценки земель (Кирюшин, 2023)

Идея устойчивости сельского хозяйства не означает исключения каких-либо технологий или методов по идеологическим соображениям. Если технология работает на повышение производительности труда и не наносит чрезмерного вреда окружающей среде, то она, скорее всего, будет иметь определенные преимущества с точки зрения устойчивости (Pretty et al., 2001). Сельскохозяйственные системы, основанные на этих принципах, также имеют тенденцию быть многофункциональными в рамках ландшафтов и экономики (Rossiter, 1996).

Сельскохозяйственные системы с высоким уровнем социальных и человеческих активов более склонны к введению новых технологий в условиях неопределенности (Chambers et al., 1989; Uphoff, 1998; Bunch et al., 1999; Pretty et al., 2001). Это говорит о том, что путей достижения устойчивости сельского хозяйства может быть много, а также о том, что ни одна конфигурация технологий, средств производства и экологического менеджмента не может быть более широко применима, чем другая. Устойчивость сельского хозяйства подразумевает необходимость соответствия этих факторов конкретным условиям различных сельскохозяйственных систем.

В монографии И.И. Васенева (2004) были рассмотрены 11 систематических признаков для лучшей ориентации во всем множестве разрабатываемых моделей агроэкологической оценки почв и земель (ранее предложенных в работе Rossiter, 1996; Hoosbeek et al., 1992).

Таблица 1 – Рабочая систематика агроэкологических моделей оценки земель и землепользования (Васенев, 2004)

Критерии (оси координации)	Характер ранжирования	Число рангов
Пространственное варьирование объектов (для данной оценки)	существенно – не существенно	2
Основная концепция временной организации базы данных исходных характеристик почв	статическая – динамическая	2
Базовая временная концепция оценки пригодности земель	статическая – динамическая	2
Принципиальный алгоритм оценки (использование частных оценок функционального качества земель)	использование – не использование	2

Продолжение таблицы 1

Определение пригодности земель варианту использования	классы пригодности (согласно физическим и экономическим критериям оценки)	до 6
Степень однородности объекта анализа (земельного участка)	однородный – сложный	2
Масштаб объекта оценки	крупный – мелкий	непрерывный
Число объектов оценки	один – несколько	2
Детальность расчетов (оценки)	качественные – количественные	непрерывный
Детальность описания (модели анализа)	механистические – функциональные	непрерывный
Структурно-функциональная иерархия объекта оценки	педон – регион	непрерывный

* - непрерывный (*континуальный*) ряд параметров координации по данной оси.

Распространенное, хотя и ошибочное предположение об устойчивости сельского хозяйства заключается в том, что она подразумевает чистое сокращение использования производственных ресурсов, что делает такие системы, по сути, экстенсивными (им требуется больше земли для производства того же количества продовольствия) (Кирюшин, 2020).

Последние эмпирические данные показывают, что успешные инициативы и проекты по обеспечению устойчивости сельского хозяйства возникают в результате изменения факторов сельскохозяйственного производства (например, в ряду случаев переход, от использования удобрений к азотофиксирующим бобовым; от пестицидов к акценту на естественных врагов; от вспашки к нулевой обработке почвы) (Li, 2001; Jackson and Jackson, 2002; Tilman et al., 2002).

Более точной концепцией, чем экстенсивная, является концепция интенсификации - более эффективного использования существующих ресурсов (земель, воды, биоразнообразия) и технологий (Conway et al., 1991; Pretty et al., 2000; Buttel, 2003; Tegtmeier et al., 2004).

Важнейшим вопросом является «тип интенсификации». Интенсификация с использованием природных, социальных и человеческих капитальных активов в сочетании с применением наилучших доступных технологий и устойчивая интенсификация (лучшие генотипы и лучшее экологическое управление), которая

минимизирует или устраняет вред для окружающей среды, может быть названа «устойчивой интенсификацией» (Кирюшин, 2020).

1.3 Зональные особенности факторов ограничивающих продуктивность агроценозов

К основным категориям, ограничивающим продуктивность агроландшафтов прежде всего следует отнести факторы: климатические, литологические (совокупность свойств почвообразующих пород, почв и особенностей рельефа территории), а также биологические особенности возделываемых культур (Кирюшин, 2005, Маремуков, 2013). При этом генетический потенциал возделываемых сортов и гибридов во многих случаях играет ключевую роль для оценки продуктивности. Если гибрид и сорт не может эффективно использовать влагу или солнечную радиацию, в то время как эти факторы находятся в избытке, такое производство следует прежде всего считать малоэффективным (Кирюшин, 2005,2010,2022).

В работах российских ученых широко представлены результаты исследований по выявлению взаимосвязи продуктивности полевых культур с природными факторами (Кирюшин, 1996, 2000, 2024; Руднев, Васенев, 2003; Гусева, 2011).

Следует отметить, что аналогичные исследования проводятся в различных частях мира, пострадавших от антропогенной деградации почвенного покрова и изменения климата. В частности широко представлены результаты исследований ученых из Китая (Guo et al., 2022; Wang et al., 2022), Казахстана (Schierhorn et al., 2020), Германии (Sieling et al., 2022), Аргентины (Yadav et al., 2021) и многих других стран.

Современный период в истории климата Земли характеризуется неуклонным увеличением засушливости, связанной со значительным увеличением тепловых ресурсов при уменьшении количества осадков.

Такая динамика метеорологических параметров наблюдается практически повсеместно и сопровождается активизацией научных исследований, направленных на адаптацию к ним различных отраслей народного хозяйства и, прежде всего, сельского хозяйства (Аристархов, 2000).

Ретроспективный анализ активно практикуемых агротехнологий с агрессивной обработкой почвы показал, что интенсивное механическое воздействие на почву при вспашке, многочисленных культивациях, бороновании и других технологических приемах, сопровождающихся нарушением структуры почвы, приводит к образованию комковатых или пылеватых фракций, снижает ее влагоемкость, водопроницаемость и влагоудерживающую способность (Кирюшин, 2007, 2010, 2024) . Кроме того, как отмечено в работе Н.П. Масютенко (2016) и происходит усиленная минерализация органического вещества; возрастают риски деградации по мере проявления различных эрозионных процессов.

В результате такого технологического подхода обширные территории возделываемых земель степной зоны России, сегодня характеризуются наличием тренда снижения плодородия почв. Исследователи указывают на то, что содержание органического вещества в почвах агроландшафтов на 25-75% ниже по сравнению с целинными аналогами, не вовлеченными в пашню (Якушев, 2008; Прохоров, 2023, 2024). Ухудшение свойств почвы в сочетании с изменением климата сопровождается нестабильностью сельского хозяйства и формирует продовольственные, финансовые и социальные риски.

В связи с этим выявление природных и антропогенных факторов, ограничивающих высокую реализацию биологического потенциала полевых культур и дестабилизирующих производство зерна, является весьма актуальным для разработки адаптированных к агроэкологическим условиям агротехнологий, направленных на их оптимизацию.

Как известно, соответствие территории возделывания сельскохозяйственных культур их агроэкологическим требованиям во многом определяется ресурсами тепла и влаги. Они выражаются в виде среднегодовой температуры воздуха, суммы

активных температур более 10°С, количества годовых осадков и количества осадков периода активных температур (Куприянов, 2022).

Доступность этих ресурсов в течение вегетационного периода характеризует гидротермические условия территории и в отечественной науке чаще всего выражается гидротермическим коэффициентом Г.Т. Селянинова или ГТК.

Стремительное снижение плодородия почв при почвенно-интенсивной направленности агротехнологий, в основном ориентированных на безвозвратную эксплуатацию природных ресурсов, особенно на обработанных полях, характерных для южных регионов России, зачастую выступает не меньшим сдерживающим фактором высокой реализации биологического потенциала возделываемых культур, чем условия тепло- и влагообеспечения. В связи с этим, одновременно с анализом гидротермического состояния сельскохозяйственных угодий целесообразно проводить их оценку по биоклиматическому потенциалу. Расчет его величины и оценка полноты использования также имеют большое значение при разработке и совершенствовании зональных ресурсосберегающих систем земледелия.

В монографии (Васенев, 2004) представлен подход, в основе которого авторы вводят понятия лимитов плодородия, таким образом отмечая, что первый лимит плодородия обусловлен обеспеченностью растений солнечной активной радиацией или ФАР; в качестве второго лимита выделяют влагообеспеченность; в качестве третьего лимита – почвенную компоненту, которая представляет собой совокупность почвенных параметров, таких как гранулометрический состав и физико-химические свойства (pH, степень насыщенности основаниями, обеспеченность элементами минерального питания и т.д.).

Многие исследования показывают, что процент поглощения ФАР является параметром, наиболее сильно коррелирующим с уровнем урожайности (Hay et al., 1989). Факторы агроклиматической ресурсообеспеченности ФАР в Европейской части России играют важную роль в определении условий для ведения сельского хозяйства и зависят от зональных особенностей. Помимо ФАР среднегодовая температура и температура вегетационного периода и его длительность также

являются ключевыми факторами (Васенев, 2004). В южных регионах, таких как Краснодарский край, среднегодовая температура может превышать 10 °C, что обеспечивает длительный вегетационный период (210–240 дней) и высокие уровни поступления ФАР. В северных регионах, таких как Архангельская область, температура ниже 5 °C и короткий вегетационный период (120–150 дней) приводят к более низкому уровню использования ФАР. Количество и распределение осадков также являются критически важными параметрами для оценки уровня продуктивности земель. В регионах, где отмечается более высокое количество осадков (600–800 мм в год) уровень продуктивности на богарных землях существенно выше (Прохоров и др., 2024). С учетом глобальных изменений климата, наблюдается тенденция к увеличению температуры в северных регионах России (Радцевич и др., 2017). Увеличение среднемноголетних температур может расширить вегетационный период, однако изменение режима осадков может как положительно, так и отрицательно сказаться на продуктивности земель. Также факторы агроклиматической ресурсообеспеченности (теплом и влагой) в Европейской части России находятся в прямой зависимости от широты, что значительно влияет на продуктивность сельского хозяйства в различных регионах (Куприянов, 2022).

Традиционно для оценки агроклиматического потенциала (АП) и почвенно-экологического индекса (ПЭИ) по методике, предложенной в работе И.И. Карманова и Д.С. Булгакова (2012) следует учитывать такие почвенные характеристики как: максимально возможная плотность почв при их предельном уплотнении г/см^3, средняя плотность для метрового слоя г/см^3, гранулометрический состав. Среди агроклиматических параметров предложено оценивать: среднегодовую суму активных температур, коэффициент увлажнения (КУ) и коэффициент континентальности (КК) климата.

В работе В.И. Кирюшина (2020) также рассмотрена комплексная методология оценки земель сельскохозяйственного назначения, где автор указывает на несовершенство описанной выше методологии, которое связано с рядом допущений, касающихся почвенной компоненты ПЭИ. В рамках методики

агроэкологической оценки земель, предложенной Кирюшиным В.И., продуктивность агроландшафта во многих случаях определяется наличием ряда ограничивающих факторов, к которым относят: гидроморфизм, степень смытости и дефлированности, солонцеватость и т.д.

Разные типы почв, в зависимости от принадлежности к почвенным зонам, влияют на продуктивность земель, так как растения по-разному реагируют на агроэкологические факторы, обусловленные почвенной компонентой (Прохоров и др., 2024). При проведении почвенного картографирования агроландшафтов важно учитывать неоднородность структуры почвенного покрова и наличие агроэкологических ограничений, способствующих снижению продуктивности сельскохозяйственных культур (Антонова, 2014; Власенко, 2009; Волкова, 2013; Сорокина, Козлов, 2009). Зоны пониженной продуктивности формируются за счет отклика возделываемой культуры на внешние факторы, обусловленные экзогенными процессами (Shapovalov et al., 2019). При этом на естественные процессы почвообразования в агроландшафтах также могут накладываться и процессы агрогенной деградации (Фридланд, 1984). Каждый фактор (водная и ветровая эрозия, переувлажнение, засоление, переуплотнение, осолонцевание и др.) вносит существенный вклад в итоговую урожайность культур и среднюю продуктивность таких элементарных участков.

В работе T. Iizumi (2023) авторы, используя полевые экспериментальные данные и калиброванную модель сельскохозяйственных культур CYGMA, показали, что избыток почвенной влаги, связанный с обильными осадками, оказывает негативное влияние на урожайность гороха, даже в засушливых районах на участках с плохо дренируемыми почвами.

Интенсивность эрозии также напрямую влияет на уровень продуктивности агроландшафтов (Olson et al., 1999; Bakker, et al., 2004). В работе M.M. Bakker (2007) авторы количественно оценивали взаимосвязь между урожайностью сельскохозяйственных культур и проявлением процессов эрозии в Европейском регионе. Было установлено, что проявление эрозионных процессов существенно влияет на качество почв и агроэкологические условия роста растений (Lal R et al.,

2015; Dormaar et al., 1986). За счет смыва верхних горизонтов и уменьшения содержания органического вещества снижается водоудерживающая способность почв, закрепление элементов питания, сокращается мощность верхних горизонтов. Эти эффекты подтверждались в ходе экспериментов, проведенных на участках, путем сравнения урожайности на сильно эродированных участках с урожайностью на менее эродированных участках (Bramble-Brodahl et al., 1984; Busacca et al., 1984; White et al., 1985; Kosmas et al., 2001).

В работах (Olson et al., 1999; Bakker et al., 2004) авторы также приходят к выводам, что снижение урожайности можно объяснить уменьшением глубины залегания корневых систем и снижением содержания доступной для растений влаги. В то же время влияние эрозии на продуктивность земель зависит от мощности почвенного профиля. В своей работе M.L. Kazemi (1990) установил сильную взаимосвязь между мощностью гумусового горизонта и урожайностью сельскохозяйственных культур.

Независимо от методологии, большинство исследований подтвердили негативное влияние эрозии почвы на урожайность с широким диапазоном результатов (Den Biggelaar et al., 2001; Bakker et al., 2007). Обзор существующих исследований, проведённый M.M. Bakker (2004) показал, что в среднем, при потере 10 см почвы происходит снижение урожайности сельскохозяйственных культур более чем на 25%.

Наряду с эрозионными процессами, избыточное переувлажнение также негативно влияет на урожайность сельскохозяйственных культур. Продолжительный избыток влаги, когда поровое пространство почвы насыщено водой, является основным абиотическим фактором, вызывающим потери урожая (в особенности озимых культур). В основном это происходит из-за продолжительных дождей, интенсивного таяния снега, локальных западин или плохого дренажа почвы (Setter et al., 2003). В Канаде в 2015 году избыточная влажность почвы была признана основной проблемой для сельскохозяйственных культур в западных регионах (Cowie et al., 1996). Все полевые культуры чувствительны к

переувлажнению и снижению уровня содержания кислорода в почве (Jackson et al., 1984).

В результате переувлажнения снижается количество побегов и семян, их масса, урожайность при этом может снижаться на 10-50 % (Setter et al., 2003). Для сельскохозяйственных культур важен режим выпадения осадков, поскольку на разных стадиях развития потребность в воде может отличаться. Адаптация растений к заболачиванию изучена и наблюдается среди многих видов культур: фасоль (Evans et al., 1960) рис (Green et al., 1977) горчица (Greenwood et al., 1971) пшеница (Malik et al., 2001) и других растений. Адаптация к переувлажнению заключается в насыщении кислородом пораженных тканей, чтобы преодолеть гипоксию. Если растения не могут адаптироваться с высокой вероятностью они погибают (Setter et al., 2003).

Эрозионные, переувлажненные, солонцовые и засоленные земли представляют собой агроэкологические типы, на которых негативные почвенные процессы существенно ограничивают продуктивность сельскохозяйственных культур (Кирюшин, 1996).

Эрозионные земли подвержены водной и ветровой эрозии, что приводит к потере верхнего плодородного слоя, снижению содержания гумуса и питательных веществ. Это негативно сказывается на урожайности культур из-за ухудшения физико-химических свойств почвы. Рациональное использование этих земель требует применения почвозащитных технологий: контурного земледелия, полосного сева, лесомелиоративных насаждений (Кирюшин, 2010, 2024). Важную роль играет посев многолетних трав и внедрение минимальной обработки почвы, а также использование минеральных удобрений для восполнения питательных веществ.

Переувлажненные земли характеризуются избыточной влажностью, что затрудняет корневое дыхание растений и вызывает анаэробные процессы в почве. Это ограничивает доступность азота и фосфора (Кирюшин, 2019). Для повышения продуктивности таких земель необходимо проводить мероприятия по дренажу, использовать культуры, устойчивые к избыточной влаге, и вносить фосфорные

удобрения, улучшающие условия роста растений. Рекомендуется глубокая обработка почвы для улучшения аэрации (Кирюшин, 2006).

На солонцовых землях отмечается высокое содержание натрия в составе почвенного поглощающего комплекса, что приводит к ухудшению структуры почвы, снижению водопроницаемости и повышению pH. Урожайность культур на таких землях ограничивается физиологической токсичностью натрия и дефицитом кальция, избыточной плотностью и твердостью почвы.

Засоленные земли отличаются избыточным содержанием легкорастворимых солей, что приводит к повышению осмотического давления раствора и нарушению водного баланса растений. Урожайность ограничивается фитотоксичностью ионов: Na^{+}, Cl^{-} $SO4^{2-}$ $CO3^{-2}$ $HCO3^{-}$. Рациональное использование включает промывные мероприятия, использование специальных культур (солевыносливых сортов/гибридов), а также снижение уровня грунтовых вод с помощью дренажных систем (Кирюшин, 2011).

Для всех агроэкологических типов земель необходимо учитывать степень выраженности негативных процессов, их пространственную неоднородность и специфические ограничения. Дифференцированное применение удобрений и технологий позволяет минимизировать негативное влияние и повысить продуктивность сельскохозяйственных культур (Кирюшин, 2011; Смирнова, Нарожняя, 2012).

Таким образом, почва как часть агроландшафта представляет собой сложный природный ресурс, образующийся в результате взаимодействия множества факторов, среди которых основными являются компоненты «КРОП»: климат, растительность, организмы (биота) и почвообразующая порода. Эти компоненты определяют не только химический и физический состав почвы, но и её функциональные возможности (Когут, 2015).

Климат, включающий в себя температурные колебания и уровень осадков, оказывает значительное влияние на процессы выветривания, дренажа и уровня увлажнения почвы, что, в свою очередь, сказывается на её структуре и плодородии (Куприянов, 2023). Растительность, в свою очередь, разнообразна в своих видах и

способах взаимодействия с почвой. Различные типы растений вносят разнообразие в состав гумуса, минералов и микрофлоры, а их корневая система способствует структурированию почвы, её аэрации и улучшению водного режима. Биота, включая микроорганизмы и почвенных животных, играют ключевую роль в процессах разложения органического вещества, минерализации питательных веществ и улучшения структуры почвы, а также в создании каналов для воды и воздуха (Когут, 2015). Почвообразующая порода, формируя минеральный состав, определяет химические и физические свойства почвы, её структуру и способность удерживать воду и питательные вещества (Дронова, 2005). Рельеф, в свою очередь, влияет на направление и скорость стока воды, распределение почв и растительности, а также на устойчивость почвы к эрозии (Ермолаев, 2019).

Важнейшим фактором почвообразования является также время; процесс формирования почвы требует значительных временных промежутков, в течение которых компоненты КРОП взаимодействуют и приводят к образованию почвенного покрова. Таким образом, понятие почвы можно рассматривать как динамичную систему, представляющую собой взаимодействие климатических, растительных, органических и минеральных компонентов, что подчеркивает важность комплексного подхода к пониманию и управлению почвенными ресурсами (Buttel, 2003; Tegtmeier, 2004).

При этом почвы агроландшафтов очень изменчивы как пространственно, так и во времени (Хитров, 2023). Пространственно-временная неоднородность сельскохозяйственных почв влияет на производство и урожайность сельскохозяйственных культур (Jones et al., 1989; Kravchenko et al., 2000; Spomer et al., 1982). Степень изменчивости почвы варьирует от поля к полю в зависимости от различных влияющих факторов, таких как особенности рельефа, типовая принадлежность почвы и особенности системы землепользования. Тем не менее, традиционная сельскохозяйственная практика предусматривает единую норму высева и норму внесения удобрений и средств защиты растений, независимо от вариаций в пределах поля. Чаще всего эта норма не соответствует внутриполевой

изменчивости, когда на разных участках поля потенциал может быть выше или ниже в зависимости от комбинаций агроэкологических факторов.

Неравномерная плотность распределения растений приводит к нерациональному использованию элементов минерального питания и средств защиты растений. Чрезмерное применение удобрений также может негативно повлиять на почвенную биоту, нарушить водные экосистемы и в значительной степени загрязнить окружающую среду. Неоптимальное распределение ресурсов может привести к увеличению производственных затрат и снижению общей экономической отдачи (Subhani et al., 2014). Таким образом, недооценка неоднородности структуры почвенного покрова и распределения агроэкологических факторов, влияющих на рост и развитие растений, приводит к снижению эффективности производства, что может поставить под угрозу продовольственную безопасность, постоянно растущего населения в будущем (Кирюшин, 2020).

Для диверсификации производства и перехода к точным технологиям с учетом потенциала земель, необходимо проведение агроэкологической оценки территории и почвенно-ландшафтного картографирования, для выявления лимитирующих факторов, потенциально снижающих продуктивность агроландшафтов (Holmes et al., 2017).

При проведении почвенного картографирования агроландшафтов важно учитывать неоднородность структуры почвенного покрова и наличие агроэкологических ограничений, способствующих снижению продуктивности сельскохозяйственных культур (Власенко, 2009; Волкова, 2013; Сорокина, 2009). Каждый фактор (водная и ветровая эрозия, переувлажнение, засоление, переуплотнение, осолонцевание и др.) вносит существенный вклад в итоговую урожайность культур и среднюю продуктивность таких элементарных участков (Беленков, 2013).

Как было отмечено в работе И.Ю. Савина (2019), традиционное картографирование почв является трудоемкой и дорогостоящей процедурой, при

этом на картографирование накладывается условие “размывания” традиционного понятия масштаба почвенных карт.

Один из наиболее перспективных подходов к оценке пестроты почвенного покрова агроландшафтов ориентирован на анализ спутниковых снимков открытой поверхности почв (Прудникова, Савин, 2016). Спектральные характеристики открытой поверхности позволяют идентифицировать неоднородность и границы переходов почвенных контуров (Thomasson et al., 2001). Открытая поверхность почвы дает представление о формах структур почвенного покрова, но не предоставляет информацию о наличии агроэкологических ограничений и влиянии этой пестроты на урожайность сельскохозяйственных культур.

Широкий спектр параметров влияют на плодородие почвы и, как следствие, на рост и развитие культур. Таким образом, агроэкологические параметры и факторы прямым образом влияют на общую эффективность производства. Анализ с использованием множества факторов (линейная и нелинейная регрессия, факторные и кластерные модели анализа и т.д.) может представить плодородие почвы лучше, чем отдельно взятые факторы. Содержание подвижного азота (N), подвижного калия (K_2O), фосфора (P_2O_5), магния (Mg), показатель электропроводности (EAC), величина емкости катионного обмена (ЕКО), кислотность (pH), органическое вещество почвы или органический углерод ($C_{орг}$) считаются наиболее значимыми показателями, влияющими на плодородие почвы и продуктивность культур (Lee et al., 2009; Whetton et al., 2017).

Геоинформационная система (ГИС) наряду с геостатистическим анализом и последующим моделированием позволяет картировать изменчивость почв и культур в пределах элементарного участка. В зависимости от однородности ландшафта, внутри контуров каждого поля можно выделять зоны устойчивого плодородия, каждая из которых может характеризоваться различным потенциалом урожайности. Предполагается, что для каждой зоны должна быть определена унифицированная агротехнология, также рассчитаны нормы удобрений. При этом в рамках концепции АЛСЗ каждая такая элементарная зона обладает определенным

потенциалом урожайности в зависимости от наличия агроэкологических ограничений (Nawar et al., 2017).

Изначально система оценки качества земель в АЛСЗ представлялось как создание баз данных по основных агрохимическим показателям качества почв: уроню кислотности, содержанию подвижных форм фосфора и калия и т.д. Однако, спустя десятилетие, развитие информационных технологий позволило перевести формат баз данных Агро-Гис (Кирюшин, 2005) в набор различных параметров качества, в числе которых не только агрохимические показатели.

Среди всех доступных и потенциальных адаптивных технологий необходимо выбирать и интегрировать наиболее научно обоснованные и экономически жизнеспособные, чтобы улучшить внедрение и принятие проектов АЛСЗ и ускорить распространение технологии.

Оценка качества почвы в отдельных случаях может осуществляться с помощью индексов качества почвы (ИКП) (Прохоров, 2023), которые рассчитываются как функция отдельных или объединенных показателей качества (например, органическое вещество, N, P, K, pH, содержание глины и т.д.). Определение и количественная оценка ИКП может в значительной степени повлиять на успешное внедрение адаптивных технологий.

Плодородие почвы описывается как способность почвы обеспечивать растения необходимыми питательными веществами в процессе вегетации на всех фазах развития от посева до уборки (Watson et al., 2006). В ряде отдельных работ с параметром плодородия также связывают и обеспеченность растений водой в достаточном количестве и пропорциях для роста и развития, что обеспечивает устойчивое развитие и урожаи высокого качества. Доступность питательных веществ сильно зависит от физических свойств почвы, таких как гранулометрический состав, органическое вещество почвы, содержание влаги в почве, электропроводность температура и т.д. (Liu, Luo, 2011; Zheng et al., 2021).

Некоторые из вариаций свойств почвы усиливаются из-за техногенного воздействия, почвообработки и применении агрохимикатов (удобрений, навоза и ХСЗР) (Carvalho et al., 2003; Keesstra et al., 2016; Montzka et al., 2011). При

обработке почв меняется соотношение капиллярных и некапиллярных пор, изменяется как водоудерживающая способность и доступное для растений количество удерживаемой влаги, так и водопроницаемость и плотность сложения (Mohammadshirazi et al., 2017; Pires et al., 2017). Эти свойства напрямую взаимодействуют с динамикой доступных для растений питательных веществ и влияют на сдвиги в эмерджентной системе почва-растение-вода (Breland et al., 1996; Gomez et al., 2002; Lipiec et al., 1995; Mouazen et al., 2006; Rosolem et al., 2002; Tracy et al., 2008). Физические свойства почвы также напрямую связаны особенностями ландшафта, сильно зависят от крутизны и экспозиция склонов, кривизны ландшафтного профиля и его формы.

1.4 Оценка сельскохозяйственных культур на основе вегетационных индексов

С развитием дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий стали доступны новые инструменты, такие как вегетационные индексы (ВИ), космические снимки и данные о рельефе, полученные с помощью спутниковых миссий, например, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Полякова, Кутинов и др., 2019). Эти инструменты значительно расширили возможности картографирования ландшафтов и мониторинга растительности, повысив точность и скорость анализа.

Один из наиболее перспективных подходов к оценке пестроты почвенного покрова агроландшафтов ориентирован на анализ спутниковых снимков открытой поверхности почв (Thomasson et al., 2001). Открытая поверхность почвы дает представление о формах структур почвенного покрова, но не предоставляет информацию о наличии агроэкологических ограничений и влиянии этой пестроты на урожайность сельскохозяйственных культур. Оценка общего развития и состояния сельскохозяйственных культур не может быть выполнена непосредственно путем измерения морфологических признаков. Раннее обнаружение биотических и абиотических стрессов также необходимо для

снижения потерь урожая, повышения рентабельности и эффективности производства. Поэтому для мониторинга качества и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур неоднократно предлагались вегетационные индексы (ВИ) (Marino et al., 2014).

При анализе временного ряда снимков с вегетирующими растениями возможно получение информации о внутриполевой неоднородности и верификация контуров с наличием агроэкологических ограничений (Савин и др., 2015). В работе А.А. Прохорова (2024), было установлено, что в условиях предгорья Кавказа при среднем количестве осадков 876 мм среднемноголетний показатель NDVI рассчитанный по снимкам с вегетирующей озимой пшеницей был достоверно связан с величиной содержания физической глины (частиц <0.01 мм). Показатель NDVI во временном ряду в среднем закономерно снижался на более тяжелых почвах за счет проявления избыточного гидроморфизма.

Вегетационные индексы представляют собой математические комбинации нескольких спектральных диапазонов, в основном красного, зеленого и инфракрасного, и предназначены для поиска функциональных связей между характеристиками сельскохозяйственных культур и результатами наблюдений (Wiegand et al., 1989). Некоторые из наиболее часто используемых ВИ представлены в таблице 2, хотя было зарегистрировано более 160 ВИ для различных задач (Bannari et al., 1995).

Таблица 2 – Вегетационные индексы

Название вегетационного индекса	Ключевая ссылка
NDVI	Sellers (1985)
GNDVI	Ma et al. (1996)
RVI	Birth et al. (1968)
GVI	Birth et al. (1968)
SAVI	Huete (1988)
OSAVI	Rondeaux et al. (1996)
RENDVI и NDVI	Varco et al. (2013)
CI	Gitelson et al. (2003)

Анализ таблицы вегетационных индексов показывает различные методы оценки состояния растений, а также источники, на которые они ссылаются. Ниже приведены наиболее распространенные ВИ и дана их краткая характеристика:

Вегетационные индексы — это количественные параметры, которые используются для оценки состояния растительности, определения уровня вегетации и мониторинга изменений в экосистемах. Они рассчитываются на основе спектральных данных, полученных с помощью спутников или других дистанционных методов.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): это один из самых известных и широко используемых индексов, который рассчитывается как разность между инфракрасным и красным диапазонами. Он показывает уровень накопления зеленой биомассы в течении вегетации.

GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index): Похож на NDVI, но использует зеленый диапазон для улучшения чувствительности к состоянию листьев.

RVI (Ratio Vegetation Index): Рассчитывается как отношение красного и инфракрасного диапазонов, менее чувствителен к освещению.

GVI (Green Vegetation Index): Использует красный и зеленый диапазоны для оценки состояния растительности.

SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index): Учитывает влияние почвы на оценку вегетации, добавляя коэффициент L.

OSAVI (Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index): Модификация SAVI, которая также учитывает влияние почвы, но с оптимизированным коэффициентом.

RENDVI (Red-Edge NDVI): Разновидность NDVI, использующая данные в области красной границы для лучшего анализа состояния растительности.

CI (Chlorophyll Index): Оценивает уровень хлорофилла в растениях, что также указывает на их состояние.

AOLNDVI – индекс внутреполевой неоднородности характеризующий частоту встречаемости низких значений NDVI в контуре поля (Рухович, Трубников, 2022).

Каждый вегетационный индекс имеет свои особенности и применяется в зависимости от целей исследования. Например, NDVI широко используется для общих оценок состояния растительности, тогда как GNDVI может быть более чувствительным к состоянию растительности.

Исследования показывают, что индекс может быть улучшен за счет добавления коррекций, таких как SAVI и OSAVI, которые учитывают влияние почвы.

Для точной оценки урожайности необходимо грамотно выбрать оптимальный ВИ и/или их комбинации (Chlingaryan et al., 2018). ВИ должны измеряться непосредственно в период вегетации растений, хотя некоторые вегетационные индексы дифференцируют растительность на поверхности почвы, например, индекс вегетации с поправкой на почву (SAVI) (Huete, 1988).

Среди всех ВИ нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) (Sellers, 1985), вероятно, самый распространенный и используемый повсеместно. NDVI показал сильную корреляцию (при $R^2 = 0,85$) с индексом площади листьев (LAI) (Sankaran et al., 2015), который определяется как общая площадь листьев на единицу площади почвы.

На начальном этапе роста культур низкий LAI и рассеивание света почвой затрудняют спектральные измерения и выделение растительности на фоне почвы (Huete, 1988). Позднее, в период роста культур, высокие значения LAI могут привести к тому, что некоторые изменения ВИ будут нечувствительны к реакции культур. Тем не менее, NDVI может быть использован в качестве предиктора для расчета LAI (Pontailler et al., 2003) и прогнозирования урожайности (Pantazi et al., 2016).

Вегетационные индексы, космические снимки и данные о рельефе (SRTM) позволяют получить уникальные данные о поверхности Земли, которые используются для изучения растительности, почв и ландшафтов. Вегетационные индексы, такие как NDVI, EVI и SAVI, используются для оценки состояния растительности, что имеет прямую связь с характеристиками почв и ландшафта (Глейзер, 2006).

Исторические космические снимки и многовременные индексы NDVI могут быть использованы для подготовки проектов в ГИС перед проведением почвенно-ландшафтного картографирования территории. На их основе могут быть созданы карты продуктивности сельскохозяйственных земель, которые являются индикатором и отражают взаимосвязь почв и растительности. В зонах с постоянно низким значением NDVI могут наблюдаться различные лимитирующие факторы, влияющие на рост и развитие растений, такие как эрозия, переувлажнение и т.д.

Интеграция данных космических снимков, вегетационных индексов и анализа рельефа в геоинформационных системах позволяет оптимизировать и значительно повысить точность проведения почвенно-ландшафтного обследования. Современные геоинформационные системы (ГИС) предлагают инструменты для объединения и анализа этих данных, что дает возможность:

- учитывать взаимосвязь растительности, рельефа и почв;
- Создавать динамические модели, отражающие пространственно-временные изменения ландшафтов;
- Автоматизировать процесс классификации и визуализации данных.

Применение вегетационных индексов и данных дистанционного зондирования значительно повышает точность оценки состояния сельскохозяйственных культур и эффективности почвенно-ландшафтного картографирования. Эти инструменты позволяют изучать сложные взаимосвязи между растительностью, рельефом и почвами, создавать высокоточные карты и принимать обоснованные решения в области природопользования, сельского хозяйства и агроэкологической оценки земель.

1.5 Анализ аспектов разработки систем минерального питания в адаптивных системах земледелия

После роста цен на сельскохозяйственную продукцию значение интенсификации сельского хозяйства (ИСХ) возросло в связи с проблемами глобальной продовольственной безопасности (Buckwell, 2014). Впервые термин

«интенсификация» начал применяться в 1960-х годах, когда F. Dovring (1965) использовал данное понятие для объяснения более высоких уровней сельскохозяйственной производительности, связанных с более высокой энергоемкостью производства. Turner (2005) в своей работе определили ИСХ как количество продукции на единицу площади и в единицу времени. Однако, отметив, что данных о производстве мало, они разработали косвенную шкалу ИСХ на основе двух переменных факторов производства: частоты посевов и использования агротехнологий. В некоторых публикациях была предпринята попытка уточнить разницу между интенсификацией и интенсивностью сельского хозяйства, однако они по-прежнему взаимозаменяемы (Shriar, 2000; Kleijn et al., 2009).

На сегодняшний день, не существует однозначного определения для категории «интенсивность» сельского хозяйства. В целом под данным термином в интерпретации Кирюшина В.И. подразумевается соотношение вводимых и производимых ресурсов в системе, т.е. с точки зрения урожайности на единицу площади с учетом ед. затрат на эту площадь.

Аналогичного подхода придерживаются авторы работ (Turner, 2005; Herzog et al., 2006). В работе Teillard et al. (2012) в качестве альтернативы, интенсификация представляется как сумма различных категорий затрат на вводимые ресурсы и с учетом общей полезной площади сельскохозяйственных угодий.

Таким образом, для описания интенсивности сельского хозяйства можно использовать либо показатели, ориентированные на выпуск продукции (производство), либо показатели, ориентированные на ввод ресурсов (использование).

Во многих исследованиях, посвященных экологическим последствиям интенсивности сельского хозяйства, основное внимание уделяется какому-либо одному компоненту, например, уровню использования азота (Kleijn et al., 2009; Fumagalli et al., 2011; Omtzigt et al., 2014) или пестицидов (Jepson et al., 2014). Другие использовали косвенные показатели интенсивности сельского хозяйства, такие как урожайность или рентабельность (Caraveli, 2000; Stoate et al., 2009). Это также вызвало другие предположения, например, определение интенсификации

как замены неоднородности структуры фитоценозов во времени и пространстве на однородные агробиоценозы (Tscharntke et al., 2005) определили ее как преобразование сложных природных экосистем в упрощенные управляемые экосистемы с высоким уровнем использования ресурсов и, как правило, более высоким уровнем поступления и выхода продукции. В отличие от экстенсивных систем, агроценоз с использованием нормальных и интенсивных технологий способен производить большее количество продовольствия (Кирюшин, 2019; Foley, 2005).

Уровень интенсификации, по определению Кирюшина В.И., характеризует степень нагрузки на агроэкосистему в результате хозяйственной деятельности. Этот показатель отражает интенсивность использования ресурсов, технологий и средств производства для получения сельскохозяйственной продукции. Интенсификация может быть экстенсивной, когда увеличиваются площади обрабатываемых земель, или интенсивной, когда повышается продуктивность с единицы площади за счёт увеличения использования удобрений, мелиоративных мероприятий и технических средств (Кирюшин, 1996). В работах В. И. Кирюшина (2011, 2019) отмечено, что интенсификация может приводить к истощению почв, снижению их плодородия и ухудшению экологического состояния, если не применять рациональные подходы к управлению агроландшафтами. Важным критерием оценки уровня интенсификации является баланс между продуктивностью и устойчивостью агросистем, что подразумевает необходимость экологизации земледелия, использования органических и природоохранных технологий (Кирюшин, 1996).

Основные показатели для оценки интенсификации включают: энергетические затраты (ГДж/га), расход минеральных удобрений (кг/га), урожайность культур (ц/га), отношение прибыли к затратам (Кирюшин, 2011). Для устойчивой интенсификации В.И. Кирюшин предлагает подходы, включающие переход на минимальную обработку почвы, использование севооборотов, внедрение органического земледелия и биологических методов защиты растений (Кирюшин, 2011, 2019). Системы земледелия классифицируются по уровню

интенсификации в зависимости от степени использования ресурсов и технологий. Согласно концепции Кирюшина, выделяются экстенсивные, нормальные, интенсивные и высокие (точные) системы, каждая из которых обладает своими особенностями, преимуществами и ограничениями.

Экстенсивные системы характеризуются минимальным использованием удобрений и технологий, акцентом на естественные процессы и низкой урожайностью. Их преимущество — экологическая устойчивость, минимальное воздействие на окружающую среду. Однако такие системы ограничены в продуктивности и эффективности, что делает их менее адаптированными к современным вызовам.

Нормальные системы ориентированы на умеренное использование ресурсов. Они включают агротехнические мероприятия, такие как севообороты и внесение удобрений, что позволяет достичь средней урожайности. Достоинством таких систем является баланс между затратами и результатами, однако ограниченная интенсивность делает их зависимыми от климатических условий и технологического уровня.

Интенсивные системы связаны с активным использованием минеральных удобрений, высокопроизводительных технологий и современной агротехники. Они обеспечивают высокую урожайность и экономическую эффективность. Однако такие системы сопровождаются рисками деградации почв, снижением экологической устойчивости и требуют значительных финансовых вложений.

Высокие (точные) системы земледелия представляют собой вершину интенсификации, базируются на точном земледелии, агрохимическом мониторинге и применении ИТ-решений. Они обеспечивают максимальную продуктивность, рациональное использование ресурсов и минимальные потери. Однако их внедрение требует значительных инвестиций, а также высокого уровня подготовки специалистов и инфраструктуры (Иванов, Козубенко, 2018).

Экстенсивные системы выигрывают в экологической устойчивости, но уступают всем остальным по продуктивности. Нормальные системы обеспечивают стабильное среднее соотношение между затратами и результатами, но менее

эффективны в сравнении с интенсивными. Интенсивные и высокие системы отличаются максимальной урожайностью, но требуют более сложного управления и сопровождаются экологическими рисками.

Агроэкологическая оценка земель, предложенная в работе В.И. Кирюшина (2005, 2011), позволяет учитывать природные особенности различных типов земель для оптимизации их использования в системах земледелия. В нормальных и интенсивных системах земледелия рациональное внесение удобрений дифференцируют с учетом агроэкологических групп земель (плакорные, эрозионные, переувлажненные) и их потенциальной продуктивности.

Плакорные земли, характеризующиеся стабильными условиями увлажнения и высокой устойчивостью, рационально использовать для культур, требующих стабильного питания, таких как соя и кукуруза (Дроздова, 2016; Кануков, Баснев и др., 2015). В нормальных системах на этих землях целесообразно вносить органические удобрения и минеральные комплексы с повышенным содержанием азота, фосфора и калия. В интенсивных системах дополнительно применяют локальное внесение азотных удобрений и микроэлементов для повышения урожайности (Азаренко, 2009).

Эрозионные земли отличаются более высокой подверженностью водной и ветровой эрозии, что ограничивает их продуктивность и урожайность. В засушливые годы урожайность может снижаться на 15-50% (Кирюшин, 2011). В нормальных системах внесение удобрений должно акцентироваться на обеспечение оптимального фосфорно-калийного питания. В нормальных и интенсивных системах возможен дифференцированный подход с использованием биопрепаратов, гранулированных форм удобрений и жидких удобрений как комплексных (ЖКУ) так и азотных (КАС-32).

Переувлажненные земли, подверженные избыточному гидроморфизму, требуют специфического подхода. В нормальных системах акцент делается на дренажные мероприятия и внесение калийно-фосфорного питания для компенсации стрессов, вызванных анаэробным режимом (Iizumi et al., 2023). В интенсивных системах на таких землях предпочтительно использование

быстродействующих азотных соединений, например жидких форм азота и микроэлементов для поддержания продуктивности культур. Таким образом, в нормальных системах основной акцент направлен на стабильность и экологичность, тогда как интенсивные системы предполагают активное использование технологий для достижения максимальной продуктивности. Дифференцированный подход позволяет минимизировать затраты, повысить продуктивность земель и улучшить их экологическую устойчивость (Кирюшин, 2011).

Продолжающаяся индустриализация сельского хозяйства и недавняя глобализация сельскохозяйственных рынков оказывают давление на рентабельность фермерской деятельности в странах с плотностью населения выше среднего (Yuanyuan et al., 2014).

Деградация почв является одной из самых серьезных проблем продовольственной безопасности (Lal, 2015), угрозой, которая в значительной степени была вызвана интенсификацией сельскохозяйственной деятельности, включая: возделывание монокультур, чрезмерное использование удобрений и пестицидов, а также интенсивную обработку почвы.

Хотя эти способы и позволили удвоить урожайность с 1960 года (Ramankutty et al., 2018), это повлекло за собой ухудшение структуры почвы, истощение органического вещества, нарушение циклов элементов минерального питания, а также повышение темпов развития эрозии (Tilman et al., 2002). Деградация почв, используемых в сельском хозяйстве, приводит к ухудшению здоровья почв, определяемого как ограниченная (лимитированная) способность «функционировать как живая экосистема, которая поддерживает жизнь растений, животных и людей» (NRCS, 2012). Потеря (ухудшение) состояния почв - ключевая проблема долгосрочной стабильности глобальных продовольственных систем (Tilman et al., 2002). Чтобы предотвратить, или ослабить процесс деградации были предложены и испытаны несколько методов сохранения почвы в системах земледелия. Эти методы включают в себя: сокращение или отказ от почвообработки, сохранение растительных остатков на поверхности почвы,

использование покровных культур, а также использование органических удобрений. Среди этих методов, минимизация обработки почвы является наиболее изученной и продвигаемой во всем мире (Derpsch et al., 2010; Horowitz et al., 2010).

Несмотря на единую цель минимизации воздействия на почву, стратегии щадящей обработки почвы, как правило, различаются в традиционных и органических технологиях возделывания. В традиционных системах земледелия, основанных на использовании агрохимикатов, сокращение обработки почвы возможно за счет использования гербицидов и устойчивых к гербицидам сортов сельскохозяйственных культур (Derpsch et al., 2010).

В работе исследуя ряд свойств почв в системе производства кукурузы, разделенной на два варианта (минеральные и органические удобрения) и два вида обработки почвы (полная и нулевая обработка); через три месяца было установлено, что физико-химические параметры почвы не были чувствительны к этим краткосрочным методам управления, но биологические параметры, включая активность ферментов, дыхание и потенциально минерализуемый азот (N), были на 23-27% выше на участках с использованием органических удобрений и нулевой обработкой, чем на участках с полной обработкой и минеральными удобрениями. Долгосрочное влияние сокращения обработки на здоровье почвы в традиционных и органических системах не получило широкого распространения.

В монографии (Васенев, 2004) авторами дан обзор на региональную автоматизированную систему комплексного агроэкологического анализа земель. Данная модель разработана на основе алгоритмов и позволяет проводить редакцию вводимой информации. Это упрощает адаптацию модели к решению частных оценочных задач в новых условиях агроландшафта.

Хорошая совместимость программы со стандартными электронными базами данных облегчает ее использование для расчетов больших массивов региональной информации. Осуществляемая с помощью трансформации первичной почвенной информации в относительные агроэкологические оценки разнородных характеристик позволяет проводить их системный сравнительно-географический и

функционально-экологический анализ. Все это позволяет более детально и точно проектировать системы минерального питания в севооборотах.

Азотные удобрения при этом играют ключевую роль в современных системах земледелия, обеспечивая высокие урожаи и качество продукции. Адаптивно-ландшафтные системы земледелия (АЛСЗ) представляют собой современный подход к управлению сельскохозяйственными угодьями, который учитывает природные и ландшафтные особенности территории. Методология Кирюшина В.И. предлагает интеграцию агроэкологических принципов для оптимизации использования ресурсов и повышения устойчивости агроэкосистем (Гамзиков, 2018).

Как уже было отмечено ранее, Методология Кирюшина В.И. основана на системном подходе к управлению агроэкосистемами, учитывающем природно-ландшафтные условия и их взаимодействие с сельскохозяйственными практиками. Основные принципы методологии для повышения эффективности производства включают:

- Агроэкологическую адаптацию: учет природных условий и особенностей ландшафта при выборе сельскохозяйственных культур и технологий их возделывания.
- Дифференцированный подход к применению удобрений: применение удобрений с учетом местных условий почвенного плодородия и потребностей культур.
- Мониторинг и оценка: постоянный мониторинг состояния агроэкосистем и оценка эффективности применяемых мер.

Азот при этом является важнейшим элементом для роста растений, обеспечивая синтез белков и хлорофилла. Применение азотных удобрений в АЛСЗ позволяет достигать высокой урожайности при минимальных затратах ресурсов и снижении негативного воздействия на окружающую среду (Бобренко, 2014).

Исследования на зерновых культурах показали, что применение азотных удобрений на фоне агроэкологической адаптации позволяет увеличить урожайность зерновых на 20-30% (Гамзиков, 2018).

Для достижения максимальной эффективности азотных удобрений важно учитывать следующие факторы: типы почв и их состояние, рельеф и климатические условия.

Виды сельскохозяйственных культур: Адаптация схем удобрения в зависимости от биологических особенностей культур.

Методология Кирюшина В.И. предлагает использовать подход, включающий расчет дозы удобрений на основе агроэкологических групп земель, почвенных анализов и биологической потребности культур.

Применение азотных удобрений в АЛСЗ позволяет не только увеличить урожайность, но и способствует устойчивому развитию сельского хозяйства. Основные преимущества включают:

- Экономия ресурсов: оптимизация использования удобрений и снижение затрат.
- Снижение негативного воздействия на окружающую среду: снижение вымывания азота и уменьшение загрязнения водоемов.
- Устойчивое производство: поддержание плодородия почв и устойчивое управление агроэкосистемами (Кирюшин, 2011).

Эффективное использование азотных удобрений в адаптивно-ландшафтных системах земледелия на основе методологии Кирюшина В.И. позволяет достичь высокой урожайности, экономии ресурсов и устойчивого развития сельского хозяйства. Внедрение дифференцированного подхода к удобрению и постоянного мониторинга состояния агроэкосистем обеспечивает оптимальные условия для роста и развития сельскохозяйственных культур (Кирюшин, 1996, 2024).

Фосфор в свою очередь является ключевым элементом для энергообеспечения процессов роста и развития растений. Введение фосфорных удобрений в АЛСЗ позволяет достичь высокой продуктивности сельскохозяйственных культур, обеспечивая необходимое питание и стимулируя рост корневой системы. Применение фосфорных удобрений на зерновых культурах в условиях АЛСЗ позволяет увеличить урожайность на 15-25% (Гамзиков, 2018).

Применение фосфорных удобрений должно быть оптимизировано с учетом содержания доступного фосфора в почвах и их потребности в удобрении, климатических условий, влияющих на доступность фосфора для растений, и биологических особенностей культур. Расчет дозы фосфорных удобрений включает анализ почвы, определение потребности культур в фосфоре и корректировку дозы с учетом агроэкологических факторов.

Калий является ключевым элементом для регулирования водного баланса, синтеза белков и углеводов, а также для повышения устойчивости растений к стрессам. Введение калийных удобрений в АЛСЗ позволяет достичь высокой продуктивности сельскохозяйственных культур, обеспечивая необходимое питание и улучшая физиологические процессы в растениях. Применение калийных удобрений на зерновых культурах в условиях АЛСЗ позволяет увеличить урожайность на 10-20% (Кидин, 2016; Ягодин, 1989; Гамзиков, 2018).

Таким образом агроэкологический подход предполагает интеграцию различных факторов, влияющих на эффективность применения удобрений (Кирюшин, 2005; Васенев, 2004). В отличие от классической агрохимической парадигмы в рамках который часто расчёт норм основывается только на содержании питательных веществ в почве и потребностях растений, агроэкологический подход включает анализ природно-климатических условий, микроклиматических особенностей, рельефа местности и гидрологических характеристик. Такой комплексный учет позволяет более точно определять оптимальные дозы и сроки внесения удобрений, что способствует максимальному усвоению питательных веществ растениями и снижению их потерь.

Одним из ключевых преимуществ агроэкологического подхода является возможность дифференцированного внесения удобрений (Bunch et al., 1999). В зависимости от условий конкретного участка, типа почвы и состояния растений, дозы и виды удобрений могут варьироваться. Это позволяет минимизировать затраты на удобрения, избежать перенасыщения почвы питательными веществами и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Дифференцированное внесение удобрений способствует более рациональному использованию ресурсов и повышению экономической эффективности сельскохозяйственного производства. Агроэкологический подход направлен на снижение негативного воздействия сельского хозяйства на окружающую среду (Marcucci, 2000; Foster et al., 2003; DeFries et al., 2004). Применение удобрений с учетом природных и ландшафтных условий позволяет минимизировать вымывание питательных веществ в водоемы, предотвращая эвтрофикацию и загрязнение водных ресурсов. Кроме того, рациональное использование удобрений способствует поддержанию биологического разнообразия и улучшению структуры почв, что важно для устойчивости агроэкосистем.

Более точный расчет доз удобрений и их адаптация к конкретным условиям способствуют улучшению качества сельскохозяйственной продукции. Растения получают оптимальное количество питательных веществ, что отражается на их росте, развитии и устойчивости к болезням и стрессам. Оптимизация применения удобрений на основе агроэкологического подхода способствует значительному снижению затрат на их приобретение и внесение. Дифференцированное использование удобрений позволяет экономить ресурсы и повышать рентабельность сельскохозяйственного производства (Кирюшин, 2005).

Агроэкологический подход в применении удобрений представляет значительные преимущества по сравнению с классическими балансовыми методами. Комплексный учет природных и ландшафтных условий, дифференцированное внесение удобрений, снижение экологической нагрузки, улучшение качества продукции и экономическая эффективность делают агроэкологический подход более перспективным и устойчивым для современного сельского хозяйства. Применение методологии агроэкологической оценки позволяет достигать высоких результатов при минимальных затратах и негативном воздействии на окружающую среду, что является ключевым фактором в условиях нарастающего давления на природные ресурсы и изменения климата (Yuanyuan et al., 2014).

1.6 Методические основы применения жидких минеральных удобрений в агротехнологиях

Современное сельское хозяйство стоит перед необходимостью повышения урожайности культур, улучшения качества продукции и обеспечения устойчивого использования природных ресурсов. Одним из ключевых направлений в этой области стало применение жидких комплексных удобрений (ЖКУ), которые обеспечивают растения необходимыми элементами питания в легко усвояемой форме (Torres-Dorante et al., 2006). В отличие от жидких азотных удобрений, жидкие удобрения, содержащие два или более элементов питания, называют жидкими комплексными удобрениями (Янишевский, 1978; Колесникова, Марченко, Мочкова, 2008, 2015).

Существуют два вида ЖКУ, разделяемые в зависимости от формы используемого для их производства фосфора: ЖКУ на ортофосфорной кислоте и ЖКУ на основе полифосфата или суперфосфорной кислоты; последние представляют собой смесь орто- и полифосфорных кислот, ЖКУ могут быть прозрачными (истинные растворы) и суспензированными, т.е. содержащими в своем составе суспензирующие агенты (Шеуджен, 2006).

Как отмечает Ф.В. Янишевский (1978), промышленное производство ЖКУ впервые было начато в США в 1953 г. в Калифорнии (Lubkowski et al., 2016). Было произведено 22 тыс. т удобрений нескольких марок (10-20-0, 12-15-0, 17-7-0), что составило 9 % от всех комплексных удобрений, выпущенных в штате.

Популярность ЖКУ росла быстрыми темпами, особенно она увеличилась в последнее десятилетие. Производство ЖКУ налаживается во многих странах, в том числе в России. В последние годы особая популярность на рынке отводится марке NP 11:37 и КАС-32 (а также раствор КАС с серой NS-28:5).

Жидкие комплексные удобрения на основе ортофосфорной кислоты содержат моно- и диаммонийфосфаты и хлористый калий (Марголис, 1968). ЖКУ на суперфосфорной кислоте отличаются от ЖКУ на ортофосфате главным образом составом фосфорного компонента, который, в свою очередь, определяется базовым

раствором. Так, в удобрении 11-34-0 в среднем содержится около 50% ортоформы, 45-48% - пироформы, 2-5% - триполиформы. Типовой состав раствора 11-37-0: 27% - ортоформы, 42% - пироформы, 20% - триполиформы и 11% - высшие полифосфаты (Gelsinger et al., 1962).

По мнению Ф.В. Янишевского (1978) внедрять ЖКУ в сельскохозяйственное производство целесообразно в первую очередь в районах высокой интенсивности использования минеральных удобрений. Следует учитывать, что машины для внесения жидких удобрений работают более производительно, если средняя площадь одного поля (контура) более 20 га (Adams et al., 1961). При выборе культур необходимо учитывать особенности их систем удобрения. Жидкие удобрения, как эффективный инструмент управления питанием растений, требуют дифференцированного подхода в зависимости от уровня интенсификации агротехнологий и агроэкологических групп земель. В работе А.А. Прохорова и Куприянова А.Н. (2024) применение раствора 7:23:7 было сопоставимо с использованием гранулированной формы 10:26:26 на всех агроэкологических группах земель. Эффективное использование азота в агротехнологиях на землях с различной продуктивностью требует учета особенностей почвенных условий, структуры и режимов азотного питания.

На плакорных землях с высоким потенциалом продуктивности азотные удобрения играют ключевую роль в обеспечении максимального уровня урожайности. Их использование должно учитывать баланс с другими элементами питания, такими как фосфор и калий. Согласно исследованиям (Куликова и др., 2022), оптимальное внесение азота достигается при комбинированном использовании минеральных удобрений и сидератов, что также позволяет повысить уровень органического вещества.

На эрозионных землях эффективное применение азота затруднено из-за потерь, связанных с смывом верхнего слоя почвы, более низким содержанием продуктивной влаги. Здесь целесообразно использовать меньшие нормы азотных удобрений, особенно в засушливые годы, а также практиковать дозированное внесение, связанное с фазами роста культур, наиболее эффективно применение

жидких азотных удобрений через листовые подкормки для повышения усвоения (Савоськина и др., 2011).

Для переувлажненных земель характерны низкий уровень аэрации и риск денитрификации. Использование азота в виде нитратных удобрений на таких почвах может быть менее эффективно, чем применение аммонийных форм.

Дифференцированный подход к использованию азота, адаптированный к агроэкологическим особенностям земель, является важным элементом рационального земледелия, минимизируя потери питательных веществ и обеспечивая устойчивое производство (Кирюшин, 2011).

После азота внесение фосфорных удобрений является важнейшей практикой в сельском хозяйстве для обеспечения оптимальной урожайности. Его важность обусловлена жизненно важной ролью фосфора во многих физиологических и биохимических процессах (фотосинтез, фиксация азота, дыхательные процессы, перенос энергии, гликолиз, транспорт питательных веществ и т.д.) (Marschner, 2012). Однако известно, что фосфор является наименее мобильным питательным веществом в почве из-за его высокой реакционной способности с почвенными катионами и глинистыми частицами (Marschner, 2012; Nannipieri et al., 2011). Эффективность использования фосфорных удобрений остается низкой, и лишь небольшая часть внесенного фосфора поглощается растениями (Топалова и др., 2014).

ЖКУ, в основе которых в растворенном виде присутствуют ортофосфаты и полифосфаты, относятся к числу препаратов, предложенных для повышения эффективности использования фосфорных удобрений. Эффективность - ЖКУ была подтверждена в ряде полевых опытов и большинство отчетов указывают на повышение урожайности, биомассы растений, развития корней, интенсивности фотосинтеза (Chtouki et al., 2021; Khourchi et al., 2022; McBeath et al., 2005). Кроме того, динамика высвобождения P_2O_5 делает ЖКУ эффективным источником фосфора для почвенного локального внесения (Weeks et al., 2019). Однако эффективное использование в значительной степени зависит от скорости гидролиза

полифосфата, поскольку корни растений могут поглощать фосфор только в виде ионов ортофосфатов из почвенного раствора.

Преимущества использования ЖКУ:

1. Высокая усвояемость элементов питания: благодаря жидкой форме, элементы питания быстрее проникают в почву и корневую систему растений.

2. Экономическая эффективность: ЖКУ позволяют сократить затраты на транспортировку и внесение за счет их концентрации и удобства применения.

3. Универсальность: ЖКУ можно использовать в качестве припосевного удобрения, корневых и некорневых подкормок в течении вегетации, в различных системах орошения.

4. Снижение негативного воздействия на окружающую среду: благодаря точному дозированию, ЖКУ снижают риск избыточного внесения удобрений, что минимизирует загрязнение водных ресурсов.

5. Улучшение физиологического состояния растений: внесение ЖКУ в критические фазы развития растений способствует повышению их устойчивости к стрессовым условиям.

В соответствии с методикой, предложенной в работе В.И. Кирюшина (2011), для плакорных земель с устойчивыми почвенными условиями и высоким потенциалом продуктивности, оптимальна интенсивная система земледелия. Здесь жидкие удобрения могут применяться в полных дозах, включая азотные и фосфорные компоненты, для обеспечения максимальной урожайности. Точечное внесение, позволяет минимизировать потери и повысить эффективность.

На эрозионных землях, с высоким потенциалом развития эрозии и дефицитом гумуса, предпочтительна нормальная система. В этом случае рационально использовать жидкие удобрения для укрепления корневой системы культур, акцентируя внимание на дозах и сроках внесения на более низкий потенциал урожайности (Кирюшин, 1996).

Переувлажненные земли требуют точного подхода, так как избыточная влага снижает доступность кислорода и эффективность удобрений, во влажные годы продуктивность таких земель мажет быть очень низкой, в сухие годы –

максимальной (Кирюшин, 2005). Нормальная или интенсивная система здесь возможна при дренировании почвы. Внесение жидких удобрений через листовую подкормку способствует быстрому усвоению и снижает риск потерь.

Таким образом, выбор уровня интенсификации и способов применения жидких удобрений зависит от особенностей агроэкологической группы земель. Интенсивные системы подходят для более устойчивых агроландшафтов на плакорных землях, тогда как на участках подверженных проявлению неблагоприятных агроэкологических факторов следует ориентироваться на рациональное использование ресурсов, минимизацию негативного влияния и адаптацию агротехнологий к специфике почвенных условий (Кирюшин, 1996).

ГЛАВА 2. УСЛОВИЯ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в условиях полевого производственного опыта в Новокубанском и Отрадненском районах Краснодарского края в течении 3-х лет (2021-2023 гг.). Был заложен производственный двухфакторный опыт, который учитывал систему питания кукурузы и агроэкологическую группу земель.

На рисунке 4 представлено пространственное распределение исследуемых в работе участков. Каждая группа участков относится к определенной агроэкологической группе земель и имеет свои особенности и лимитирующие факторы.

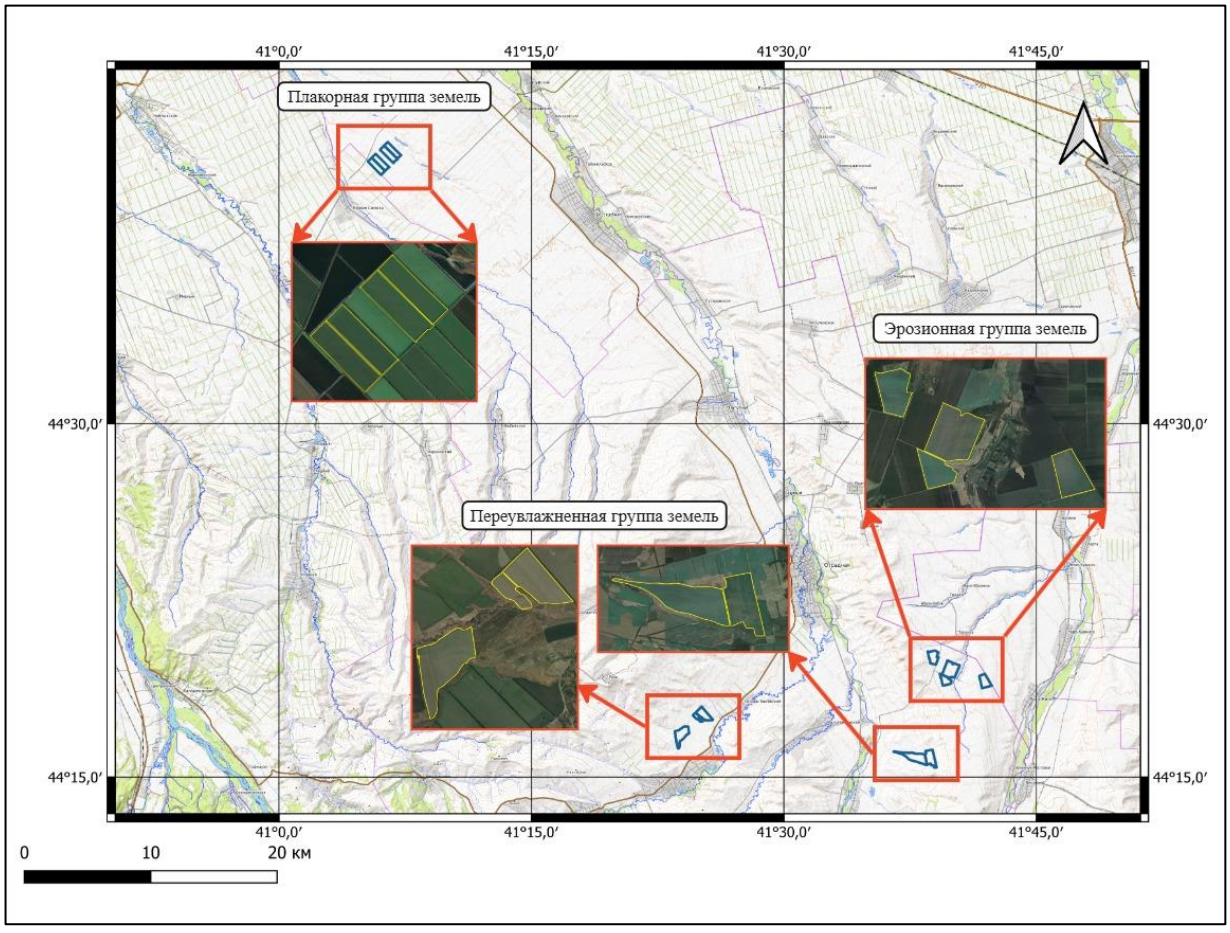


Рисунок 4 – Пространственное распределение изучаемых участков

2.1 Агроэкологические условия территории проведения исследований

2.1.1 Климатические условия

Климат один из главнейших факторов влияющих на продуктивность возделываемых культур, его основные показатели, такие как температурный режим и осадки напрямую влияют на формирование урожая. Кукуруза, являясь тепло- и влаголюбивой культурой, нуждается в тщательном подборе гибрида по группе спелости в зависимости от суммы активных температур и продолжительности вегетационного периода, а также от осадков, выпадающих в течении вегетации, если возделывается на богарных землях. Также большое значение следует уделять агроэкологическим группам земель, наиболее подходящих для данной культуры.

Перед проведением исследований был проанализирован климат выбранной территории за последние 30 лет, что является климатической нормой. Последующие года проведения исследований (2021, 2022 и 2023 гг.) сравнивались с многолетними значениями.

Анализ параметров климатического районирования свидетельствует, что место проведения исследований относится к Умеренному поясу, Атлантико-континентальной европейской области. Климат умеренно-континентальный с чертами средиземноморского. По качественной характеристики теплообеспеченности относятся к очень теплой, недостаточно влажной зоне. Суммарная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность, составляет – 4600-5050 МДж/м^2. По агроклиматическому районированию территория проведения исследований находятся в зоне с засушливым вегетационным периодом с $ГТК_{VI-VIII}$ – 0,5-0,1, с вероятностью засух 25-50 % (Национальный атлас России, 2004-2008).

Индекс континентальности по Иванову составляет 181 единицу, что характеризует климат как средне континентальный. Континентальный режим характеризуется значительными суточными, сезонными и годовыми колебаниями.

Анализ среднемесячных температур был проведен по данным с 1971 по 2020 гг. Среднегодовая температура составляет 11,5°С, максимальная среднемесячная температура отмечается в июле (23,4°С), минимальная в январе (-1,4°С). Усредненная многолетняя максимальная среднесуточная температура составляет 29,8 °С, минимальная -16,8°С.

Вариативность годовой амплитуды температур составляет в среднем 27°С, достигая в некоторые годы 30-35°С (1972, 2002, 2006 и 2012 гг.).

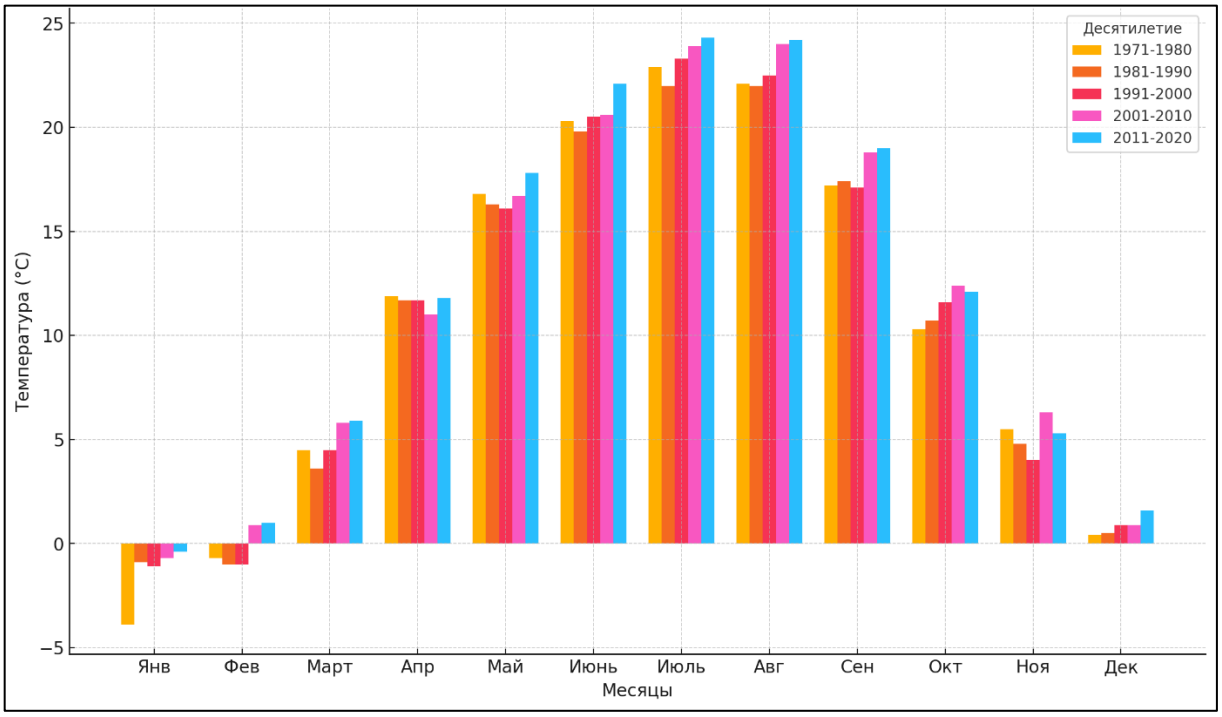


Рисунок 5 – Среднемесячная температура по десятилетиям

Анализ данных представленных на рисунке 5 подтверждает тенденцию к увеличению температур на протяжении 50 лет. Особенно это заметно в январе, где температура поднялась с -3,9°С (1971–1980) до -0,4°С (2011–2020). Летние температуры остаются высокими на протяжении всех десятилетий, при этом заметен рост, особенно в июле и августе. Температура в июле выросла с 22,9°С (1971–1980) до 24,3°С (2011–2020). Для весенних и осенних месяцев изменения не столь выражены, хотя в марте и ноябре также видно небольшое увеличение средней температуры.

Среднемесячные амплитуды температур в летний период колеблются в районе 9-10°С. Максимальные среднемесячные амплитуды температур

характерны в основном для зимнего периода (декабрь, январь и февраль) достигая 25-30°С, при средних значениях в 15-18°С (рисунок 6).

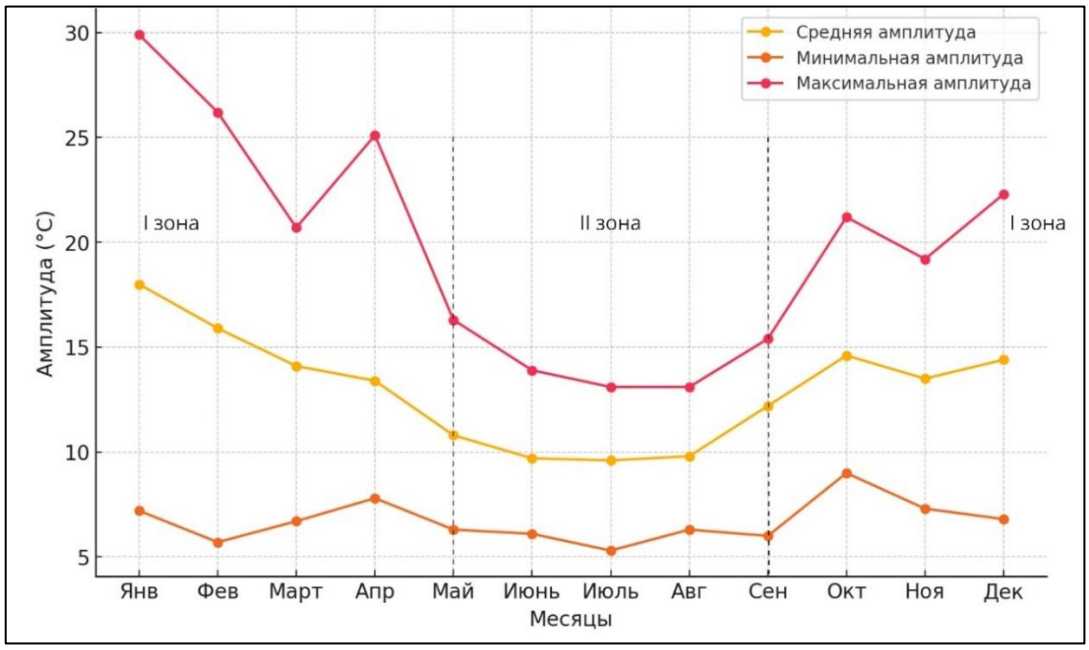


Рисунок 6 – Среднемесячные амплитуды температур

В зимние месяцы максимальная амплитуда (29,9°С в январе) достигает своего пика. Это указывает на сильные перепады температуры между днем и ночью. Весной средняя амплитуда уменьшается с 18°С (март) до 13,4°С (апрель). В июле и августе амплитуды минимальны – минимальная амплитуда 5,3°С в июле и средняя амплитуда 9,6°С в августе. В сентябре и октябре наблюдается постепенный рост амплитуды, по мере приближения холодного периода. Анализируя график амплитуд, среднемесячных температур можно выделить 2 зоны:

I зона – холодный период (с октября по апрель), когда колебания температур достигают максимальных значений;

II зона – летний период (май-сентябрь), в котором амплитуды температур минимальны.

В связи с этим, можно предположить, что в вегетационный период выращивания кукурузы температурный режим исследуемой территории стабилен и подвержен минимальным колебаниям.

Термические ресурсы и потенциал Краснодарского края позволяют возделывать широкий диапазон сельскохозяйственных культур, требующих

значительного количества тепла для формирования качественного урожая, в том числе кукурузу на зерно. Продолжительность вегетационного периода составляет в среднем 200 дней, по датам перехода температур через 10°С и 248 дней по датам перехода температур через 5°С.

Температурный режим в 2021-2023 гг. соответствовал климатической зоне, в которой располагается хозяйство и отклонения от среднемноголетних показателей были незначительны. Стоит отметить тенденцию к повышению температурного режима в летний период. Практически все среднедекадные температуры в годы проведения исследований были выше среднемноголетних (рисунок 7).

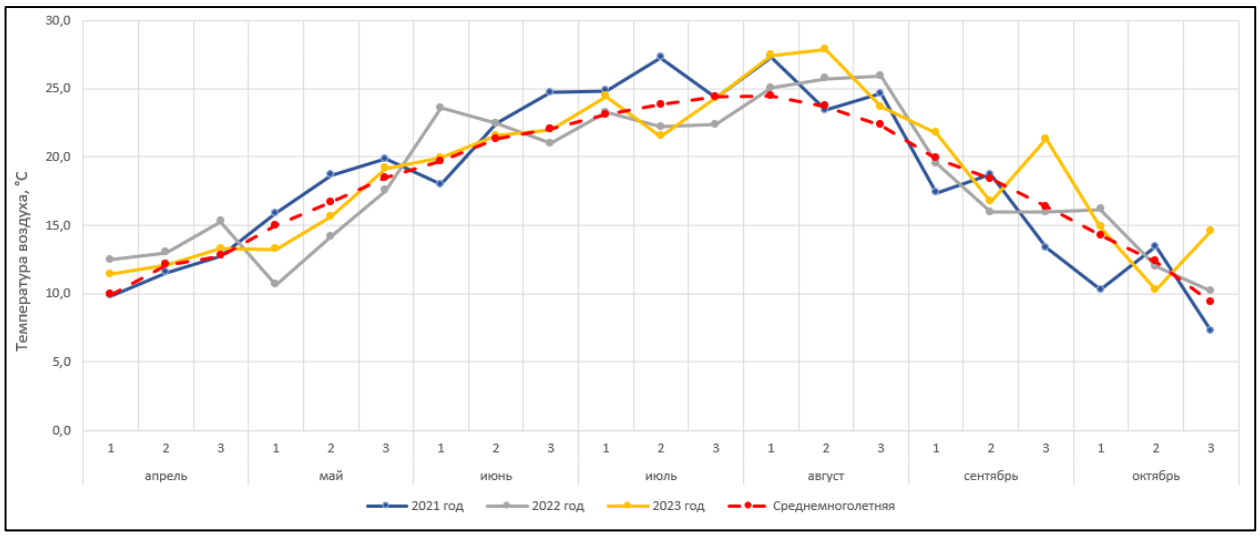


Рисунок 7 – Среднедекадные температуры за период вегетации 2021-2023 гг.

Данные рисунка 7 свидетельствуют, что апрель 2021 года был прохладнее, а май, наоборот, по сравнению с 2022 годом, но на прогревание почвы и сроки проведения посева это не отразилось. В 2022 году апрель оказался теплее среднего, особенно в третьей декаде, где температура достигла 15,3°С, что выше среднемноголетнего значения на 2,5°С. Тогда как май 2022 года был аномально холодным, первая декада была значительно ниже нормы (10,7°С против 15°С среднего значения). Июнь 2021 года был заметно теплее среднего, тогда как 2022 и 2023 годы были приближены к многолетним показателям. Август 2023 года оказался самым жарким, с максимальной температурой во второй декаде 29,9°С.

Октябрь 2021 года был значительно холоднее нормы (7,2°C), тогда как 2022 и 2023 года демонстрируют более тёплую тенденцию.

Продолжительность вегетационного периода за годы исследований: 189, 195 и 190 дней соответственно, что близко к климатической норме для данной территории.

Сумма активных температур (∑t>10°C) на территории проведения исследований по данным климатического районирования равна 2600-3200 °C. При расчете климатических данных, за 30-летний период, среднее значение суммы активных температур выше 10 °C составляет 3718,4 °C, с диапазоном от 3195 °C в 1992 году, до 4240°C в 2012 году. На рисунке 8 представлено распределение динамики сумм активных температур выше 10 °C за последние 30 лет и тенденция к их увеличению.

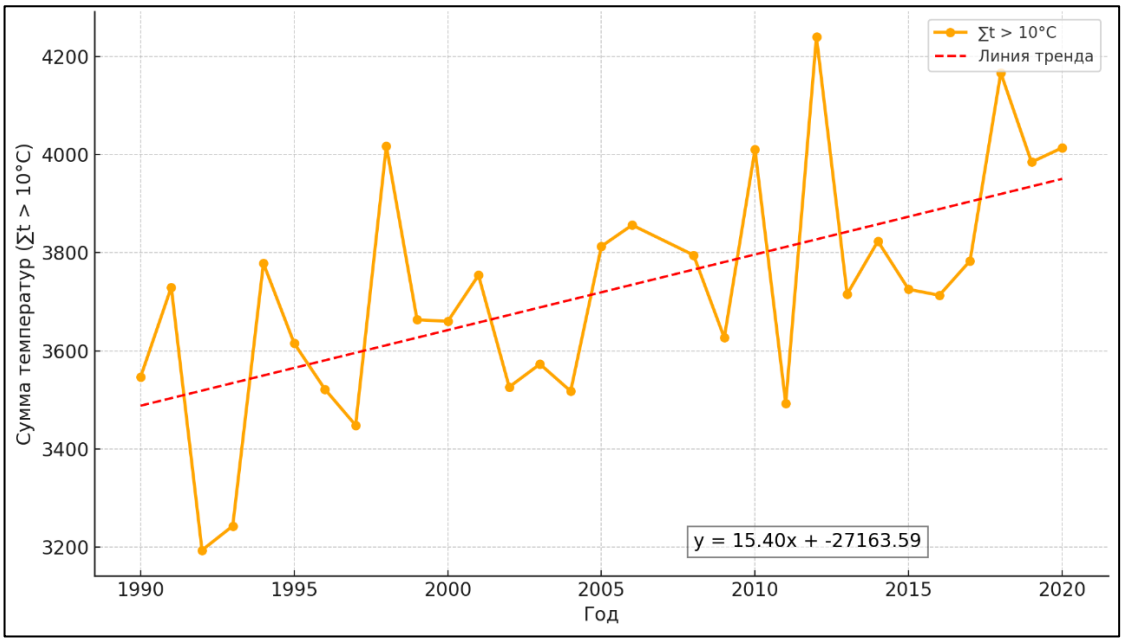


Рисунок 8 – Сумма активных температур по годам

Анализ данных температурного режима свидетельствуют, что за последние 30 лет наблюдается выраженная тенденция к увеличению суммы активных температур. Линия тренда, построенная на основе линейной регрессии, отражает общее направление изменения температур за годы. Она показывает тенденцию к увеличению сумм температур выше 10°C на протяжении рассматриваемого периода. Уравнение регрессии показывает, что сумма температур имеет тенденцию увеличиваться на 15,4°C каждый год.

Суммы активных температур выше 10 °С за 2021-2023 гг. составляют: 3718, 3800 и 3875 °С соответственно. При среднемноголетнем значении 3720 °С, только 2021 год соответствовал климатической норме, 2022 и 2023 года имеют отклонение в большую сторону на 80 °С и 155 °С соответственно. В целом территория исследования в достаточной степени обеспечена теплом, что позволяет возделывать различные по группе спелости гибриды кукурузы.

Среднее количество осадков, выпадающих за календарный год, составляет 655 мм, с диапазоном от 473 мм (1998 год) до 860 мм (2004 год). Влагообеспеченность растений за период с температурой выше 10 °С составляет в среднем 457 мм, что определяет примерно 70 % от годовой суммы осадков (рисунок 9). Стоит отметить, что в летний период осадки часто выпадают в виде сильных дождей, а иногда ливней.

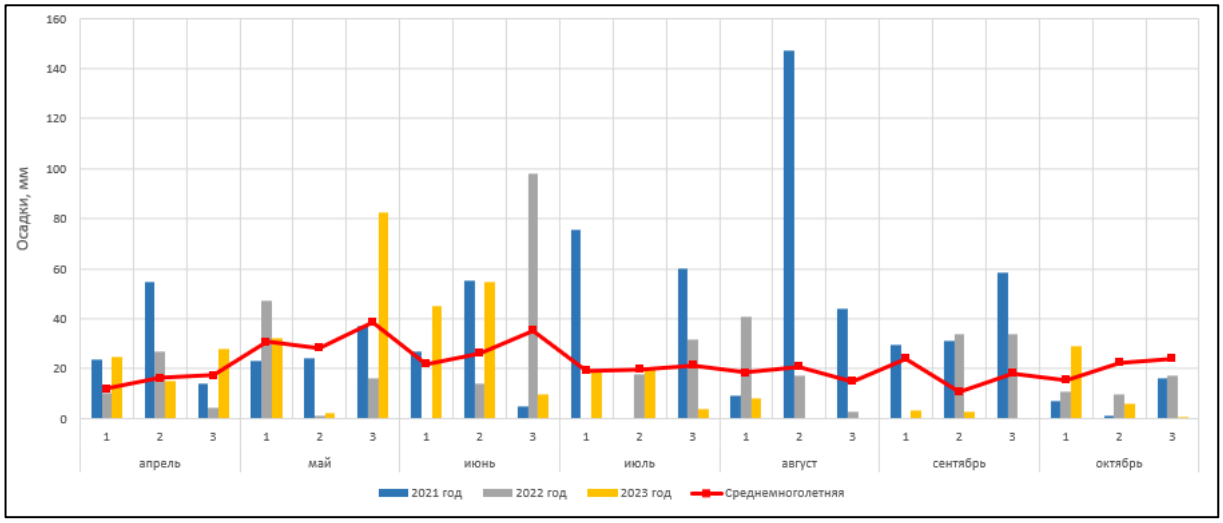


Рисунок 9 – Сумма осадков за период с температурой выше 10 °С

Исходя из данных рисунка 9, 2021 и 2023 год отличались повышенным количеством осадков по сравнению с 2022 годом и среднемноголетними значениями. За период апрель-май в 2021 году выпало 177 мм, в 2023 году 185 мм, тогда как в 2022 году – 106 мм. Достаточно большое количество осадков в 2021 году немного сместило сроки посева, но большого влияние не оказало, наоборот, в почве было накоплено большое количество влаги необходимой для прорастания и благоприятного развития кукурузы. Август 2021 года оказался экстремально дождливым, особенно во второй декаде, где осадки составили 147 мм. В сентябре

наблюдались продолжительные осадки в течении месяца с максимумом в третьей декаде (58,3 мм), что помешало выходу на уборку в оптимальные сроки.

В 2022 году, по сравнению с 2021 г., в первой половине вегетации осадков отмечалось больше, но июль и август выдался более засушливым и недостаток влаги попал в критический период водопотребления, но от части компенсировался за счет небольших осадков во второй половине июля. К моменту наступления уборки осадков было меньше, чем в 2021 году и они не помешали проведению уборочных работ.

В 2023 году отмечался избыток осадков, что повлияло на сроки проведения полевого опыта и результаты. Почвы были перенасыщены влагой, в отрицательных элементах микрорельефа застаивались осадки, начать посев в оптимальные сроки не удалось. Май 2023 года отметился резким ростом осадков в третьей декаде (82,7 мм), что более чем в два раза превышает среднемноголетний уровень. После продолжительных весенних осадков и смещения сроков посева, наблюдались засушливые условия с 3 декады июля по 1 декаду октября на фоне высоких температур. В августе осадки были только в первой декаде – 8 мм. Сентябрь был очень сухим в первой и второй декадах (3,6 мм). 2023 год оказался самым аномальным, что негативно повлияло на урожайность кукурузы.

Сравнение данных осадков за 2021, 2022 и 2023 годы с среднемноголетними значениями показывает значительные отклонения от нормы, а распределение осадков по месяцам и декадам имеет высокую изменчивость. В некоторые месяцы наблюдались аномально высокие уровни осадков, тогда как в другие периоды осадки были значительно ниже многолетних значений. При этом, выпадающие осадки, в виде сильных дождей, после засушливых периодов не могут полностью напитать почву влагой, так как теряются за счет стока и интенсивного испарения. Увеличение ливневых осадков влечет за собой усиление эрозионных процессов на участках, подверженных эрозии.

Не смотря на достаточное количество осадков, в течении вегетации часто могут наблюдаться засушливые периоды продолжительностью 10-15 дней и более, характеризующиеся высокой температурой, пониженной относительной

влажностью воздуха и восточными суховейными ветрами. Анализируя данные температуры, осадков и скорости ветра, можно сделать вывод, что в период с 3 декады июля и 2 и 3 декады августа, когда наблюдались высокие температуры, превышающие 27°С, при полном отсутствии эффективных осадков, наблюдались сильные засушливые условия и такие опасные агрометеорологические явления как суховеи.

Среднемноголетний показатель ГТК за вегетационный период (по датам перехода температур через 10°С) равен 1,24, что характеризует зону как достаточно увлажненную. В течении исследуемого периода ГТК имели следующие значения: 1,99, 1,14 и 1,00 за 2021, 2022 и 2023 года соответственно.

Однако, следует отметить, что данный показатель сильно варьирует от года к году. При детальном рассмотрении климатических данных за 30-летний период, значения ГТК варьировали от 0,58 до 1,9. Из 30 лет, 25% (8 лет) с ГТК за вегетационный период менее 1 и 60% (18 лет) ниже среднемноголетнего показателя. Наиболее точно описывает данную территорию среднемноголетнее значение ГТК за период июнь-август – 0,96, что относит ее к засушливой зоне (рисунок 10).

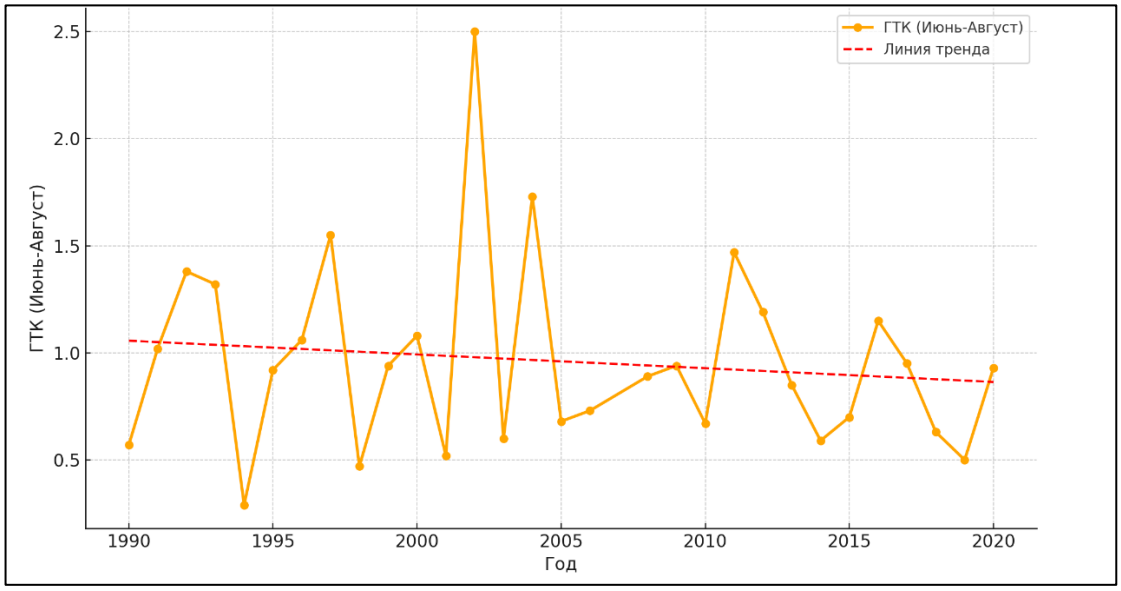


Рисунок 10 – ГТК за период июнь-август

Годы, в которых значения ГТК были значительно ниже 1,0, свидетельствуют о засушливых летних сезонах. В частности, это 1994 г. (ГТК = 0,29), 1998 г. (ГТК = 0,47), 2001 г. (ГТК = 0,52), 2003 г. (ГТК = 0,60), 2010 г. (ГТК = 0,67) и 2020 г. (ГТК

= 0,93). В эти годы наблюдались засушливые условия в период вегетации сельскохозяйственных культур. Однако, выделяются и влажные (избыточно влажные) периоды, например, 2002 г. (ГТК = 2,50), 1997 г. (ГТК = 1,55), 2004 г. (ГТК = 1,73), и 2011 г. (ГТК = 1,47).

В последние годы, в период с 2015 по 2020 годы наблюдаются значения ГТК преимущественно ниже 1.0 (кроме 2016 г.), что подтверждает наблюдаемую долгосрочную тенденцию к более засушливым условиям в летние месяцы.

В годы проведения исследований ГТК за период июнь-август менялся очень значительно от 1,91 в 2021 году до 0,74 в 2023 году, тогда как в 2022 году находился в районе климатической нормы – 1,03 (рисунок 11).

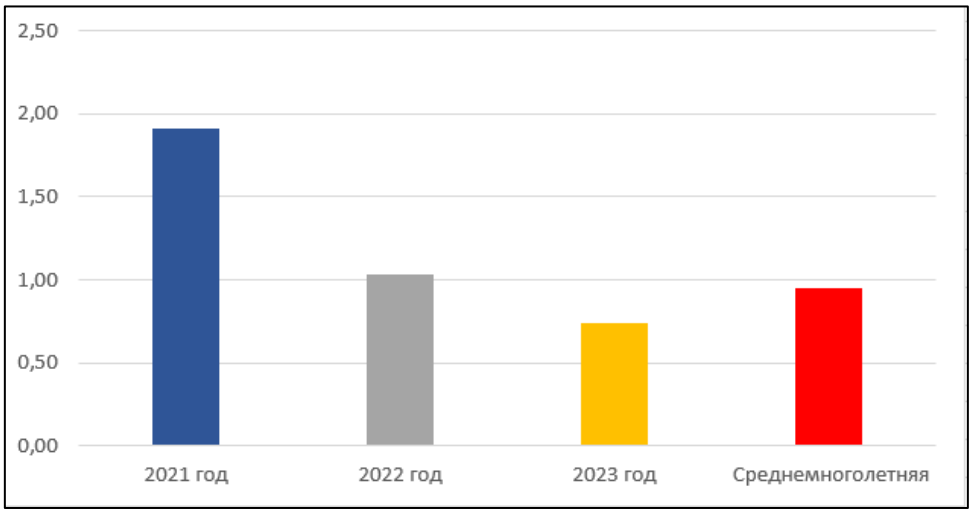


Рисунок 11 – ГТК за период июнь-август в 2021-2023 гг.

Большое количество осадков за период апрель-май в 2021 и 2023 гг., подтверждается высоким значением ГТК за выбранный период – 2,14 и 2,22 соответственно.

На рисунке 12 показана частота встречаемости определенного диапазона ГТК за период июнь-август с 1990 по 2020 года. Большинство лет попадают в диапазоны ГТК от 0,3 до 0,8, что указывает на преобладание засушливых климатических условий в летние месяцы.

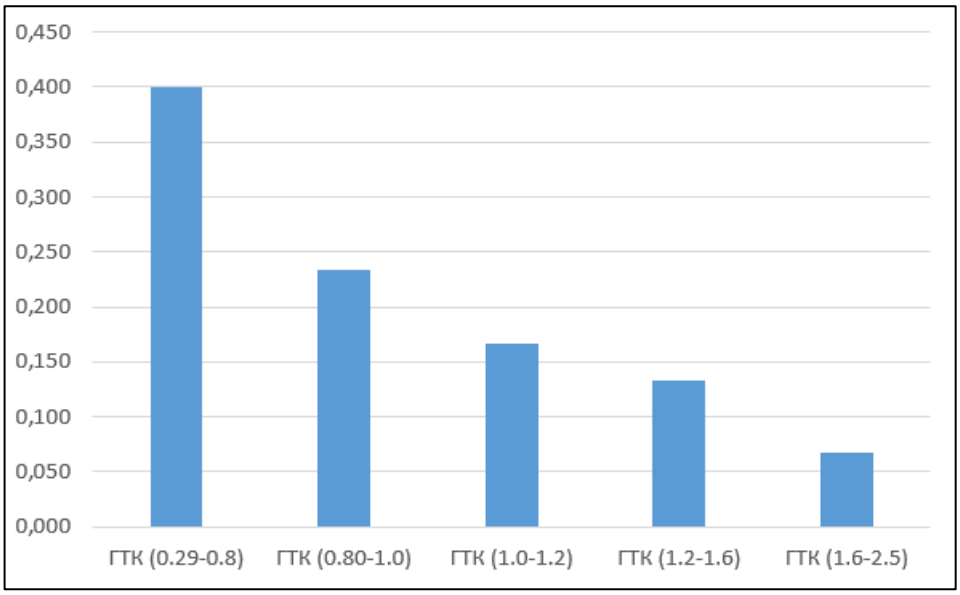


Рисунок 12 – Частота встречаемости выбранных диапазонов ГТК за июль-август

По графику относительных частот следует, что из 30 лет, 40% (12 лет) приходится на засушливые летние периоды с ГТК менее 0,8.Таким образом, 2021 год является самым редким годом по условиям увлажнения в летний сезон с вероятностью около 6%, тогда как 2023 год попадает в первый диапазон, а 2022 год во второй.

Преобладающими ветрами являются восточные и юго-восточные ветра. В зимний период они относительно холодные, а в весенне-летний период жаркие, носящие суховейный характер. Особенно опасны такие ветра, в совокупности с отсутствием осадков и пониженной влажностью воздуха, в критические периоды развития культур. В годы проведения исследования суховеи наблюдались в 2023 году в 3 декаде июля и 2-3 декаде августа.

Обобщая все климатические условия, можно с уверенностью сказать, что все три года проведения исследований попали в различные погодные условия. 2022 год оказался максимально приближен к среднемноголетним значениям по всем основным показателям, таким как осадки, сумма активных температур и ГТК. 2021 год стал самым влажным, в течении которого за вегетационный период выпало 743 мм осадков, что больше среднемноголетнего значения на 286 мм, а также самым теплым по сумме активных температур. Последний год исследований оказался очень изменчивым и непредсказуемым. В начале весны отмечалось избыточное количество осадков, на фоне невысоких температур, что повлияло на сроки посева,

затем в течении вегетации картина полностью изменилась и на фоне высоких температур был недостаток атмосферных осадков, что подтверждается самым низким ГТК за летний период из трех лет исследований – 0,74. За 30 лет была выявлена тенденция возвращения засушливых летних периодов в среднем один раз в три-четыре года.

Повышение температуры в летние месяцы при недостаточном количестве осадков приводит к снижению ГТК. Это подтверждается данными за 2023 год, когда при высоких температурах в июле и августе наблюдались минимальные осадки, что привело к низким значениям ГТК и засушливым условиям. Периоды с экстремальной засушливостью наблюдаются чаще, что подтверждается данными ГТК. Это повышает риск засух и суховеев, которые могут оказать негативное влияние на сельскохозяйственные культуры.

2.1.2 Общая характеристика рельефа

Краснодарский край расположен на равнинах Западного Предкавказья, занимающих примерно 70 % территории края, оставшаяся часть приходятся на горы Западного Кавказа.

Основная часть Новокубанского района относится к равнинной территории, что характерно для южных частей Восточно-Европейской равнины. Однако, здесь можно выделить несколько основных типов рельефа:

- Кубано-Приазовская низменность: это наиболее типичный рельеф района, представляющий собой слабо холмистую равнину. В целом, местность характеризуется пологими уклонами и относительно небольшими перепадами высот.
- Предгорья Северного Кавказа: В юго-восточной части района начинается зона перехода от равнин к предгорьям Кавказа. Здесь рельеф становится более разнообразным с характерными возвышенностями, холмами и грядами.
- Долины рек и балочные системы: В рельефе района можно наблюдать значительное количество речных долин и балок, которые прорезают равнинную

поверхность. Балки представляют собой небольшие долины с крутыми склонами, которые возникают из-за эрозионной деятельности временных водотоков.

Отрадненский район представляет собой разнообразный рельеф, который определяется его географическим положением на стыке предгорий Кавказа и равнинных частей Кубано-Приазовской низменности.

Рельеф Отрадненского района является холмисто-возвышенным, с постепенным нарастанием высот по направлению к югу и юго-востоку. Территория района входит в состав Кавказских предгорий, что отражается на характере местности:

- Северные и центральные части района более равнинные, с постепенными возвышениями. Здесь преобладают пологие холмы и широкие долины рек.
- Южные и юго-восточные части: находится в зоне предгорий Северного Кавказа. Эти предгорья характеризуются холмисто-грядовым рельефом с плавным увеличением высоты в направлении к Кавказским горам. В рельефе преобладают гряды, увалы и холмы с крутыми склонами. Местность расчленена глубокими балками и оврагами, образованными водной эрозией.

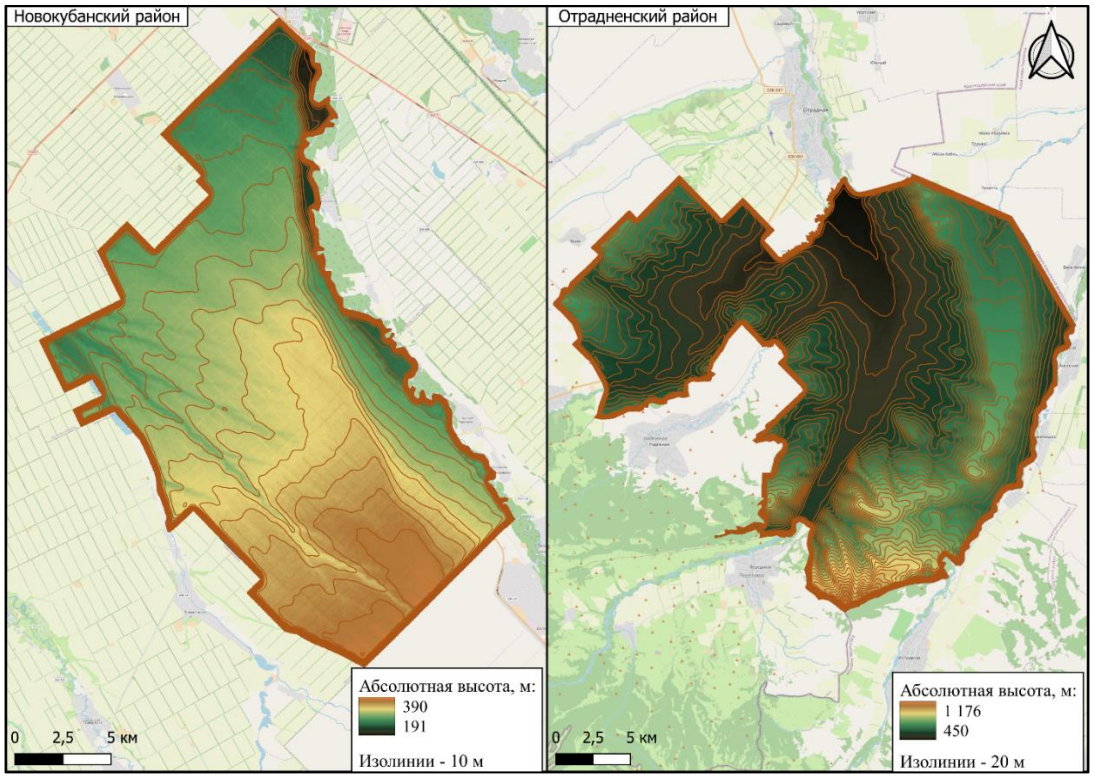


Рисунок 13 – Цифровая модель рельефа части Новокубанского и Отрадненского районов (разрешение 12,5 м/пикс)

Исследуемая часть Новокубанского района расположена на широком водоразделе, расчлененном лощинами и балками, с перепадами высот от 190 до 390 м. Представляет собой типичную равнину с элементами холмистой местности.

Абсолютные высоты исследуемой части Отрадненского района варьируют от 450 до 1170 м. Рельеф более расчлененный, с выраженными резкими склонами от вершин водораздела к оврагам и балкам, и представляет собой предгорную часть южных склонов Кавказского хребта.

Территория проведения исследований относится к равнинной части края, занимая центральную часть Закубанской равнины. С севера и востока она четко отделяется долиной р. Кубань, а ее южная часть постепенно переходит в пологие склоны невысоких горных гряд.

Анализ геоморфологического районирования показывает, что территория расположена на стыке Кубано-Приазовской низменности и предгорий Кавказа, относится к наклонной аллювиальной террасированной равнине, что создает плавный переход от равнинной местности к более холмистой, предгорной территории. Столь близкое расположение к горным массивам обуславливает ее специфические особенности, связанные с более расчлененным рельефом, в сравнении с другими равнинами края, и климатическими характеристиками.

Согласно ландшафтной карте СССР 1980 г. территория проведения исследований относится к двум разным отделам ландшафтов: равнинно-платформенному и отделу горных равнинных поясов. Анализируя ландшафтную карту СССР была составлена схема, показывающая иерархию двух отделов ландшафтов по таксономическим единицам (рисунок 14).

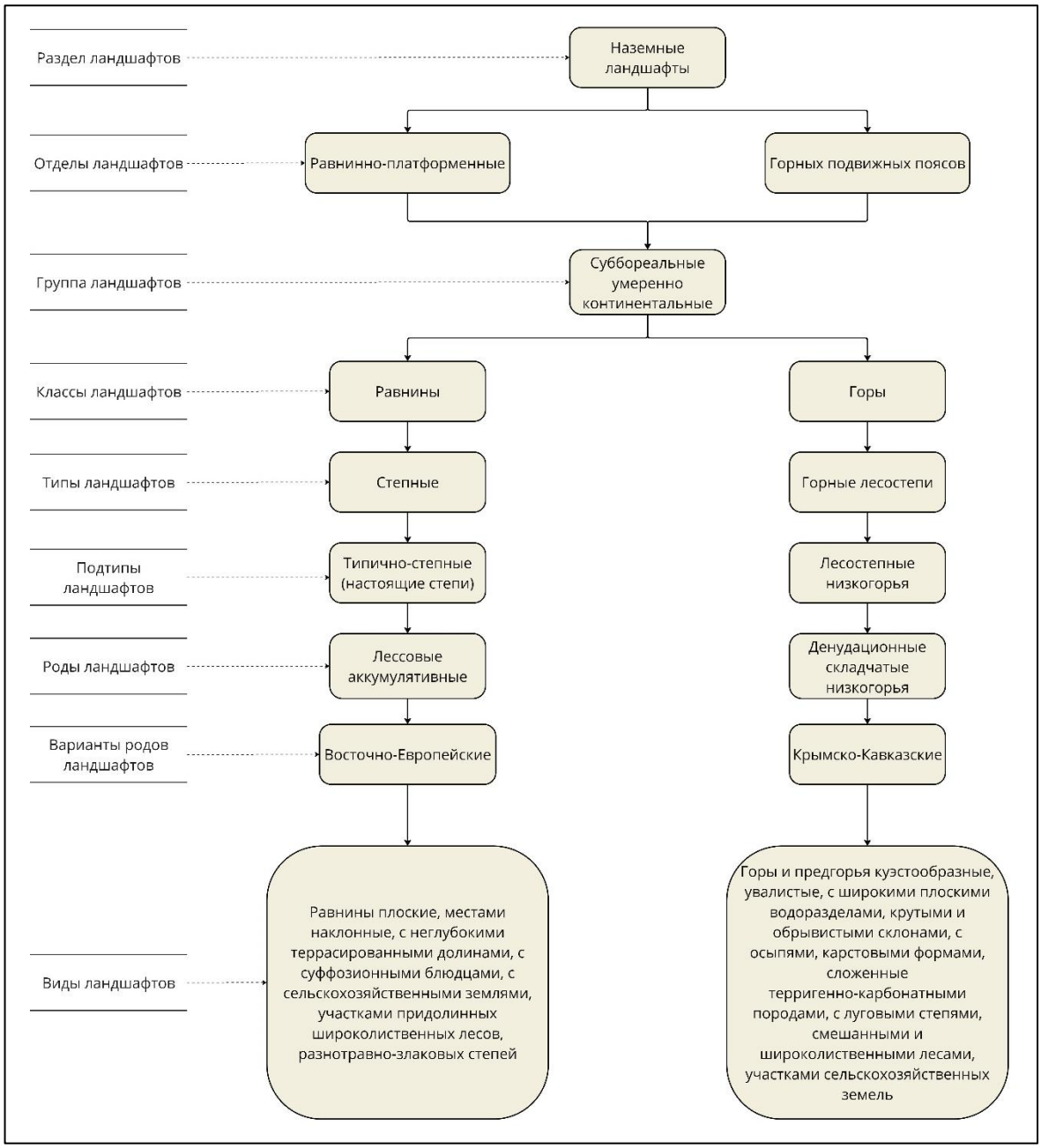


Рисунок 14 – Схема таксономических единиц ландшафтов территории проведения исследований

Исследование проводилось на 2 разных видах ландшафтов, которые, поднимаясь выше по таксономическим единицам, относятся к одной группе – суббореальные-умеренно континентальные ландшафты. Изучая два вида ландшафтов, можно сделать вывод об их отличии, как с точки зрения строения, так и с точки зрения рельефа и почвенного покрова.

2.1.3 Почвенный покров

Почвенный покров Краснодарского края отличается значительным разнообразием, обусловленным географическим положением, климатом, рельефом и особенностями растительности региона. В связи с разнообразием почвенно-климатических условий, согласно Национальному атласу почв Российской Федерации (2011 г.), на территории края выделяют:

- почвы тайги и хвойно-широколиственных лесов ~ 9 % (буро-таёжные и дерново-карбонатные почвы);
- почвы широколиственных лесов и лесостепей ~ 15 % (бурые лесные, буровато-темно-серые лесные и т.д.);
- почвы степей ~ 60 % (черноземы, лугово-черноземные и т.д.);
- почвы субтропиков ~ 1 %;
- гидроморфные почвы ~ 7 % (торфяно-болотные, лугово-болотные и т.д.);
- пойменные и маршевые почвы ~ 3 %;
- почвы горных территорий ~ 1 %.

Черноземы являются самым распространенным типом почв и занимают около 60 % территории края. Распространены преимущественно на равнинных ландшафтах в центральных и северных районах края.

Основной подтип черноземов – южные и обыкновенные, на их долю приходится порядка 40 % почвенного покрова. Вторые по площади – черноземы типичные, занимают около 10 % и располагаются в центральной части Краснодарского края. Черноземы выщелоченные располагаются южнее типичных черноземов и занимают примерно 4 % почвенного покрова.

Данные почвенно-географического районирования (ПГР) свидетельствуют, что территория исследований принадлежат к суббореальному поясу, центрально лиственно-лесной, лесостепной и степной области, зоне обыкновенных и южных черноземов степи, предкавказской провинции черноземов обыкновенных и южных мицелярно-карбонатных мощных и сверхмощных малогумусных. Входит в почвенный округ черноземов обыкновенных, типичных и выщелоченных

мицелярно-карбонатных мощных и сверхмощных малогумусных, черноземов слитых, лугово-черноземных выщелоченных глинистых и суглинистых на аллювиальных, пролювиальных и делювиальных отложениях.

Зональным типом почв на территории проведения исследований является чернозем типичный. Данные почвы формируются на равнинных участках и характеризуются мощным гумусовым горизонтом, высокой водоудерживающей способностью, зернистой и комковато-зернистой структурой, что способствует хорошему воздухо- и водообмену. Основной почвообразующей породой, на которой сформированы почвы исследуемой территории, является лессовидный тяжелый суглинок.

Основным фактором, определяющим структуру почвенного покрова на территории исследования выступает рельеф. В зависимости от местоположения в ландшафте почвы дифференцированы по степени смытости (от не смытых – занимающих поверхности водоразделов с уклоном около 1°, до среднесмытых - приуроченных как правило к склонам с уклоном 2-3°) и мощности гумусового горизонта (A+AB) (от среднемощных с гумусовым горизонтом 40-80 см до мощных с гумусовым горизонтом 80-120 см).

В пониженных элементах рельефа, вследствие поверхностного переувлажнения, формируются луговато-черноземные почвы, являющиеся полугидроморфными аналогами черноземов.

2.2 Объекты исследования

Объектом исследования является среднеспелый гибрид кукурузы ДКС 4964 (ФАО 370).

Гибрид кукурузы (*Zea mays* L.) ДКС 4964, включен в Госреестр по Северо-Кавказскому региону на зерно, районирован в Краснодарском крае в 2010 году. Оригинатор(ы): MONSANTO INTERNATIONAL SARL (RUE DES VIGNERONS 1 A, CH-1110, MORGES, SWITZERLAND).

Морфологическое описание гибрида. Лист изогнутый, угол между пластинкой листа и стеблем средний. Антоциановая окраска корней у стебля средняя. Время цветения метелки среднее - позднее. Антоциановая окраска колосковой чешуи сильная, основания чешуи - слабая, пыльников - средняя, колоски средней плотности. Главная ось метелки выше верхней боковой ветви короткая, образует с боковыми веточками средний угол. Первичные боковые веточки метелки слегка изогнутые, короткие, веточек малое количество. Антоциановая окраска шёлка слабая, влагалища листа - отсутствует или очень слабая. Растение высокое, лист средней ширины. Початок средней длины, толстый, слабоконический, ножка средняя, рядов зерен среднее количество, стержень окрашен слабо - средне. Зерно зубовидное, в верхней части жёлтое.

Устойчив к южному гельминтоспориозу, слабо поражался пузырчатой головней, выше среднего - бактериозом и фузариозом початков. Средне повреждался стеблевым кукурузным мотыльком. По группе спелости – среднеспелый, ФАО 370, высота растения 250-280. Характеристика початка: число рядов – 16-18, число зерен в ряду – 42-44, масса 1000 семян – 280-320 г.

Изучаемые факторы:

1. Удобрение жидкое ЛиквиФорс марки: NPK 7:23:7; удобрение жидкое ЛиквиФорс марки: NS 8:9; КАС-32 (карбамидно-аммиачная смесь).

Удобрение жидкое ЛиквиФорс марки: NPK 7:23:7 и NS 8:9 разработаны компанией ООО «ДЖИЭСЭМ КЕМИКЛ», входят в «Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов», разрешенных к применению на территории Российской Федерации (Свидетельство о Государственной регистрации № 800-10-3590-1 и № 800-15-3589-1, соответственно).

В состав жидкого удобрения ЛиквиФорс марки NPK 7:23:7 входит:

- N – 7 % в аммонийной форме;
- P_2O_5 – 23 % в ортофосфорной форме;
- K_2O – 7 % калия в форме карбоната калия.

Производится и поставляется в жидкой форме с плотностью около 1,3 кг/л. Позиционируется в качестве комплексного стартового удобрения в жидкой форме, для внесения в почву совместно с посевом.

Все элементы питания находятся в легкодоступной для растений форме. Особенно это актуально для фосфора, который очень важен на начальных этапах прорастания и развития культуры. Внесение данной формы фосфора не требует времени и влаги для его перехода в доступную для растений форму, он уже вносится в почву в форме доступных для растений ортофосфатов. Весь азот находиться в аммонийной форме, легкодоступной в начале вегетации растений. Калий, способствует накоплению сахаров в молодых растениях, что является страховкой от возврата холодов и других неблагоприятных погодных условий, также в своем составе не содержит хлор, что немаловажно для культур чувствительных к его концентрации.

Жидкое удобрение ЛиквиФорс марки NS 8:9 представляет собой раствор сульфата аммония, с плотностью, примерно, 1,1 кг/л.

В состав входит:

- N – 8 % в аммонийной форме;
- S – 9 % в сульфатной форме.

КАС-32 (карбамидно-аммиачная смесь) – жидкое азотное удобрение, представляющее собой смесь водных растворов карбамида и аммонийной селитры с плотностью до 1,34 кг/л. Содержит в своем составе 32 % азота (N), из них 16 % амидного азота (NH_2^-) и по 8 % нитратного (NO_3^-) и аммонийного (NH_4^+) азота.

2. Агроэкологические группы земель: плакорные, эрозионные и переувлажненные земли.

Плакорные земли — дренированные равнины с преобладающими автоморфными почвами. Располагаются на равнинном участке в средней части длинного водораздельного склона с углом наклона менее 1°. Почвенный покров представлен зональными черноземами типичными среднемощными и мощными (рисунок 15). Земли данных типов не имеют выраженных ограничивающих

факторов и пригодны для возделывания наиболее требовательных культур с использованием интенсивных и высокоинтенсивных агротехнологий.

Агрохимическая характеристика (в среднем за 2021-2023 года): гумус – 3,4 %; pH (вод) – 6,8; подвижный фосфор (по Чирикову) – 101 мг/кг (IV класс); подвижный калий (по Чирикову) – 205 мг/кг (VI класс); сумма поглощенных оснований (S) – 35 мг-экв/100 г; азот щелочногидролизуемый ($N_{щг}$) – 185 мг/кг; содержание физической глины в пахотном горизонте (частиц менее 0,01 мм) – 54%.

Рисунок 15 – Доля почв входящих в плакорную группу земель

Эрозионные земли — на территории исследования расположены преимущественно на холодных выпуклых (реже вогнутых) склонах 1-3°, а также выпуклых склонах ложбин 1-3° с преобладающими автоморфными почвами. Структура почвенного покрова представлена комбинациями несмытых, слабосмытых и среднесмытых зональных почв, а также комбинациями с луговато-черноземными почвами по дну ложбин, менее 10 % (рисунок 16). Основной лимитирующий фактор – пониженная влагообеспеченность, вследствие усиленного поверхностного стока; развитие водной эрозии.

Агрохимическая характеристика (в среднем за 2021-2023 года): гумус – 2,6 %; pH (вод) – 6,7; подвижный фосфор (по Чирикову) – 97 мг/кг (III класс); подвижный калий (по Чирикову) – 195 мг/кг (VI класс); сумма поглощенных оснований (S) – 33 мг-экв/100 г; азот щелочногидролизуемый ($N_{щг}$) – 160 мг/кг;

содержание физической глины в пахотном горизонте (частиц менее 0,01 мм) – 54% (приложение Б).

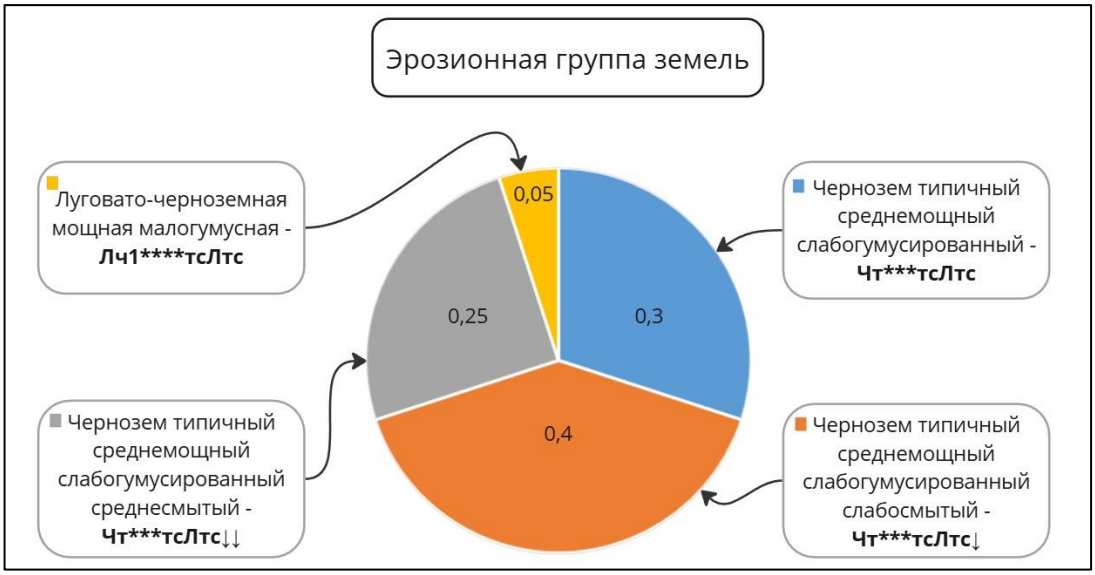


Рисунок 16 – Доля почв входящих в эрозионную группу земель

Переувлажненные земли — эта группа земель, характеризуется избыточным содержанием влаги в почве в течение значительных периодов времени. Признаки гидроморфизма не всегда означают неблагоприятность эколого-гидрологических условий для роста и развития культур. Расположены в нижней части склона, в низинах, блюдцеобразных понижениях и западинах и представлены луговато-черноземными почвами в комбинации с несмытыми и слабосмытыми черноземами типичными (рисунок 17).

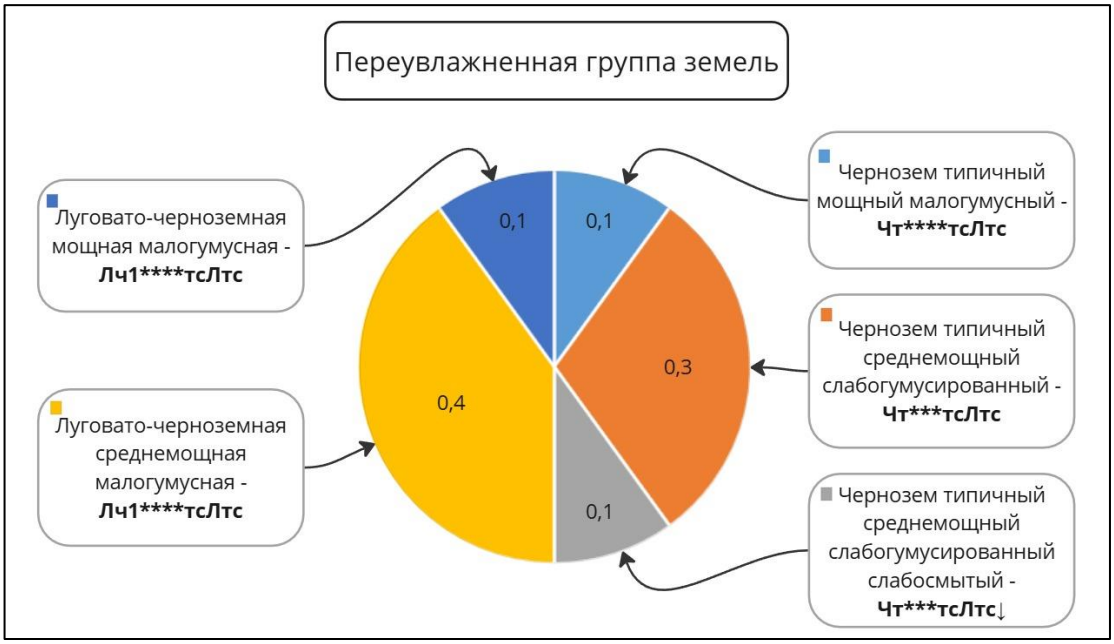


Рисунок 17 – Доля почв входящих в переувлажненную группу земель

Агрохимическая характеристика (в среднем за 2021-2023 года): гумус – 4,0 %; pH (вод) – 6,9; подвижный фосфор (по Чирикову) – 100 мг/кг (III класс); подвижный калий (по Чирикову) – 197 мг/кг (VI класс); сумма поглощенных оснований (S) – 32 мг-экв/100 г; азот щелочногидролизуемый ($N_{щг}$) – 206 мг/кг; содержание физической глины в пахотном горизонте (частиц менее 0,01 мм) – 52% (приложение Б).

2.3 Методы проведения исследования

2.3.1 Технология возделывания кукурузы

Агротехнические мероприятия по подготовке почвы включали в себя: основную обработку и предпосевную. Основную обработку почвы проводили осенью предыдущего года. Она включала лущение стерни на глубину 6-8 см, затем зяблевую вспашку на глубину 25-27 см и культивацию на 10-12 см. Предпосевная обработка почвы – культивация на глубину 6-8 см под углом к посеву 45 °.

Посев проводи сеялками Mater Macc 12*70 см с шириной захвата 8,4 м. Внесение жидких комплексных удобрений осуществляли с использованием оборудования, разработанного компанией ООО «АПАРЕК» (растениепитатель), позволяющего вносить ЖКУ совместно с посевом и в междурядье, а также устанавливать его на любою сеялку, как для пропашных культур, так и для культур сплошного сева, и междурядный культиватор (рисунок 18).

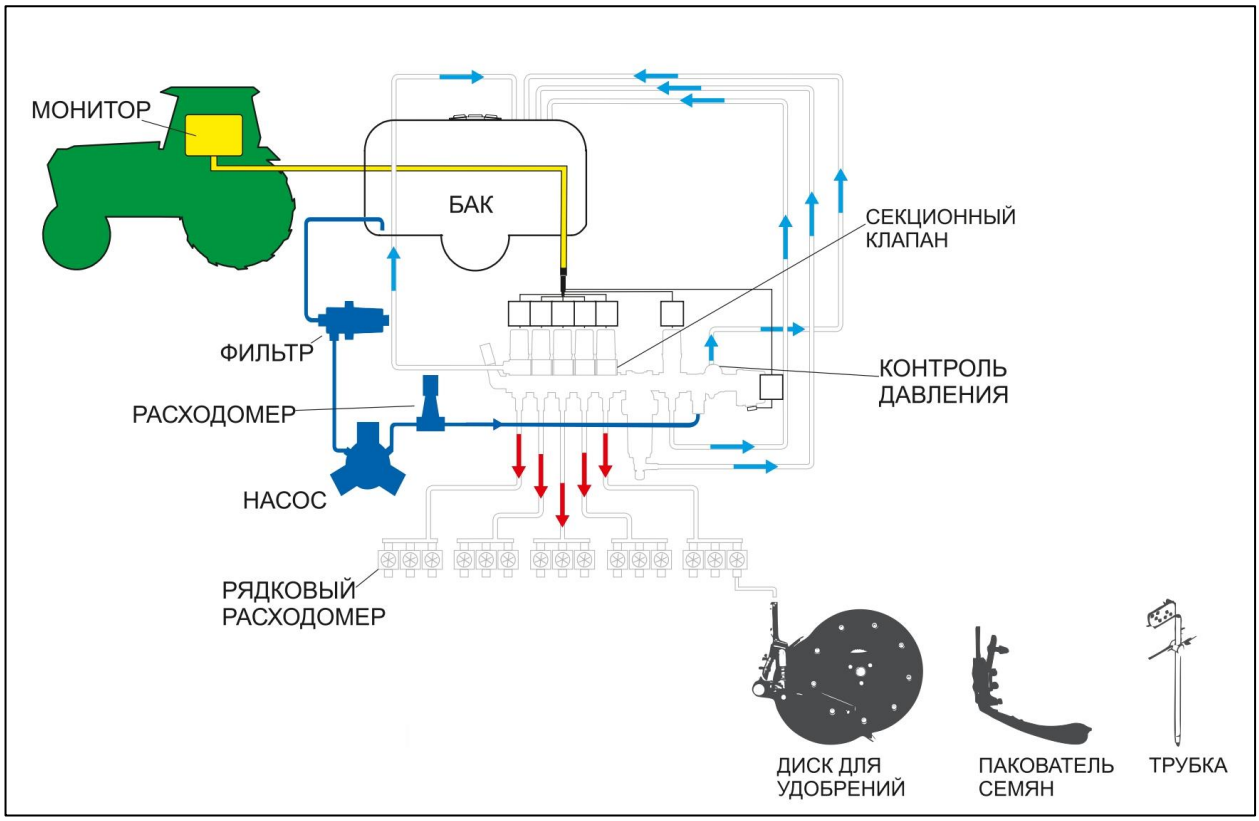


Рисунок 18 – Устройство растениепитателя (производство ООО «АПАРЕК»)

Основные компоненты растениепитателя:

- система управления и контроля;
- ёмкости и насос подачи жидкости;
- распределение жидкости по рядкам;
- вылив жидкости в рядок.

Раствор подается из емкости посредством насоса к узлу контроля подачи жидкости. С помощью расходомера и пропорционального клапана регулировки давления создается требуемое давление жидкости для поддержания установленной нормы внесения. Далее жидкость поступает в рядковые расходомеры, где происходит вторая ступень контроля за нормой внесения и равномерности распределения в каждом рядке.

После расходомеров жидкость подается в рядок, где могут быть установлены различные вносители (диск, трубка, пакователь семян). Контроль всех параметров происходит в автоматическом режиме. Скорость движения определяется посредством собственного GPS датчика и антенны. Требуемая норма внесения устанавливается в мониторе и может изменяться в любой момент времени. Рабочая

скорость от 3 до 30 км/ч, диапазон нормы внесения от 15 до 500 л/га (кратность нормы 1 л), количество контролируемых рядов до 128.

Растениепитатели могут устанавливаться на пропашные, зерновые и другие типы сеялок. Также могут устанавливаться на культиваторы и глубокорыхлители.

Посев проводился пропашными 12-ти рядными сеялками Mater Macc 12*70 см и шириной захвата 8,4 м, на которые был установлен растениепитатель для внесения ЖКУ, в сцепке с трактором New Holland 7000 (рисунок 19, 20).

Рисунок 19 – Сеялка Mater Macc 12*70 с установленным растениепитателем (фото автора)

Рисунок 20 – Процесс внесения ЖКУ (фото автора)

Междурядная культивация проводилась с помощью КРН-5,6, на который был установлен растениепитатель, с трактором New Holland 7000 (рисунок 21).

Рисунок 21 – Междурядный культиватор с установленным растениепитателем (фото автора)

Подкормки и средства защиты растений использовались одновременно на каждом варианте опыта и включали в себя:

1. внесение в фазу 3-5 листа: микроудобрение «Ультрамаг» (хелат цинка) 0,5 л/га + «МэйсТер Пауэр» 1,5 л/га (послевсходовый гербицид), рабочий раствор 250 л/га.

2. внесение после междурядной культивации в фазу 7-8 листьев: карбамид 10 кг/га д. в. или 21,7 кг физ. веса + «Ультрамаг» (хелат цинка) 0,5 л/га, рабочий раствор 250 л/га.

Уборку урожая проводили при полном созревании кукурузы и влажности зерна 14-17 % сплошным методом (прямое комбайнирование), комбайном New Holland CR (8,4 м).

Таблица 3 – Перечень технологических операций при возделывании кукурузы в хозяйстве

Технологические операции	Состав агрегата		Глубина обработки, см	Сроки проведения
	Марка трактора	Марка прицепного орудия		
Лущение стерни	К-744	ЛДГ-20	6-8	После уборки предшественника
Зяблевая вспашка	К-744	ПЛН-5-35	25-27	Через 15-20 дней после лущения
Культивация	John Deere 8420	Lemken Kompaktor	10-12	По мере появления всходов сорняков
Внесение удобрений	МТЗ-82.1	РУМ-1500	Поверхностно	Перед культивацией (для вариантов без ЖКУ)
Предпосевная культивация	John Deere 8420	Lemken Kompaktor	6-8	В день посева
Посев	New Holland 7000	Mater Macc 12*70 (с установленным растениепитателем для вариантов с ЖКУ)	4-5	Апрель-май
1-я обработка (СЗР+Zn)	МТЗ-82.1	ОП-3000	Поверхностно	Фаза 3-5 листьев
Междурядная культивация	New Holland 7000	КРН-5,6 (с установленным растениепитателем для вариантов с КАС)	7-9	Фаза 3-5 листьев
2-я обработка (подкормка)	МТЗ-82.1	ОП-3000	Поверхностно	Фаза 7-8 листьев
Уборка	New Holland CR		-	Фаза полной спелости

2.3.2 Схема и описание опыта

Опыт закладывали в производственных условиях, согласно принятым в агрохимии и растениеводстве методикам. Схема опыта включала два фактора: агроэкологическая группа земель (фактор А) и система питания (фактор Б).

Фактор А – агроэкологические группы земель:

1. Плакорные земли.
2. Эрозионные земли.
3. Переувлажненные земли.

Фактор Б - система питания (на каждой агроэкологической группе земель):

1. Фон – Аммофос – $N_{12}P_{52}$ кг д.в./га.

На фоновых участках вносили аммофос (NP 12:52) в дозе 100 кг/га осенью под вспашку. Посев проводили без внесения минеральных удобрений.

2. Фон + Naa – $N_{12}P_{52} + N_{51}$ кг д.в./га.

На участках, со схемой питания хозяйства, в качестве основного удобрения, вносили 100 кг/га аммофоса осенью под вспашку. При посеве вносили 150 кг/га аммонийной селитры.

3. Фон + ЖУ ЛиквиФорс марка NPK 7:23:7 – $N_{12}P_{52} + N_7P_{23}K_7$ кг д.в./га.

В качестве основного удобрения, вносили 100 кг/га аммофоса осенью под вспашку. Припосевное внесение в рядок NPK 7:23:7 – 75 л/га или эквивалент 100 кг/га (рабочий раствор с учетом воды 150 л/га).

4. Фон + ЖУ ЛиквиФорс марка NPK 7:23:7 + смесь (КАС-32 + ЖУ ЛиквиФорс марка NS 8:9) – $N_{12}P_{52} + N_7P_{23}K_7 + N_{45}S_6$ кг д.в./га.

Осенью под вспашку внесение 100 кг/га аммофоса, припосевное внесение в рядок NPK 7:23:7 – 75 л/га, подкормка по вегетации в фазу 3-5 листьев, совместно с междурядной обработкой смесь КАС-32 и NS 8:9 – 100 л + 75 л/га или эквивалент 130 кг + 82,5 кг/га (рабочий раствор с учетом воды 350 л/га).

Описанные 4 варианта систем питания, были заложены на трех группах земель: плакорные, эрозионные и переувлажненные. Всего в опыте 12 вариантов в 4-х кратной повторности.

Предшественником в первый год на всех участках была озимая пшеница, затем кукуруза в течении 3-х лет исследования. Норма высева кукурузы 70 тыс. шт/га, междурядье 70 см.

Учетная площадь каждого варианта составляет 15 га (без учета обсева и защитных полос). Границы каждого варианта отбивались по координатам с помощью GPS. Каждый вариант опыта и повторности находились на одном месте в течении 3-х лет исследования.

2.3.3 Методы исследования

В соответствии с задачами и вопросами, поставленными в диссертации, при проведении опыта были проведены соответствующие наблюдения, анализы и учет:

1. Определение агрохимических свойств почвы:

- отбор почвенных проб проводили согласно ГОСТ 28168 – 89;
- определение pH (вод) – потенциометрически по методу ЦИНАО (ГОСТ 26483-85);
- определение содержания органического углерода по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91);
- определение щелочногидролизуемого азота по А.Х. Корнфилду;
- определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26204-91);
- определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена-Гильковица (ГОСТ 27821-2020);
- определение гранулометрического состава пипеточным методом (ГОСТ 12536-2014).

2. Оценка агроэкологических условий проводилась по методике В.И. Кирюшина «Методическое руководство по агроэкологической оценке земель, проектированию адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий» и включала в себя:

2.1 Описание геоморфологических условий с использованием космических снимков (10 м/пикс), снимков рельефа: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с пространственным разрешением 30м/пикс и Alos Palsar – 12,5 м/пикс. Анализ данных проводился в геоинформационных системах QGIS 3.16.7 и SAGA 8.3.0.

2.2 Агроклиматические условия. Оценивались архивные метеорологические данные температуры и осадков. Были рассчитаны термические показатели (среднегодовая и среднемесячные температуры, абсолютные минимумы и максимумы, Сумма температур выше 10 °С, даты первого осеннего и последнего весеннего заморозка и т.д.), показатели влагообеспеченности (суммы осадков за год и по месяцам, характер выпадения осадков, вероятность проявления засух и тд.), ГТК (по Селянинову).

3. Структура почвенного покрова. Почвенно-ландшафтное картографирование проводилось по методике «Агроэкологической оценки земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий» (2005 г.) и картографии почв с использованием космических снимков и моделей рельефа. По материалам почвенно-ландшафтного обследования разработана ГИС агроэкологической оценки земель в программе QGIS 3.16.7 и SAGA 8.3.0., включающая:

- картограмму цифровой модели рельефа;
- картограмму крутизны склонов;
- картограмму экспозиции склонов;
- топографический индекс влажности (TWI);
- LS-Factor (индекс потенциала плоскостной эрозии);
- карту структур почвенного покрова.

4. Учет урожайности проводился сплошным методом с помощью комбайна. Урожай зерна пересчитывали на 14 % влажность. Влажность зерна определяли экспресс-влагомером «Wile 65».

6. Определение качественных показателей зерна кукурузы:

- содержания массовой доли сырого протеина проводили согласно ГОСТ 32040, ГОСТ Р 51417, ГОСТ 13496.4;

- определение содержания массовой доли сырого жира – ГОСТ 13496.15-2016;
- определение содержание массовой доли сырой клетчатки – ГОСТ 31675-2012;
- определение массовой доли азота – ГОСТ 13496.4-2019;
- определение массовой доли фосфора – ГОСТ 26657-97;
- определение массовой доли калия – ГОСТ 30504-97.

7. Математическая обработка климатических и качественных данных проводилась с помощью пакета анализа Microsoft Excel 2019 и программы STATISTICA 8.0. Статистическую обработку урожайных данных проводили методом двухфакторного дисперсионного анализа с повторениями по Доспехову Б.А. с помощью пакета анализа Microsoft Excel 2019 и программы STATISTICA 8.0.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Агроэкологическая оценка земель

Эффективное использование сельскохозяйственных угодий требует комплексного анализа природных условий и характеристик почвенного покрова. Современные подходы в агроэкологической оценке земель основаны на интеграции данных дистанционного зондирования Земли, цифровых геоинформационных технологий и традиционных методов полевых исследований.

Представлен анализ геоморфологических условий и почвенного покрова исследуемой территории. Особое внимание уделено применению цифровых систем для обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования, что позволило выделить ключевые особенности рельефа исследуемых участков. Также было проведено почвенно-ландшафтное картографирование, позволившее описать структуру почвенного покрова и выявить лимитирующие факторы. Проведена оценка земель, согласно агроэкологической и ландшафтно-экологической классификации.

3.1.1 Оценка геоморфологических условий на основе геоинформационных систем

Цифровая модель рельефа (ЦМР) является ключевым инструментом для визуализации, изучения и анализа ландшафта. ЦМР предоставляет детализированное и количественно выраженное представление рельефа, позволяя точно анализировать высоты, уклоны и экспозицию местности. С использованием ЦМР возможно проводить моделировании различных геоморфологических процессов, таких как эрозия, сток поверхностных вод и распределения влаги. Цифровая модель рельефа помогает точно определить участки с различными уклонами, что позволяет выбрать наиболее подходящие

земли для выращивания определённых культур, а также определить земли подверженные эрозии или переувлажнению.

Для проведения исследования были выбраны 3 группы участков, относящиеся к различным элементам рельефа:

- группа 1 – равнинная часть водораздела (поля: 1-1, 1-2, 1-3, 1-4);
- группа 2 – участки, расположенные на склонах водораздела (поля: 2-1, 2-2, 2-3, 2-4);
- группа 3 – нижние части склона водораздела и низины (поля: 3-1, 3-2, 3-3, 3-4).

Рельеф территории проведения исследования представляет собой плоско-волнистую равнину, расчлененную элементами гидрографической сети (лощины и ложбины) различной глубины и степени врезанности. Коэффициент расчленённости территории средний (0,25-0,50 км/км^2) (рисунок 22).

Первая группа земель расположена на равнинном участке в средней части длинного водораздельного склона и представляет собой плоскую субгоризонтальную поверхность с углом наклона менее 1°. Микрорельеф выражен слабо, основными формами являются: микро-понижения, западины и ложбино-образные понижения, которые играют роль в локальном перераспределении влаги.

Участки второй группы относятся к средней и нижней части склона водораздела. На полях 2-2 и 2-1 в восточной и северо-восточной части присутствует выраженный уклон в сторону балки крутизной до 5°. Микрорельеф представлен теми же формами, через поле 2-1 проходит ложбина, уходящая в балку, которая имеет достаточно сильный поверхностный сток и высокую эрозионную опасность. На поле 2-3 уклон более выражен в северной части на склоне широкой ложбины.

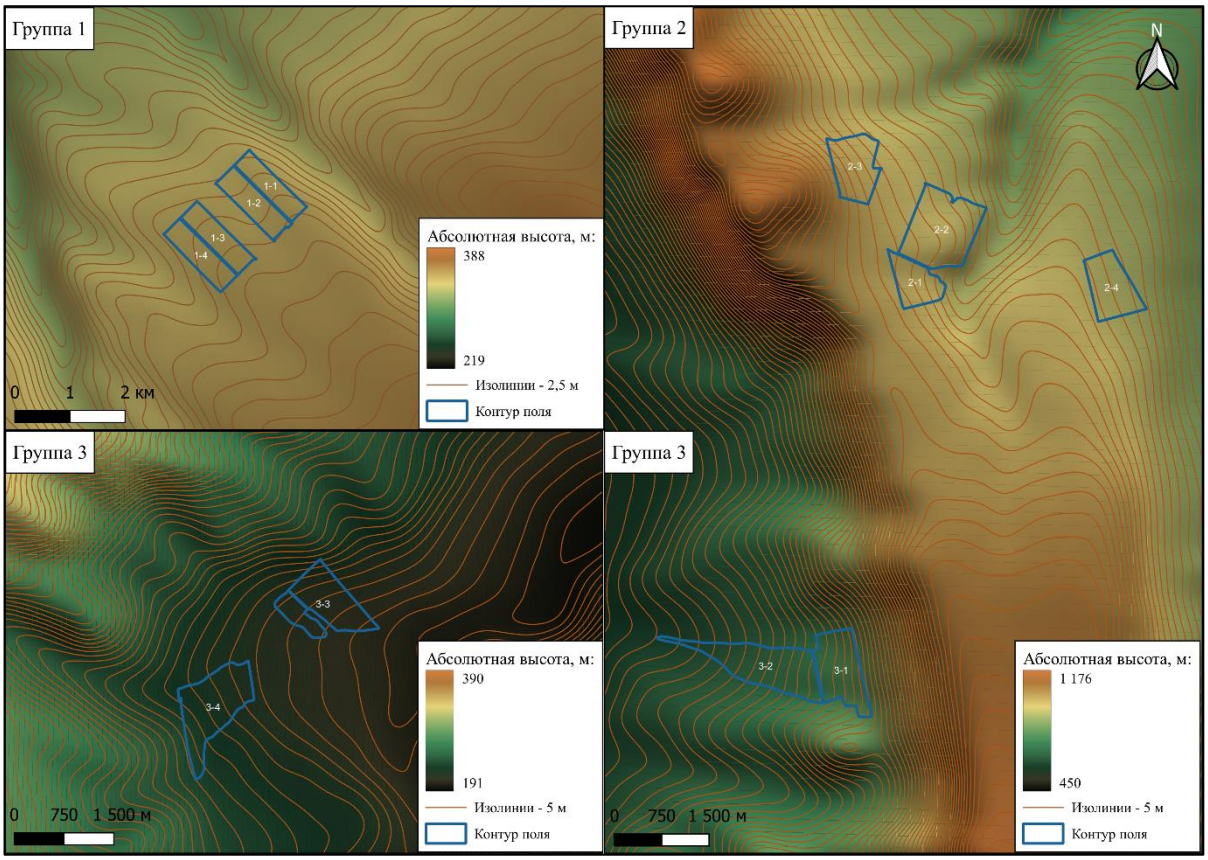


Рисунок 22 – Картограмма цифровой модели рельефа исследуемой территории

Третья группа полей расположена в нижней части склонов водоразделов. Поля 3-1 и 3-2 расположены между двумя увалами с северной и южной стороны и крутым обрывом водораздела с восточной. Микрорельеф на полях представлен микро-понижениями и западинами, в которых накапливается избыточная влага, поступающая с вышележащих элементов рельефа. Поля 3-3 и 3-4 находятся в нижней части юго-восточного склона водораздела, имеют ровный, с небольшим уклоном, рельеф и развитый микрорельеф, в связи с чем поступающая с водораздела влага накапливается на полях.

На картограмме крутизны склонов цветом показаны группировки земель в зависимости от уклона (рисунок 23). Первая группа полей, расположенная на равнинной дренированной территории, представляет собой субгоризонтальную поверхность с уклоном менее 1°. Согласно

агроэкологической группировке земель, данные участки относятся к плакорной группе земель.

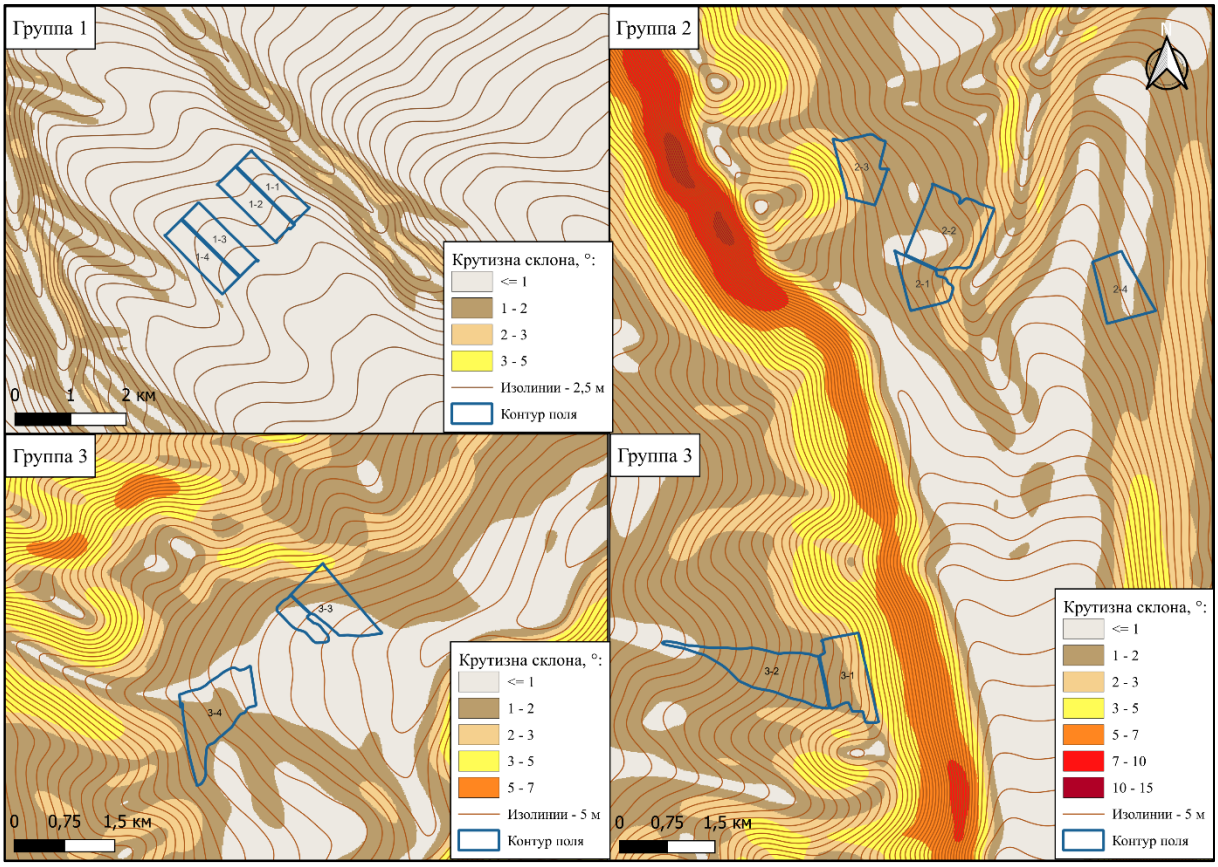


Рисунок 23 – Картограмма крутизны склонов исследуемой территории

Вторая группа расположена на склонах со средней крутизной 2-3° и максимальным уклоном до 5°. Поля 2-1, 2-2 и 2-4 имеют выпуклую форму склонов, поле 2-3 – вогнутую.

Таблица 4. Распределение площади участков по величине уклона местности, %

Номер поля	Уклон, °			
	0-2°	2-3°	3-5°	5-7°
2-1	11,6	37,5	48,6	2,3
2-2	20,4	48,1	30,6	0,9
2-3	17,1	45,5	36,7	0,8
2-4	13,4	27,8	17,9	0,2

Исследуемые территории характеризуются градиентом уклона в диапазоне 2-5°, согласно общепринятой классификации, такие участки соответствуют категориям пологих (2-3°) и слабопокатых (3-5°) склонов. Проведенный анализ показывает, что увеличение крутизны до 2° инициирует развитие линейной эрозии, а при достижении 3-5° наблюдается интенсивное развитие эрозионных процессов (Кирюшин, 2005). Согласно проведенному исследованию, вторая группа земель относится к эрозионным землям.

Третья группа полей расположена в нижней части вогнутого склона водораздела с уклоном 1-2° (поля 3-1 и 3-2). Поля 3-3 и 3-4 находятся на склоне с уклоном менее 1-2°. В следствии аккумуляции поверхностных вод, поступающих с близлежащих водоразделов и увалов, при минимальном уклоне, данные группы относятся к переувлажненным землям.

На рисунке 24 представлена модель TWI (Topographic Wetness Index) которая используется для оценки влияния рельефа на накопление влаги в почве и показывает водный баланс в ландшафтах. Модель отражает склонность участка к аккумуляции воды и учитывает как уклон местности, так и площадь водосбора. TWI показывает, какие участки ландшафта более подвержены накоплению влаги, и, соответственно, могут быть более влажными. С помощью индекса TWI можно визуализировать зависимость между влагообеспеченностью и формой рельефа.

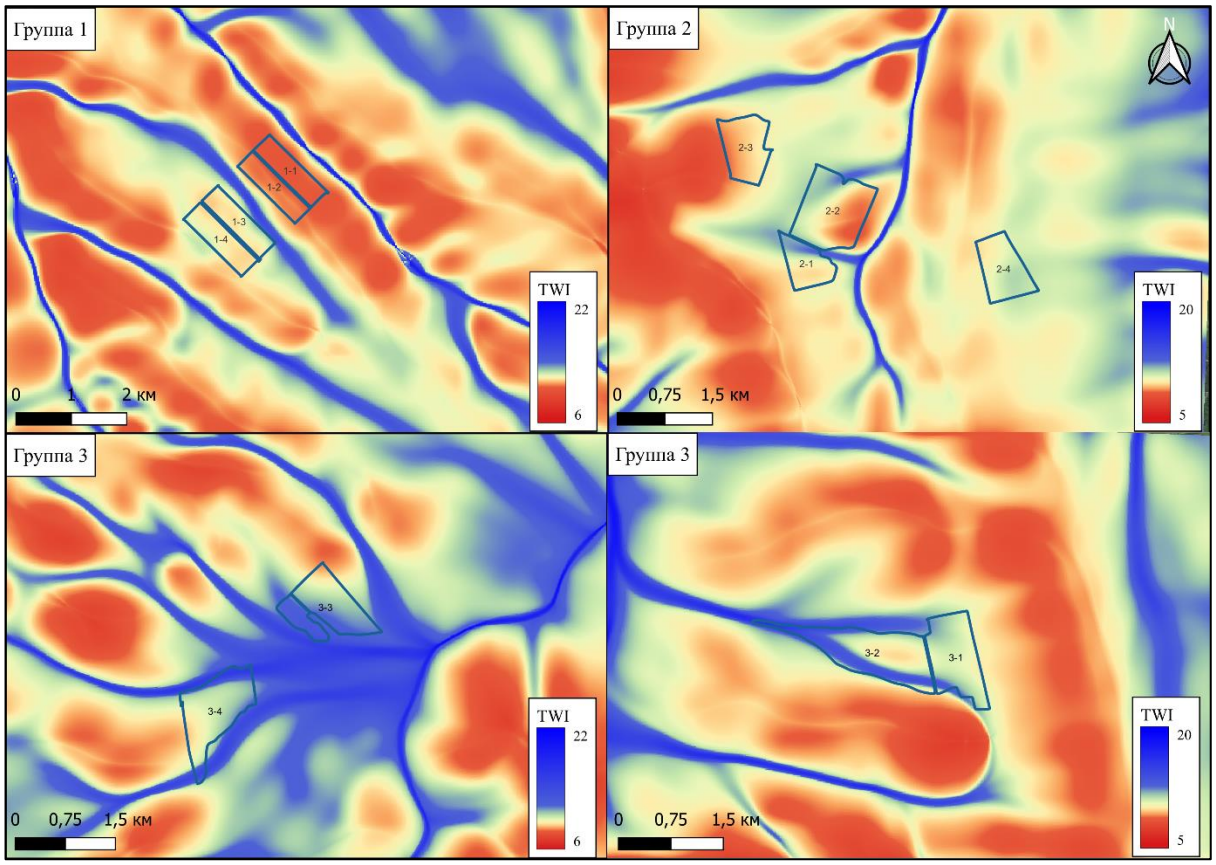


Рисунок 24 – Топографический индекс влажности исследуемой территории (TWI)

Участки первой группы, в основном, имеют низкое значение индекса TWI, что говорит о слабой аккумуляции воды на полях. На второй группе земель индекс отлично показывает закономерный недостаток влаги на склонах, подверженных эрозии, в следствии усиления стока. Наиболее ярко это выраженно на полях 2-2 и 2-3. Поля третьей группы земель, напротив, имеют высокое значение индекса TWI, что говорит об избыточной увлажненности и потенциальному накоплению влаги на данной территории.

Использование модели LS-Factor позволяет оценить индекс потенциала плоскостной эрозии, как элемента универсальной модели математического уравнения потерь почвы (Universal Soil Loss Equation – USLE). Индекс оценивает влияние рельефа местности на эрозию почвы (рисунок 25). Он отражает, как уклон и длина склона влияют на процесс смыва почвы водными потоками (L – длинна, S – крутизна склона).

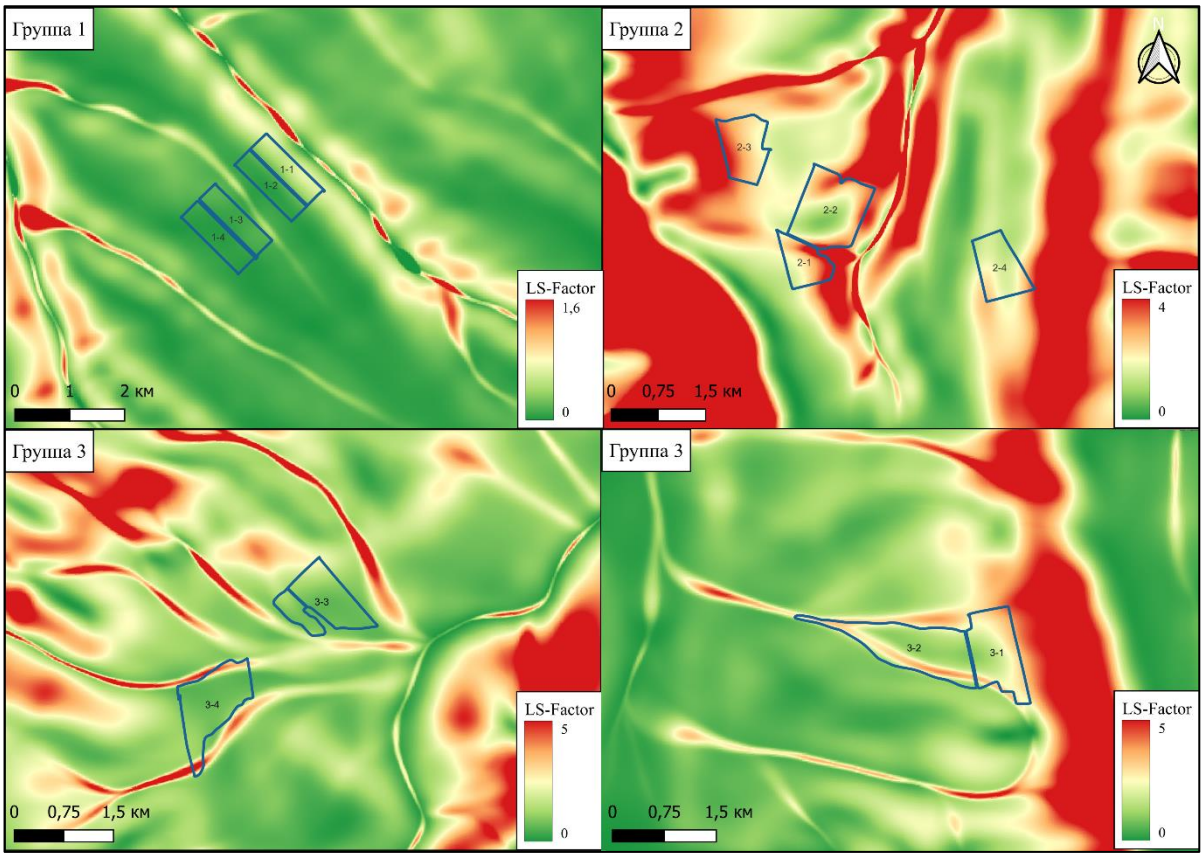


Рисунок 25 – Модель LS-Factor исследуемой территории

Модель LS-Factor объединяет много переменных, включая описанные выше модели, и показывает, какие участки ландшафта более подвержены эрозии. На основе значений данной модели можно предсказать, где почва будет сильнее разрушаться под воздействием стока воды. Чем больше значение LS, тем выше влияние рельефа на процессы водной эрозии.

На основании данной модели видно, что на первой и на третьей группе земель наблюдается наименьшее значение индекса LS и влияние рельефа на развитие водной эрозии минимально. С другой стороны, значение индекса LS возрастает на второй группе земель (эрозионной) и достигает максимальных значений ближе к краям поля, в следствии увеличения крутизны склона.

Данный индекс показывает характерную взаимосвязь и корреляцию с другими описанными моделями. Первая группа земель отличалась наименьшим уклоном и накоплением влаги по моделям крутизны склона и TWI, в следствии чего эрозионная опасность на данной группе минимальна. На второй группе земель выявлена зависимость между высоким LS значением

и минимальным накоплением влаги в следствии стока и развития эрозионных процессов.

Третья группа земель выделялась наиболее интенсивным накоплением влаги, при незначительном уклоне, в связи с чем значение индекса LS-Factor было минимальным. При такой комбинации индексов с учетом ЦМР можно сделать вывод об избыточном накоплении влаги на данных участках.

Модель экспозиции рельефа (рисунок 26) показывает ориентацию поверхности склонов относительно сторон света. Экспозиция склонов влияет на инсоляцию, температуру, влажность и в целом на микроклимат в различных частях ландшафта. Ориентация склонов влияет на то, сколько солнечного света они получают, что в свою очередь влияет на температуру поверхности почвы, а также на влажность.

На картограмме экспозиции склонов (рисунок 26) красным цветом показана теплая экспозиция (к ней относятся: юг, юго- запад, запад и юго-восток), а синим – холодная (север, северо-восток, восток и северо-запад).

Поля первой группы располагаются на ровной территории, в связи с чем экспозиция склона не оказывает на них существенного влияния. Вторая группа земель расположена на склонах холодной экспозиции, что уменьшает влияние водной эрозии при частом снеготаянии. С другой стороны данные земли расположены в верхней части склона водораздела с северо-восточной экспозицией, что увеличивает опасность проявления ветровой эрозии, так как преобладающими ветрами на данной территории в летний период являются восточные ветра, для которых характерна повышенная температура и минимальная влажность.

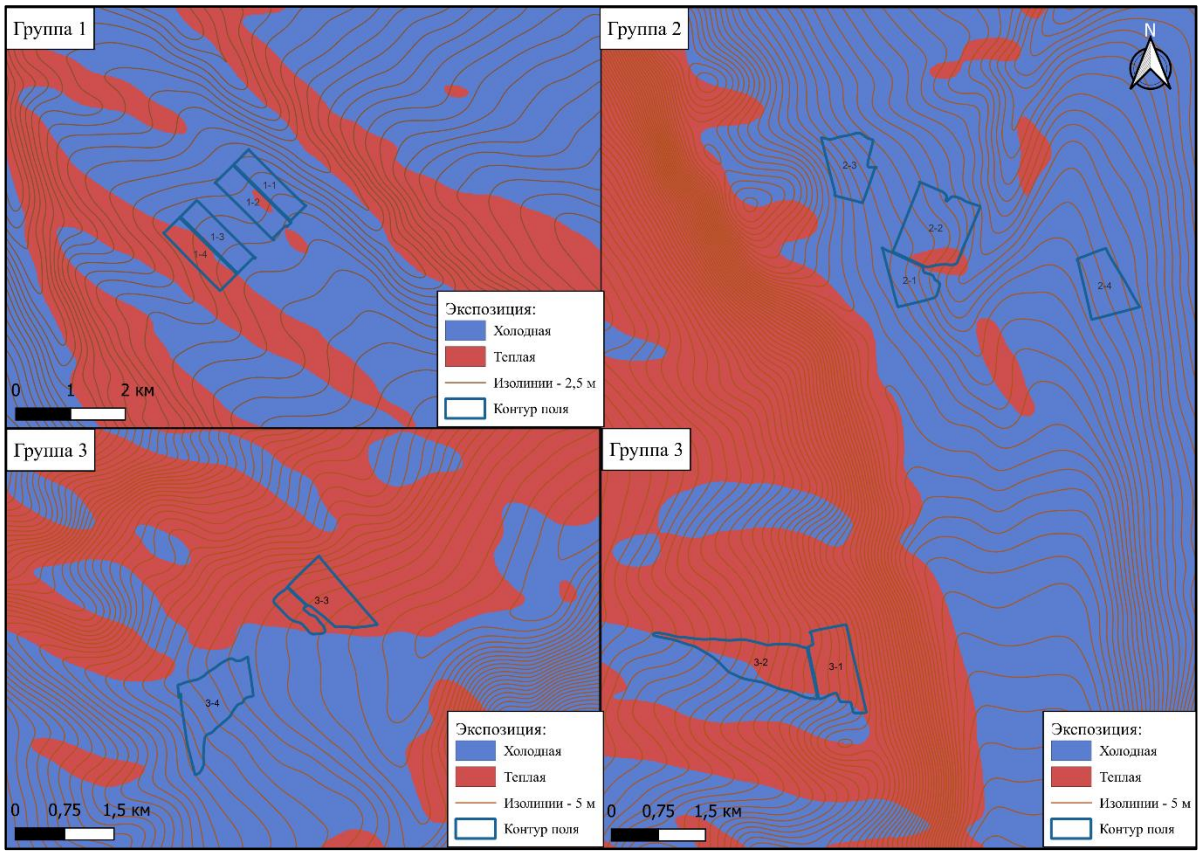


Рисунок 26 – Картограмма экспозиции склонов исследуемой территории

Большая часть полей третьей группы расположена в нижней части склона южной экспозиции и одно поле северной экспозиции (поле 3-4). Имея минимальный уклон, ориентация склонов оказывает слабое влияния на микроклимат полей, однако почвы на полях южной экспозиции могут быстрее достигать физической спелости, в следствии, большего прихода тепла, чем почвы северной экспозиции.

Все индексы и картограммы, построенные по ЦМР, позволяют визуализировать и оценить вклад рельефа в формирование и развитие различных процессов, в том числе водной эрозии и переувлажнения. В таблице 5 собрана общая характеристика участков по всем вышеописанным моделям.

Таблица 5 – Общая характеристика исследуемых участков

Группа участков	Цифровая модель рельефа (ЦМР)	Крутизна склонов	Экспозиция склонов	Топографический индекс влажности (TWI)	LS-Factor
1	Средняя часть длинного водораздельного склона	> 1°	Без экспозиции	Слабый приток и аккумуляция влаги на полях	Минимальный риск развития эрозии
2	Средняя и нижняя часть склона водораздела	2-3°	Холодная	Недостаточная увлажненность в следствии усиления поверхностного стока	Риск развития эрозии
		3-5°			Сильное развитие эрозии
3	Нижняя часть склона водораздела	1-2°	Поля 3-1, 3-2, 3-3 – теплая; поле 3-4 – холодная	Потенциальное накопление влаги и избыточная увлажненность	Минимальный риск развития эрозии

Картограммы и модели, построенные на основе цифровой модели рельефа (ЦМР), позволяют всесторонне изучить влияние рельефа на формирование и развитие различных природных процессов. Такие модели, как экспозиция и крутизна склонов, LS-Factor и TWI (топографический индекс влажности) помогают визуализировать и количественно оценить вклад рельефа в развитие таких процессов и явлений, как водная эрозия, накопление влаги, распределение тепла и солнечной энергии, что даёт возможность классифицировать и более точно планировать использование сельскохозяйственных земель.

3.1.2 Структура почвенного покрова. Характеристика агроэкологических групп и видов земель

Зональным типом почв на территории проведения исследований является чернозем типичный. В зависимости от местоположения в ландшафте почвы дифференцированы по степени смытости (от не смытых – занимающих поверхности водоразделов с уклоном около 1°, до среднесмытых - приуроченных как правило к склонам с уклоном 3°) и мощности гумусового

горизонта (А+АВ) (от среднемощных с гумусовым горизонтом 40-80 см до мощных с гумусовым горизонтом 80-120 см).

Основным фактором, определяющим структуру почвенного покрова на территории исследования выступает рельеф. В зависимости от положения в рельефе меняется строение почвенного профиля. Вследствие поверхностного переувлажнения, в пониженных элементах рельефа, формируются лугово-черноземные почвы, являющиеся полугидроморфными аналогами черноземов. Основной почвообразующей породой на исследуемой территории является лессовидный тяжелый суглинок.

Первый массив полей (1-1, 1-2, 1-3 и 1-4), приуроченный к равнинному ландшафту, располагается в средней части длинного водораздельного склона с крутизной менее 1°. Структура почвенного покрова представлена комбинацией черноземов типичных среднемощных и мощных слабогумусированных тяжелосуглинистых на лессовидном тяжелом суглинке (мощность гумусового горизонта 70-90 см). Это автоморфные почвы, которые преобладают на ровных дренируемых территориях с минимальным уклоном (рисунок 27, 28).

Согласно агроэкологической типизации земель, такая территория относиться к группе плакорных земель. Плакорные земли являются базовой категорией, которые максимально полно отражают все основные зонально-провинциальные особенности данной территории.

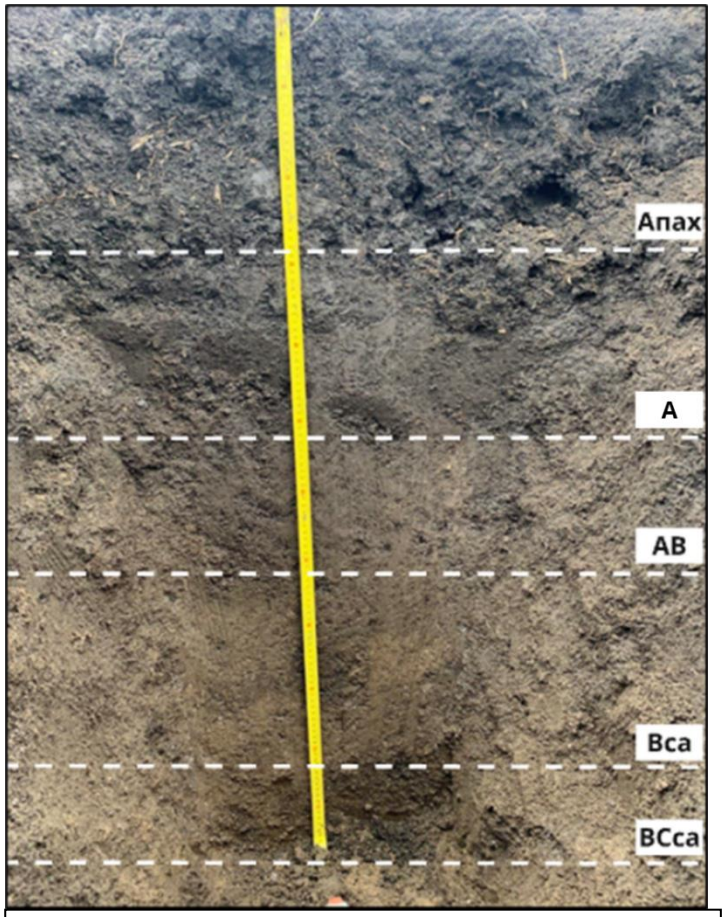


Рисунок 27 – почвенный разрез, поле 1-1
КидпСССР-1977: Чернозем типичный среднемощный слабогумусированный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке
КидпР-2008: Агрочернозем миграционно-сегрегационный среднемощный среднепахотный средне гумусированный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке

Таблица 6 – Морфологическое описание почвенного разреза (рисунок 27)

Индекс	Мощность, см	Описание
Апах	$\frac{0-30}{30}$	Темно-серый, влажный, тяжелосуглинистый, структура – комковато-зернистая, плотность сложения – рыхлая, включения в виде растительных остатков различной степени разложения, переход постепенный, ровный.
А	$\frac{30-53}{23}$	Темно-серый, влажный, структура – ореховато-зернистая, плотность сложения – рыхлая, включения в виде растительных остатков различной степени разложения уменьшается вниз по профилю, переход постепенный, ровный.
АВ	$\frac{53-72}{19}$	Темно-бурый, свежий, структура – комковато-ореховатая, плотность сложения – рыхлый сверху и немного уплотнен к низу, новообразования в виде карбонатной плесени с 65 см, включения в виде редких корней, переход постепенный, ровный.
Вса	$\frac{72-103}{31}$	Бурый, свежий, структура – ореховато-призматическая, плотность сложения – плотный, новообразования в виде значительного количества карбонатной плесени (проявляются по мере подсыхания), переход постепенный, ровный.
ВСса	$\frac{103-150}{47}$	Светло-бурый, свежий, структура – неоднородная, призматическая, плотность сложения – плотный, новообразования в виде значительного количества карбонатной плесени (проявляются по мере подсыхания), переход постепенный, ровный.
Сса	>150	Светло-палево-бурый (неоднородный), свежий, тяжелосуглинистый, структура – неоднородная, бесструктурная, плотность сложения – плотный, новообразования в виде значительного количества карбонатной плесени и белоглазки.

КидпСССР-1997 – Классификация и диагностика почв СССР, 1977 г.

КидпР-2008 – Классификация и диагностика почв России, 2004 г.

WRB: Haplic Chernozems (Anthric).

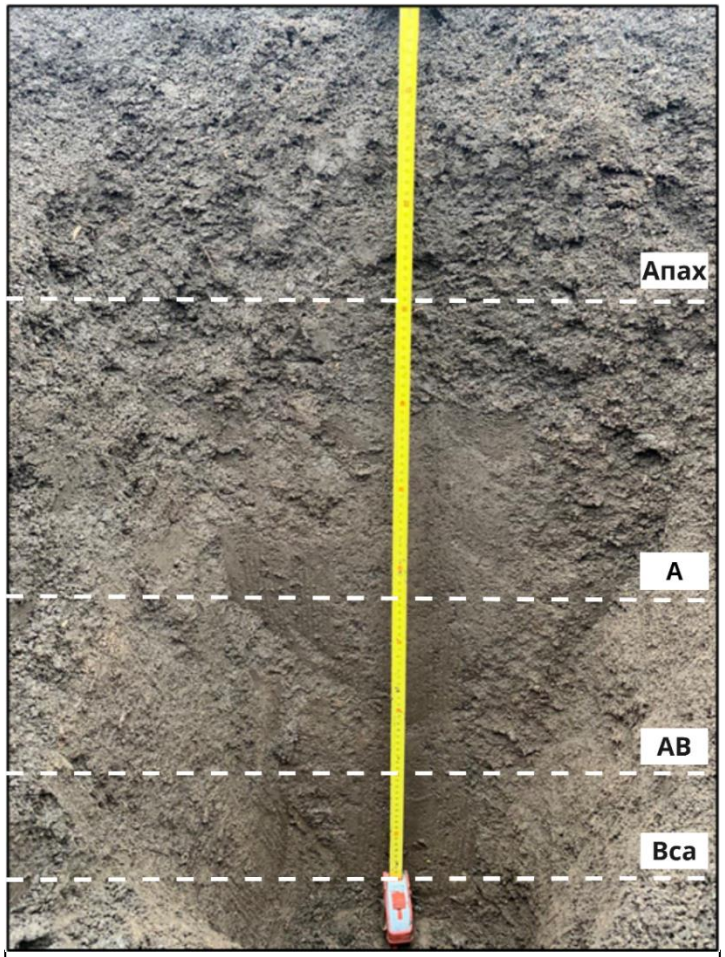


Рисунок 28 – почвенный разрез, поле 1-3
КидпСССР-1977: Чернозем типичный мощный слабогумусированный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке
КидпР-2008: Агрочернозем миграционно-сегрегационный мощный среднепахотный средне гумусированный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке

Таблица 7 – Морфологическое описание почвенного разреза (рисунок 28)

Индекс	Мощность, см	Описание
Апах	$\frac{0-30}{30}$	Темно-серый, влажный, тяжелосуглинистый, структура – комковато-зернистая, плотность сложения – рыхлая, включения в виде растительных остатков различной степени разложения, переход постепенный, ровный.
А	$\frac{30-65}{35}$	Темно-серый, влажный, структура – комковато-зернистая, плотность сложения – рыхлая, включения в виде растительных остатков различной степени разложения уменьшается вниз по профилю, переход постепенный, ровный.
АВ	$\frac{65-90}{25}$	Темно-бурый, влажный, структура – комковато-ореховатая, плотность сложения – рыхлый сверху и немного уплотнен к низу, новообразования в виде карбонатной плесени с 82 см (проявляются по мере подсыхания), включения в виде редких корней, переход постепенный, ровный.
Вса	$\frac{90-165}{75}$	Бурый, свежий, структура – неоднородная комковато-призматическая, плотность сложения – плотный, новообразования в виде значительного количества карбонатной плесени (проявляются по мере подсыхания), переход постепенный, ровный.
ВСса	$\frac{165-200}{35}$	Светло-бурый, свежий, плотность сложения – плотный, новообразования в виде значительного количества карбонатной плесени (проявляются по мере подсыхания), белоглазка появляется в нижней части горизонта.
Сса	>200	Палево-бурый (неоднородный), свежий, тяжелосуглинистый, плотность сложения – плотный, новообразования в виде значительного количества карбонатной плесени и белоглазки.

КидпСССР-1997 – Классификация и диагностика почв СССР, 1977 г.

КидпР-2008 – Классификация и диагностика почв России, 2004 г.

WRB: Haplic Chernozems (Anthric)

С учетом проведенного полевого обследования и оценки рельефа, поля 2-1, 2-2, 2-3 и 2-4 отличаются от плакорных земель, так как имеют лимитирующие факторы, которые не позволяют отнести их к данной группе. Основной лимитирующий фактор связан с рельефом и крутизной склонов, такие земли отличаются от плакорных неравномерной влаго- и теплообеспеченностью, а также почвенным покровом.

Структура почвенного покрова представлена вариациями черноземов типичных среднемощных слабогумусированных разной степени эродированности (от не смытых до среднесмытых). Они отличаются укороченным гумусовым горизонтом, по сравнению с плакорными землями, а также меньшей влагообеспеченностью в следствии усиления поверхностного стока и развитию эрозионных процессов (рисунок 29, 30).

Согласно классификации и диагностики почв СССР 1977 г., разделение пахотных черноземов по степени эродированности, с мощностью гумусового горизонта более 50 см и глубиной вспашки не менее 22 см, производят по следующим критериям:

- слабосмытые – горизонт А смыт на 30%, мощность подпахотного гумусового слоя уменьшена до 25% и запасы гумуса ниже на 10%, по сравнению с неэродированной почвой;

- среднесмытые – горизонт А смыт более чем на половину, мощность гумусового горизонта на 30-50% меньше, по сравнению с неэродированной почвой.

Согласно данной классификации, почвы, на части исследуемой территории (на полях 2-1, 2-2, 2-3 и 2-4), относятся как к слабосмытым, так и к среднесмытым. Слабосмытые почвы отличаются от несмытых меньшей мощностью гумусового горизонта (55-60 см) и большей потерей запасов гумуса, на 10 %. Физические свойства практически такие же, как и у несмытых чернозёмов, но негативные последствия эрозионного процесса все же присутствуют. Нарушается структура почвы, она несколько уплотнена, в связи с этим изменяются водно-физические свойства почвы.

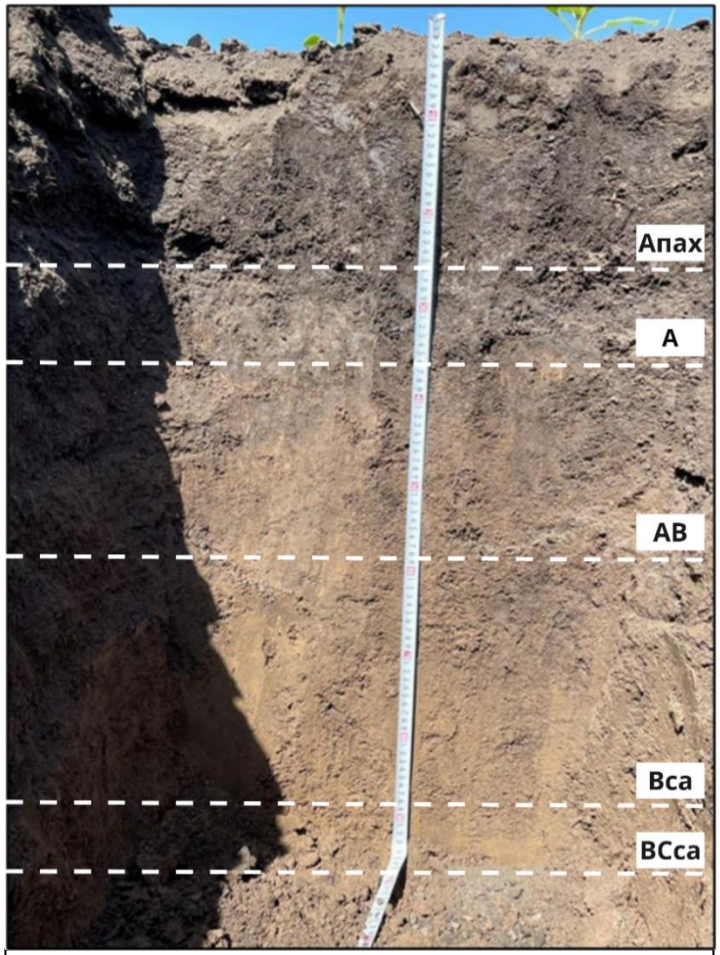


Рисунок 29 – почвенный разрез, поле 2-3
КидпСССР-1977: Чернозем типичный среднемощный слабогумусированный слабосмытый тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке
КидпР-2008: Агрочернозем миграционно-сегрегационный среднемощный слабосмытый среднепахотный мало гумусированный

Таблица 8 – Морфологическое описание почвенного разреза (рисунок 29)

Индекс	Мощность, см	Описание
Апах	$\frac{0-25}{25}$	Темно-серый, влажный, тяжелосуглинистый, структура – глыбисто-мелкозернистая, пылеватая, плотность сложения – рыхлая, включения в виде растительных остатков различной степени разложения, переход постепенный, ровный.
А	$\frac{25-35}{10}$	Темно-серый, влажный, структура – комковато-зернистая, плотность сложения – рыхлая, включения в виде растительных остатков различной степени разложения уменьшается вниз по профилю, переход заметный, ровный.
АВ	$\frac{35-58}{23}$	Темно-бурый, свежий, структура – неоднородная комковато-ореховатая, плотность сложения – плотный, новообразования в виде карбонатной плесени с 50 см, включения в виде редких корней, переход постепенный, волнистый.
Вса	$\frac{58-90}{32}$	Бурый с гумусовыми затеками, свежий, структура – неоднородная, комковато-призматическая, плотность сложения – плотный, новообразования в виде значительного количества карбонатной плесени (проявляются по мере подсыхания), переход постепенный, ровный.
ВСса	$\frac{90-120}{30}$	Светло-бурый, свежий, структура – неоднородная, призматическая, плотность сложения – плотный, новообразования в виде значительного количества карбонатной плесени (проявляются по мере подсыхания), белоглазка появляется в нижней части горизонта.
Сса	>120	Палево-бурый (неоднородный), свежий, тяжелосуглинистый, плотность сложения – плотный, новообразования в виде значительного количества карбонатной плесени и белоглазки.

КидпСССР-1997 – Классификация и диагностика почв СССР, 1977 г.

КидпР-2008 - Классификация и диагностика почв России, 2004 г.

WRB: Haplic Chernozems (Anthric, Solimovic).

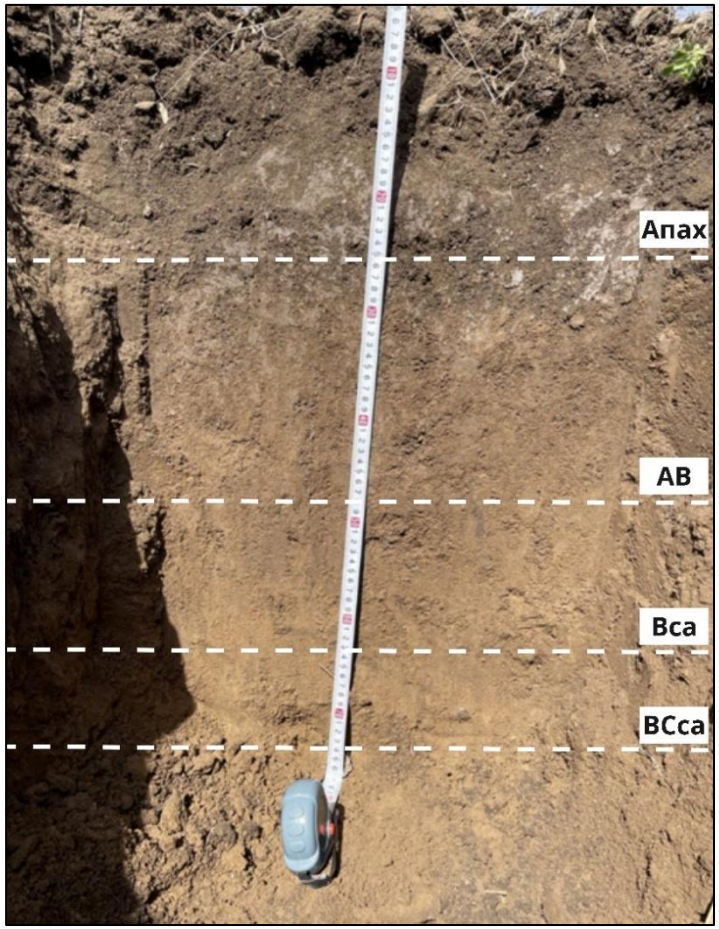


Рисунок 30 – почвенный разрез, поле 2-2
КидпСССР-1977: Чернозем типичный среднемощный слабогумусированный среднесмытый тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке
КидпР-2008: Агрочернозем миграционно-сегрегационный среднемощный среднесмытый среднепахотный мало гумусированный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке

Таблица 9 – Морфологическое описание почвенного разреза (рисунок 30)

Индекс	Мощность, см	Описание
Апах	$\frac{0-25}{25}$	Темно-серый (с бурым оттенком), влажный, тяжелосуглинистый, структура – комковато-глыбистая, пылеватая, плотность сложения – рыхлая, включения в виде растительных остатков различной степени разложения, переход заметный, ровный.
АВ	$\frac{25-47}{22}$	Темно-бурый, свежий, структура – неоднородная, комковато-призматическая, плотность сложения – плотный, новообразования в виде карбонатной плесени с 43 см (проявляются по мере подсыхания), включения в виде редких корней, переход постепенный, волнистый.
Вса	$\frac{47-65}{18}$	Бурый с гумусовыми затеками, свежий, структура – неоднородная, призматическая, плотность сложения – плотный, новообразования в виде значительного количества карбонатной плесени (проявляются по мере подсыхания), переход постепенный, ровный.
ВСса	>65	Светло-бурый, свежий, структура – неоднородная, бесструктурная, плотность сложения – плотный, новообразования в виде значительного количества карбонатной плесени (проявляются по мере подсыхания), белоглазка появляется в нижней части горизонта.

КидпСССР-1997 – Классификация и диагностика почв СССР, 1977 г.

КидпР-2008 - Классификация и диагностика почв России, 2004 г.

WRB: Haplic Chernozems (Anthric, Solimovic).

У среднесмытых почв смыто порядка 30-50 % гумусового горизонта, а потери запаса гумуса колеблются в пределах 20-40 %. Мощность гумусового горизонта 40-50 см, он уплотнен, часто бесструктурный или комковато-глыбистый, имеет бурый оттенок, под пахотным горизонтом залегает гумусовый переходный горизонт небольшой мощности, быстро переходящий в горизонт гумусовых затеков В и переходный к почвообразующей породе горизонт ВС. При этом уменьшается количество водопрочных агрегатов, увеличивается плотность почвы, разрушается её структура, тем самым нарушаются физические и водно-физические свойства почвы.

Существенным последствием эрозии является снижение запасов доступной для растений влаги, что значительно влияет на урожайность культур. Опасность развития эрозии ограничивает их использование для ряда культур, прежде всего пропашных.

Согласно агроэкологической типизации земель, такие участки относятся к эрозионной агроэкологической группе земель, которые характеризуются перераспределением влаги в следствие поверхностного стока, тем самым усиливая процессы водной эрозии и недостаток влагообеспеченности.

Третья группа земель расположена в нижней части склона водораздела, в низинных участках, что обуславливает дополнительный приток влаги и развитие поверхностного увлажнения. В связи с протеканием дополнительных процессов, связанных с переувлажнением, в структуре почвенного покрова присутствуют полугидроморфные аналоги зонального типа почв (поля 3-1, 3-2, 3-3 и 3-4). Структура почвенного покрова, на данных участках, включает в себя луговато-черноземные почвы и их комбинации с черноземами типичными (рисунок 31, 32).

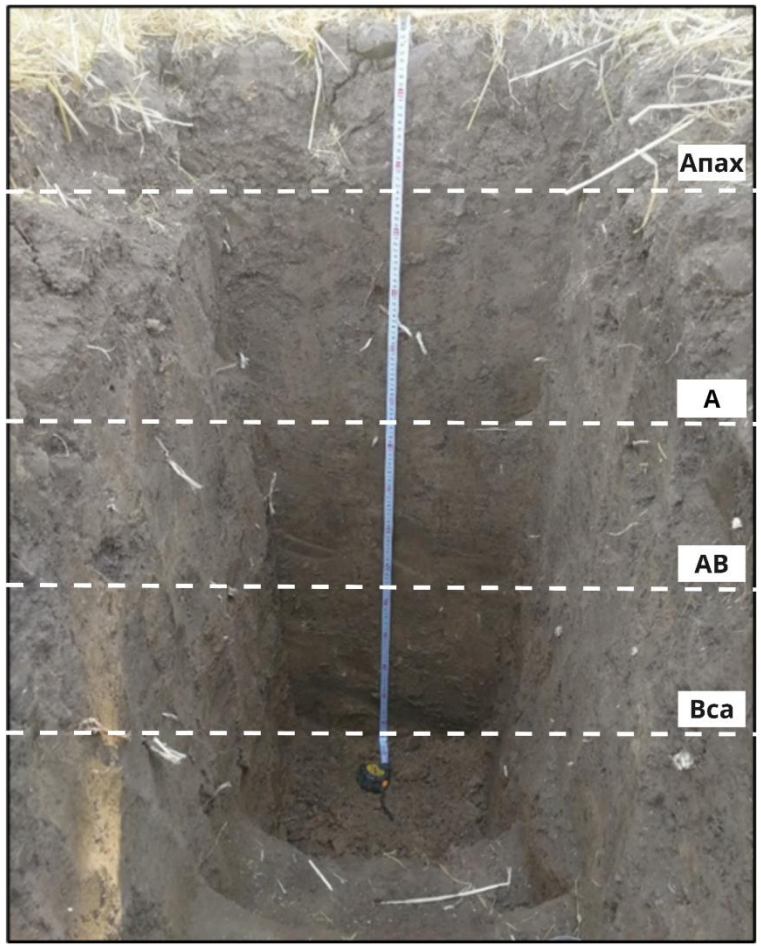


Рисунок 31 – почвенный разрез, поле 3-3
КидпСССР-1977: Луговато-черноземная мощная малогумусная тяжелосуглинистая на лессовидном тяжелом суглинке
КидпР-2008: Агрочернозем гидрометаморфизованный мощный среднепахотный средне гумусированный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке

Таблица 10 – Морфологическое описание почвенного разреза (рисунок 31)

Индекс	Мощность, см	Описание
Апах	$\frac{0-25}{25}$	Темно-серый, влажный, тяжелосуглинистый, структура – комковато-зернистая, плотность сложения – рыхлая, включения в виде растительных остатков различной степени разложения, переход постепенный, ровный.
А	$\frac{25-65}{40}$	Темно-серый с сизоватым оттенком, влажный, структура – крупнозернистая, плотность сложения – рыхлая с постепенным уплотнением вниз по профилю, включения в виде растительных остатков различной степени разложения уменьшается вниз по профилю, переход постепенный, волнистый.
АВ	$\frac{65-105}{40}$	Темно-бурый с сизоватым оттенком и бурыми вкраплениями, влажный, структура – комковато-ореховатая, неоднородная, плотность сложения – плотный, новообразования в виде карбонатной плесени с 100 см (проявляются по мере подсыхания) и мелких охристых пятен железа, включения в виде редких корней, переход постепенный, волнистый.
Вса	$\frac{105-160}{55}$	Бурый с гумусовыми затеками, свежий, структура – неоднородная комковато-призматическая, плотность сложения – плотный, новообразования в виде значительного количества карбонатной плесени (проявляются по мере подсыхания), белоглазки и мелких охристых пятен железа, переход постепенный, ровный.

КидпСССР-1997 – Классификация и диагностика почв СССР, 1977 г.

КидпР-2008 – Классификация и диагностика почв России, 2004 г.

WRB: Stagnic Chernozems (Anthric).

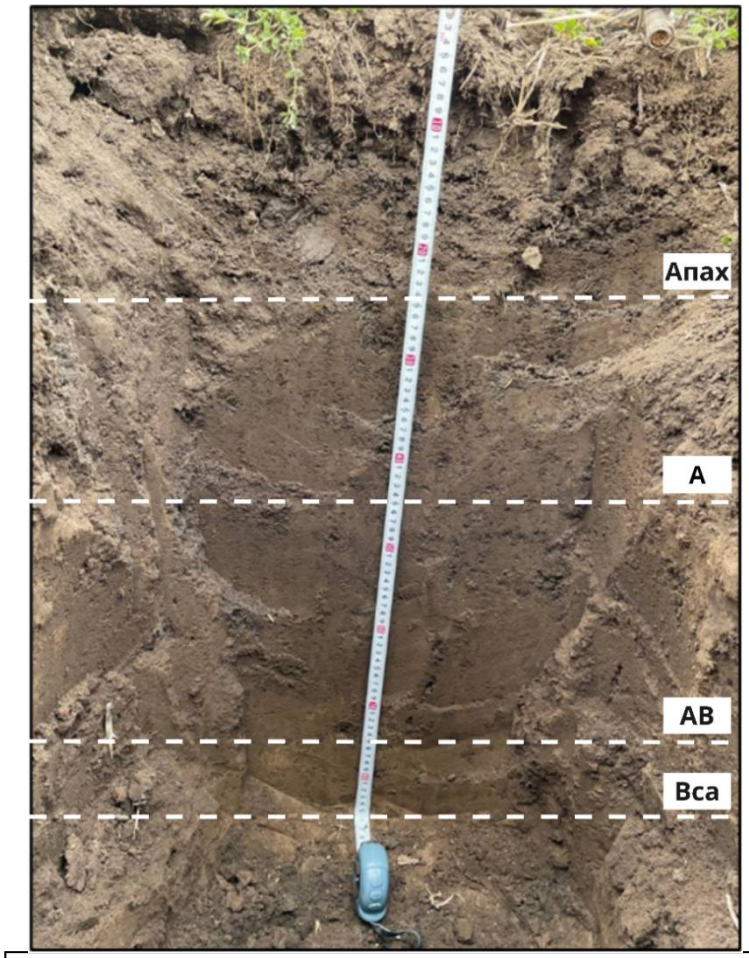


Рисунок 32 – почвенный разрез, поле 3-2
КидпСССР-1977: Луговато-черноземная среднемощная малогумусная тяжелосуглинистая на лессовидном тяжелом суглинке
КидпР-2008: Агрочернозем гидрометаморфизованный среднемощный среднепахотный средне гумусированный тяжелосуглинистый на лессовидном тяжелом суглинке

Таблица 11 – Морфологическое описание почвенного разреза (рисунок 32)

Индекс	Мощность, см	Описание
Апах	$\frac{0-25}{25}$	Темно-серый, влажный, тяжелосуглинистый, структура – мелкокомковато-зернистая, плотность сложения – рыхлая, включения в виде растительных остатков различной степени разложения, переход постепенный, ровный.
А	$\frac{25-45}{20}$	Темно-серый, влажный, структура – ореховато-комковатый, плотность сложения – рыхлая, включения в виде растительных остатков различной степени разложения уменьшается вниз по профилю, переход постепенный, ровный.
АВ	$\frac{45-75}{30}$	Темно-серый со слабым сизоватым оттенком и бурыми вкраплениями, влажный, структура – комковато-ореховатая, неоднородная, плотность сложения – плотный, новообразования в виде мелких охристых пятен железа, переход ясный, волнистый.
Вса	>75	Бурый с гумусовыми затеками, свежий, структура – неоднородная комковато-призматическая, плотность сложения – плотный, новообразования в виде карбонатной плесени (проявляются по мере подсыхания).

КидпСССР-1997 – Классификация и диагностика почв СССР, 1977.

КидпР-2008 – Классификация и диагностика почв России, 2004.

WRB: Stagnic Chernozems (Anthric).

Луговато-черноземные почвы, исследуемой территории, формируются в пониженных элементах микрорельефа, за счет дополнительного притока поверхностной влаги, поступающей с вершины водораздела вниз по склонам. Отличаются повышенным содержанием органического вещества и более мощным гумусовым горизонтом по сравнению с черноземом типичным. Однако, в годы с повышенным количеством осадков, особенно в весенний период, позднее достигают физической спелости и могут долго просыхать, что смещает сроки посева на более позднее даты. В течении вегетационного периода во время продолжительных осадков, может наблюдаться вымокание культур, особенно в отрицательных элемента микрорельефа. Это основной лимитирующий фактор для данной группы земель.

Несмотря на это, в годы с недостаточным увлажнением, луговато-черноземные почвы будут иметь преимущество, по сравнению с зональным типом почв, так как накапливают большее количество влаги. Особенно это важно для влаголюбивых культур, к которым относится кукуруза.

С учетом всех агроэкологических условий, на основании агроэкологической классификации земель данные участки можно отнести к переувлажненной группе земель.

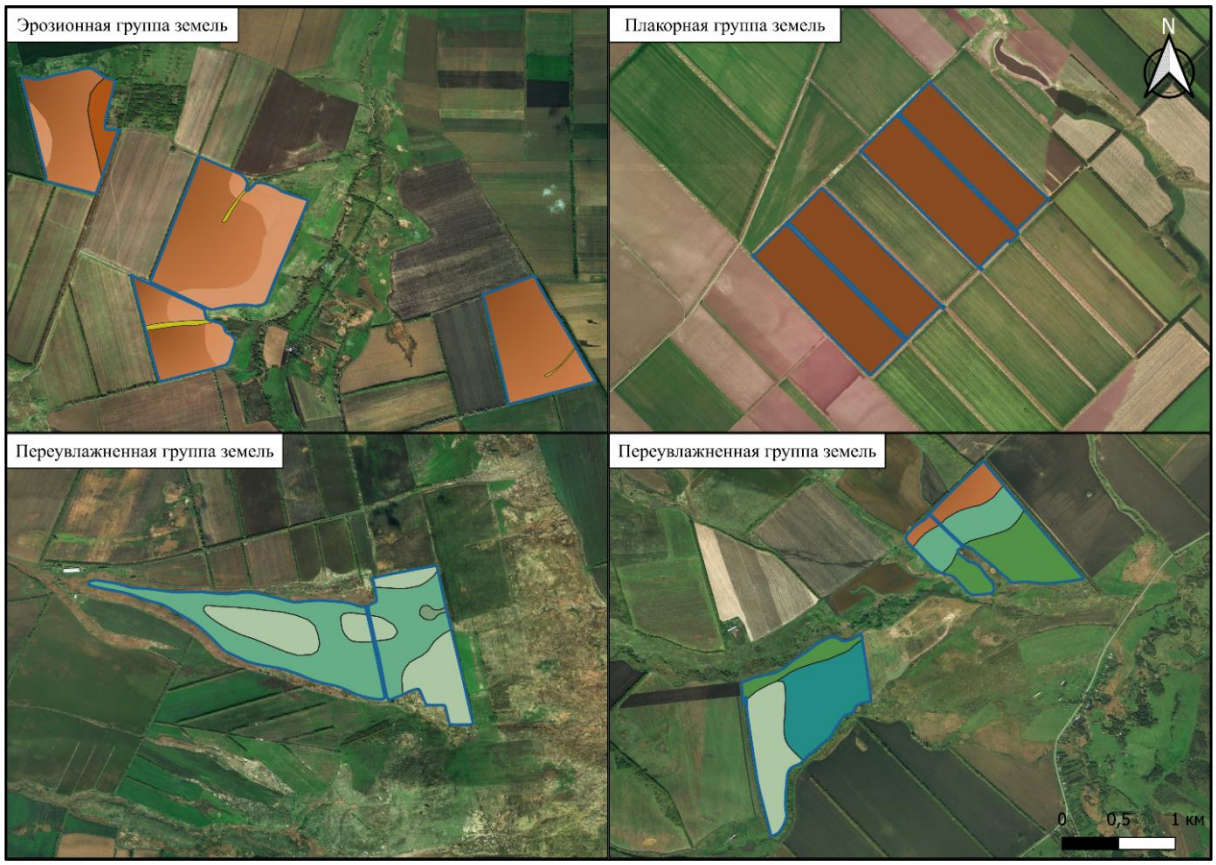
На основании ландшафтно-экологического анализа территории и почвенно-ландшафтного обследования с учетом агроэкологической группировки земель, выделено 3 заметно отличающиеся по условиям группы:

- плакорные земли – представленные автоморфными зональными почвами;

- эрозионные земли – расположенные на склонах 2-3°;

- переувлажненные земли – расположенные в нижней части склона, в низинах.

По итогам проведенного обследования была составлена карта структур почвенного покрова (рисунок 33) и дана характеристика агроэкологических видов земель (таблица 12).



Условные обозначения:

- Пятнистость черноземов типичных среднемощных (50%) и мощных (50%) слабогумусированных
- Вариация черноземов типичных среднемощных слабогумусированных не смытых (75 %) и слабосмытых (25%)
- Вариация черноземов типичных среднемощных слабогумусированных среднесмытых (75%) и слабосмытых (25%)
- Вариация черноземов типичных среднемощных слабогумусированных не смытых (50 %) и слабосмытых (50%)
- Пятнистость черноземов типичных среднемощных слабогумусированных (50%) и луговато-черноземных среднемощных малогумусных (50%)
- Пятнистость луговато-черноземных среднемощных малогумусных (75%) и черноземов типичных слабосмытых среднемощных слабогумусированных (25%)
- Пятнистость луговато-черноземных мощных малогумусных (75%) и черноземов типичных среднемощных слабогумусированных (25%)
- Комплекс черноземов типичных среднемощных слабогумусированных слабосмытых (75%) и луговато-черноземных мощных малогумусных (25%)
- Пятнистость луговато-черноземных мощных малогумусных (75%) и черноземов типичных мощных малогумусных (25%)
- Пятнистость луговато-черноземных среднемощных (50%) и мощных (50%) малогумусных

Рисунок 33 – Карта структур почвенного покрова исследуемой территории

Таблица 12 – Характеристика агроэкологических видов земель

Структура почвенного покрова	Гранулометрический состав почв и почвообразующих пород	Рельеф и микрорельеф	Ограничивающие факторы
Плакорная агроэкологическая группа земель			
Чт***тсЛтс 50% ▪ Чт****тсЛтс 50% Пятнистость черноземов типичных среднемощных и мощных слабогумусированных	Тяжелосуглинистые на лессовидных тяжелых суглинках	Средняя часть длинного пологого склона водораздела. Микрорельеф выражен слабо.	Нет
Эрозионная агроэкологическая группа земель			
Чт***тсЛтс 75% - Чт***тсЛтс↓ 25% Вариация черноземов типичных среднемощных слабогумусированных не смытых и слабосмытых	Тяжелосуглинистые на лессовидных тяжелых суглинках	Вогнутые холодные склоны 2-3°	Слабая эрозионная опасность, пониженная влагообеспеченность
Чт***тсЛтс 50% - Чт***тсЛтс↓ 50% Вариация черноземов типичных среднемощных слабогумусированных не смытых и слабосмытых	Тяжелосуглинистые на лессовидных тяжелых суглинках	Выпуклые холодные склоны 2-3°	Умеренная водная эрозия, пониженная влагообеспеченность
Чт***тсЛтс↓↓ 75% - Чт***тсЛтс↓ 25% Вариация черноземов типичных среднемощных слабогумусированных средне- и слабосмытых	Тяжелосуглинистые на лессовидных тяжелых суглинках	Выпуклые холодные склоны 3-5°	Значительная водная эрозия, пониженная влагообеспеченность
Чт***тсЛтс↓ 75% Лч1****тсЛтс 25% Комплекс черноземов типичных среднемощных слабогумусированных слабосмытых и луговато-черноземных мощных малогумусных	Тяжелосуглинистые на лессовидных тяжелых суглинках	Выпуклые холодные склоны 2-3° с выраженным ложбинным микрорельефом	Неравномерность увлажнения, значительная водная эрозия

Продолжение таблицы 12

Переувлажненная агроэкологическая группа земель			
Лч1****тсЛтс 75% ▪ Чт****тсЛтс 25% Пятнистость луговато-черноземных мощных малогумусных и черноземов типичных мощных малогумусных	Тяжелосуглинистые на лессовидных тяжелых суглинках	Западины, блюдцеобразные понижения	Локальное переувлажнение
Лч1****тсЛтс 75% ▪ Чт***тсЛтс 25% Пятнистость луговато-черноземных мощных малогумусных и черноземов типичных среднемощных слабогумусированных	Тяжелосуглинистые на лессовидных тяжелых суглинках	Выположенные прямые шлейфы с западинным микрорельефом	Неравномерность увлажнения, переувлажнение
Чт***тсЛтс 50% ▪ Лч1***тсЛтс 50% Пятнистость черноземов типичных среднемощных слабогумусированных и луговато-черноземных среднемощных малогумусных	Тяжелосуглинистые на лессовидных тяжелых суглинках	Выпуклые теплые и холодные склоны 1-3° с западинным микрорельефом	Неравномерность увлажнения, переувлажнение
Лч1***тсЛтс 75% ▪ Чт***тсЛтс↓ 25% Пятнистость луговато-черноземных среднемощных малогумусных и черноземов типичных слабосмытых среднемощных слабогумусированных	Тяжелосуглинистые на лессовидных тяжелых суглинках	Выпуклые теплые склоны 1-3° с холмистым микрорельефом	Неравномерность увлажнения, умеренная водная эрозия
Лч1***тсЛтс 50% ▪ Лч1****тсЛтс 50% Пятнистость луговато-черноземных среднемощных и мощных малогумусных	Тяжелосуглинистые на лессовидных тяжелых суглинках	Выположенные прямые шлейфы с западинным микрорельефом	Неравномерность увлажнения, переувлажнение

I группа. Плакорные земли – дренированные равнины с преобладающими автоморфными почвами. Располагаются на равнинном участке в средней части длинного водораздельного склона с углом наклона менее 1°. Почвенный покров представлен зональными черноземами типичными среднемощными и мощными. Земли данных типов не имеют выраженных ограничивающих факторов и пригодны для возделывания наиболее требовательных культур с использованием интенсивных и высокоинтенсивных агротехнологий.

II группа. Эрозионные земли. На территории исследования представлены преимущественно холодными выпуклыми (реже вогнутыми) склонами 2-3° (до 3-5°), а также выпуклыми склонами ложбин, с преобладающими автоморфными почвами. Структура почвенного покрова представлена комбинациями несмытых, слабосмытых и среднесмытых зональных почв, а также комбинациями с луговато-черноземными почвами по дну ложбин (менее 10 %). Основной лимитирующий фактор – пониженная влагообеспеченность агроценозов вследствие усиленного поверхностного стока, развитие водной эрозии на пашне.

III группа. Переувлажненные земли (слабопереувлажненные) – расположенные в нижней части склона, в низинах. Представлены слабополугидроморфными луговато-черноземными почвами в комбинации с несмытыми и слабосмытыми черноземами типичными. Расположены на выположенных шлейфах склонов в блюдцеобразных понижениях и западинах.

Особенность – неравномерное увлажнение и переувлажнение, связанное с микрорельефом. В годы с избыточным количеством осадков данные особенности будут лимитирующими для возделывания основных культур. В такие годы наблюдается позднее поспевание почвы и сроки весенних посевных работ смещаются. В засушливых условиях, напротив, могут быть на уровне, или даже иметь преимущество, по сравнению с плакорными землями, в связи с повышенным накоплением влаги в почве.

3.1.3 Цифровые методы дистанционного агроэкологического мониторинга

В исследовании использованы космические снимки за период с 2015 по 2023 годы (апрель-ноябрь), исключая сезоны с озимыми культурами, для формирования временных рядов индекса NDVI. На основе массива данных были составлены многовременные индексы NDVI, которые позволяют детектировать зоны деградации, оценивать их интенсивность и степень изменений. Значения NDVI, визуализированные в ГИС (QGIS), варьируют от 0 до 1, что отражает уровни продуктивности от очень низкой до очень высокой, где минимальные значения обозначены красным, а максимальные – зеленым. Этот индекс демонстрирует не моментальное состояние растительности, а её усредненное значение на определенном участке. В связи с этим, данный индекс также называют среднемноголетней продуктивностью.

Пространственный анализ NDVI показывает усредненное распределение значений за исследуемый период, что позволяет сопоставить их с характеристиками рельефа и почвы. Исследование было проведено путем наложения и сопоставления почвенных разрезов и агроэкологических видов земель на картограмму среднемноголетней продуктивности.

На плакорных землях выявлена слабая зависимость между среднемноголетней продуктивностью и почвенным покровом. Как описывалось выше, структура почвенного покрова представлена комбинациями черноземов типичных среднемощных и мощных. На рисунке 34 представлена среднемноголетняя продуктивность для этой группы земель и указаны места почвенных разрезов.

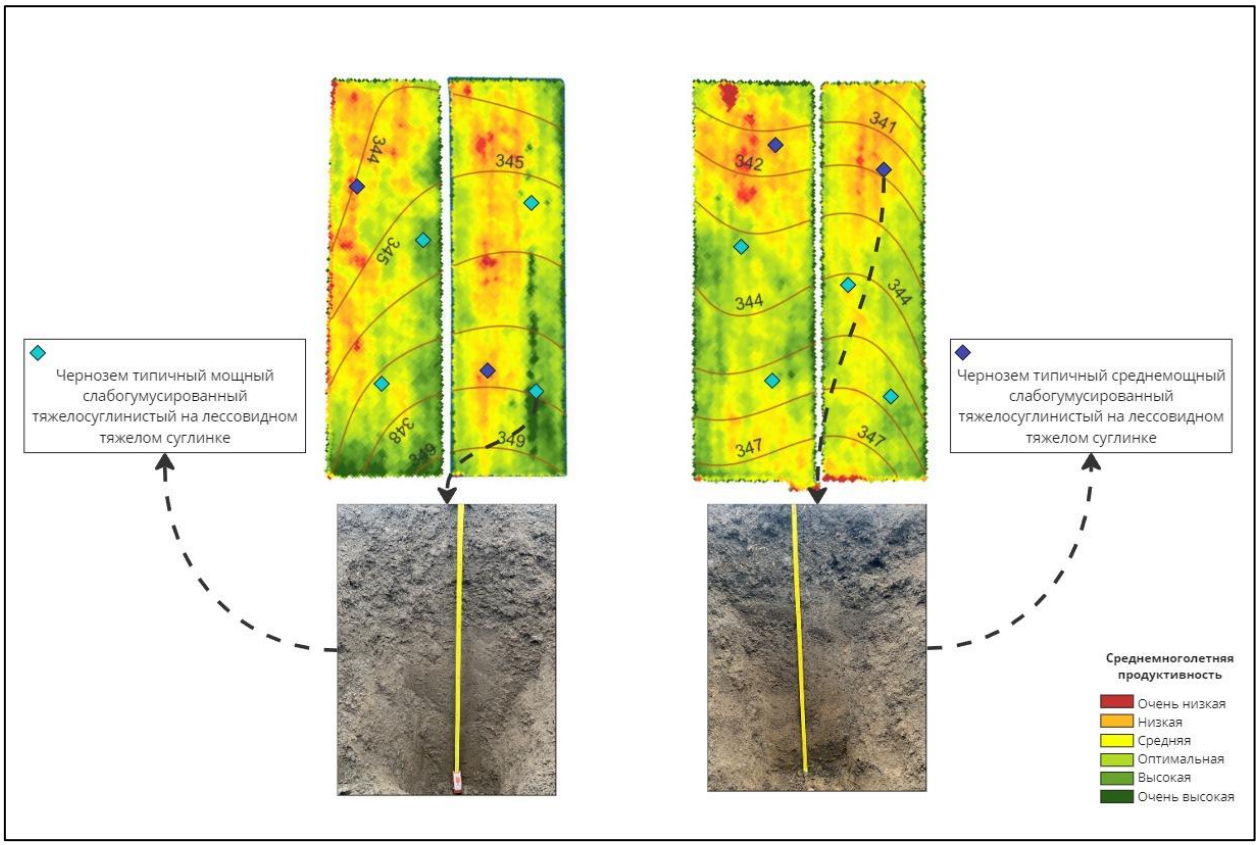


Рисунок 34 – Среднемноголетний индекс NDVI на плакорной группе земель

Сравнивая данные среднемноголетнего индекса NDVI и почвенно-ландшафтного обследования, можно выделить закономерность, связанную с преобладанием более мощных черноземов в местах с более высокой среднемноголетней продуктивностью. Однако, из-за простой структуры почвенного покрова на равнинных участках, состоящей из одной неконтрастной почвенной комбинации, данную зависимость нельзя считать абсолютной.

Для эрозионных земель выявлены более выраженные закономерности: продуктивность растений на данных территориях зависит от рельефа, крутизны склонов и, связанных с ним, почвенного покрова (рисунок 35).

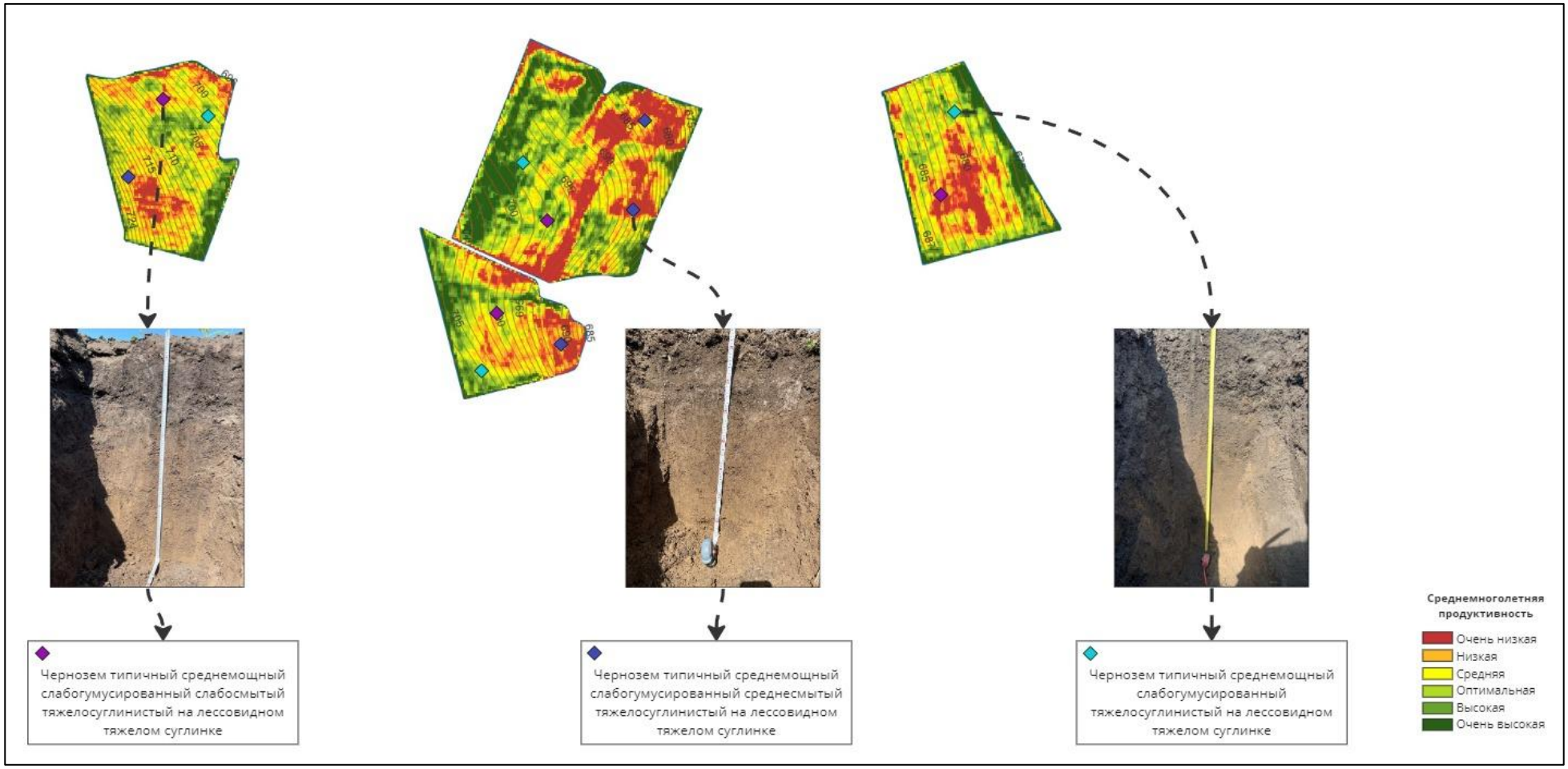


Рисунок 35 – Среднемноголетний индекс NDVI на эрозионной группе земель

Земли данной группы представлены почвенными комбинациями не смытых, слабосмытых и среднесмытых черноземов типичных. Как показано на рисунке 35, продуктивность растений здесь ограничивается рельефом: на склонах с интенсивными эрозионными процессами преобладают слабо- и среднесмытые почвы и уменьшается влагообеспеченность (отмечены красным цветом), на более пологих участках – не смытые почвы (зеленый цвет). На рисунке 35 также отображены точки почвенных разрезов и фотографии, иллюстрирующие характер почв в различных зонах продуктивности.

Анализируя среднемноголетнюю продуктивность растений и структуру почвенного покрова на эрозионной группе земель, можно сделать вывод о высокой корреляции многовременных индексов NDVI с рельефом и почвенным покровом.

На третьей группе земель индекс среднемноголетней продуктивности также в достаточной степени коррелирует со структурой почвенного покрова. Более высокая продуктивность отмечается на увлажнённых участках, чаще всего с преобладанием в СПП луговато-черноземных почв, что отображается зелёным цветом на рисунке 36.

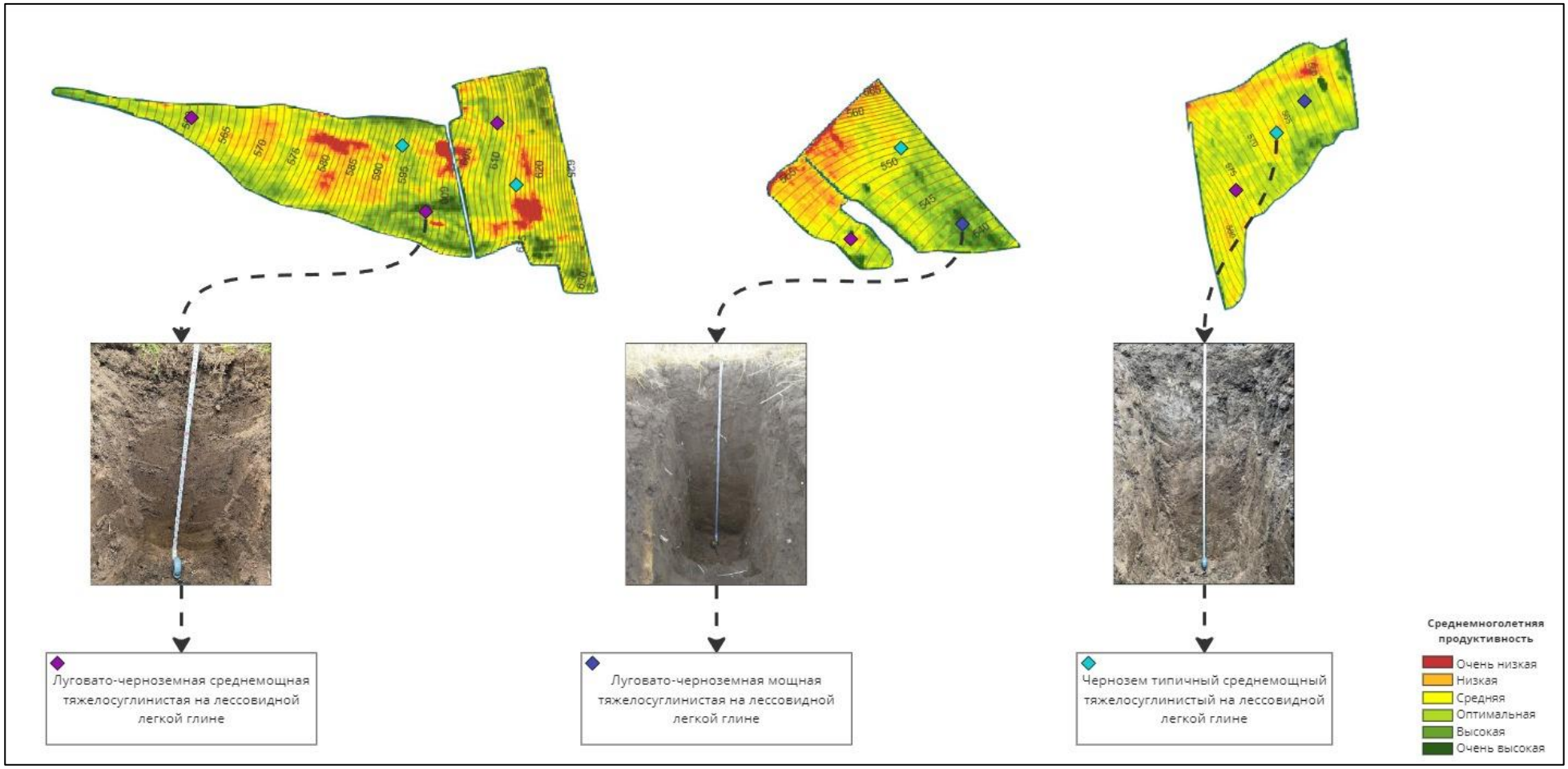


Рисунок 36 – Среднемноголетний индекс NDVI на переувлажненной группе земель

Индекс NDVI является информативным индикатором многолетней продуктивности растительности и её зависимости от различных почвенно-ландшафтных условий, что подтверждается данными для двух агроэкологических групп земель: эрозионных и переувлажненных. Чем более выраженный рельеф и СПП, тем более показательным является индекс многолетней продуктивности. На плакорных землях в виду выравненного рельефа и слабоконтрастных почвенных комбинаций, выявленные зависимости не являются однозначными.

Модель AOLNDVI представляет собой способ мониторинга состоянии почвенного покрова и оценки его деградации с использованием спутниковых данных. Для построения данной модели были использованы снимки «Landsat», за период с 2015 по 2023 годы (апрель-ноябрь). Первым делом рассчитываются многовременные индексы NDVI, которые позволяют определить продуктивность на исследуемом участке. Значения NDVI < 0,5 указывают на зоны с низкой продуктивностью и возможной деградацией почвенного покрова. Затем NDVI преобразуются в бинарную карту, где для каждого пикселя рассчитывается частота встречаемости низких значений NDVI. То есть, значение индекса AOLNDVI = 0,3 – означает, что низкие значения NDVI (< 0,5) фиксировались в 30 % случаев.

В рамках научного исследования были рассчитаны индексы AOLNDVI для каждой агроэкологической группы земель. По рисунку 37 видно, что индекс на плакорной группе земель постоянный и не имеет участков с зафиксированной деградацией почвенного покрова.

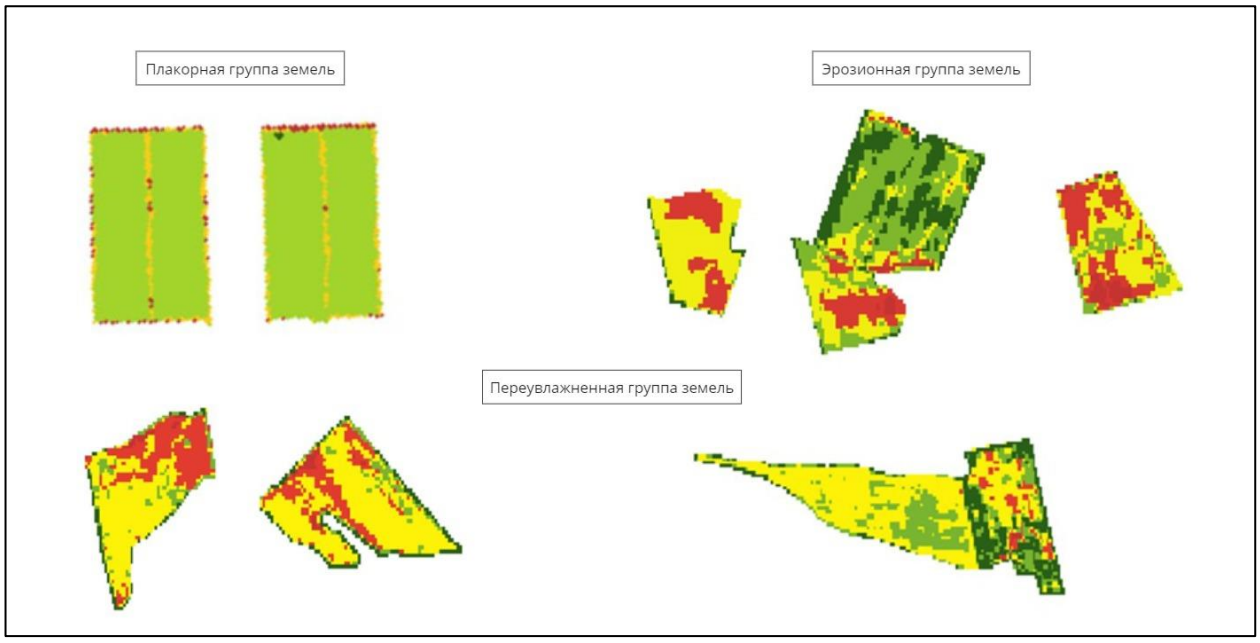


Рисунок 37 – Модель определения зон деградации почв (AOLNDVI)

На эрозионной группе земель модель показывает зоны активной деградации в следствии развития эрозионных процессов. Значение индекса AOLNDVI, в красной и желтой зонах, варьируется от 0,2 до 0,34. Это означает, что в 20-34 % случаев значение индекса NDVI на данных участках опускалось ниже 0,5, что соответствует зонам слабой продуктивности и развития деградационных процессов. Данные зоны, в большинстве случаев, совпадают с индексом продуктивности NDVI (рисунок 35), где структура почвенного покрова представлена комбинациями слабо- и среднесмытых черноземов типичных.

Значение индекса AOLNDVI на переувлажненной группе земель также варьирует в диапазоне 0,2-0,34. Зоны с наибольшим значением индекса соотносятся с локальными зонами переувлажнения и развития эрозии. Также значения данного индекса коррелируют со среднемноголетним индексом NDVI (рисунок 36).

Верификация моделей произведена на основе почвенно-ландшафтного картирования исследуемых участков. В большинстве случаев, обе модели сильнее коррелируют с почвенным покровом на эрозионной и переувлажненной группе земель, то есть на участках со сложным рельефом. На плакорной группе земель с учетом выровненной территории и слабой пестроты почвенного покрова, значение индексов в меньшей степени связано с рельефом и структурой почвенного покрова.

3.2 Урожайность кукурузы в зависимости от группы земель и системы питания

В ходе исследования изучено влияние агроэкологической группы земель (фактор А) на урожайность кукурузы при различных системах питания (фактор Б). Были рассмотрены три группы земель: плакорные, эрозионные и переувлажненные. Анализ данных в таблице 13 показал значительные различия в уровнях урожайности между агроэкологическими группами, а также между вариантами систем питания внутри каждой группы.

На плакорных землях средняя урожайность (с 2021 по 2023 гг.) варьировалась от 55,0 ц/га на фоне (вариант 1) до 80,1 ц/га при использовании ЖУ ЛФ совместно с междурядным внесением удобрений (вариант 4), что на 45,6 % превышает показатель фонового варианта. Варианты с использованием аммонийной селитры (вариант 2) и ЖУ ЛФ (вариант 3), также показали высокие результаты – 68,8 и 69,9 ц/га, прибавка урожайности, по сравнению с фоном, составляет 13,8 и 14,9 ц/га, соответственно. Однако, достоверной разницы между этими вариантами выявлено не было.

Урожайность на фоновом варианте снизилась с 59,8 ц/га в 2021 году до 46,6 ц/га в 2023 году, однако, применение удобрений позволило нивелировать это снижение. Так, при применении аммонийной селитры урожайность варьировалась от 73,0 ц/га в 2021 году до 61,9 ц/га в 2023 году, сохраняя высокие значения даже в менее благоприятные годы. Внесение ЖУ ЛФ увеличивало урожайность в 2022 году до 77,4 ц/га, однако в 2023 году она снизилась до 57,6 ц/га. Максимальные результаты наблюдаются на 4 варианте, где урожайность достигла 84,3 ц/га в 2021 году, оставалась высокой в 2022 году (81,1 ц/га) и даже в 2023 году составила 74,8 ц/га, что подтверждает эффективность данной системы питания.

Таблица 13 – Влияние различных систем питания на урожайность кукурузы в зависимости от агроэкологических групп земель

Вариант опыта	Система питания (фактор Б)	Урожайность, ц/га				Прибавка к фону		Прибавка к аммонийной селитре (Naa)	
		2021	2022	2023	Средняя	ц/га	%	ц/га	%
Плакорная группа земель (фактор А)									
1	Фон	59,8	58,7	46,6	55,0	-	-	-	-
2	Фон + Naa	73,0	71,6	61,9	68,8	13,8	25,1	-	-
3	Фон + ЖУ ЛФ	74,6	77,4	57,6	69,9	14,9	27,1	1,0	1,5
4	Фон + ЖУ ЛФ + м/п	84,3	81,1	74,8	80,1	25,1	45,6	11,3	16,4
Средняя по группе земель (фактор А), ц/га		72,9	72,2	60,2	68,4	-	-	-	-
Эрозионная группа земель (фактор А)									
5	Фон	49,4	45,1	35,4	43,3	-	-	-	-
6	Фон + Naa	62,2	62,8	53,0	59,3	15,9	37,0	-	-
7	Фон + ЖУ ЛФ	68,2	68,3	54,9	63,8	20,5	47,3	4,5	7,5
8	Фон + ЖУ ЛФ + м/п	71,9	73,6	57,0	67,5	24,2	55,9	8,1	13,7
Средняя по группе земель (фактор А), ц/га		62,9	62,5	50,0	58,5	-	-	-	-
Переувлажненная группа земель (фактор А)									
9	Фон	54,6	55,0	38,2	49,3	-	-	-	-
10	Фон + Naa	70,6	69,7	57,7	66,0	16,7	33,9	-	-
11	Фон + ЖУ ЛФ	75,5	74,2	61,9	70,5	21,3	43,1	4,5	6,9
12	Фон + ЖУ ЛФ + м/п	75,8	74,8	66,4	72,3	23,0	46,8	6,3	9,6
Средняя по группе земель (фактор А), ц/га		68,8	68,1	55,7	64,2	-	-	-	-
$НСР_{05}$ для фактора А		2,25	2,18	2,15	1,21	-	-	-	-
$НСР_{05}$ для фактора Б		2,59	2,52	2,48	1,40	-	-	-	-
$НСР_{05}$ для сравнения частных средних		4,49	4,36	4,30	2,42	-	-	-	-

На эрозионных землях урожайность была ниже, что обусловлено худшими исходными агроэкологическими условиями в следствии развития эрозионных процессов и пониженной влагообеспеченности. В среднем, на фоновом варианте, урожайность кукурузы составила 43,3 ц/га, однако применение ЖУ ЛФ+м/п (вариант 8) повысило урожайность до 67,5 ц/га, что на 55,9 % выше фонового уровня. Сравнивая одну систему питания (варианты 4 и 8) между двумя группами земель видно, что на плакорных землях урожайность выше на 12,6 ц/га, по сравнению с эрозионной группой. Варианты с аммонийной селитрой (вариант 6) и

ЖУ ЛФ (вариант 7) показали промежуточные результаты – 59,3 и 63,8 ц/га соответственно. Исходя из статистического анализа, разница между вариантами 6 и 7 достоверна, тогда как на плакорных землях разница была несущественна.

Урожайность фонового варианта также значительно снижалась: с 49,4 ц/га в 2021 году до 35,4 ц/га в 2023 году. Это демонстрирует уязвимость эрозионных земель к ухудшению погодных условий. Применение аммонийной селитры (вариант 6) повысило урожайность до 62,2 ц/га в 2021 году и обеспечило стабильные значения в последующие годы, достигая 53,0 ц/га в 2023 году. Внесение ЖУ ЛФ (вариант 7) увеличило урожайность до 68,3 ц/га в 2022 году, однако в 2023 году она снизилась до 54,9 ц/га. Вариант ЖУ ЛФ+м/п оказался наиболее эффективным, урожайность увеличилась с 71,9 ц/га в 2021 году до 73,6 ц/га в 2022 году, однако в 2023 году урожайность понизилась до 57,0 ц/га.

На переувлажненных землях средняя урожайность кукурузы за 3 года варьировалась от 49,3 ц/га на фоновом варианте, до 72,3 ц/га при использовании ЖУ ЛФ+м/п (вариант 12). Максимальная урожайность на этом варианте на 46,8 % выше фонового показателя. Применение ЖУ ЛФ (вариант 11) и аммонийной селитры (вариант 10) также оказало значительное влияние на урожайность, обеспечив результаты в 70,5 и 66,0 ц/га соответственно. Фактическая разница, между 10 и 11 вариантами, составляет 4,5 ц/га (больше НСР), следовательно, различия между вариантами существенны.

Урожайность в фоновом варианте снижалась по годам: с 54,6 ц/га в 2021 году до 38,2 ц/га в 2023 году. Применение аммонийной селитры (вариант 10), повысило урожайность по сравнению с фоном до 70,6 ц/га в 2021 году и 57,7 ц/га в 2023 году. Внесение ЖУ ЛФ (вариант 11) обеспечивало стабильно высокие результаты, с максимумом в 2021 году (75,5 ц/га) и снизившись до 61,9 ц/га в 2023 году. Максимальная урожайность была достигнута в варианте 12: 75,8 ц/га в 2021 году, 74,8 ц/га в 2022 году и 66,4 ц/га в 2023 году.

Сравнительный анализ показал, что наибольший уровень урожайности достигается на плакорных землях, что объясняется лучшими природно-климатическими условиями для выращивания кукурузы. В то же время,

эрозионные земли продемонстрировали наименьшую урожайность, что связано с развитием эрозионных процессов и недостатком влаги в следствии усиления поверхностного стока. Переувлажненные земли характеризуются промежуточными результатами, однако применение ЖУ ЛФ+м/п позволило достичь значительного увеличения урожайности.

Анализ прибавки урожайности по фактору Б (система питания) позволяет оценить влияние различных удобрений на урожайность кукурузы на разных группах земель.

Фоновые варианты (варианты 1, 5, 9) показали наименьшую урожайность на всех группах земель. На плакорных землях средняя урожайность составила 55,0 ц/га, на эрозионных — 43,3 ц/га и на переувлажненных — 49,3 ц/га.

Применение аммонийной селитры (варианты 2, 6, 10) привело к существенному увеличению урожайности. На плакорных землях она составила 68,8 ц/га, что на 25,1 % выше фонового уровня. На эрозионных землях прирост составил 37 %, а урожайность достигла 59,3 ц/га. На переувлажненных землях урожайность повысилась до 66,0 ц/га, что на 33,9 % больше фона.

Варианты с внесением ЖУ ЛФ (варианты 3, 7, 11) обеспечили еще более высокие результаты. На плакорных землях урожайность увеличилась до 69,9 ц/га, что на 27,1 % превышает фон. На эрозионных землях урожайность составила 63,8 ц/га, что на 47,3 % выше уровня фона. На переувлажненных землях ЖКУ обеспечили урожайность 70,5 ц/га, что на 43,1 % больше фона.

Система питания ЖУ ЛФ+м/п (варианты 4, 8, 12) показала максимальные результаты, на каждой группе земель. Урожайность на плакорных землях достигла 80,1 ц/га, что на 45,6 % выше фонового уровня. На эрозионных землях урожайность увеличилась до 67,5 ц/га, что на 55,9 % выше фона. На переувлажненных землях урожайность составила 72,3 ц/га, что на 46,8 % превышает урожайность фона.

Сравнительный анализ систем питания показал, что максимальная урожайность достигается при совместном использовании ЖУ ЛФ с междурядной подкормкой (рисунок 38). Наибольшая эффективность отмечена на плакорных землях, где зафиксирована максимальная урожайность – 80,1 ц/га. Аммонийная

селитра и ЖУ ЛФ также продемонстрировали значительное увеличение урожайности, но их эффект был менее выраженным.

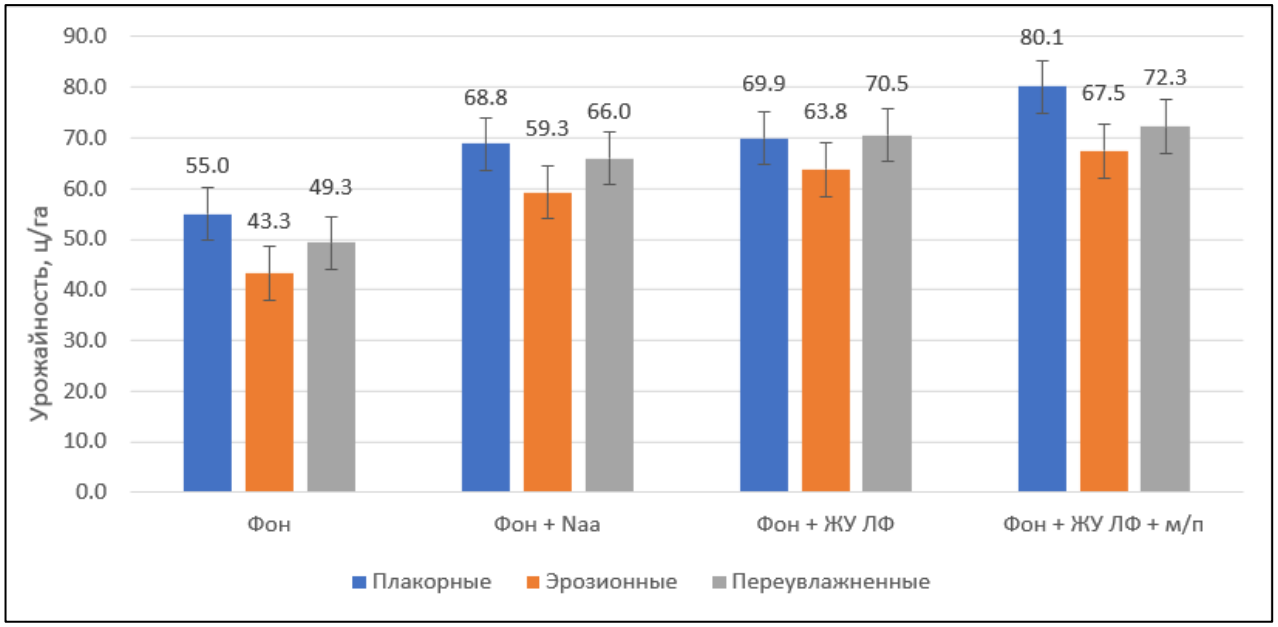


Рисунок 38 – Влияние различных систем питания на урожайность кукурузы в зависимости от агроэкологических групп земель

На рисунке 38 можно увидеть закономерность, связанную с несущественной разницей между вариантами с аммонийной селитрой и ЖУ ЛФ на плакорных землях. Также не было отмечено достоверной разницы между плакорными и переувлажненными землями в варианте с внесением ЖУ ЛФ.

Во всех вариантах наблюдается снижение урожайности в 2023 году, что связано с неблагоприятными погодными условиями, которые наблюдались в вегетационный период. В данный год, в весенний период, зафиксировано избыточное количество осадков, что сместило сроки посева на более поздние даты. Вместе с этим в период с 3 декады июля по 1 декаду октября наблюдались засушливые условия и суховеи, которые попали в критические периоды развития кукурузы. На эрозионной группе земель в 2023 году отмечалось наибольшее снижение урожайности кукурузы, по сравнению с плакорными и переувлажненными землями.

3.3 Оценка вклада изучаемых факторов в формирование урожайности кукурузы

Статистическая обработка урожайных данных показывает, что все средние значения по фактору А и по фактору Б достоверно отличаются между собой, кроме вариантов с внесением аммонийной селитры и ЖУ ЛФ на плакорных землях и вариантов с несением ЖУ ЛФ на плакорных и переувлажненных группах земель. Двухфакторный дисперсионный анализ доказывает, что средние по двум изучаемым факторам: группа земель и система питания, достоверно отличаются как внутри группы, так и между группами.

Таблица 14 – Влияние различных систем питания на урожайность кукурузы в зависимости от агроэкологических групп земель (в среднем за 2021-2023 гг.), ц\га

Группа земель (фактор А)	Система питания (фактор Б)				В среднем по фактору А ($НСР_{05}$ = 1,2)
	Фон	Фон + Naa	Фон + ЖУ ЛФ	Фон + ЖУ ЛФ + м/п	
Плакорные	55,0	68,8	69,9	80,1	68,4
Эрозионные	43,3	59,3	63,8	67,5	58,5
Переувлажненные	49,3	66,0	70,5	72,3	64,5
В среднем по фактору Б ($НСР_{05}$ = 1,4)	49,2	64,7	68,1	73,3	63,8

$НСР_{05}$ = 2,4 – для сравнения частных средних

Двухфакторный дисперсионный анализ позволяет оценить вклад каждого фактора в формирование урожайности. В среднем за три года вклад фактора А – 0,17 или 17 %, фактора Б – 0,80 или 80 %. Основная доля прибавки урожайности приходится на систему питания, но в тоже время группа земель также вносит достаточно весомый вклад в формирование урожая. Также, на основании статистической обработки, доказано влияние на урожайность кукурузы, как отдельных факторов А и В, так и их взаимодействия – АВ, что говорит о необходимости индивидуального подхода к выбору системы питания в зависимости от группы земель.

Результаты попарных сравнений уровня урожайности с учетом взаимодействия факторов (только для статистически значимых различий при уровне p=0,05): группа земель и внесение фосфора/азота с удобрениями показали,

что в ряде вариантов, преимущественно на плакорных группах земель, где в качестве системы питания было внесено ЖУ ЛФ+м/п, урожайность в среднем была достоверно выше. На рисунке 39 средние значения показаны в виде точек с доверительными интервалами, красная вертикальная линия обозначает нулевой эффект. Пересечение доверительными интервалами этой линии свидетельствует об отсутствии статистически значимых различий между сравниваемыми группами.

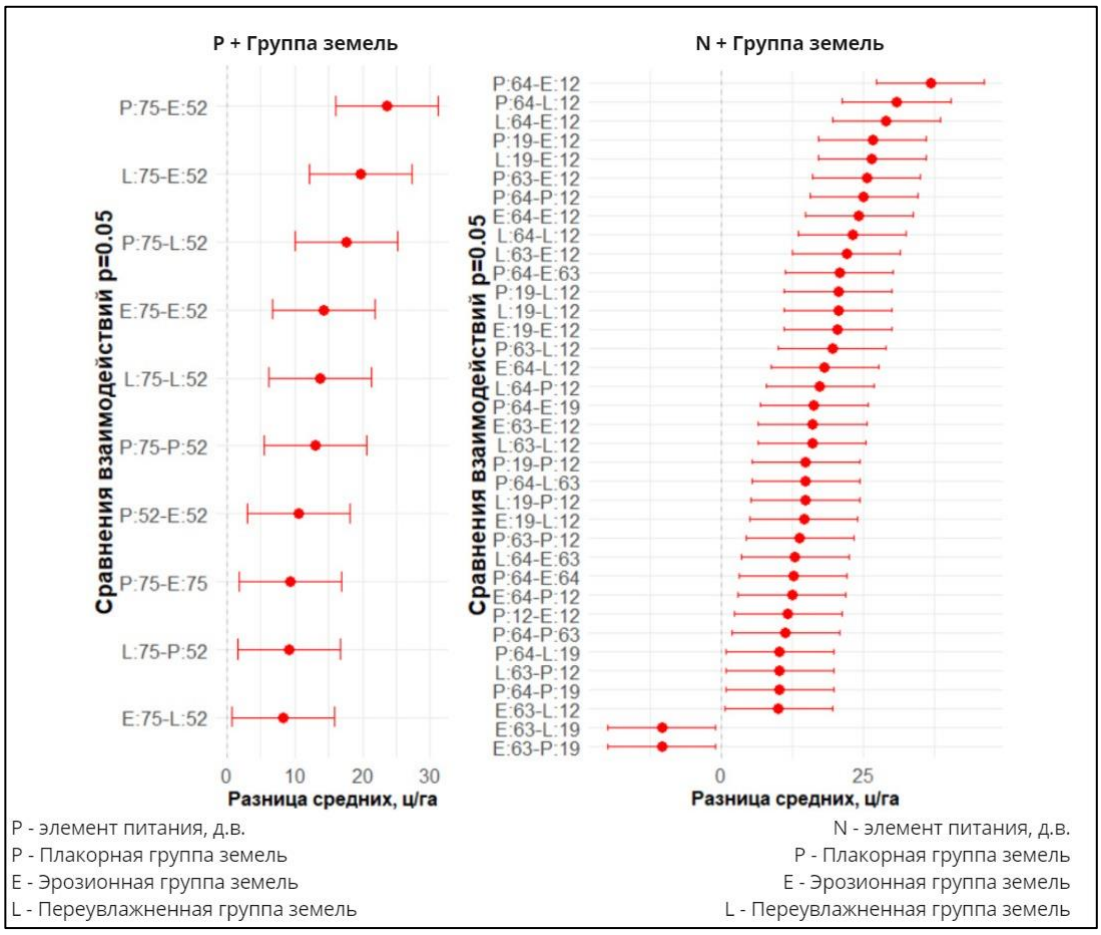


Рисунок 39 – Достоверные различия средних по вариантам опыта с учетом взаимодействия факторов

На рисунке 39 представлены результаты взаимодействий между группами земель (плакорная – P, переувлажненная – L и эрозионная – E) при различных уровнях внесения фосфора (цифрами 52 и 75 показаны дозы внесения фосфора под кукурузу, 52 кг/га соответствуют вариантам фон и фон + Naa, 75 кг/га – фон + ЖУ ЛФ и фон + ЖУ ЛФ+м/п) и азота (цифрами 12, 63, 19 и 64 показаны дозы внесения азота под кукурузу, 12 кг/га соответствует фону, 63 кг/га – фон + Naa, 19 кг/га – фон + ЖУ ЛФ, 64 кг/га – фон + ЖУ ЛФ+м/п).

Разница средних значений находится в диапазоне от 0 до 30 ц/га. Попарные сравнения демонстрируют статистически значимую разницу, что подтверждается тем, что доверительные интервалы не пересекают нулевую ось. Это говорит о достоверной разницы средних и влиянии фосфора и группы земель на урожайность кукурузы. При эквивалентном д.в. по фосфору отмечаются достоверные прибавки на плакорных агроэкологических группах относительно эрозионных при средней прибавке 11 ц/га для 52 кг/га д.в. и 9 ц/га для 75 кг/га д.в. фосфора.

Азот аналогично влиял на прибавки по урожайности и размер эффекта для большинства вариантов составил 2-36 ц/га. Статистически достоверные различия, с учетом взаимодействия факторов группа земель и внесение азота, отмечаются для большинства пар агроэкологических групп.

Для выявления важнейших факторов, влияющих на урожайность кукурузы, был проведен анализ корреляционных связей между различными агрохимическими и агроэкологическими параметрами. В качестве метода анализа использована корреляционная матрица, которая позволяет выявить степень линейной зависимости между количественными переменными.

Анализируя полученные данные следует отметить, что при проведении корреляционного анализа на выборке, состоящей из 36 наблюдений, достоверными следует считать зависимости, в которых величина R превышает значение 0,31, то есть значимыми (отличными от нуля) будут коэффициенты корреляции, превышающие по модулю 0,31 (для уровня значимости 0,05). Используя метод Спирмена, для оценки зависимостей, была построена матрица корреляций (рисунок 40).

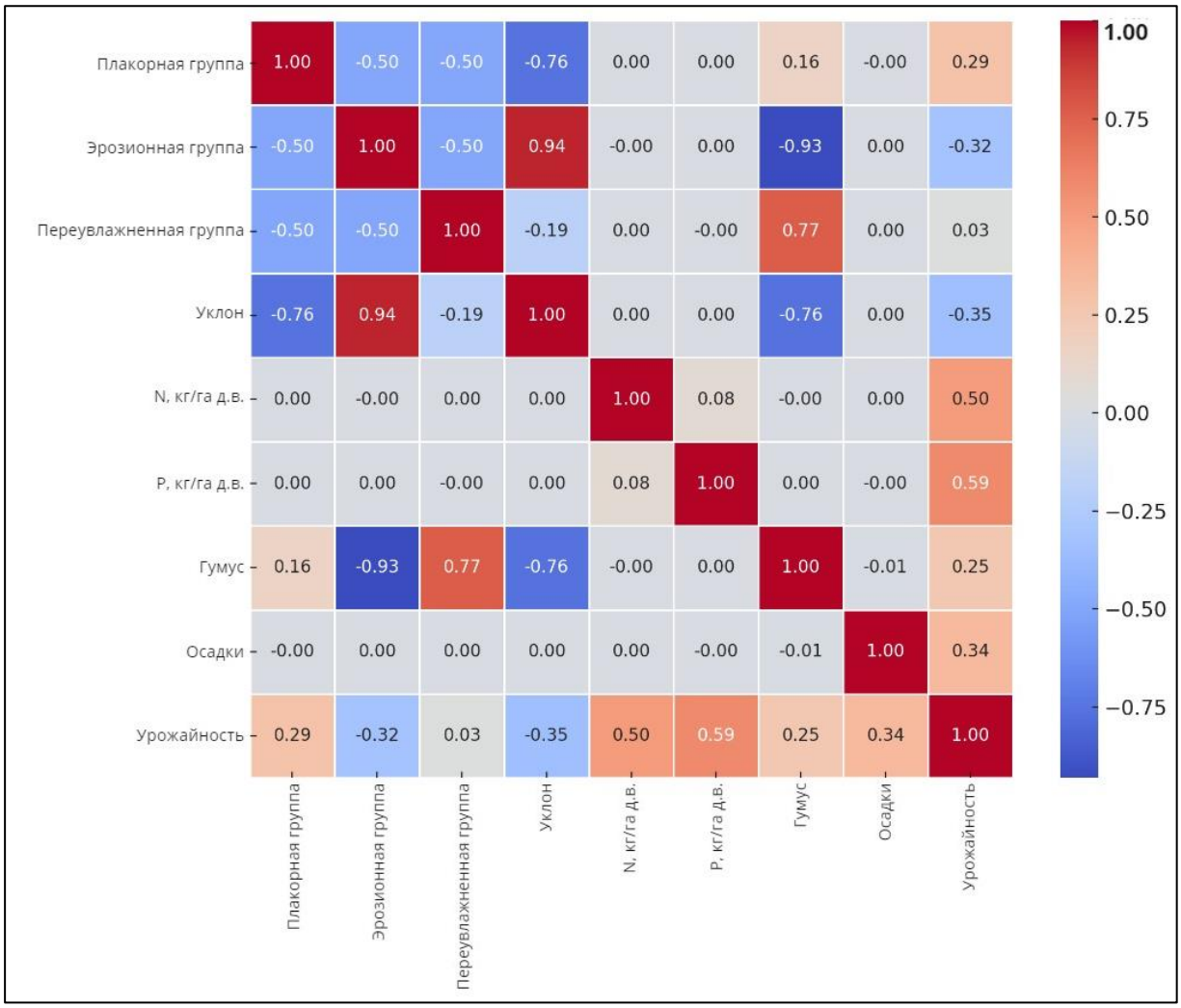


Рисунок 40 – Корреляционная матрица между урожайностью и различными параметрами

Для анализа использованы следующие переменные:

- Агроэкологическая группа земель: плакорные, эрозионные и переувлажненные;
- Уклон;
- N, кг/га д.в. – доза азота в зависимости от системы питания;
- P, кг/га д.в. – доза фосфора в зависимости от системы питания;
- Содержание гумуса;
- Осадки – за период вегетации (апрель-октябрь);
- Урожайность.

Корреляционный анализ показал, что ключевыми факторами, определяющими урожайность, являются внесение фосфора и азота, а также сумма осадков. Фактор «уклон» объединяет в себе влияние агроэкологических групп земель и показывает

умеренную отрицательную корреляцию с урожайностью. Для дальнейших анализов фактор «уклон» будет служить для описания влияния групп земель на урожайность, так как является одним из основных признаков для выделения агроэкологических групп. Полученные результаты подтверждают ключевые теоретические предположения о влиянии агрохимических и агроэкологических факторов на урожайность и соотносится с данными двухфакторного дисперсионного анализа.

Для оценки степени влияния и анализа связи между выделенными ключевыми факторами и урожайностью, был проведен множественный линейный регрессионный анализ. Путем последовательного исключения незначимых переменных была построена модель, включающая четыре переменные: уклон, осадки, доза азота, доза фосфора.

X_1 – уклон, °;

X_2 – доза азота в зависимости от системы питания, кг/га д.в.;

X_3 – доза фосфора в зависимости от системы питания, кг/га д.в.;

X_4 – сумма осадков за период вегетации (апрель-октябрь), мм;

Регрессионный анализ показал, что модель объясняет 79,1 % вариации урожайности (R^2 = 0,791), что свидетельствует о хорошей объясняющей способности модели. Факторы, входящие в модель, вносят максимальный вклад в итоговый параметр урожайности. Статистическая значимость модели подтверждается p < ,00000, что говорит о высокой объясняющей способности факторов. Все независимые переменные являются статистически значимыми ($p<0,05$) (таблица 15).

Таблица 15 – Факторы и фактические уровни p для переменных регрессионной модели

Фактор	**p-value**
Уклон, °	0,000188
Азот, кг/га д.в.	0,000004
Фосфор, кг/га д.в.	0,000000
Осадки, мм	0,000253

На основе полученных коэффициентов, уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$Y = 10,14 – 3,26 \cdot X_1 + 0,22 \cdot X_2 + 0,56 \cdot X_3 + 0,03 \cdot X_4$$

Уравнение регрессии показывает, что при увеличении уклона на 1 градус урожайность уменьшается в среднем на 3,26 ц/га. Этот эффект статистически значим ($p<0,00118$), что подтверждает снижение урожайности кукурузы на эрозионной группе земель.

Обратное действие наблюдается при увеличении дозы фосфорных и азотных удобрений. Оба эффекта статистически значимы и при увеличении дозы азота и фосфора на 1 кг/га д.в., урожайность возрастает на 0,22 и 0,56 ц/га соответственно. Данная закономерность также подтверждается фактическими результатами. Максимальная урожайность наблюдается на вариантах с внесением ЖУ ЛФ+м/п, где максимальная норма внесения азота и фосфора.

Сумма осадков также положительно влияет на урожайность, при увеличении осадков на 1 мм урожайность повышается на 0,026 ц/га. Данные о влиянии осадков также коррелируют с фактическими значениями. Уменьшение осадков и засушливый период в 2023 году сказался на уровне урожайности кукурузы, в данный год наблюдалась наименьшая урожайность за 3 года исследований.

На основании данных, полученных в ходе корреляционного анализа и множественной регрессии, была сформирована графическая модель данных, отражающая вклад различных переменных в итоговый параметр урожайности (рисунок 41).

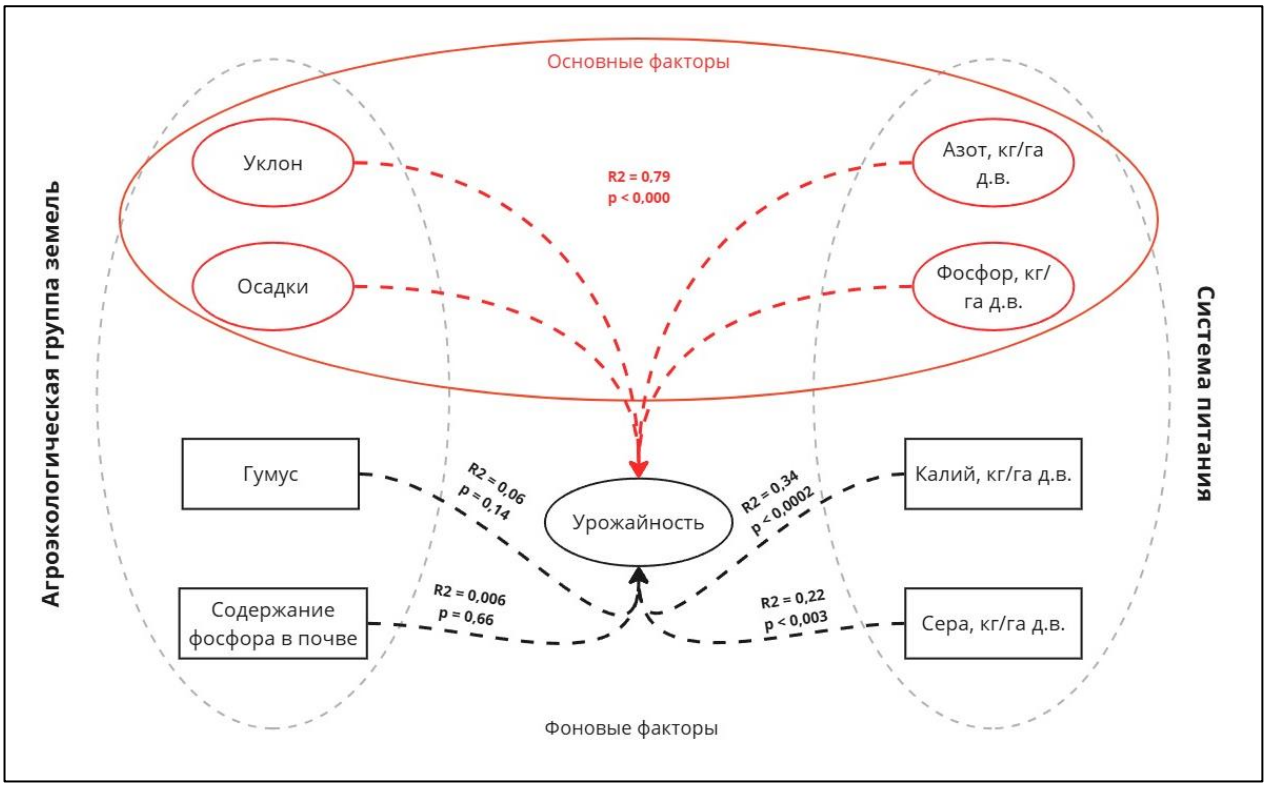


Рисунок 41 – Модель вклада различных факторов в урожайность кукурузы

Предложенная модель отражает внешние «фоновые» и внутренние «основные» факторы, определяющие итоговую урожайность кукурузы в условиях Западного Предкавказья. Следует отметить, что параллельно с основными факторами, оказывающими непосредственное воздействие, фоновые факторы также косвенно влияют на урожайность. Например, агроэкологическая группа земель обуславливает уклон территории и часто коррелирует с содержанием гумуса в почвах, и в конечном итоге вносит свой вклад в формирование итоговой урожайности кукурузы.

3.4 Качественные показатели и химический состав зерна кукурузы

Применение жидких комплексных удобрений повлияло не только на увеличение урожайности кукурузы, но и оказало влияние на улучшение качественного и химического состава зерна кукурузы. В проведенном исследовании было проанализировано влияние двух изучаемых факторов на содержание азота, фосфора, калия, а также на качественные показатели зерна — содержание протеина, клетчатки и жира.

Увеличение доз азотных удобрений, достоверно повышало содержание азота в зерне на всех группах земель. Применение аммонийной селитры и ЖУ ЛиквиФорс с междурядной обработкой (ЖУ ЛФ+м/п) показало наибольшее увеличение содержания азота. На плакорной группе земель внесение данных видов удобрений повышало содержание азота в зерне до 1,44 и 1,51 % соответственно. Разница между фоновым вариантом и ЖУ ЛФ+м/п составляет 0,32 %, что свидетельствует о достоверном повышении содержания азота в зерне (таблица 16).

Таблица 16 – Влияние различных систем питания на химический состав зерна кукурузы в зависимости от агроэкологических групп земель, в среднем за 2021-2023 гг. (в % к сухой массе)

Вариант опыта	Фактор		N	P_2O_5	K_2O
	Группа земель (фактор А)	Система питания (фактор Б)			
1	Плакорные	Фон	1,19	0,43	0,46
2		Фон + Naa	1,44	0,44	0,45
3		Фон + ЖУ ЛФ	1,39	0,44	0,41
4		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	1,51	0,46	0,40
5	Эрозионные	Фон	1,17	0,40	0,42
6		Фон + Naa	1,36	0,39	0,42
7		Фон + ЖУ ЛФ	1,34	0,42	0,41
8		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	1,43	0,43	0,39
9	Переувлажненные	Фон	1,20	0,43	0,46
10		Фон + Naa	1,43	0,44	0,40
11		Фон + ЖУ ЛФ	1,40	0,44	0,43
12		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	1,53	0,46	0,43
$НСР_{05}$			0,05	$F_{факт} < F_{05}$	$F_{факт} < F_{05}$

На эрозионной группе земель эффект от удобрений также был заметен, но выражен слабее. Аммонийная селитра достоверно увеличивала содержание азота до 1,36 %, ЖУ ЛФ – до 1,34 %, по сравнению с 1,17 % на фоновом варианте. Достоверной разницы между вариантами ЖУ ЛФ и аммонийной селитрой выявлено не было. В варианте ЖУ ЛФ+м/п содержание азота возрастало до 1,43 %.

На переувлажненных землях достигнуты максимальные значения содержания азота при использовании ЖУ ЛФ+м/п (1,53 %). Достоверной разницы между вариантами ЖУ ЛФ и аммонийной селитрой выявлено не было.

Группа земель также оказывала достоверное увеличение содержания азота на некоторых вариантах. На эрозионных землях, по сравнению с плакорными, содержание азота уменьшалось, наибольшая разница по группам земель отмечалась на вариантах с внесением ЖУ ЛФ+м/п (1,51 – 1,43 %). Содержание азота достоверно не изменялось между плакорной и переувлажненной группой земель. На рисунке 42 показана зависимость содержания азота в зерне от группы земель и системы питания.

Содержание фосфора и калия в зерне слабо варьирует по вариантам опыта. На основании проведенного анализа достоверной разницы выявлено не было, ни система питания, ни группа земель, не оказали существенного влияния на содержание данных элементов в зерне кукурузы.

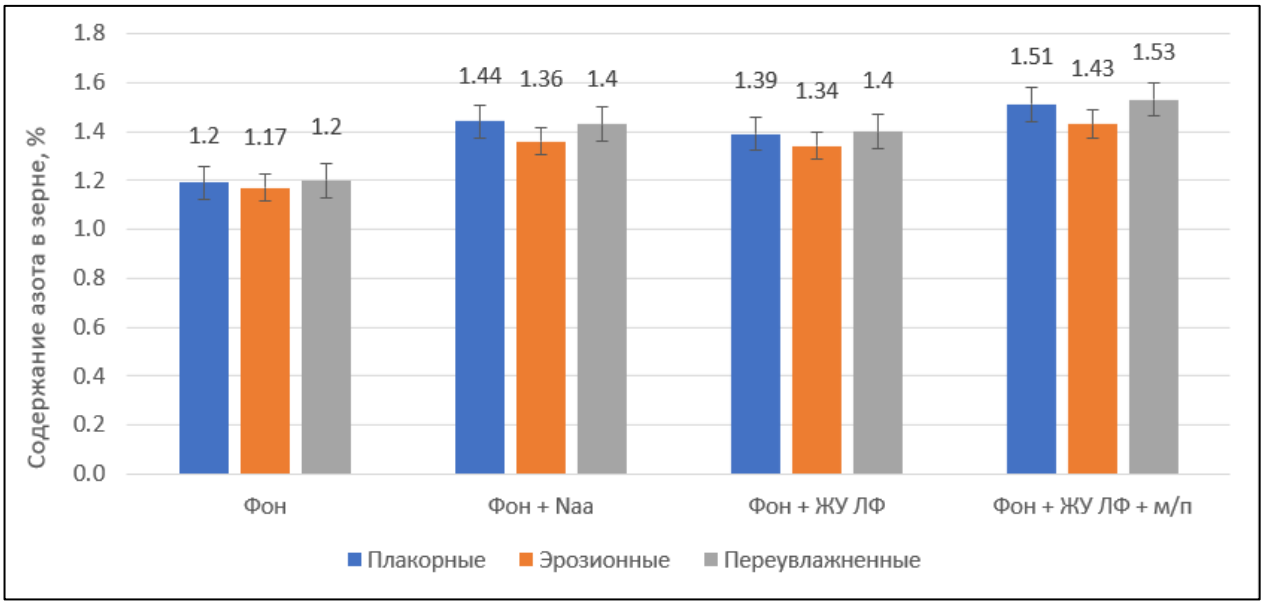


Рисунок 42 – Содержание азота (N) в зерне кукурузы в зависимости от группы земель и системы питания, %

Содержание сырого протеина также увеличивается с повышением доз азотных удобрений. На плакорных и переувлажненных землях содержание сырого протеина достигает 12,5 % на вариантах с внесением ЖУ ЛФ+м/п, что на 0,4 % выше, чем на эрозионной группе земель (12,1 %) при той же системе питания.

Плакорные и переувлажненные земли имеют более высокий уровень клетчатки в фоновом варианте и в варианте с внесением ЖУ ЛФ+м/п (4,4 % и 4,5 % соответственно), по сравнению с эрозионными землями (4,1 %). На плакорных

землях, на фоновом варианте, уровень сырого жира в зерне составляет 3,7% и достигает максимального значения в варианте ЖУ ЛФ+м/п – 4,0%. На эрозионной группе земель наблюдается наименьшее содержание сырого жира, начиная с 3,4 % в варианте с внесением аммонийной селитры и достигая 3,8 % в варианте ЖУ ЛФ+м/п. Однако, содержание сырой клетчатки и сырого жира незначительно варьируют между вариантами опыта, оба изучаемых фактора не оказали достоверного влияния на их содержание в зерне кукурузы (таблица 17).

Таблица 17 – Влияние различных систем питания на качественные показатели зерна кукурузы в зависимости от агроэкологических групп земель, в среднем за 2021-2023 гг., % сухого вещества

Вариант опыта	Фактор		Сырой протеин	Сырая клетчатка	Сырой жир	Выход сырого протеина, кг/га
	Группа земель (фактор А)	Система питания (фактор Б)				
1	Плакорные	Фон	11,0	4,4	3,7	606
2		Фон + Naa	11,9	4,2	3,9	820
3		Фон + ЖУ ЛФ	11,6	4,1	3,8	812
4		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	12,5	4,5	4,0	999
5	Эрозионные	Фон	10,9	4,1	3,6	471
6		Фон + Naa	11,7	3,5	3,4	696
7		Фон + ЖУ ЛФ	11,5	3,6	3,5	733
8		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	12,1	4,0	3,8	822
9	Переувлажненные	Фон	11,1	4,5	3,7	546
10		Фон + Naa	11,7	4,0	3,8	776
11		Фон + ЖУ ЛФ	11,6	4,0	3,8	820
12		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	12,5	4,5	4,0	902
$НСР_{05}$			0,4	$F_{факт} < F_{05}$	$F_{факт} < F_{05}$	-

Одновременно с увеличением содержания азота в зерне, увеличивалось общее содержание и выход сырого протеина. Плакорные земли показывают самый высокий выход протеина (999 кг/га) в варианте ЖУ ЛФ+м/п. Эрозионные земли имеют наименьший выход протеина, максимальный показатель – 822 кг/га. Переувлажненные земли показывают промежуточные результаты, с максимумом 902 кг/га при внесении ЖУ ЛФ+м/п.

Достоверной разницы, по содержанию сырого протеина, не было выявлено между вариантами с внесением аммонийной селитры и ЖУ ЛФ на всех группах земель.

Применение ЖУ ЛФ+м/п является оптимальной системой питания для повышения как химических, так и качественных показателей зерна кукурузы. Данная система питания позволяет достичь максимальных значений по содержанию азота и протеина, а также обеспечивает высокий выход сырого протеина с 1 га. Плакорные и переувлажненные земли наиболее отзывчивы к применению интенсивных технологий питания с использованием жидких удобрений ЛиквиФорс, что делает их более предпочтительными для выращивания кукурузы по сравнению с эрозионными землями.

3.5 Вынос элементов питания кукурузой на зерно

В ходе исследования были проанализированы изменения выноса элементов питания с основной продукцией (зерном) в зависимости от группы земель и системы питания. Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии удобрений на вынос питательных веществ, причем интенсивность данного процесса варьируется в зависимости от агроэкологической группы земель.

На плакорной группе земель фоновый вариант обеспечил вынос азота на уровне 66 кг/га, фосфора – 24 кг/га, калия – 26 кг/га (таблица 18). Применение аммонийной селитры способствовало увеличению данных показателей до 99, 30 и 31 кг/га соответственно. Внесение ЖУ ЛФ показало схожие результаты, обеспечив прирост выноса N на 47 %, P_2O_5 – на 29 %, K_2O – на 12 %. Максимальный эффект был зафиксирован в варианте ЖУ ЛФ+м/п, что способствовало увеличению выноса азота на 83%, фосфора – на 54 %, калия – на 23 %, по сравнению с фоном. Таким образом, на плакорных землях наиболее значительное влияние на вынос питательных веществ оказала система питания ЖУ ЛФ+м/п, тогда как аммонийная селитра и ЖУ ЛФ показали меньшие и схожие результаты.

Таблица 18 – Вынос элементов питания с основной продукцией (зерно) в зависимости от системы питания и группы земель, в среднем за 2021-2023 гг., кг/га

Вариант опыта	Фактор		N	P_2O_5	K_2O
	Группа земель (фактор А)	Система питания (фактор Б)			
1	Плакорные	Фон	66	24	26
2		Фон + Naa	99	30	31
3		Фон + ЖУ ЛФ	97	31	29
4		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	121	37	32
5	Эрозионные	Фон	51	17	18
6		Фон + Naa	81	23	25
7		Фон + ЖУ ЛФ	85	27	26
8		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	97	29	27
9	Переувлажненные	Фон	59	21	23
10		Фон + Naa	95	29	27
11		Фон + ЖУ ЛФ	99	32	31
12		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	111	33	31

Фоновый вариант, на эрозионной группе земель, характеризовался минимальными значениями выноса элементов питания: 51 кг/га азота, 17 кг/га фосфора и 18 кг/га калия. Внесение аммонийной селитры способствовало увеличению выноса на 59 % N, 35 % P_2O_5 и 39 % K_2O. Применение ЖУ ЛФ обеспечило прирост по сравнению с фоном на 67 % N, 59 % P_2O_5 и 44 % K_2O. В варианте с внесением ЖУ ЛФ+м/п вынос элементов питания увеличился и составил – 97 кг/га азота, 29 кг/га фосфора, 27 кг/га калия.

На переувлажненных землях на фоновом варианте вынос азота составил 59 кг/га, фосфора – 21 кг/га, калия – 23 кг/га. Применение аммонийной селитры увеличило данные показатели на 61 % по азоту, 38 % по фосфору и 17 % по калию. Внесение ЖУ ЛФ обеспечило рост выноса на 68 % N, 52 % P_2O_5 и 34 % K_2O. Максимальный вынос, аналогично другим группам земель, был достигнут при внесении ЖУ ЛФ+м/п и составил 111 кг/га азота, 33 кг/га фосфора, 31 кг/га калия.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что на всех группах земель внесение удобрений способствовало значительному увеличению выноса

элементов питания, причем максимальный эффект был достигнут при применении жидких удобрений ЛиквиФорс совместно с междурядной подкормкой. Наибольший вынос зафиксирован на плакорной группе земель, наименьший на эрозионной. Также на всех группах земель разница в выносе элементов питания между вариантами с внесением аммонийной селитры и ЖУ ЛФ была незначительна.

3.6 Экономическая эффективность

Оценка экономической эффективности по прямым затратам, позволяет определить не только агротехническую целесообразность использования различных технологий, но и их практическую применимость в производственных условиях. В сельскохозяйственном производстве, где значительную часть затрат составляют расходы на удобрения, расчет экономических показателей служит основным инструментом для обоснования наиболее выгодных решений.

В данном разделе представлен анализ экономической эффективности применения различных систем питания при возделывании кукурузы на плакорных, эрозионных и переувлажненных землях. Результаты экономической эффективности обосновывают выбор применяемой технологии и определяют рентабельность, доходность и эффективность вложений.

Ключевыми экономическими показателями в данном исследовании являются условно чистый доход, окупаемость затрат и рентабельность. Условно чистый доход характеризует абсолютную прибыль, полученную от применения той или иной системы питания, и является индикатором общей экономической отдачи. Окупаемость затрат, в свою очередь, позволяет оценить, насколько эффективно использованы вложенные средства, и показывает относительную отдачу на каждый вложенный рубль.

В основе расчета экономической эффективности использованы следующие показатели:

1. Цена кукурузы на зерно – средняя цена реализации зерна на декабрь 2021, 2022 и 2023 годов по Краснодарскому краю (цены взяты из открытых источников, Росстат);

2. цена аммонийной селитры и аммофоса – усредненная цена по Южному федеральному округу за январь-март 2021, 2022 и 2023 года (цены взяты из открытых источников, Росстат);

3. цена жидких удобрений ЛиквиФорс марки NPK 7:23:7 и NS 8:9, КАС-32 – усредненная цена от производителя ООО «ЛиквиФорс», за январь-март 2021, 2022 и 2023 года.

Результаты расчета, представленные в таблице 19, позволяют объективно оценить экономическую эффективность каждой системы питания на разных агроэкологических группах земель.

На плакорной группе земель применение ЖУ ЛФ и междурядной подкормки в течении вегетации увеличивало урожайность по сравнению с фоном на 25 ц/га. Стоимость продукции возросла на 45,5 %, достигнув 106 253 руб./га, а условно чистый доход – на 58,9 % (до 63 025 руб./га). Себестоимость продукции снизилась на 11,0 % (до 539,7 руб./ц), а рентабельность увеличилась с 119 % до 146 %. Применение аммонийной селитры и ЖУ ЛФ также увеличивало рентабельность по сравнению с фоновым вариантом до 134 % и 131 %, соответственно. Однако, достоверной разницы между данными вариантами на плакорной группе земель выявлено не было. Таким образом, на плакорных землях наиболее экономически эффективной является интенсивная система питания – Фон + ЖУ ЛФ + м/п.

На эрозионной группе земель наибольшее повышение урожайности зафиксировано в варианте Фон + ЖУ ЛФ + м/п. Однако, рост себестоимости продукции (640,4 руб./ц) и снижение рентабельности до 107 %, относительно варианта Фон + ЖУ ЛФ (111 %) свидетельствует о меньшей эффективности дополнительного внесения подкормки во время вегетации. Максимальный рост условно чистого дохода (84,9 %) зафиксирован в варианте Фон + ЖУ ЛФ (44 487 руб./га против 24 050 руб./га), а окупаемость удобрений составила 2,11 руб./руб. против 1,72 руб./руб. на фоновом варианте.

Таблица 19 – Влияние различных систем питания на экономическую эффективность возделывания кукурузы в зависимости от агроэкологических групп земель (в среднем за 2021-2023 гг.)

Показатели	Система питания (фактор Б)			
	Фон	Фон + Naa	Фон + ЖУ ЛФ	Фон + ЖУ ЛФ + м/п
Плакорная группа земель (фактор А)				
Урожайность, ц/га	55,0	68,8	69,9	80,1
Стоимость продукции, руб/га	72958	91263	92722	106253
Общие затраты, руб/га	33387	38986	40144	43228
Себестоимость продукции, руб/ц	607,0	566,7	574,31	539,7
Условно чистый доход, руб/га	39571	52277	52578	63025
Окупаемость удобрений, руб/руб	2,19	2,34	2,31	2,46
Рентабельность, %	119	134	131	146
Эрозионная группа земель (фактор А)				
Урожайность, ц/га	43,3	59,3	63,8	67,5
Стоимость продукции, руб/га	57437	78661	84631	89539
Общие затраты, руб/га	33387	38986	40144	43228
Себестоимость продукции, руб/ц	771,1	657,4	629,2	640,4
Условно чистый доход, руб/га	24050	39675	44487	46311
Окупаемость удобрений, руб/руб	1,72	2,02	2,11	2,07
Рентабельность, %	72	102	111	107
Переувлажненная группа земель (фактор А)				
Урожайность, ц/га	49,3	66,0	70,5	72,3
Стоимость продукции, руб/га	65396	87549	93518	95906
Общие затраты, руб/га	33387	38986	40144	43228
Себестоимость продукции, руб/ц	677,2	590,7	569,4	597,9
Условно чистый доход, руб/га	32009	48563	53374	52678
Окупаемость удобрений, руб/руб	1,96	2,25	2,33	2,22
Рентабельность, %	96	125	133	122

На переувлажненных землях максимальная урожайность (72,3 ц/га) отмечена в варианте Фон + ЖУ ЛФ + м/п, что на 46,7 % выше, чем на фоновом варианте (49,3 ц/га), при уровне рентабельности 122 %. В варианте Фон + ЖУ ЛФ урожайность была несколько ниже (70,5 ц/га), однако, рентабельность оказалась выше и составила 133 %, что на 38,5 % выше, по сравнению с фоном (96 %). Окупаемость удобрений (2,33 руб./руб.) также оказалась наивысшей в варианте Фон + ЖУ ЛФ.

Анализ экономической эффективности показывает, что применение одних и тех же систем питания на разных агроэкологических группах земель имеет разную

эффективность. На плакорных землях наиболее экономически эффективным вариантом является применение ЖУ ЛФ+м/п, на эрозионных землях – использование ЖУ ЛФ, обеспечивающее наибольшую рентабельность. На переувлажненных землях также наиболее рентабельно вносить ЖУ ЛФ без подкорми по вегетации. Однако, в зависимости от климатических условий года и состояния культур в период вегетации можно применять вариант ЖУ ЛФ+м/п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных научных исследований была изучена эффективность жидких удобрений ЛиквиФорс (марки NPK 7:23:7 и NS 8:9) и разработана система питания кукурузы на зерно для каждой агроэкологической группы земель в условиях Западного Предкавказья. Были получены следующие **выводы:**

1. Проведенная агроэкологическая оценка исследуемой территории, на основе почвенно-ландшафтного картографирования и геоинформационных систем, позволила выделить 3 агроэкологических группы земель: плакорные земли – расположенные на равнинном участке в средней части длинного водораздельного склона, с углом наклона менее 1°; эрозионные земли – расположенные на склонах 2-3° и 3-5°; переувлажненные земли – расположенные в нижней части склона, в низинах. Каждая группа земель отличается по характеру рельефа, структуры почвенного покрова и преобладающим лимитирующим факторам.

2. Проведенные исследования подтвердили эффективность применения верифицированных многовременных индексов NDVI и AOLNDVI, проверенных методами почвенно-ландшафтного картографирования, для оценки продуктивности агроценозов и выявления деградированных участков в условиях Западного Предкавказья. Данные исследования подтверждают возможность использования данных индексов для цифрового почвенного картографирования и первичной агроэкологической оценки территории.

3. Наибольшая урожайность зерна кукурузы получена в вариантах с внесением ЖУ ЛиквиФорс марки NPK 7:23:7 в дозе 75 л/га при посеве и подкормки смесью КАС-32 + ЖУ ЛиквиФорс марки NS 8:9 в дозах 100 л + 75 л/га соответственно (вариант Фон + ЖУ ЛФ+м/п) на всех группах земель. Урожайность на плакорных землях достигла 80,1 ц/га, что на 45,6 % выше фонового уровня. На эрозионных землях урожайность увеличилась до 67,5 ц/га, что на 55,9 % выше фона. На переувлажненных землях результат составил 72,3 ц/га, что на 46,8 % превышает урожайность фонового варианта. Внесение только ЖУ ЛиквиФорс в дозе 75 л/га при посеве (вариант Фон + ЖУ ЛФ) и аммонийной селитры в дозе 150

кг/га (вариант Фон + Naa) показали меньшую прибавку по сравнению с фоном: 25-27 % на плакорных землях, 37-47 % на эрозионных и 33-43 % на переувлажненных землях соответственно. На плакорных землях разницы между данными вариантами выявлено не было – 69,9 и 68,8 ц/га, соответственно. На эрозионных и переувлажненных землях наоборот, прибавка от внесения ЖУ ЛФ достоверно отличается от аммонийной селитры – 63,8-59,3 ц/га и 70,5-66,0 ц/га, соответственно.

4. Система питания оказала существенное влияние на содержание азота и протеина в зерне кукурузы. Вариант с внесением ЖУ ЛФ+м/п способствовал увеличению содержания азота на всех группах земель: плакорные – 1,51 %, эрозионные – 1,43 % и переувлажненные – 1,53 %. Внесение аммонийной селитры эффективнее повышало содержание азота, чем внесение ЖУ ЛФ, однако достоверная разница между двумя вариантами зафиксирована только на плакорных землях. Содержание фосфора, калия, сырого жира и сырой клетчатки достоверно не изменялось по вариантам опыта.

5. Разработанная математическая модель позволила количественно оценить вклад изучаемых факторов в формирование урожайности. Методом последовательного исключения незначимых факторов, получена оптимизированная модель, включающая четыре значимые переменные: уклон и осадки (характеризующие агроэкологическую группу земель), нормы азота и фосфора (система питания). Модель объясняет 79,1 % вариации урожайности (R^2 = 0,791). На основе проведенного анализа построена графическая модель, визуализирующая вклад различных факторов в формирование урожайности.

6. На плакорных землях необходимо применять интенсивную систему питания кукурузы – вариант ЖУ ЛФ+м/п, где условно чистый доход составил 62 978 руб./га, а рентабельность достигла 146 %. На эрозионных землях экономически обоснованным является нормальный уровень интенсификации с использованием ЖУ ЛФ (без междурядной подкормки), который показывает наивысшую рентабельность на данной группе земель – 111 %. На переувлажненной агроэкологической группе земель можно применять нормальный уровень

интенсификации с использованием ЖУ ЛФ (без междурядной подкормки), при уровне рентабельности 133 %. Но в зависимости от климатических условий года и начала вегетационного периода возможно применение интенсивной системы питания – вариант ЖУ ЛФ+м/п.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ

При выращивании кукурузы на зерно в условиях Западного Предкавказья рекомендуется:

1. На плакорной агроэкологической группе земель припосевное внесение жидкого удобрения ЛиквиФорс марки NPK 7:23:7 в дозе 75 л/га или эквивалент 100 кг/га (рабочий раствор с учетом воды 150 л/га) и совместное внесение КАС-32 (130 кг/га или 100 л/га) + жидкое удобрение ЛиквиФорс марки NS 8:9 (82,5 кг/га или 75 л/га) в фазу 3-5 листьев совместно с междурядной обработкой (рабочий раствор с учетом воды 350 л/га).

2. На эрозионной агроэкологической группе земель припосевное внесение жидкого удобрения ЛиквиФорс марки NPK 7:23:7 в дозе 75 л/га или эквивалент 100 кг/га (рабочий раствор с учетом воды 150 л/га).

3. На переувлажненной агроэкологической группе земель припосевное внесение жидкого удобрения ЛиквиФорс марки NPK 7:23:7 в дозе 75 л/га или эквивалент 100 кг/га (рабочий раствор с учетом воды 150 л/га). В зависимости от климатических условий года и начала вегетационного периода возможно применение системы питания, как на плакорной группе земель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий. Под редакцией академика РАСХН В.И. Кирюшина, академика РАСХН А.Л. Иванова. Методическое руководство. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 784 с.

2. Азаренко, А.М. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук: «Продуктивность кукурузы в зависимости от приемов возделывания на черноземе, выщелоченном Западного Предкавказья» / А.М. Азаренко. – Краснодар, 2009. – 27с.

3. Антонова, Ж.А. Картография почв / Ж.А. Антонова, Е.Г. Климентова, Е.В. Рассадина. – Ульяновск: УлГУ, 2014.- 102 с.

4. Аристархов, А.Н. Оптимизация питания растений и применение удобрений в агроэкосистемах / А.Н. Аристархов. - М.: ЦИНАО, 2000. - 524 с.

5. Бараев, А. И. Почвозащитное земледелие / А. И. Бараев [и др.]. – Москва: Колос, 1975. – 304 с.

6. Беленков, А. И. Адаптивно-ландшафтные системы земледелия / А. И. Беленков, Н. С. Матюк, М. А. Мазиров. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2013. – 186 с.

7. Беленков, А. И. Почвоведение с основами геологии: Учебник / А. И. Беленков, М. А. Мазиров, Н. В. Перекрестов. – Москва: ООО "Издательство "КноРус", 2023. – 262 с.

8. Бобренко, И. А. Эффективность применения минеральных удобрений при возделывании гибридов кукурузы в условиях Северного Казахстана / И. А. Бобренко, В. М. Красницкий, Э. Е. Кантарбаева // Плодородие. – 2014. – № 5(80). – С. 16-17.

9. Борин, А.А. Адаптивно-ландшафтные системы земледелия: учебно-методическое пособие / А.А. Борин, А.Э. Лошинина – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА, 2020 – 43 с.

10. Вальков, В.Ф. Почвы Краснодарского края, их использование и охрана / В.Ф. Вальков. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 1995. 192 с.

11. Власенко, В. П. Развитие гидроморфизма в почвах западинных агроландшафтов западного Предкавказья / В. П. Власенко // Почвоведение. – 2009. – № 5. – С. 532–539.

12. Волкова, Н. А. Крупномасштабное картографирование растительности очагов современного гидроморфизма в агроландшафтах Ростовской области для целей мониторинга / Н. А. Волкова // Геоботаническое картографирование. – 2013. – № 2013. – С. 125-135.

13. Гамзиков, Г. П. Почвенная диагностика азотного питания растений и применения азотных удобрений в севооборотах / Г. П. Гамзиков // Плодородие. – 2018. – № 1(100). – С. 8-14.

14. Ганжара, Н. Ф. Практикум по почвоведению / Н. Ф. Ганжара, Б. А. Борисов, Р. Ф. Байбеков. – М.: Агроконсалт, 2002. – 280 с.

15. Глейзер, И. В. Некоторые аспекты использования ГИС технологий при морфометрическом анализе рельефа / И. В. Глейзер, И. М. Копанева, Е. А. Рублева // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. – 2006. – № 11. – С. 143-146.

16. ГОСТ 28168–89. Почвы. Отбор проб. Издание официальное. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 7 с.

17. ГОСТ 26483-85. Определение pH солевой вытяжки, обменной кислотности, содержания нитратов, обменного аммония и подвижной серы методами ЦИНАО. Издание официальное. – Москва: 1985. – 6 с.

18. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. Издание официальное. – Москва: Издательство стандартов, 1992. – 8 с.

19. ГОСТ 26204-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации ЦИНАО. Издание официальное. – Москва: Издательство стандартов, 1992. – 8 с.

20. ГОСТ 27821-2020. Почвы. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена. Издание официальное. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 9 с.

21. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Издание официальное. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 22 с.

22. Гулидова, В.А. Кукуруза на зерно. Современные технологии возделывания: практическое руководство / В.А. Гулидова, Е.И. Хрюкина, Г.Я. Сергеев. – Воронеж: Агрохолдинг МТС "Агро-Альянс", 2017 – 51 с.

23. Гусева, Е. С. Современная модель экологически устойчивого сельского хозяйства в условиях аридного климата / Е. С. Гусева, Ю. В. Белякова, А. Н. Бармин // Земледелие. – 2011. – № 8. – С. 3-5.

24. Гусева, Ю.Е. Практикум по системе удобрения: учебное пособие / Ю.Е. Гусева, А.Н. Налиухин, В.А. Демин; Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева. – Москва: РГАУ МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023. – 136 с.

25. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки / Б.А. Доспехов. – Изд. 4-е. – М.: Колос, 1979. – 415 с.

26. Дроздова, В. В. Влияние норм и сочетаний минеральных удобрений на урожайность кукурузы и агрохимические показатели плодородия чернозема, выщелоченного западного Предкавказья / В. В. Дроздова, Н.Е. Редина // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 121. – С. 1732-1748.

27. Дронова, Т. Я. Глинистые минералы в почвах / Т. Я. Дронова, Т. А. Соколова, И. И. Толпешта. – Тула : Гриф и К, 2005. – 336 с.

28. Ермолаев, Н. Р. Оценка потенциала водной эрозии почв Ставропольского края на основе факторной модели RUSLE / Н. Р. Ермолаев, С. А. Юдин, В. П. Белобров // Сельскохозяйственный журнал. – 2019. – № 3(12). – С. 1–12.

29. Жученко, А. А. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы). Теория и практика. В трех томах. Том 1. / А. А. Жученко. – М.:Агрорус, 2008. – 814 с.

30. Жученко, А. А. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы). Теория и практика. В трех томах. Том 2. / А. А. Жученко. – М.:Агрорус, 2009. – 1104 с.

31. Жученко, А. А. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы). Теория и практика. В трех томах. Том 3. / А. А. Жученко. – М.:Агрорус, 2009. – 960 с.

32. Иванов, А. Л. Цифровое земледелие / А.Л. Иванов, И. С. Козубенко, И. Ю. Савин, В. И. Кирюшин // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2018. – № 5. – С. 4-9.

33. Кануков, З.Т. Влияние различных систем удобрения на урожайность и качество зерна кукурузы в условиях лесостепной зоны РСО Алания / З.Т. Кануков, А.Е. Басиев., Т.К. Лазаров, С.Х. Дзанагов // Известия Горского государственного аграрного университета. – 2015. – Т. 52. – № 2. – С.39-44.

34. Карманов И.И. Бонитировка почв на основе почвенно-экологических показателей / И.И. Карманов, Т.А. Фриев // Почвоведение. – 1982. – № 5. – С. 13-21.

35. Карчагина, Л. П. Адаптивно-ландшафтная система земледелия предгорной зоны Республики Адыгея / Л. П. Карчагина, Р. К. Тугуз, Н. И. Мамсиров, Н. Е. Костина. – Майкоп: Магарин О. Г., 2013. – 84 с.

36. Кауричев, И. С. Памяти академика В. Р. Вильямса / И. С. Кауричев, В. И. Кирюшин, Л. О. Карпачевский, И. А. Соколов // Почвоведение. – 2003. – № 11. – С. 1392–1402.

37. Каштанов, А. Н. Концепция ландшафтно-контурной мелиоративной системы земледелия / А. Н. Каштанов // Сельское хозяйство. – 1992. – № 4. – С. 2–5.

38. Кидин, В.В. Агрохимия: учебник / В.В. Кидин, С.П.Торшин // Москва: Проспект, 2016. – 603 с.

39. Кирюшин, В. И. Агрономическое почвоведение: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 110100

"Агрохимия и агропочвоведение" / В. И. Кирюшин. – Москва: Издательство КолосС, 2010. – 687 с.

40. Кирюшин, В. И. Адаптивно-ландшафтные системы земледелия-основа современной агротехнологической политики России / В. И. Кирюшин // Земледелие. – 2000. – № 3. – С. 4-6.

41. Кирюшин, В. И. Задачи научно-инновационного обеспечения земледелия России / В. И. Кирюшин // Земледелие. – 2018. – № 3. – С. 3-12.

42. Кирюшин, В. И. Методология комплексной оценки сельскохозяйственных земель / В. И. Кирюшин // Почвоведение. – 2020. – № 7. – С. 871-879.

43. Кирюшин, В. И. Минимизация обработки почвы: итоги дискуссии / В. И. Кирюшин // Земледелие. – 2007. – № 4. – С. 28-30.

44. Кирюшин, В. И. Применение ГИС-технологий при картографировании и проектировании агроландшафтов / В. И. Кирюшин, И. В. Слива // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2005. – № 1(5). – С. 8-13.

45. Кирюшин, В. И. Проблемы инновационного развития сельского хозяйства / В. И. Кирюшин // Инновации. – 2014. – № 7(189). – С. 3-11.

46. Кирюшин, В. И. Система научно-инновационного обеспечения технологий адаптивно-ландшафтного земледелия / В. И. Кирюшин // Земледелие. – 2022. – № 2. – С. 3-7.

47. Кирюшин, В. И. Экологические основы проектирования сельскохозяйственных ландшафтов: учебник / В. И. Кирюшин. – 2-е изд. – Санкт-Петербург: Квадро, 2024. – 576 с.

48. Кирюшин, В. И. Агрономическое почвоведение / В. И. Кирюшин – 2-е изд. – Санкт-Петербург: Квадро, 2024. – 680 с.

49. Кирюшин, В. И. Методология комплексной оценки сельскохозяйственных земель / В. И. Кирюшин // Почвоведение. – 2020. – № 7. – С. 871–879.

50. Кирюшин, В. И. Минимизация обработки почвы: перспективы и противоречия / В. И. Кирюшин // Земледелие. – 2006. – № 5. – С. 12–15.

51. Кирюшин, В. И. Теория адаптивного-ландшафтного земледелия и проектирование агроландшафтов / В. И. Кирюшин. – Москва.: КолосС, 2011. – 443 с.

52. Кирюшин, В. И. Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтных системах земледелия / В. И. Кирюшин // Почвоведение. – 2019. – № 9. – С. 1130–1139.

53. Кирюшин, В. И. Экологические основы земледелия / В. И. Кирюшин. – М.: "Колос", 1996. – 367 с.

54. Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: «Ойкумена», 2004. 342 с.

55. Классификация и диагностика почв СССР / [Сост. чл.-кор. ВАСХНИЛ В.В. Егоров, профессора В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова и др.]; Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. — Москва : Колос, 1977. — 223 с.; 20.

56. Колесникова, В.А. Состояние и перспективы применения жидких минеральных удобрений / В.А.Колесникова, Л.А.Марченко, Т.В.Мочкова // Сельскохозяйственные машины и технологии. – №3(4), – 2008, – С. 38–40.

57. Коробской, Н.Ф. Черноземы Западного Предкавказья. Экологические проблемы и пути их решения / Н.Ф. Коробской. – Краснодар: КубГАУ, 2005. – 382 с.

58. Куликова, А.Х. Роль органических удобрений (соломы, сидератов, пожнивно-корневых остатков) в воспроизводстве и сохранении гумуса в почве / А. Х. Куликова, Е. А. Яшин, Е. А. Черкасов, Е. С. Волкова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 4(60). – С. 53-58.

59. Куприянов, А. Н. Агрометеорологическая оценка возделывания сельскохозяйственных культур и меры по адаптации продукционного процесса в условиях изменения климата на примере Зерноградского района Ростовской области / А. Н. Куприянов, А. И. Белолюбцев // АгроЭкоИнфо. – 2022. – № 5(53).

60. Куприянов, А. Н. Применение жидких комплексных минеральных удобрений как фактор оптимизации производства продукции растениеводства в условиях изменения климата / А. Н. Куприянов, А. А. Прохоров, А. И. Белолюбцев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2024. – № 3(233). – С. 33-40.

61. Лопырев, М. И. Основы агроландшафтоведения / М. И. Лопырев. – Воронеж : Воронежский государственный университет, 1995. – 184 с.

62. Макаров, В.И. Агроэкологическая оценка земель: Учебное пособие для практических занятий и самостоятельной работы студентов / В.И. Макаров. – Ижевск : ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2015. – 104 с.

63. Малышева, Е.В. Влияние минеральных удобрений на урожайность и вынос элементов питания кукурузой, возделываемой в условиях ЦЧЗ / Е.В. Малышева, Н.В. Долгополова // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. - 2021. - № 3. - С. 45-49.

64. Марголис, Ф. Г. Производство комплексных удобрений / Ф. Г. Марголис, Т. П. Унанянц. – Москва : Химия, 1968. – 203 с.

65. Марченко, Л.А., Мочкова, Т.В., Колесникова, В.А., Козлова, А.И. Состояние производства и применения жидких минеральных удобрений в сельском хозяйстве /Л.А. Марченко, Т.В. Мочкова, Л.А. Колесникова, А.И. Козлова // Сельскохозяйственные машины и технологии. – №6, – 2015. – С. 36 40.

66. Масютенко, Н.П. Методологические аспекты формирования экологически сбалансированных агроландшафтов / Н. П. Масютенко, А. В. Кузнецов, М. Н. Масютенко, Г. М. Брескина // Земледелие. – 2016. – № 7. – С. 6-9.

67. Методика агроэкологической типизации земель в агроландшафте (информационно-справочные системы оценки их ресурсного потенциала и оптимизации базовых элементов систем земледелия) / Рос. акад. с.-х. наук, Всерос. науч.-исслед. ин-т земледелия и защиты почв от эрозии ; [Васенев И. И. и др.]. – Москва: Россельхозакадемия, 2004. – 80 с.

68. Муха, В. Д. Агропочвоведение / В. Д. Муха, Н. И. Картамышев, И. С. Кочетов, Д. В. Муха; под ред. В. Д. Мухи. – М.: Колос, 1994. – 527 с.

69. Назаренко, О.Г. Рекомендации по применению жидких комплексных удобрений (ЖКУ) / О.Г. Назаренко, И.В. Субботина, В.И. Продан, Н.В. Кайдалова – п. Рассвет: Министерство сельского хозяйства РФ. ФГБУ ГЦАС «Ростовский», 2017. – 14 с.

70. Наумов В.Д. География почв: Рабочая тетрадь / В.Д. Наумов, Н.Л. Каменных, М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2019. 152 с.

71. Наумов, В.Д. География почв / В.Д. Наумов. – М.: КолосС, 2008. – 288 с.

72. Национальный атлас почв Российской Федерации. – М.: Астрель: АСТ, 2011. – 632 с.

73. Национальный атлас России / в 4 т. / Министерство транспорта Российской Федерации, Федеральное агентство геодезии и картографии; гл. ред. В.В. Свешников. – М.: Роскартография, 2004-2008.

74. Нестеренко О.А. Оценка эффективности применения комплексных удобрений при возделывании кукурузы на зерно / О. А. Нестеренко, А. В. Дронов, В. В. Мамеев [и др.] // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 6. – С. 20-27.

75. Особенности адаптивно-ландшафтной системы земледелия Кабардино-Балкарской Республики / А. Л. Иванов и др.; под общ. ред. А. А. Маремукова. – Нальчик: Принт-Центр, 2013. – 541 с.

76. Патент N 2769575 Российская Федерация, МПК G01C 11/00 (2006.01), G06K 9/62 (2006.01), G01N 33/24 (2006/01). Способ генерации карт деградации почвенного покрова: N 2021119664: заявл. 05.07.2021: опубл. 04.04.2022 / Рухович Д.И., Трубников А.В. и др.

77. Полякова, Е.В. Применение геоморфометрического анализа рельефа при осуществлении хозяйственной деятельности на территории Архангельской области / Е. В. Полякова, Ю. Г. Кутинов, А. Л. Минеев, З. Б. Чистова // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2021. – № 2. – С. 86-95.

78. Полякова, Е.В. Цифровое моделирование рельефа в оценке вероятности развития эрозионных процессов в северных регионах страны / Е. В.

Полякова, Ю. Г. Кутинов, А. Л. Минеев, З. Б. Чистова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 1. – С. 95 104.

79. Прохоров, А. А. Индексная оценка степени выпаханности черноземов Предкавказской провинции / А. А. Прохоров, Б. А. Борисов, О. Е. Ефимов // Агрохимический вестник. – 2023. – № 5. – С. 50-55.

80. Прохоров, А. А. Агроэкологическая оценка продуктивности яровой пшеницы в агроландшафтах Нижнекамского района Республики Татарстан / А. А. Прохоров, А. Н. Куприянов, Б. А. Борисов, О. Е. Ефимов // Плодородие. – 2024. – № 5. – С. 89–96.

81. Прохоров, А. А. Использование индексов вегетации в почвенно-ландшафтном картографировании и агроэкологической оценке / А. А. Прохоров, К. Д. Агеев, К. С. Горячев // АгроЭкоИнфо. – 2024. – № 2.

82. Прохоров, А. А. Оценка продуктивности плакорной агроэкологической группы земель на примере Краснодарского края / А. А. Прохоров, Б. А. Борисов, О. Е. Ефимов [и др.] // Агрохимический вестник. – 2024. – № 4. – С. 39–44.

83. Прудникова, Е. Ю. Исследование оптических свойств открытой поверхности почв / Е. Ю. Прудникова, И. Ю. Савин // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83, № 10. – С. 79–86.

84. Радцевич, Г. А. Исследование тенденций изменения климата на европейской части Российской федерации за длительный период / Г. А. Радцевич, А. А. Черемисинов, А. Ю. Черемисинов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2017. – № 4(55). – С. 30–40.

85. Руднев, Н.И. Адаптация ЛИССОЗ к условиям Опытного хозяйства ВНИИЗиЗПЭ / Н.И. Руднев, И.И. Васенев, Ю.И. Харченков, В.Г. Хахулин // Модели и технологии оптимизации земледелия. Курск. - 2003. - С. 277-282.

86. Савин, И. Ю. Использование вегетационного индекса NDVI для оценки качества почв пашни (на примере Баксанского района Кабардино-Балкарии) / И. Ю. Савин, Э. Р. Танов, С. Харзинов // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2015. – № 77. – С. 51–65.

87. Савин, И. Ю. Проблема масштаба в современной почвенной картографии / И. Ю. Савин // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2019. – № 97. – С. 5–20.

88. Савоськина, О. А. Влияние систем обработки почвы на сорный компонент агрофитоценоза ячменя / О. А. Савоськина, С. И. Чебаненко, С. Г. Манишкин // Плодородие. – 2011. – № 6(63). – С. 18-20.

89. Семенов, В. М. Почвенное органическое вещество / В.М. Семенов, Б.М. Когут. – Москва: ГЕОС, 2015. — 233 с.

90. Сидоров, А. В. Влияние минеральных удобрений на химический состав зерна кукурузы и вынос основных элементов питания в условиях лесостепи среднего Поволжья / А. В. Сидоров, А. А. Моисеев, А. В. Ивойлов // Агрохимия. – 2020. – № 9. – С. 18-23.

91. Система земледелия Краснодарского края на агроландшафтной основе / А. Н. Коробка, С. Ю. Орленко, Е. В. Алексеенко [и др.]. – Краснодар: ООО "Просвещение-Юг", 2015. – 352 с.

92. Смирнова, Л. Г. Агроэкологическая типизация земель для проектирования адаптивно-ландшафтной системы земледелия / Л. Г. Смирнова, А. Г. Нарожняя. – Белгород: ИД «Белгород», 2012. – 43 с.

93. Сорокина, Н. П. Опыт цифрового картографирования структуры почвенного покрова / Н. П. Сорокина, Д. Н. Козлов // Почвоведение. – 2009. – № 2. – С. 198–210.

94. Технология возделывания кукурузы: рекомендации / Н. Ф. Лавренчук, М. В. Петрова, В. Ю. Пацкан [и др.]; Национальная Ассоциация Производителей Семян Кукурузы, Краснодарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени П.П. Лукьяненко. – Краснодар: Издательство "ЭДВИ", 2017. – 42 с.

95. Тишков, Н.М. Эффективность применения жидких комплексных удобрений под подсолнечник на чернозёмах Краснодарского края / Н.М. Тишков, Г.И. Ерёмин // Масличные культуры. – 2020. – Вып. 2 (182). – С. 51–61.

96. Толорая, Т.Р. Эффективность припосевного применения минеральных удобрений и азотных подкормок при выращивании кукурузы / Т.Р. Толорая, В.П. Малаканова, А.И. Подлесный [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 85. – С. 279-288.

97. Топалова, З. Х. Эффективность применения жидкого комплексного удобрения ЖКУ 10-34-0 под гибриды кукурузы разных сроков созревания в предгорной зоне КБР / З. Х. Топалова, Ю. М. Шогенов, З. А. Иванова, Ф. Х. Нагудова // Наука, образование, общество. – 2014. – № 2(2). – С. 204–210.

98. Усманов, Р. Р. Статистическая обработка данных агрономических исследований в программе «STATISTICA»: учебно-методическое пособие / Р. Р. Усманов. – Москва: РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2020. – 177 с.

99. ФАО, МФСР, ЮНИСЕФ, ВПП и ВОЗ. 2018. Положение дел в области продовольственной безопасности и питания в мире – 2018.

100. Фридланд, В. М. Структура почвенного покрова мира / В. М. Фридланд. – Москва : Мысль, 1984. – 236 с.

101. Шеуджен А.Х. Региональная агрохимия. Северный Кавказ // А.Х. Шеуджен, В.Т. Куркаев, Л.М. Онищенко. – Краснодар: КубГАУ, 2007. – 502 с.

102. Шеуджен, А.Х. Агрохимия / А.Х. Шеуджен, В.Т. Куркаев, Н.С. Котляров. – Майкоп, 2006. – 1076 с.

103. Ягодин, Б. А. Агрохимия / Б. А. Ягодин М.: Агропромиздат. 1989. — 656 с.

104. Якушев, В. П. Точное земледелие - новый этап в развитии агрономии / В. П. Якушев, В. В. Якушев // Земледелие. – 2008. – № 2. – С. 1-5.

105. Янишевский, Ф.В. Агрохимия жидких комплексных удобрений / Ф.В. Янишевский. – М.: Наука, 1978. – 208 с.

106. Adams, J. R. Liquid nitrogen fertilizers for direct application / J. R. Adams, M. S. Anderson, W. C. Hulbert // USDA Agric. Handbook. – 1961. – № 198.

107. Altieri, M. A. Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture. — Boca Raton / M.A. Altieri // CRC Press. - 1995. – P.452.

108. Altieri, M. A. The Ecological Role of Biodiversity in Agroecosystems / M.A. Altieri // Agriculture, Ecosystems & Environment. — 1999. — Vol. 74, №. 1. — P. 19-31.

109. Altieri, Miguel. Toledo, Víctor. The Agroecological Revolution in Latin America: Rescuing Nature, Ensuring Food Sovereignty and Empowering Peasants. / Miguel. Altieri. Victor, Toledo // The Journal of Peasant Studies. – 2021.

110. Altieri. The Agroecological Revolution in Latin America: Rescuing Nature, Ensuring Food Sovereignty and Empowering Peasants. / Miguel. Altieri. Victor, Toledo // The Journal of Peasant Studies. – 2021.

111. Bakker M. M. The Crop Productivity–Erosion Relationship: An Analysis Based on Experimental Work / M. M. Bakker, G. Govers, M. D. A. Rounsevell // CATENA. – 2004. – Vol. 57(1). – P. 55–76.

112. Bakker, M. M. The Effect of Soil Erosion on Europe's Crop Yields / M. M. Bakker, G. Govers, M. D. Rounsevell // Ecosystems. – 2007. – Vol. 10(7). – P. 1209–1219.

113. Balfour, E. J. The Living Soil / E. J. Balfour. — London: Faber & Faber, 1943. — 250 p.

114. Bannari, A. A review of the application of remote sensing for soil moisture estimation / A. Bannari, et al. // Remote Sensing of Environment. — 1995. — Vol. 53, № 3. — P. 229-242.

115. Bignall, E. M. Low intensity farming systems in the conservation of the countryside / E. M. Bignall, D. I. McCracken // Journal of Applied Ecology. — 1996. — Vol. 33. — P. 416-424.

116. Birth, G. S. Measuring the reflectance of vegetation: A review / G. S. Birth, G. R. McVey // Horticultural Research. — 1968. — Vol. 10, № 1. — P. 36-42.

117. Bramble-Brodahl, M. Changes in soil productivity related to changing topsoil depth on two Idaho Palouse soils / M. Bramble-Brodahl, M.A. Fosberg, D.J. Walker, A.L. Falen // Erosion and Soil Productivity. – American Society of Agricultural Engineers, New Orleans, Louisiana. – 1984.

118. Breland, T. A. Soil quality and management for sustainable agriculture / T. A. Breland, S. Hansen // Agricultural Systems. — 1996. — Vol. 51, № 3. — P. 151-163.

119. Brethour, C. An economic evaluation of the environmental benefits from pesticide reduction / C. Brethour, A. Weersink // Agricultural Economics. — 2001. — Vol. 25. — P. 219-226.

120. Bunch, R. Soil recuperation in Central America / R. Bunch, G. Lopez // Fertile Ground: The Impact of Participatory Watershed Management. — London: Intermediate Technology Publications, 1999. — P. 32-41.

121. Bünemann. Soil quality - A critical review / Bünemann, Bongiorno, Giulia, Bai, Zhanguo, Creamer, Rachel, Deyn, Soil Biology and Biochemistry. – 2018. – Vol. 120. – P. 105.

122. Bürgi, M. Understanding Land-Use Change in the Context of Land-Use Sustainability / M. Bürgi, et al. // Global Environmental Change. — 2017. — Vol. 42. — P. 205-215.

123. Busacca A.J. Dynamic impacts of erosion processes on productivity of soils in the Palouse / A.J. Busacca, D.K. McCool, R.I. Papendick, D.L. // In: American Society of Agricultural Engineers, Eds. Erosion and Soil Productivity. – New Orleans, Louisiana, 1984. – P. 152–169.

124. Buttel, F. H. The Role of Agriculture in Sustainable Development / F. H. Buttel // Society & Natural Resources. — 2003. — Vol. 16, № 5. — P. 387-402.

125. Cakmak, I. The Role of Silicon in Enhancing the Resistance of Plants to Biotic and Abiotic Stresses / I. Cakmak // Soil Science and Plant Nutrition. — 2002. — Vol. 48, № 5. — P. 745-758.

126. Caraveli, H. A. Comparative analysis on intensification and extensification in Mediterranean agriculture: dilemmas for LFAs policy / H. A. Caraveli // Journal of Rural Studies. – 2000. – Vol. 16. – P. 231-242.

127. Carvalho, R. F. Soil management and its effects on crop productivity / R. F. Carvalho, et al. // Soil & Tillage Research. — 2003. — Vol. 71, № 2. — P. 181-192.

128. Cassman, K. G. Sustainable Intensification of Cereal Production: A Global Perspective / K. G. Cassman, P. Grassini // Nature Sustainability. — 2020. — Vol. 3, № 6. — P. 490-503.

129. Cernea, Michael M. The economics of involuntary resettlement : questions and challenges / edited by Michael M. – Cernea World Bank Washington, D.C. – 1999.

130. Chambers, R., et al. From Farmer Participation to Sustainable Agricultural Development / R. Chambers, et al. // Agricultural Research and Extension Network Paper. — 1989. — № 1.

131. Chlingaryan, A. Soil moisture estimation using remote sensing / A. Chlingaryan, et al. // Remote Sensing. — 2018. — Vol. 10, № 6. — P. 929.

132. Chtouki, M. Chickpea plant responses to polyphosphate fertiliser forms and drip fertigation frequencies: effect on photosynthetic performance and phenotypic traits / M. Chtouki, R. Naciri, S. Garré, F. Nguyen, A. Oukarroum // Funct. Plant Biol. – 2021. – Vol. 49. – P. 505–516.

133. Clements, D. R. Weed Management: Ecological Principles and Practice / D. R. Clements, A. Shrestha // Weed Science. — 2004. — Vol. 52, № 3. — P. 461-467.

134. Collins, C. D. Land-Use Dynamics: An Integrated Approach / C. D. Collins, et al. // Land Use Policy. — 2011. — Vol. 28, № 1. — P. 1-10.

135. Conway, G. R. The Doubly Green Revolution: Food for All in the 21st Century / G. R. Conway. — Ithaca, NY: Cornell University Press, 1997. — 312 p.

136. Conway, G. Unwelcome Guests: The Politics of Food Production / G. Conway, J. N. Pretty. — London: Earthscan, 1991. — 255 p.

137. Cowie, A L. Effects of waterlogging on chickpeas I. Influence of timing of waterlogging / A. L. Cowie, R. S. Jessop, MacLeod D. A. // Plant and Soil. – 1996. – Vol. 183. – P. 97–103.

138. de Sherbinin, A. Environmental migration in China / A. de Sherbinin // Journal of International Affairs. — 2002. — Vol. 56, № 1. — P. 59-76.

139. DeFries, R. The impact of land use change on the carbon balance / R. DeFries, et al. // Global Change Biology. — 2004. — Vol. 10, № 2. — P. 293-307.

140. Den Biggelaar C. Impact of Soil Erosion on Crop Yields in North America / C. Den Biggelaar, R. Lal, K. Wiebe, V. Breneman // Adv Agron. – 2001. – Vol. 72. – P. 1–52.

141. Derpsch, R. Current status of no-tillage adoption in the world / R. Derpsch, et al. // Soil & Tillage Research. — 2010. — Vol. 105, № 3. — P. 331-336.

142. Dormaar J.F. Restoring productivity to an artificially eroded dark brown chernozemic soil under dryland conditions / J.F. Dormaar, C.W. Lindwall, G.C. Kozub // Canadian Journal of Soil Science. – 1986. – T. 66. – C. 273–285.

143. Dovring, F. The Conditions of Agricultural Growth: The Economics of Agrarian Change under Population Pressure / Dovring, F. – Chicago: Aldine Publishing Company, 1965. – P. 124.

144. Duru, M. How to implement bio-diversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review / M. Duru, G. Martin, O. Therond, et al. // Agronom. – 2012. – Vol. 35. — P. 1259-1281.

145. Evans, N. T. S. Radioactive oxygen in the study of gas transport down the roots of Vicia faba / N. T. S. Evans, M. Ebert // New Phytologist. – 1960. – Vol. 73, №1. – P. 1–9.

146. Fabre, N. Long-Term Trends in Land Use and Biodiversity in Agricultural Landscapes / N. Fabre, et al. // Biodiversity and Conservation. — 2012. — Vol. 21, № 8. — P. 1899-1919.

147. FAO, 1999, Committee on Agriculture, 15th Session, Biotechnology.

148. Foley, J.A. Global consequences of land use / J.A. Foley // Science. – 2005. – Vol. 309. – P. 570-574.

149. Foster, J. Sustainable land management in the tropics: What works and what doesn't / J. Foster, et al. // Tropical Conservation Science. — 2003. — Vol. 1, № 3. — P. 261-272.

150. Foster, R. Sustainable rural livelihoods: Practical concepts for the 21st century / R. Foster, et al. — London: DFID, 2003. — 126 p.

151. Fumagalli, M. An analysis of agricultural sustainability of cropping systems in arable and dairy farms in an intensively cultivated plain / M. Fumagalli, M. Acutis, F.

Mazzetto, F. Vidotto, G. Sali, L. Bechini // European Journal of Agronomy. – 2011. – Vol. 34. – P. 71–82.

152. Gelsinger, I. G. Ammonium polyphosphates from superphosphoric acid and ammonia / I. G. Gelsinger, M. R. Sirgel, H. C. Mann // J. Agric. and Food Chem. – 1962. – Vol. 10, № 4.

153. Gergel, S. E. Learning from Spatial Patterns: The Role of Landscapes in Ecological Understanding / S.E. Gergel, M.G. Turner // Ecological Applications. — 2017. — Vol. 27, № 5. — P. 1383-1389.

154. Gitelson, A. A. Remote estimation of chlorophyll concentration in higher plant leaves / A. A. Gitelson, et al. // Remote Sensing of Environment. — 2003. — Vol. 84, № 2. — P. 209-220.

155. Gliessman, S. R. Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems. 2nd ed. / S. R. Gliessman. — Boca Raton, FL: CRC Press, 2008. — 478 p.

156. Gliessman, S. R. Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems / S. R. Gliessman. — Boca Raton, FL: CRC Press, 2004. — 432 p.

157. Gomez, I. Remote sensing for soil moisture estimation: A review / I. Gomez, et al. // Remote Sensing of Environment. — 2002. — Vol. 79, № 3. — P. 375-390.

158. Green, J. Oxidation of ferrous iron by rice (*Oryza sativa* L.) roots: a mechanism for waterlogging tolerance? / J. Green, J. R. Etherington // Journal of Experimental Botany. – 1977. – Vol. 3. – P. 678–690.

159. Greenwood, D. J. Studies on the Supply of Oxygen to the Roots of Mustard Seedlings (*Sinapis alba L.*) / D. J. Greenwood, D. Goodman // New Phytologist. – 1971. – Vol. 70, №1. – P. 85–96.

160. Guo, Q. Soil and Crop Management for Sustainable Agriculture: Challenges and Opportunities / Q. Guo, et al. // Agriculture. — 2022. — Vol. 12, № 3. — P. 462.

161. Hay, R. K. M. Principles of Crop and Pasture Production / R. K. M. Hay, A. J. Walker — London: Longman, 1989. — 432 p.

162. Helfenstein, J. Ecosystem Services and the Role of Biodiversity in Ecosystem Functioning / J. Helfenstein, et al. // Ecosystems. — 2014. — Vol. 17, № 5. — P. 819-828.

163. Herzog, F. Assessing the intensity of temperate European agriculture at the landscape scale / Herzog, F., Steiner, B., Bailey, D., Baudry, et al. // European Journal of Agronomy. – 2006. – Vol. 24, № 2. – P. 165-181.

164. Hinchliffe, S. Biodiversity and Land Use in the United Kingdom / S. Hinchliffe, et al. // Environmental Planning. — 1999. — Vol. 31, № 5. — P. 1-14.

165. HLPE. Healthy Diets from Sustainable Food Systems. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition. — Rome: Committee on World Food Security, 2019. — 122 p.

166. Holmes, D. Agricultural innovation: Successes and failures / D. Holmes // Journal of Agricultural Science. — 2017. — Vol. 9, № 4. — P. 345-352.

167. Hoosbeek, M. R. Soil Acidification in Agriculture: Effects and Management / M. R. Hoosbeek, R.B.Bryant // Soil Science Society of America Journal. — 1992. — Vol. 56, № 6. — P. 1955-1963.

168. Horowitz, W. Soil sampling for analysis of soil organic carbon: A comparative review / W. Horowitz, et al. // Journal of Soil and Water Conservation. — 2010. — Vol. 65, № 3. — P. 155-164.

169. Huete, A. R. Soil-adjusted vegetation index (SAVI) / A. R. Huete // Remote Sensing of Environment. — 1988. — Vol. 25, № 3. — P. 295-309.

170. Iizumi, T. Increasing heavy rainfall events and associated excessive soil water threaten a protein-source legume in dry environments of West Africa / T. Iizumi, K. Iseki, K. Ikazaki, T. Sakai, H. Shiogama, Y. Imada, B.J. Batieno // Agricultural and Forest Meteorology. – 2023. – T. 344. – C. 109-783.

171. Jackson, M. B. The impact of flooding stress on plants and crops. In: Flooding and plant growth, 2nd edition / M. B. Jackson // Agricultural Research Council Letcombe Laboratory. – 1984.

172. Jackson, W., Jackson, L. Ecological Agriculture: Principles and Practice / W. Jackson, L. Jackson //Journal of Sustainable Agriculture. — 2002. — Vol. 19, № 4. — P. 1-13.

173. Jepson, Paul & Guzy. Measuring pesticide ecological and health risks in West African agriculture to establish an enabling environment for sustainable

intensification / Jepson, Paul & Guzy, Michael & Blaustein, Kathy & Sow M. & Sarr, Makhfousse & Mineau, Pierre & Kegley, S. // Philosophical transactions of the Royal Society of London. – 2014. – Vol. 369.

174. Jones, J. W. Crop modeling for decision support / J. W. Jones, et al. // Journal of Production Agriculture. — 1989. — Vol. 2, № 3. — P. 285-291.

175. Kazemi, M.L. Effects of accelerated erosion on corn yields of loess-derived and till-derived soils in Iowa. Unpublished technical report / M.L. Kazemi, L.C. Dumenil, T.E. Fenton // Department of Agronomy Iowa State University, Iowa. – 1990. – P. 1–102.

176. Keesstra, S. D. The role of soil in sustainable agriculture / S. D. Keesstra, et al. // Environmental Science & Policy. — 2016. — Vol. 60. — P. 22-30.

177. Khadse, A. Sustainable Agriculture: The Role of Agroecology in Food Systems / A. Khadse, et al. // Agronomy for Sustainable Development. — 2018. — Vol. 38. – № 1. — P. 1-15.

178. Khourchi, S. Polyphosphate application influences morpho-physiological root traits involved in P acquisition and durum wheat growth performance / S. Khourchi, A. Oukarroum, A. Tika, P. Delaplace, A. Bargaz // BMC Plant Biol. – 2022. – Vol. 22, Issue 1. – P. 1–15.

179. Kleijn, D. On the relationship between farmland biodiversity and land-use intensity in Europe / D. Kleijn, F. Kohler, A. Báldi, P. Batáry, et al //. Proc Biol Sci. – 2009.

180. Kosmas, C. The effects of tillage displaced soil on soil properties and wheat biomass / C. Kosmas, S. Gerontidis, M. Marathianou, B. Detsis, T. Zafiriou, W.V. Muysen, G. Govers, T. Quine, K. Vanoost // Soil and Tillage Research. – 2001. – Vol. 58. – P. 31–44.

181. Kravchenko, A. N. Soil Quality and Management Practices Affecting Soil Carbon Sequestration in Agronomy / A. N. Kravchenko, D. G. Bullock // Soil Science Society of America Journal. — 2000. — Vol. 64, № 2. — P. 761-769.

182. Lal, R. Restoring soil quality to mitigate food insecurity / R. Lal // Sustainability. — 2015. — Vol. 7, № 5. — P. 6735-6751.

183. Lampkin, N., Padel, S. The Economics of Organic Farming: An International Perspective / N. Lampkin, S. Padel. — Wallingford: CAB International, 1994.

184. Landis, D. A. The Sustainable Intensification of Agriculture: Integrating Ecological and Economic Principles / D. A. Landis // Frontiers in Ecology and the Environment. — 2017. — Vol. 15, № 5. — P. 268-276.

185. Lee, K. The role of remote sensing in precision agriculture / K. Lee, M. Ehsani // Remote Sensing of Environment. — 2009. — Vol. 113, № 4. — P. 763-770.

186. Li, W. Organic Agriculture in China: Development and Perspectives / W. Li // Sustainable Agriculture Reviews. — 2001. — Vol. 1. — P. 25-40.

187. Lipiec, J. Soil compaction and its effects on soil properties / J. Lipiec, W. Stepniewski // Soil Science Society of America Journal. — 1995. — Vol. 59, № 2. — P. 222-230.

188. Liu, J. Spatial variability of soil properties and its implications for soil management / J. Liu, X. Luo // Soil & Tillage Research. — 2011. — Vol. 113, № 2. — P. 107-115.

189. Loneragan, J. F. Nutritional Aspects of Crop Production / J. F. Loneragan // In G. P. Moss, H. H. T. Whittle (Eds.), Agricultural Biochemistry. — Academic Press, 1977. — P. 1-13.

190. Lubkowski, Krzysztof. Environmental impact of fertilizer use and slow release of mineral nutrients as a response to this challenge / Krzysztof, Lubkowski // Polish Journal of Chemical Technology. – 2016. – P. 72-79.

191. MA (Millennium Ecosystem Assessment). Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. — Washington, DC: Island Press, 2005. — 155 p.

192. Ma, Y. An index for assessing soil erosion risk / Y. Ma, et al. // Land Degradation & Development. — 1996. — Vol. 7, № 1. — P. 1-10.

193. Malik, R. K. Productivity of Wheat Under Different Irrigation Regimes and Nitrogen Levels in the Indo-Gangetic Plains / R. K. Malik, S. Singh, A. Yadav, G. Gill // Indian Journal of Agricultural Sciences. – 2001. – Vol. 71(7). – P. 441–446.

194. Marcucci, A. Agricultural landscape design: Principles and techniques / A. Marcucci // Environmental Science & Policy. — 2000. — Vol. 3. – № 4. — P. 337-345.

195. Marino, G. Soil moisture content estimation by remote sensing / G. Marino, A. Alvino // Agricultural Water Management. — 2014. — Vol. 138. — P. 43-52.

196. Marschner, P. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants / P. Marschner.- 2012.

197. McBeath, T. Responsiveness of wheat (*Triticum aestivum*) to liquid and granular phosphorus fertilisers in southern Australian soils / T. McBeath, Armstrong, Roger, Lombi, Enzo, McLaughlin // Australian Journal of Soil Research. – 2005. – Vol. 43. – P. 203-212.

198. McNeely, J. A. Ecoagriculture: Strategies to Feed the World and Save Wild Biodiversity / J. A. McNeely, S. J. Scherr. — Washington, DC: Island Press, 2003. — 350 p.

199. Mohammadshirazi, M. Estimation of soil moisture content using remote sensing / M. Mohammadshirazi, et al // Agricultural Water Management. — 2017. — Vol. 192. — P. 90-98.

200. Montzka, S. A., et al. The role of the atmosphere in the global carbon cycle / S. A. Montzka, et al. // Nature. — 2011. — Vol. 476, № 7358. — P. 105-108.

201. Mouazen, A. M., Ramon, H. The potential of using near infrared spectroscopy for soil analysis / A. M. Mouazen, H. Ramon // Soil Science Society of America Journal. — 2006. — Vol. 70, № 3. — P. 896-903.

202. Nair, P. K. R., et al. Agroforestry: The future of sustainable land management / P. K. R. Nair, et al. // Land Use Policy. — 2014. — Vol. 36. — P. 1-3.

203. Nannipieri, P. Role of phosphatase enzymes in soil / P.Nannipieri, L.Giagnoni, L.Landi, G.Renella // Phosphorus in Action. — Springer, 2011.

204. Naveh, Z. The Importance of Biodiversity and Ecological Health for Sustainable Agriculture / Z. Naveh // Agricultural Systems. — 2007. — Vol. 93, № 1. — P. 89-101.

205. Nawar, W. Precision agriculture: Improving crop production efficiency / W. Nawar, et al. // Agricultural Engineering International: CIGR Journal. — 2017. — Vol. 19, No. 2. — P. 1-11.

206. NRCS (Natural Resources Conservation Service). Soil health: The foundation for productive and resilient agriculture. — 2012.

207. Olson, K. R. Erosion impacts on crop yield for selected soils of the north central United States / K. R. Olson, D. L. Mokma, R. Lal, T. E. Schumacher, M. J. Lindstrom // In: Lal R. (ed.). Soil quality and soil erosion. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, 1999. Pp. 259–283.

208. Omtzigt, N. Developing a methodology for a species-based and spatially explicit indicator for biodiversity on agricultural land in the EU / N. Omtzigt, J. H. J. Schaminée // Ecological Indicators. – 2014. – Vol. 37. – P. 186–198.

209. Pantazi, X. E. Precision agriculture: Trends and technologies / X. E. Pantazi, et al. // Agricultural Systems. — 2016. — Vol. 146. — P. 1-12.

210. Perfecto, I. The Ecological Complexity of Agriculture: A New Perspective on Ecosystem Services / I. Perfecto, J. Vandermeer // Ecosystems. — 2010. — Vol. 13, № 1. — P. 61-72.

211. Pires, A. M. Remote sensing applications for soil moisture monitoring: A review / A. M. Pires, et al. // Agricultural and Forest Meteorology. — 2017. — Vol. 245. — P. 129-139.

212. Pontailler, J. Y., et al. Remote sensing for soil moisture assessment / J. Y. Pontailler, et al. // European Journal of Agronomy. — 2003. — Vol. 19, № 1. — P. 73-81.

213. Pretty, J. N. An Assessment of the Total Economic and Social Costs of Sustainable Agriculture / J. N. Pretty, et al. // Journal of Agricultural Science. — 2000. — Vol. 134, № 1. — P. 12-25.

214. Pretty, J. N. Regenerating Agriculture: Policies and Practice for Sustainability and Self-Reliance / J. N. Pretty. — London: Earthscan, 1995. — 340 p.

215. Pretty, J. N. Social Capital and the Collective Management of Resources / J. N. Pretty, H. Ward // Science. — 2001. — Vol. 292, No. 5521. — P. 2045-2046.

216. Pretty, J. N. Social capital and the environment / J. N. Pretty, H. Ward // World Development. — 2001. — Vol. 29, № 2. — P. 209-227.

217. Pretty, J. N. Sustainable Agriculture: Progress and Prospects / J. N. Pretty // Sustainable Development. — 1998. — Vol. 6, № 3. — P. 142-149.

218. Pretty, J. N. The Interconnections between Agricultural Biodiversity, Ecosystem Services and Sustainable Agriculture / J. N. Pretty, et al. // Agriculture, Ecosystems & Environment. — 2018. — Vol. 262. — P. 157-171.

219. Pretty, J. N. The Interconnections between Agricultural Biodiversity and Ecosystem Services / J. N. Pretty // Nature. — 2005. — Vol. 438, № 7072. — P. 307-312.

220. Ramankutty, N. Global agricultural land use / N. Ramankutty, et al. // Global Change Biology. — 2018. — Vol. 24, № 2. — P. 545-558.

221. Reynolds, M. P. Challenges for Global Wheat Production in a Changing Climate / M. P. Reynolds // Field Crops Research. — 2009. — Vol. 118, № 2. — P. 128-139.

222. Roe, S. The Contribution of Agricultural Productivity to Economic Growth: A Global Perspective / S. Roe // World Development. — 2019. — Vol. 113. — P. 238-250.

223. Rondeaux, G. Estimation of vegetation cover using remote sensing / G. Rondeaux // Remote Sensing of Environment. — 1996. — Vol. 55, № 3. — P. 317-326.

224. Rosolem, C. A. The use of remote sensing for soil moisture assessment / C. A. Rosolem // Soil and Tillage Research. — 2002. — Vol. 67, № 2. — P. 109-117.

225. Rossiter, D. G. Soil Resources and Agricultural Production: A Review / D. G. Rossiter // Soil Use and Management. — 1996. — Vol. 12, № 1. — P. 1-10.

226. Sankaran, Sindhuja & Khot, Lav & Espinoza, Carlos & Jarolmasjed, Sanaz & Sathuvalli, Vidyasagar & Vandemark, George & Miklas, Phillip & Carter, Arron & Pumphrey, Michael & Knowles, N. & Bgood, Johnny. Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. European Journal of Agronomy. – 2015. – Vol. 70. – P. 112-123.

227. Sayer, J. Sustainable Intensification in Agricultural Landscapes / J. Sayer // Nature. — 2013. — Vol. 497, № 7449. — P. 355-357.

228. Schierhorn, F. Agricultural Intensification and Sustainable Development: A Review of the Evidence / F. Schierhorn // Global Food Security. — 2020. — Vol. 26. — P. 100-396.

229. Schneider, C. Social capital and sustainable development / C. Schneider // Global Environmental Change. — 2007. — Vol. 17. — P. 148-157.

230. Sellers, P. J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration / P. J. Sellers // International Journal of Remote Sensing. — 1985. — Vol. 6, № 4. — P. 1335-1372.

231. Setter, T. Review of prospects for germplasm improvement for waterlogging tolerance in wheat, barley and oats / T. Setter, I. Waters // Plant and Soil. – 2003. – Vol. 253. – P. 1-34.

232. Shapovalov, D. A. Maps of stable intra-field heterogeneity based on big satellite data in the precision farming system / D. A. Shapovalov, V. F. Fedorenko, A. V. Trubnikov, P. V. Koroleva, D. I. Rukhovich // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019: conference proceedings, Albena, Bulgaria. – Sofia, 2019. – Vol. 19. – P. 903–908.

233. Shriar, A. J. Agricultural intensity and its measurement in frontier regions / A. J. Shriar // Agroforestry Systems. – 2000. – Vol. 49, №3. – P. 301–318.

234. Sieling, K., Kage, H. Managing Crop Production Under Climate Change: Challenges and Solutions / K. Sieling, H. Kage // European Journal of Agronomy. — 2022. — Vol. 134. — P. 126-135.

235. Silici, L. Agroecological Principles for Sustainable Agriculture / L. Silici // Sustainable Agriculture Reviews. — 2014. — Vol. 14. — P. 1-24.

236. Spomer, R. G. The Ecology of Agroecosystems: Challenges and Opportunities / R. G. Spomer, G. Piest // Bioscience. — 1982. — Vol. 32, № 2. — P. 135-140.

237. Steffen, W. The Trajectory of the Earth System in the Anthropocene / W. Steffen // Proceedings of the National Academy of Sciences. — 2015. — Vol. 115, № 33. — P. 8252-8259.

238. Stoate, C. Ecological impacts of early 21st century agricultural change in Europe – a review / C. Stoate, A. Báldi, P. Beja, N.D. Boatman, I. Herzon, et al. // Journal of Environmental Management. – 2009. – Vol. 91. – P. 22-46.

239. Subhani, M. & Sahi, Shahbaz & Hussain, Safdar & Munir, Niyyar & Abbas, Waseem & Chattha, Muhammad. Evaluation of Antifungal Effect of Different Plant Extracts for the Management of Late Blight of Potato Caused by Phytophthorain *festans (Mont.) de Bary*. Journal of Biologically Active Products from Nature. — 2014. — № 4.

240. Swift, M. J. Biodiversity and Ecosystem Functioning: Current Understanding and Future Directions / M. J. Swift // Ecosystems. — 2004. — Vol. 7, № 2. — P. 249-258.

241. Tegtmeier, E. M. External costs of agricultural production in the United States / E. M. Tegtmeier, M. Duffy // International Journal of Agricultural Sustainability. — 2004. — Vol. 2, № 1. — P. 1-21.

242. Teillard, F. Novel method for mapping agricultural intensity reveals its spatial aggregation: implications for conservation policies / F. Teillard, G. Allaire, E. Cahuzac, F. Léger, E. Maigné, M. A. Tichit // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 2012. – Vol. 149. – P. 135–143.

243. Thomasson, J. & Cox, Michael & Al-Rajehy, A. Soil reflectance sensing for determining soil properties in precision agriculture. – 2001.

244. Tilman, D. Agricultural Sustainability and Intensive Production Practices / D. Tilman // Nature. – 2002. – Vol. 418. – P. 671.

245. Tomich, T.P., and Palm, C.A. (CLAs), 2004. Forest and Agroecosystem Tradeoffs in the Humid Tropics. ASB-MA Status Report. Alternatives to Slash-and-Burn Systemwide Programme, Nairobi, Kenya.

246. Torres-Dorante, L.O. Fertilizer-use efficiency of different inorganic polyphosphate sources: effects on soil P availability and plant P acquisition during early

growth of corn / L.O. Torres-Dorante, N. Claassen, B. Steingrobe, H-W. Olfs // J. Plant Nutr Soil Sci. – 2006. – Vol. 30. – P. 509–515.

247. Tracy, R. Modeling soil moisture for remote sensing applications / R. Tracy, M. Zhang // Geoderma. — 2008. — Vol. 147, № 3-4. — P. 207-214.

248. Tscharntke, T. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity - ecosystem service management / T. Tscharntke, A.M. Klein, A. Kruess, I. Steffan-Dewenter, C. Thies // Ecology Letters. – 2005. – Vol. 8. – P. 857-874.

249. Turner, I.I. The Concept and Measure of Agricultural Intensity / I.I. Turner, B. L. Doolittle // The Professional Geographer. – 2005. – Vol. 30. – P. 297 - 301.

250. Uhre, Andreas, Buckwell, Allan. The Sustainable Intensification of European Agriculture. – 2014.

251. Uphoff, N. Naturally Sustainable Agriculture: A Study of Integrated Farming Systems in India / N. Uphoff. – New Delhi: Oxford University Press, 1998. — 275 p.

252. Varco, J. Canopy-based normalized difference vegetation index for monitoring cotton nitrogen status / J. Varco // Agronomy Journal. – 2013. – Vol.105. – P. 1345-1354.

253. Wang, H. Innovative Approaches to Sustainable Agriculture: Lessons from China / H. Wang // Sustainable Development. — 2022. — Vol. 30, № 2. — P. 208-220.

254. Watson, J. Soil quality and management for sustainable agriculture / S. Watson // Sustainability. — 2006. — Vol. 2, № 2. — P. 250-267.

255. Weeks, J. J. A review of the latest in phosphorus fertilizer technology: possibilities and pragmatism / J. J. Weeks, G. M. Hettiarachchi // J. Environ. Qual. – 2019. – Vol. 48. – P. 1300.

256. Wezel, A.M. Agroecological practices for sustainable agriculture / A.M. Wezel, M. Casagrande // Agronomy for sustainable. – № 2014. – Vol. 34, № 1. — P. 1-20.

257. Whetton, R.L., Waine, T.W. & Mouazen, A.M. Hyperspectral measurements of yellow rust and fusarium in cereal crops: Part 1: Laboratory study / R.L. Whetton, T.W. Waine // Biosystems Engineering. – 2017. – 166. – P. 101-115.

258. White, A. W., Bruce, Jr. R. R., Thomas, A. W., Langdale G. W. Characterizing productivity of eroded soils in the Southern Piedmont / A. W. White, Jr. R. R. Bruce, A. W. Thomas, G. W. Langdale // In Erosion and Soil Productivity. – 1985. – P. 83-95.

259. White, J. W. Yield Gap Analysis: A Multi-Level Approach to Understanding Yield Gaps and Implications for Food Security / J. W. White, R. Brown // Global Food Security. — 2010. — Vol. 1, № 2. — P. 95-103.

260. Wiegand, C. L. Assessing soil quality using remote sensing / C. L. Wiegand // Agricultural Systems. — 1989. — Vol. 29, № 3. — P. 237-251.

261. Wu, J. Landscape Sustainability Science: Ecosystem Services and Human Well-Being in a Changing World / J. Wu // Landscape Ecology. — 2013. — Vol. 28, № 1. — P. 1-2.

262. Yadav, S.K. Agroecology Towards Environmental Sustainability / S.K. Yadav, M.K. Jhariya, A. Banerjee, R.S. Meena, S. Kumar, A. Raj // Sustainable Intensification for Agroecosystem Services and Management. - Springer, 2021.

263. Yuanyuan, Y. A review of historical reconstruction methods of land use/land cover / Y. Yuanyuan, Shuwen Z., et al. // Journal of Geographical Sciences. — 2014. — Vol. 24, №. 4. — P. 746-766.

264. Zhang, W. A Global Perspective on Food Security: The Role of Sustainable Agriculture in Achieving Food Security / W. Zhang // Global Environmental Change. — 2007. — Vol. 17, №. 1. — P. 115-132.

265. Zheng, Chaolei. Impact of remote sensing soil moisture on the evapotranspiration estimation / Chaolei. Zheng, G. Hu, CHEN, Qiting Li, Jia, Yaogan Xuebao // Journal of Remote Sensing. – 2021.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А – Среднесуточная температура воздуха и сумма осадков за вегетационные периоды 2021-2023 гг.

Месяц	Декада	Температура воздуха, °С				Сумма осадков, мм			
		2021 г.	2022 г.	2023 г.	Среднемноголетнее	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Среднемноголетнее
Апрель	I	9,8	12,5	11,4	9,9	24	10	25	12
	II	11,5	13,0	12,1	12,1	55	27	15	16
	III	12,7	15,3	13,3	12,8	14	4	28	17
	Среднемесячная	11,4	13,6	12,3	11,6	93	41	68	15
Май	I	15,9	10,7	13,2	15,0	23	47	32	31
	II	18,7	14,2	15,6	16,7	24	1	2	28
	III	19,9	17,5	19,2	18,5	37	16	83	38
	Среднемесячная	18,2	14,2	16,1	16,7	84	98	117	33
Июнь	I	18,0	23,6	19,9	19,7	27	0	45	22
	II	22,4	22,5	21,6	21,3	55	14	55	26
	III	24,7	21,0	22,0	22,1	5	98	10	35
	Среднемесячная	21,7	22,3	21,2	21,0	87	112	110	28
Июль	I	24,8	23,3	24,5	23,1	75	0	19	19
	II	27,3	22,2	21,5	23,8	0	18	21	20
	III	24,4	22,4	24,3	24,4	60	32	4	21
	Среднемесячная	25,4	22,6	23,4	23,8	135	50	44	20
Август	I	27,3	25,0	27,4	24,5	9	41	8	19
	II	23,4	25,7	27,9	23,7	147	17	0	21
	III	24,6	25,9	23,7	22,3	44	3	0	15
	Среднемесячная	25,1	25,6	26,2	23,5	200	61	8	18
Сентябрь	I	17,4	19,5	21,8	19,9	30	0	3	24
	II	18,7	16,0	16,7	18,4	31	34	3	11
	III	13,4	16,0	21,3	16,4	58	34	0	18
	Среднемесячная	16,5	18,5	19,9	18,2	119	53	6	18
Октябрь	I	10,3	16,2	14,9	14,2	7	11	29	16
	II	13,5	12,0	10,3	12,4	1	10	6	22
	III	7,2	10,2	14,6	9,4	16	17	1	24
	Среднемесячная	10,2	12,7	13,5	12,0	24	38	36	21

Примечание – по данным метеостанции Краснодарского края г. Армавир. Расположение метеорологической станции: широта 44,98; долгота 41,12; высота над уровнем моря 196 м. Среднемноголетние значения взяты за период с 1990 по 2020 гг

Приложение Б – Агрохимическая характеристика почв

Показатели	Агроэкологическая группа земель								
	Плакорн.	Эрозион.	Переувлажнен.	Плакорн.	Эрозион.	Переувлажнен.	Плакорн.	Эрозион.	Переувлажнен.
	2021 год			2022 год			2023 год		
Гумус, %	3,4-3,5	2,5-2,7	3,8-4,0	3,3-3,5	2,7-2,8	3,9-4,1	3,4-3,5	2,5-2,7	3,7-3,9
pH (вод)	6,8-6,9	6,6-6,9	6,8-7,0	6,6-6,9	6,6-6,8	6,8-6,9	6,7-6,8	6,7-6,8	6,7-6,9
P_2O_5*, мг/кг	92-97	89-95	95-102	101-108	93-105	94-105	99-112	94-108	97-106
K_2O*, мг/кг	195-201	190-200	192-199	197-215	189-203	190-201	200-217	192-201	197-209
S, мг-экв/100 г	32-34	31-33	31-33	35-37	32-35	32-34	34-37	31-36	30-33
Nщг, мг/кг	182-194	156-167	198-210	175-186	150-159	201-208	184-191	159-170	204-215
Физ. глина (менее 0,01 мм), %	53-55	52-57	50-52	53-55	52-57	50-52	53-55	52-57	50-52

Прим.: агроэкологические группы земель – плакорные, эрозионные и переувлажненные.

* - Обеспеченность почв подвижным фосфором и калием по Чирикову.

Приложение В – Двухфакторный дисперсионный анализ урожайности кукурузы в 2021 году, ц/га

1. Исходные данные урожая в 4-х кратной повторности

		Фактор Б (система питания)			
		Фон	Фон + Naa	Фон + ЖУ ЛФ	Фон + ЖУ ЛФ + м/п
Фактор А (группа земель)	Плакорные	60,1	71,2	72,9	80,0
		60,5	74,6	70,9	89,6
		54,6	77,5	78,9	82,7
		64,1	68,7	75,5	84,9
	Эрозионные	49,5	60,9	67,3	71,4
		50,2	61,8	69,9	71,9
		54,2	66,3	69,1	70,7
		43,6	59,6	66,5	73,6
	Переувлажненные	55,0	70,0	73,4	73,3
		56,2	67,4	75,8	76,6
		54,7	69,7	72,1	80,8
		52,4	72,3	77,9	72,5

2. Таблица дисперсионного анализа

Дисперсия	Сумма квадратов отклонений, SS	Степени свободы, df	Средний квадрат отклонений (дисперсия), S^2	Критерий Фишера	
				F факт.	F таблич.
Фактор А (группа земель)	809,59	2	404,80	41,28	3,26
Фактор Б (система питания)	3447,07	3	1149,02	117,18	2,87
Взаимодействие факторов АВ	91,61	6	15,27	1,56	2,36
Остаток (ошибка)	352,99	36	9,81	-	-
Общая	4701,27	47	-	-	-

3. Оценка существенности

Оценка существенности	Sd	$НСР_{05}$, ц/га
Различия между частными средними	2,21	4,49
Фактор А (группа земель)	1,11	2,25
Фактор Б (система питания)	1,28	2,59

4. Итоговая таблица

Группа земель (фактор А)	Система питания (фактор Б)				В среднем по фактору А ($НСР_{05}$ = 2,25)
	Фон	Фон + Naa	Фон + ЖУ ЛФ	Фон + ЖУ ЛФ + м/п	
Плакорные	59,8	73,0	74,6	84,3	72,9
Эрозионные	49,4	62,2	68,2	71,9	62,9
Переувлажненные	54,6	69,9	74,8	75,8	68,8
В среднем по фактору Б ($НСР_{05}$ = 2,59)	54,6	68,3	72,5	77,3	68,2

Приложение Г – Двухфакторный дисперсионный анализ урожайности кукурузы в 2022 году, ц/га

1. Исходные данные урожая в 4-х кратной повторности

		Фактор Б (система питания)			
		Фон	Фон + Naa	Фон + ЖУ ЛФ	Фон + ЖУ ЛФ + м/п
Фактор А (группа земель)	Плакорные	53,1	72,9	78,4	79,4
		58,6	67,6	78,9	79,1
		62,9	74,8	75,2	84,2
		60,0	71,0	77,1	81,6
	Эрозионные	45,9	61,4	69,8	77,7
		45,0	63,3	68,6	76,7
		43,1	61,3	64,5	69,1
		46,5	65,3	70,3	70,7
	Переувлажненные	52,7	73,8	77,7	75,9
		57,0	64,6	74,2	77,4
		54,5	72,2	68,5	72,2
		55,9	65,3	73,4	73,7

2. Таблица дисперсионного анализа

Дисперсия	Сумма квадратов отклонений, SS	Степени свободы, df	Средний квадрат отклонений (дисперсия), S^2	Критерий Фишера	
				F факт.	F таблич.
Фактор А (группа земель)	762,61	2	381,30	41,24	3,26
Фактор Б (система питания)	3883,32	3	1294,44	140,02	2,87
Взаимодействие факторов АВ	87,69	6	14,61	1,58	2,36
Остаток (ошибка)	332,82	36	9,24	-	-
Общая	5066,43	47	-	-	-

3. Оценка существенности

Оценка существенности	Sd	$НСР_{05}$, ц/га
Различия между частными средними	2,15	4,36
Фактор А (группа земель)	1,07	2,18
Фактор Б (система питания)	1,24	2,52

4. Итоговая таблица

Группа земель (фактор А)	Система питания (фактор Б)				В среднем по фактору А ($НСР_{05}$ = 2,18)
	Фон	Фон + Naa	Фон + ЖУ ЛФ	Фон + ЖУ ЛФ + м/п	
Плакорные	58,7	71,6	77,4	81,1	72,2
Эрозионные	45,1	62,8	68,3	73,6	62,5
Переувлажненные	55,0	69,0	73,5	74,8	68,1
В среднем по фактору Б ($НСР_{05}$ = 2,52)	52,9	67,8	73,1	76,5	67,6

Приложение Д – Двухфакторный дисперсионный анализ урожайности кукурузы в 2023 году, ц/га

1. Исходные данные урожая в 4-х кратной повторности

		Фактор Б (система питания)			
		Фон	Фон + Naa	Фон + ЖУ ЛФ	Фон + ЖУ ЛФ + м/п
Фактор А (группа земель)	Плакорные	43,7	64,6	55,3	72,9
		48,1	63,3	61,8	79,5
		49,6	63,2	61,8	74,0
		45,0	56,3	51,5	72,9
	Эрозионные	34,2	51,7	55,5	55,8
		35,0	54,1	58,0	57,3
		34,4	51,2	47,9	57,3
		37,9	55,0	58,0	57,4
	Переувлажненные	37,6	58,8	59,9	68,9
		36,6	56,6	59,9	66,8
		41,2	58,1	65,4	63,8
		37,5	54,3	59,5	65,9

2. Таблица дисперсионного анализа

Дисперсия	Сумма квадратов отклонений, SS	Степени свободы, df	Средний квадрат отклонений (дисперсия), S^2	Критерий Фишера	
				F факт.	F таблич.
Фактор А (группа земель)	831,40	2	415,70	46,31	3,26
Фактор Б (система питания)	4295,23	3	1431,74	159,49	2,87
Взаимодействие факторов АВ	318,27	6	53,04	5,91	2,36
Остаток (ошибка)	323,18	36	8,98	-	-
Общая	5768,07	47	-	-	-

3. Оценка существенности

Оценка существенности	Sd	$НСР_{05}$, ц/га
Различия между частными средними	2,12	4,30
Фактор А (группа земель)	1,06	2,15
Фактор Б (система питания)	1,22	2,48

4. Итоговая таблица

Группа земель (фактор А)	Система питания (фактор Б)				В среднем по фактору А ($НСР_{05}$ = 2,15)
	Фон	Фон + Naa	Фон + ЖУ ЛФ	Фон + ЖУ ЛФ + м/п	
Плакорные	46,6	61,9	57,6	74,8	60,2
Эрозионные	35,4	53,0	54,9	57,0	50,0
Переувлажненные	38,2	57,0	61,2	66,4	55,7
В среднем по фактору Б ($НСР_{05}$ = 2,48)	40,1	57,3	57,9	66,0	55,3

Приложение Е – Влияние системы питания и агроэкологической группы земель на качество зерна

Варианты опыта	Факторы		Содержание сырого протеина, %				Содержание сырой клетчатки, %				Содержание сырого жира, %			
	Группа земель (фактор А)	Система питания (фактор Б)	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Среднее	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Среднее	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Среднее
1	Плакорные	Фон	11,1	11,0	10,9	11,0	4,7	4,7	3,9	4,4	3,8	3,7	3,7	3,7
2		Фон + Naa	12,0	12,2	11,5	11,9	3,5	4,7	4,3	4,2	3,7	4,0	3,9	3,9
3		Фон + ЖУ ЛФ	11,8	11,7	11,3	11,6	3,9	4,3	4,1	4,1	3,7	4,1	3,7	3,8
4		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	12,7	12,6	12,1	12,5	4,3	4,8	4,3	4,5	3,9	4,0	4,0	4,0
5	Эрозионные	Фон	10,9	10,9	10,8	10,9	4,2	4,3	3,8	4,1	3,7	3,6	3,5	3,6
6		Фон + Naa	11,9	11,7	11,6	11,7	3,3	3,1	4,0	3,5	3,4	3,1	3,8	3,4
7		Фон + ЖУ ЛФ	11,7	11,5	11,2	11,5	3,3	3,4	4,1	3,6	3,6	3,2	3,8	3,5
8		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	12,4	12,1	12,0	12,2	3,9	3,8	4,3	4,0	3,9	3,7	3,9	3,8
9	Переувлажненные	Фон	11,0	11,2	11,0	11,1	4,6	4,8	4,0	4,5	3,8	3,5	3,7	3,7
10		Фон + Naa	12,0	11,9	11,3	11,7	3,5	4,2	4,2	4,0	3,6	3,8	3,9	3,8
11		Фон + ЖУ ЛФ	11,9	11,6	11,3	11,6	4,0	4,1	4,0	4,0	3,7	3,9	3,8	3,8
12		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	12,6	12,6	12,2	12,5	4,3	4,9	4,2	4,5	3,8	4,0	4,1	4,0

Приложение Ж – Влияние системы питания и агроэкологической группы земель на содержание и выход сырого протеина

Вариант опыта	Факторы		2021 год		2022 год		2023 год		Среднее	
	Группа земель (фактор А)	Система питания (фактор Б)	Сырой протеин, %	Выход сырого протеина, кг/га	Сырой протеин, %	Выход сырого протеина, кг/га	Сырой протеин, %	Выход сырого протеина, кг/га	Сырой протеин, %	Выход сырого протеина, кг/га
1	Плакорные	Фон	11,1	664	11,0	645	10,9	508	11,0	606
2		Фон + Naa	12,0	876	12,2	873	11,5	711	11,9	820
3		Фон + ЖУ ЛФ	11,8	880	11,7	906	11,3	651	11,6	812
4		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	12,7	1071	12,6	1022	12,1	905	12,5	999
5	Эрозионные	Фон	10,9	538	10,9	492	10,8	382	10,9	471
6		Фон + Naa	11,9	740	11,7	735	11,6	615	11,7	696
7		Фон + ЖУ ЛФ	11,7	798	11,5	785	11,2	614	11,5	733
8		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	12,4	892	12,1	890	12,0	683	12,2	822
9	Переувлажненные	Фон	11,0	600	11,2	616	11,0	420	11,1	546
10		Фон + Naa	12,0	847	11,9	829	11,3	652	11,7	776
11		Фон + ЖУ ЛФ	11,9	898	11,6	861	11,3	699	11,6	820
12		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	12,6	955	12,6	942	12,2	809	12,5	902

Приложение И – Влияние системы питания и агроэкологической группы земель на химический состав зерна

Варианты опыта	Факторы		Содержание азота, %				Содержание фосфора, %				Содержание калия, %			
	Группа земель (фактор А)	Система питания (фактор Б)	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Среднее	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Среднее	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Среднее
1	Плакорные	Фон	1,20	1,19	1,19	1,19	0,45	0,43	0,41	0,43	0,53	0,43	0,43	0,46
2		Фон + Naa	1,47	1,49	1,35	1,44	0,5	0,42	0,4	0,44	0,48	0,46	0,42	0,45
3		Фон + ЖУ ЛФ	1,42	1,41	1,34	1,39	0,46	0,45	0,41	0,44	0,42	0,43	0,39	0,41
4		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	1,54	1,53	1,47	1,51	0,46	0,47	0,46	0,46	0,43	0,4	0,38	0,40
5	Эрозионные	Фон	1,18	1,17	1,17	1,17	0,41	0,38	0,41	0,40	0,43	0,43	0,41	0,42
6		Фон + Naa	1,43	1,36	1,3	1,36	0,4	0,4	0,38	0,39	0,45	0,42	0,4	0,42
7		Фон + ЖУ ЛФ	1,4	1,3	1,31	1,34	0,43	0,4	0,45	0,42	0,42	0,41	0,41	0,41
8		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	1,47	1,42	1,41	1,43	0,45	0,42	0,44	0,43	0,42	0,4	0,39	0,39
9	Переувлажненые	Фон	1,21	1,18	1,18	1,20	0,44	0,42	0,42	0,43	0,5	0,45	0,42	0,46
10		Фон + Naa	1,49	1,42	1,38	1,43	0,48	0,42	0,41	0,44	0,44	0,4	0,39	0,40
11		Фон + ЖУ ЛФ	1,47	1,39	1,35	1,40	0,47	0,46	0,41	0,44	0,48	0,43	0,39	0,43
12		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	1,55	1,55	1,48	1,53	0,47	0,45	0,46	0,46	0,49	0,4	0,4	0,43

Приложение К – Вынос элементов питания с основной продукцией (зерно) в зависимости от системы питания и группы земель, кг/га

Варианты опыта	Факторы		2021 год			2022 год			2023 год		
	Группа земель (фактор А)	Система питания (фактор Б)	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
1	Плакорные	Фон	72	27	32	70	25	25	55	19	20
2		Фон + Naa	107	37	35	107	30	33	83	25	26
3		Фон + ЖУ ЛФ	106	34	31	109	35	33	77	24	22
4		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	130	39	36	124	38	32	110	34	28
5	Эрозионные	Фон	58	20	21	53	17	19	41	15	15
6		Фон + Naa	89	25	28	85	25	26	69	20	21
7		Фон + ЖУ ЛФ	95	29	29	89	27	28	72	25	22
8		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	106	32	30	104	31	29	80	25	22
9	Переувлажненые	Фон	66	24	27	65	23	25	45	16	16
10		Фон + Naa	105	34	31	99	29	28	80	24	23
11		Фон + ЖУ ЛФ	111	35	36	103	34	32	84	25	24
12		Фон + ЖУ ЛФ + м/п	117	36	37	116	34	30	98	31	27

УТВЕРЖДАЮ

Управляющий директор ООО «ЛиквиФорс»,

Кирюшин С.В. «10» июня 2024 г.

АКТ о внедрении научных и практических результатов

Куприянова А.Н.; ООО «Ликвифорс»

«Разработка адаптивных систем питания кукурузы с использованием жидких удобрений для разных агроэкологических групп земель Западного Предкавказья».

Настоящим актом подтверждается, что исследования проводились аспирантом Куприяновым А.Н. совместно с компанией ООО «Ликвифорс» в Краснодарском крае в период с 2021 по 2023 года. Результаты научно-исследовательской работы, представленные на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук, используются в компании ООО «Ликвифорс».

В условиях Западного Предкавказья, на плакорных и переувлажненных землях применяется интенсивная технология питания: внесение жидкого удобрения ЛиквиФорс марки NPK 7:23:7 в качестве припосевного удобрения в дозе 100 кг/га и совместное внесение КАС-32 (130 кг/га) и раствора сульфата аммония марки NS 8:9 (82,5 кг/га) в фазу 3-5 листьев совместно с междурядной обработкой. На эрозионных землях используется нормальный уровень интенсификации – внесение жидкого удобрения ЛиквиФорс марки NPK 7:23:7 - 100 кг/га при посеве.

Результаты производственных испытаний показывают, что применение жидких удобрений ЛиквиФорс при посеве и совместно с междурядной подкормкой, увеличивает урожайность кукурузы на 7-16 ц/га на всех группах земель, по сравнению с аммонийной селитрой. Наибольший экономический эффект достигается на плакорных и переувлажненных землях.

Акт составлен в присутствии

Управляющий директор

Кирюшина С.В. _____

Аспирант РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева

Куприянова А.Н. _____