

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Почтенная Алена Игоревна

**Влияние удобрений пролонгированного действия и лигногумата на
рост саженцев и качество плодов черной смородины (*Ribes nigrum* L.)**

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре агрохимии и биохимии растений факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель – *Пашкевич Елена Борисовна* – доктор биологических наук

Официальные оппоненты – *Семенов Вячеслав Михайлович* – доктор биологических наук, доцент, ФГБУН «Пущинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, лаборатория почвенных циклов азота и углерода, главный научный сотрудник
Малюкова Людмила Степановна – доктор биологических наук, профессор РАН, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», лаборатория агрохимии и почвоведения, главный научный сотрудник
Леоничева Елена Вячеславна – кандидат биологических наук, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур», лаборатория агрохимии, заведующая лабораторией

Защита диссертации состоится «02» декабря 2025 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.015.2 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, д.1, стр. 12, биологический факультет, ауд. М-1.

E-mail: nvkostina@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3630>

Автореферат разослан «29» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук

Н.В. Костина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние десятилетия существенно возрос интерес к применению минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия и гуминовых препаратов в сельскохозяйственном производстве. Эти агрохимические средства оказывают комплексное воздействие на почвенные характеристики, способствуя их улучшению, а также повышению продуктивности и качественных показателей сельскохозяйственных культур (Мухина и др., 2021).

Комплексные минеральные удобрения пролонгированного действия постепенно высвобождают питательные вещества, что обеспечивает длительное и сбалансированное питание растений, снижает потери элементов питания и уменьшает экологические риски, связанные с их вымыванием или газообразными выбросами (Борисова, 2022). Удобрения серии Osmocote, инкапсулированные в полимерную оболочку и российский аналог Ruscote, показали высокую результативность при возделывании сельскохозяйственных культур, однако их влияние на черную смородину до настоящего времени не изучалось (Мнатсаканян и др., 2023а; Мнатсаканян, 2023б).

Лигногумат содержит соли гуминовых и фульвовых кислот, являющихся мощными природными стимуляторами роста растений (Лапин и др., 2007; Suada et al., 2017; Rotondo et al., 2018). Препарат усиливает устойчивость растений к стрессу и способствует лучшему усвоению питательных веществ (Jindo et al., 2020).

Совместное применение минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия (в дальнейшем – удобрения пролонгированного действия) и Лигногумата позволяет достичь синергического эффекта: оптимизировать питание растений, улучшить агрохимические свойства почвы, а также сократить нормы внесения традиционных минеральных удобрений без потерь урожайности (Якименко, Терехова, 2011; Коваль, Огородникова, 2021).

Степень разработанности проблемы. Проблема повышения эффективности минерального питания с использованием удобрений пролонгированного действия и гуминовых соединений в растениеводстве в последние годы активно разрабатывается как отечественными, так и зарубежными учеными. В работах А.А. Борисовой и др. (2022), А.А. Мнатсаканяна (2023б) обоснована эффективность применения удобрений пролонгированного действия при выращивании плодовых и полевых культур. Исследования, посвященные гуминовым веществам, подчеркивают их способность стимулировать рост растений и повышать устойчивость к стрессам (Якименко, Терехова, 2011; Jindo et al., 2020; Коваль, Огородникова, 2021). Эксперименты по применению лигногуматов показали положительное влияние на урожайность и качество продукции, особенно при совместном использовании с минеральными удобрениями (Suada et al., 2017; Rotondo et al., 2018). В то же время исследования, направленные на изучение воздействия данных агрохимических препаратов именно на черную смородину, пока немногочисленны. Имеются отдельные работы по влиянию удобрений и внекорневых обработок на данную культуру (Рыбинцев и др., 2015; Ершова, 2019; Мистратова, Теряева, Южакова, 2021), однако изучение совместного воздействия удобрений пролонгированного действия и лигногумата на физиолого-биохимические показатели и продуктивность черной смородины до настоящего времени не проводили.

Цель и задачи. Цель исследования - изучить влияние комплексных минеральных капсулированных удобрений пролонгированного действия и

фолиарной обработки растений препаратом Лигногумат АМ на показатели почвенного плодородия и продуктивность растений черной смородины (*Ribes nigrum* L.).

В задачи исследования входило:

1. Сравнить эффективность применения традиционных минеральных удобрений (аммиачная селитра, суперфосфат, хлористый калий) и комплексных минеральных капсулированных удобрений пролонгированного действия (Ruscote, Osmocote) в сочетании с пятикратной фолиарной обработкой препаратом Лигногумат АМ на показатели плодородия почвогрунта за исследуемый период.
2. Оценить влияние традиционных и минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия (Ruscote, Osmocote) в сочетании с фолиарной обработкой препаратом Лигногумат АМ на морфометрические показатели черной смородины.
3. Изучить влияние традиционных и минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия (Ruscote и Osmocote) в сочетании с фолиарной обработкой препаратом Лигногумат АМ на содержание биологически активных веществ в листьях и ягодах растений.
4. Сравнить эффективность применения различных удобрений при внесении в почвогрунт при выращивании черной смородины.
5. Исследовать скорость высвобождения питательных веществ из комплексных минеральных капсулированных удобрений пролонгированного действия (Ruscote и Osmocote), определить изменения оболочек до и после проведения модельного опыта. Выяснить, содержат ли оболочки этих удобрений фенольные соединения.

Научная новизна. Впервые дана сравнительная оценка эффективности минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия (Osmocote Bloom 2–3М и Ruscote Цветочный) и фолиарной обработки Лигногуматом АМ при выращивании черной смородины. Установлены особенности влияния данных удобрений на морфометрические показатели растений, агрохимические свойства почвогрунта и накопление макро- и микроэлементов в листьях культуры, а также урожайность и качество плодов.

Впервые установлены особенности высвобождения питательных веществ из оболочек удобрений и их потенциальное влияние на почвенную среду. Впервые проведена оценка концентрации фенольных соединений в плодах и листьях, с учётом возможного поступления этих веществ при разложении полимерной оболочки удобрений.

Впервые обосновано оптимальное сочетание минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия и Лигногумата, обеспечивающее повышение стрессоустойчивости растений и улучшение их продуктивности. Выявлен синергический эффект совместного применения минеральных и органических препаратов, открывающий перспективы для более экологичных технологий удобрения в ягодоводстве.

Теоретическая и практическая значимость. Расширены теоретические представления о механизмах действия минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия и гуминовых веществ (на примере лигногумата) на рост, развитие и продуктивность черной смородины. Полученные данные дополняют научные сведения о влиянии этих препаратов на агрохимические свойства почвогрунта, накопление макро- и микроэлементов в листьях и плодах, а также содержание фенольных соединений в образцах растений.

Практическая значимость работы заключается в разработке и научном обосновании эффективных схем применения минеральных удобрений и биостимуляторов, позволяющих повысить урожайность, устойчивость к стрессовым нагрузкам и качество плодов черной смородины. Результаты могут быть использованы в практике садоводства, в агрохимическом обслуживании, при составлении рекомендаций по рациональному применению удобрений, а также в учебном процессе при подготовке специалистов в области агрономии.

Объект исследования. Объектами исследования являлись одногодичные саженцы черной смородины, расположенные на территории МГУ имени М.В. Ломоносова, почвогрунт (ГОСТ Р 53381-2009), минеральные комплексные капсулированные удобрения пролонгированного действия Osmocote Bloom 2-3M (ICL, Нидерланды) и Ruscote Цветочный (ООО ТД ЗМУ «ФЛОРАЛАЙФ», Россия), Лигногумат АМ (ООО НПО «Реализация Экологических Технологий», Россия). Ruscote – аналог удобрений в оболочке европейских торговых марок Osmocote (Нидерланды), Basacote (Германия) и др. Ruscote – комплексное минеральное удобрение, инкапсулированное в мембранную полимерную оболочку с контролируемым периодом высвобождения питательных веществ. Полимерная оболочка производится из компонентов растительного происхождения, обеспечивающих образование необходимой пористости мембраны на поверхности гранул.

Методология и методы исследования. Методология исследования основывается на результатах, полученных в течение трех лет на мелкоделяночном полевом опыте, заложенном на территории МГУ имени М.В. Ломоносова в период 2022-2024 гг., модельного опыта, лабораторных методов исследования почвогрунта и растений по общепринятым методикам. Все полученные результаты были обработаны статистически.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Применение минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия в сочетании с фолиарной обработкой препаратом Лигногумат АМ способствует повышению продуктивности и улучшению биохимических показателей ягод чёрной смородины. Наибольшую эффективность в условиях проведённых опытов показал вариант с использованием удобрения Ruscote в сочетании с фолиарной обработкой Лигногуматом АМ.
2. Скорость и объём высвобождения питательных веществ из минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия определяются особенностями структуры их оболочек. Более рыхлая и пористая оболочка капсул Ruscote обеспечивает ускоренное высвобождение азота и фосфора, по сравнению с калием. Удобрение Osmocote с более плотной и однородной оболочкой характеризуется умеренными темпами выхода азота и калия, при минимальном высвобождении фосфора. Фенольные соединения из капсулированных удобрений в раствор не поступают.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается проведением полевого мелкоделяночного опыта в течение трёх лет с соблюдением общепринятых агрохимических и агротехнических методик. Все лабораторные и аналитические исследования выполнялись в трёхкратной повторности с использованием современного оборудования, что обеспечивало точность и воспроизводимость данных. Обработка

экспериментальных результатов осуществлялась с применением современных методов статистического анализа.

Основные положения и результаты исследования прошли апробацию на Всероссийских и Международных научных и научно-практических конференциях, в том числе: Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы биологии, химии, экологии» (г. Ярославль, 17–21 октября 2023 г.) – устный доклад «Влияние удобрений в полимерной оболочке на черную смородину (*Ribes nigrum* L.)», Всероссийская конференция «Агрохимическая наука — синтез академических знаний и практического опыта» (г. Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, 12–13 сентября 2023 г.) – устный доклад «Применение лигногумата при возделывании черной смородины (*Ribes nigrum* L.)», Международный форум «Агробиотехнологии: достижения и перспективы развития» (г. Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, 28–31 августа 2023 г.) – устный доклад «Исследование совместного действия пролонгированных удобрений и листовой обработки лигногуматом на почвогрунт, состав питательных веществ и морфометрические показатели листьев черной смородины (*Ribes nigrum* L.)», Международная молодежная научная школа «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки» (г. Ростов-на-Дону, 27–30 сентября 2022 г.) – устный доклад «Влияние лигногумата на показатели почвенного плодородия и продуктивность растений», VI Международная научная конференция «Эволюция и деградация почвенного покрова» (г. Ставрополь, 19–22 сентября 2022 г.) – устный доклад «Перспективы применения удобрений с пролонгированным действием в условиях ограниченного импорта».

Личный вклад автора. Автором осуществлялась организация и полное проведение всего комплекса исследований, предусмотренных программой работы. Все мелкоделяночные опыты и лабораторно-аналитические исследования выполнены при непосредственном участии автора. Проведены анализ и интерпретация экспериментальных данных, их статистическая обработка, а также подготовка научного текста и иллюстративного материала для публикации результатов исследования.

Публикации. По результатам проведённого исследования опубликованы 9 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова. В публикациях, выполненных в соавторстве, ведущий вклад в разработку темы и подготовку материалов принадлежит соискателю.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, выводов, списка литературы и приложений и изложена на 141 странице. Работа содержит 28 таблиц, 54 рисунка и список литературы из 99 наименований, из которых 48 на английском языке.

Благодарности. Автор выражает признательность научному руководителю, д.б.н., с.н.с. Пашкевич Е.Б. за научную поддержку и ценные консультации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Эффективность применения минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия и лигногумата на черной смородине. Обзор литературы

В первой главе приведён обзор литературы, посвящённый применению минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного

действия и гуминовых препаратов в ягодоводстве, в частности на примере чёрной смородины. Описаны биологические особенности культуры, её требования к питанию и условиям выращивания, питательная ценность и биохимический состав ягод. Подчёркивается значимость сбалансированного минерального питания для формирования урожая и качества плодов, а также рассмотрены проблемы накопления микроэлементов и тяжёлых металлов.

Особое внимание уделено характеристике минеральных удобрений пролонгированного действия (Osmocote, Ruscote), их механизму действия и преимуществам по сравнению с традиционными формами, включая снижение потерь питательных веществ, агроэкологическую безопасность и экономическую эффективность. Отдельно рассмотрены гуминовые препараты, в частности Лигногумат, как стимуляторы роста и антистрессовые агенты, способствующие повышению усвоения макро- и микроэлементов, активизации фотосинтеза и устойчивости растений к стрессам. Завершает главу анализ роли фенольных соединений в антиоксидантной системе растений и их накопления в листьях и ягодах чёрной смородины, что подчёркивает важность комплексного применения капсулированных удобрений и Лигногумата для повышения урожайности и качества продукции.

Глава 2. Объекты и методы исследования

Исследование включало два опыта: мелкоделяночный полевой опыт (Опыт 1) и модельный лабораторный опыт (Опыт 2). Мелкоделяночный полевой опыт (Опыт 1) был направлен на изучение долговременного действия удобрений в природных условиях выращивания культуры, тогда как модельный лабораторный эксперимент (Опыт 2) позволил детально исследовать процессы высвобождения элементов питания из минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия, а также скорость высвобождения фенольных соединений из этих удобрений и Лигногумата АМ.

2.1. Опыт 1. Мелкоделяночный полевой опыт

Мелкоделяночный полевой опыт проводили в 2022-2024 гг. на территории Почвенного стационара факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова. Объектом исследования стали однолетние саженцы черной смородины сорта «Искушение», полученные из питомника «Егорьевский» (Московская область) и высаженные в июне 2022 г.

Для создания однородных условий для выращивания растений перед закладкой опыта был снят 20-сантиметровый слой предшествующего почвогрунта, после чего участок был заполнен новым плодородным почвогрунтом (ГОСТ Р 53381–2009). Состав почвогрунта (по объёму): верховой торф – 20 %, песок – 10 %, суглинок – 10 %, плодородный грунт – 60 % (производство компании ООО «Грин Трейд», Россия). Агрохимические характеристики почвогрунта до закладки опыта: pH_{KCL} – 7,5; содержание нитратного и аммонийного азота – 15,7 и 46,0 мг/кг, соответственно; подвижного фосфора – 542,0 мг/кг; подвижного калия – 300,0 мг/кг, подвижного цинка – 37,3 мг/кг почвы, подвижной меди – 10,7 мг/кг почвы.

В качестве минеральных удобрений применяли как традиционные (аммиачная селитра, двойной суперфосфат, хлористый калий), так и минеральные комплексные капсулированные удобрения пролонгированного действия: Osmocote Bloom 2–3М: NPK 12-7-18%+МЭ (бор 0,02%, медь 0,045%, железо 0,35%, в т.ч. EDTA-хелат 0,06, марганец 0,05%, молибден 0,017%, цинк 0,013 %), и Ruscote Цветочный: NPK 12-10-

18%+МЭ (оксид серы (VI) – 8,0 %, кальция оксид – 9,0 %, бор – 0,1 %, медь – 0,07 %, оксид магния – 3 %, марганец – 0,1 %, оксид молибдена (VI) – 0,05 %, цинк – 0,06 %). Во все варианты опыта вносили одинаковое количество азота, фосфора и калия. В дополнение к внесению удобрений в почвогрунт проводили фолиарную обработку растений водным раствором биостимулятора, Лигногуматом АМ, в концентрации 0,05 % до полного смачивания листовой поверхности с периодичностью раз в 10 суток, всего было 5 обработок за вегетационный сезон.

Схема опыта включала 8 вариантов, каждый из которых был заложен в трёхкратной повторности на делянках площадью 1 м² (по 5 растений в одной повторности): 1. Контроль – почвогрунт без внесения удобрений. 2. ЛГ – почвогрунт без удобрений + фолиарная обработка Лигногуматом. 3. NPK + ЛГ – почвогрунт + аммиачная селитра (17,4 г/м²), двойной суперфосфат (18 г/м²), хлористый калий (15 г/м²) + Лигногумат. 4. Osmocote + ЛГ – почвогрунт + Osmocote Bloom 2–3М (50 г/м²) + лигногумат. 5. Ruscote + ЛГ – почвогрунт + Ruscote Цветочный (50 г/м²) + лигногумат. 6. NPK – почвогрунт + аммиачная селитра (17,4 г/м²), двойной суперфосфат (18 г/м²), хлористый калий (15 г/м²). 7. Osmocote – почвогрунт + Osmocote Bloom 2–3М (50 г/м²). 8. Ruscote – почвогрунт + Ruscote Цветочный (50 г/м²).

В 2022 г. все удобрения вносили перед посадкой саженцев из расчета: 60 кг по д.в. N/га, 35 кг по д.в. P₂O₅/га, 90 кг по д.в. K₂O/га, с заделкой на глубину 10-15 см. Во второй и третий годы исследований у ягодных кустарников происходит интенсивное наращивание вегетативной массы, что обуславливает необходимость повышения уровня обеспечения растений элементами питания (Михайлова, 2012), поэтому на втором и третьем году роста растений, дозы минеральных удобрений были скорректированы: в 2023 году – 70 кг по д.в N/га, 40 кг по д.в P₂O₅/га, 105 кг по д.в K₂O/га; в 2024 году – 80 кг по д.в N/га, 45,7 кг по д.в P₂O₅/га, 120 кг по д.в K₂O /га. В варианты Контроль и ЛГ дополнительно вносили в 2023 и в 2024 гг. аммиачную селитру по 10 кг и по 20 кг по д.в N/га, соответственно. На 2-й и 3-й год исследования удобрения вносили равномерно по поверхности приствольного круга с последующим рыхлением на глубину до 5 см. Саженцы черной смородины за весь период проведения опыта не подвергали обрезке ветвей.

2.2. Опыт 2. Модельный опыт

Модельный лабораторный опыт был заложен на кафедре агрохимии и биохимии растений 4 декабря 2023 года и был проведен за 21 сутки, чтобы минимизировать развитие микроорганизмов в питательной среде и исключить влияние биотических факторов на точность результатов. Эксперимент проводили при стабильной комнатной температуре в условиях полного отсутствия освещения. Для исключения воздействия света все круглодонные колбы накрывали защитными колпаками, изготовленными из крафтовой бумаги.

Целью данного опыта стало изучение процессов высвобождения питательных элементов из удобрений пролонгированного действия, а также оценка возможного выделения фенольных соединений при разрушении их оболочек. Схема опыта состояла из трех вариантов в трех повторностях: вариант 1 - Osmocote Bloom 2–3М, вариант 2 - Ruscote Цветочный и вариант 3 - Лигногумат АМ. Используемые агрохимические препараты полностью соответствовали тем, что применялись в полевом мелкоделяночном опыте.

Для каждой повторности были взвешены по 1,34 г удобрений пролонгированного действия и помещены в круглодонную стеклянную колбу объемом 500 мл. Далее в колбы добавляли 200 мл дистиллированной воды, концентрация раствора Лигногумата соответствовала 0,05%. Горлышки колб закрывали бумажными пробками, а сверху накрывали крафтовыми колпаками.

По завершении опыта капсулированные удобрения извлекали и сушили в термостате при температуре 65 °С в течение 24 часов. В водных растворах 1 и 2 варианта определяли содержание основных элементов питания – аммонийного и нитратного азота, фосфора и калия по тем же методикам, как и в почвогрунтах (Практикум по агрохимии, 2001).

Особое внимание уделили мониторингу содержания в пробах фенольных соединений, выделяемых в процессе растворения оболочек удобрений и Лигногумата. Отбор проб для анализа проводили в шести временных точках. Определение общего содержания фенольных соединений в растворе соответствовал методу его определения в растениях (Николаева и др., 2021).

Морфологические изменения оболочек удобрений оценивали при помощи светового микроскопа марки Micros (Австрия) при увеличении $\times 40$ и $\times 100$. Дополнительно, после завершения эксперимента проводили взвешивание удобрений, что позволяло количественно оценить долю веществ, высвободившихся в раствор в течение модельного опыта.

Методы исследования почвогрунтов и растений

Смешанные образцы почвогрунта отбирали с глубины 0-10 см в конце вегетационного периода ежегодно, согласно ГОСТ Р 58595–2019. Листья для анализа собирали в конце августа, ягоды – в июле.

Агрохимические показатели почвогрунта определяли по следующим методикам: рН – потенциометрически в водной вытяжке (с использованием универсального иономера «Эксперт-001», Россия); аммонийный азот – фотометрически (фотометр КФК-3-01 «ЗОМЗ», Россия); нитратный азот – по методу Грандваль–Ляжу; подвижные формы фосфора и калия – из вытяжки по Кирсанову: фосфора – фотометрически с окрашиванием по Дениже; калия – пламенно-фотометрически (на фотометре «LEKI FP640», Финляндия), подвижные формы цинка и меди определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе AAS-3 фирмы «Hitachi» (Япония) в ацетатно-аммонийной (ААБ) вытяжке (Практикум по агрохимии, 2001).

За 2022-2024 гг. получены данные по средним приростам побега, площади листьев, массе ягод с 1 м², массе 50 ягод и количеству кистей, а также содержанию питательных элементов в образцах листьев и ягод черной смородины (Руководство по проведению регистрационных испытаний..., 2016). Содержание макроэлементов в листьях и ягодах растений и их валовое содержание в почвогрунте определяли после мокрого озоления по Гинзбург в концентрированной серной и добавлением хлорной (в качестве катализатора) кислотах. Азот – методом Кьельдаля; фосфор – фотометрически по Дениже (фотометр КФК-3-01 «ЗОМЗ», Россия); калий – на фотометре «LEKI FP640» (Финляндия). Определение содержания фотосинтетических пигментов (хлорофилла а и b, каротиноиды) проводили в свежих образцах растительного материала фотометрически после экстрагирования пигментов 100% ацетоном (Третьяков, 1990). Содержание микроэлементов (Zn, Cu) определяли после сухого озоления атомно-абсорбционным методом на приборе AAS-3, Япония (Практикум по агрохимии, 2001). В образцах растений были определены

концентрация нитратов ионометрическим методом (ГОСТ 29270-95), антоцианы колориметрическим методом в модификации Л.И. Вигорова (Ермаков и др., 1987) (фотометр КФК-3-01 «ЗОМЗ», Россия), каталазная активность (Плешков, 1985), аскорбиновая кислота йодометрическим методом (ГОСТ 24556-89).

Погодные условия в 2022-2024 гг. оценивали по данным Метеорологической Обсерватории МГУ (МОМГУ). На основании данных были рассчитаны гидротермические коэффициенты Селянинова (ГТК) (1928) в годы исследования: а) 2022 г.: июнь – сентябрь - 0,75 (недостаточное увлажнение); б) 2023 г.: май – сентябрь - 1,31 (оптимальное увлажнение); 2024 г.: май – сентябрь - 1,14 (оптимальное увлажнение).

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Excel (пакет Microsoft Office) и STATISTICA версии 7.0. Средние значения изучаемых показателей ($n = 2-3$) рассчитывали с учетом стандартной ошибки опыта. Для оценки значимости различий между средними величинами применяли метод попарного сравнения с использованием t-критерия Стьюдента.

Для анализа влияния независимых факторов и их взаимодействия на измеряемые параметры использовали двухфакторный дисперсионный анализ (two-way ANOVA), достоверность оценивалась по критерию Фишера. Проверку соответствия распределения данных нормальному закону осуществляли с использованием критерия Шапиро–Уилка.

На графических материалах представлены усреднённые значения с указанием величин ошибки опыта, отражающей вариабельность данных в пределах опытов, либо НСР, рассчитанной при уровне значимости 0,05.

Глава 3. Результаты и обсуждение

3.1. Опыт 1. Мелкоделяночный полевой опыт

На основе анализа площади листа, проведённого с учётом наименьшей существенной разницы (НСР) при уровне значимости 0,05 были установлены значимые различия между рядом вариантов: варианты Контроль и Ruscote + ЛГ, ЛГ и Ruscote + ЛГ, NPK + ЛГ и Ruscote + ЛГ, а также NPK и Ruscote + ЛГ достоверно отличались между собой. На варианте NPK отмечены наибольшие значения площади листа и достоверно отличающиеся от большинства остальных вариантов. Контрольный вариант и ЛГ показывают достоверно меньшие значения по сравнению с вариантами, где применялись минеральные удобрения (рис. 1).

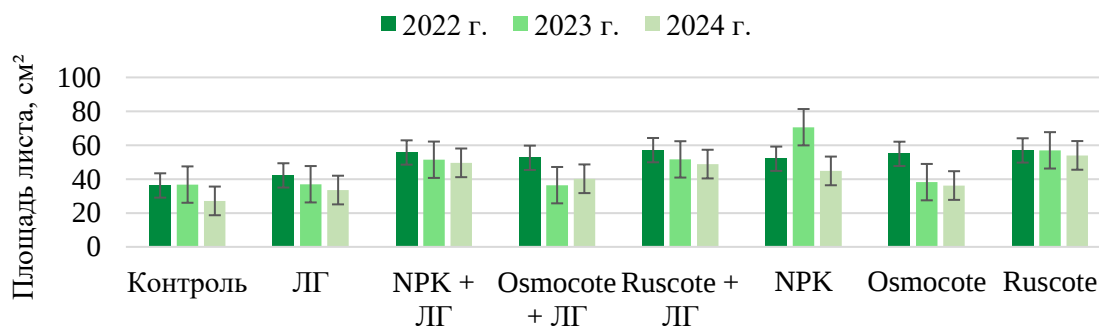


Рисунок 1. Площадь листа после вегетационного сезона за 3 года, см². Вертикальными линиями на графике отмечено значение НСР_{0,05}.

Самый высокий урожай ягод в 2023-2024 гг. был отмечен на вариантах NPK, NPK + ЛГ и Ruscote + ЛГ, он статистически не различался между ними и превышал все другие варианты опыта, а минимальный - ЛГ (табл. 1), что указывает на неэффективность одной foliarной обработки без внесения минеральных удобрений. Различия были особенно выражены между вариантами Контроль, ЛГ и всеми остальными: эти два варианта показали минимальные значения урожайности и достоверно уступали другим вариантам, особенно вариантам NPK и Ruscote + ЛГ.

Таблица 1. Масса ягод с 1м² (за 2023-2024 гг.), г (среднее ± ошибка опыта)

Вариант	Масса ягод с 1м ² , г	
	2023 г.	2024 г.
Контроль	80,8±6,73	23,2±11,45
ЛГ	64,9±34,39	15,0±10,89
NPK + ЛГ	542,5±118,74	328,5±146,96
Osmocote + ЛГ	312,6±71,88	172,1±25,81
Ruscote + ЛГ	402,5±178,60	523,2±120,19
NPK	574,6±111,78	668,7±413,94
Osmocote	298,4±71,09	140,1±63,95
Ruscote	220,6±117,47	140,6±64,14

В 2023 и в 2024 гг. масса 50 ягод была самой большой в варианте NPK и Ruscote + ЛГ. Минимальные значения массы 50 ягод были зафиксированы в вариантах ЛГ и Контроль. По количеству кистей и количеству ягод в кисти лидировали следующие варианты: NPK, Ruscote + ЛГ, NPK + ЛГ. Варианты Контроль и ЛГ имели достоверно меньшие значения количества ягод по сравнению с другими вариантами (рис. 2). Наиболее выраженные различия в количестве кистей были выявлены между Контролем, ЛГ и остальными вариантами. Контрольный вариант достоверно отличается в меньшую сторону по количеству кистей и числу ягод в кисти от всех остальных вариантов с удобрениями (рис. 2).

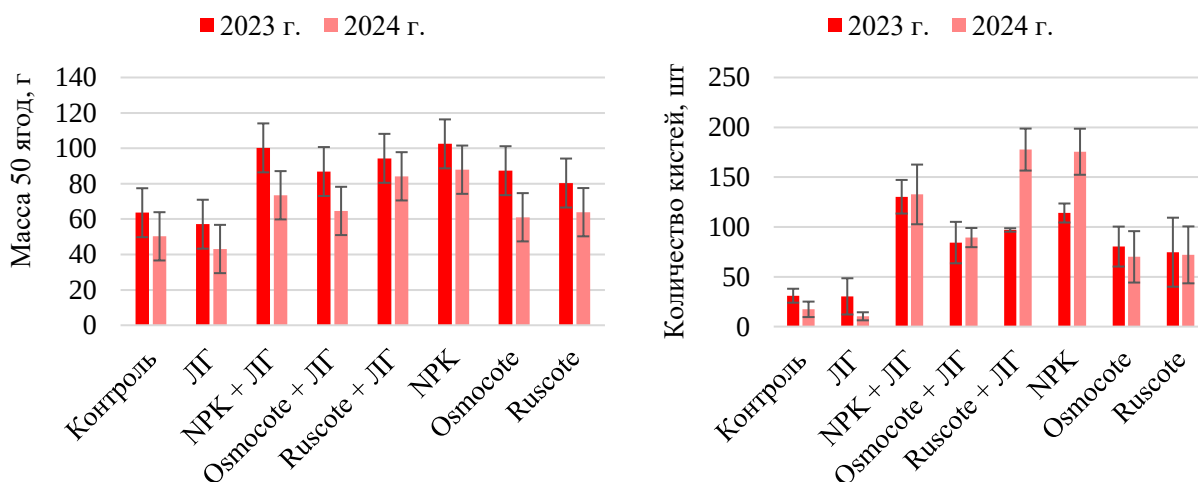


Рисунок 2. Масса 50 ягод, г и количество кистей (за 2023-2024 гг.), шт. Вертикальными линиями на графике отмечено значение ошибки опыта.

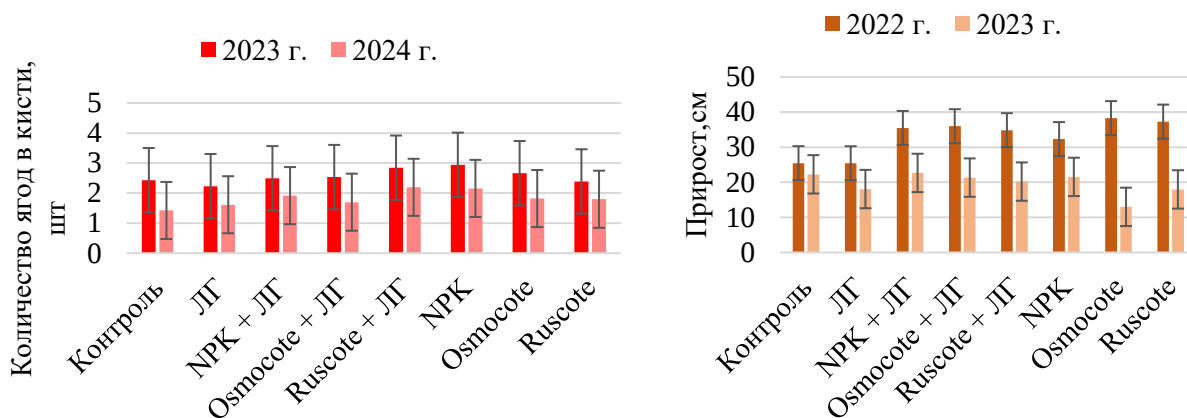


Рисунок 3. Количество ягод в кисти, шт. и величина прироста побега, см (за 2023-2024 гг. и 2022-2023 гг. соответственно). Вертикальными линиями на графике отмечено значение НСР_{0,05}.

Максимальный прирост побегов в 2022 г. наблюдали в варианте Osmocote, а в 2023 г. - в вариантах NPK + ЛГ и NPK. Самые низкие значения были зафиксированы в варианте Osmocote и ЛГ в 2023 г. Общее снижение прироста во второй год может быть связано с перераспределением питательных веществ в сторону генеративных органов (рис. 3).

Корреляционный анализ между морфометрическими показателями черной смородины за 2023-2024 гг. позволил выявить ряд выраженных взаимосвязей. Наиболее высокая положительная корреляция отмечена между урожайностью и массой 50 ягод ($r = 0,95$), что указывает на прямую зависимость величины общего урожая от средней массы плодов, между урожайностью и числом ягод в кисти ($r = 0,86$) и между урожайностью и приростом побегов ($r = 0,79$). Это позволяет утверждать, что активный рост надземной части растения способствует формированию более мощных генеративных органов и, как следствие, повышению урожайности.

За время проведения исследования pH почвогрунта изменился незначительно (рис. 4), только в 2022 г. наибольшее значение pH (7,8) было зафиксировано в варианте с применением удобрения Ruscote в сочетании с Лигногуматом.

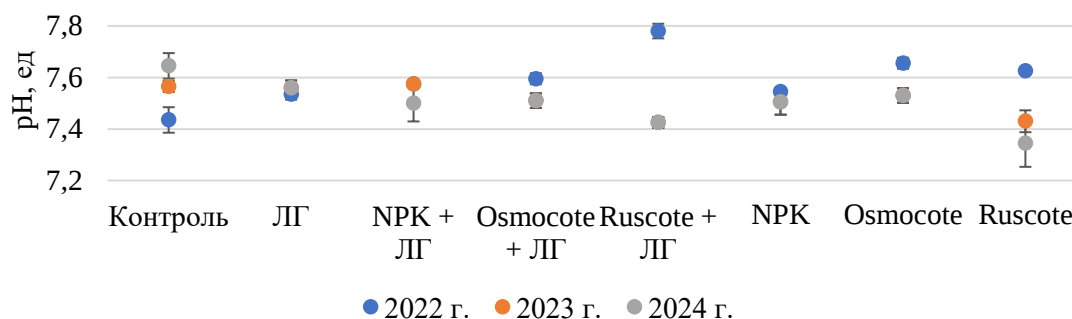


Рисунок 4. Значения pH почвогрунта, ед. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Для оценки влияния факторов «тип удобрения» и «обработка лигногуматом/отсутствие», а также их взаимодействия на агрохимические

характеристики почвы был проведён двухфакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Согласно полученным данным, в течение трёх лет только фактор «Удобрения» оказывал статистически значимое влияние на уровень кислотности почвогрунта.

Максимальная концентрация нитратного азота была зафиксирована в варианте NPK в 2022 г., в то время как минимальные значения были отмечены в варианте с применением Лигногумата. В 2023 г. в большинстве опытных вариантов наблюдалось снижение содержания нитратного азота, однако, в варианте с Ruscote отмечен резкий его рост. Такой результат, вероятно, свидетельствует о постепенном высвобождении нитрат-ионов из полимерной оболочки удобрения. Кроме того, в варианте ЛГ было зафиксировано увеличение содержания нитратов с 2022 г. до 2023 г., что может указывать на опосредованное влияние некорневой обработки Лигногуматом на минерализацию органического азота в почвогрунте. В 2024 году во всех вариантах эксперимента концентрация нитратов вновь снизилась (рис. 5). Результаты двухфакторного дисперсионного анализа показали, что в течение трёх лет достоверное влияние на содержание нитратного азота оказывали фактор «Удобрения», а также взаимодействие факторов «Удобрения × Лигногумат АМ».

Содержание аммонийного азота при закладке опыта в 2022 г. было выше, чем в другие года исследования, особенно на вариантах с внесением удобрений пролонгированного действия (рис. 5). По результатам дисперсионного анализа статистически значимого влияния исследуемых факторов на содержание этого элемента в почвогрунте установлено не было.

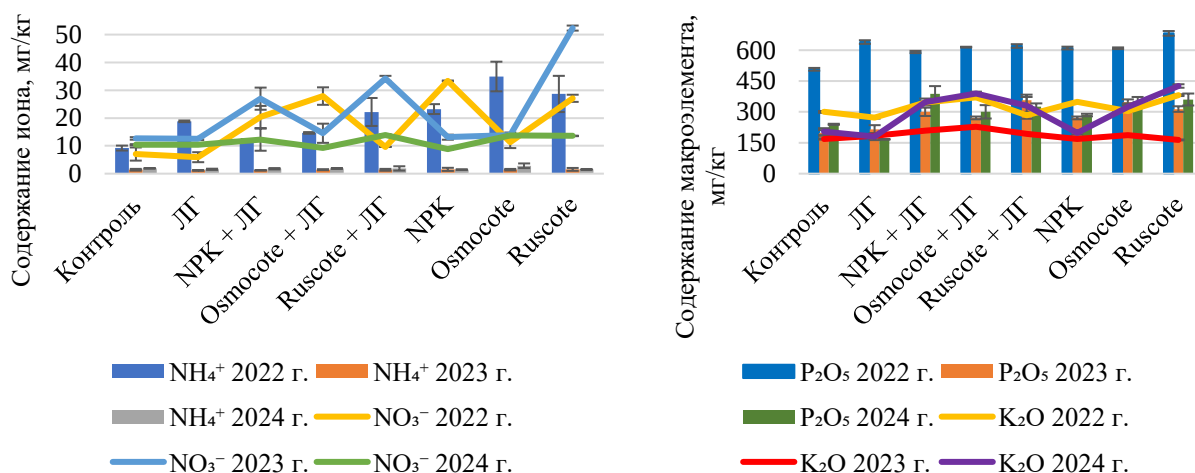


Рисунок 5. Значения нитратного и аммонийного азота, подвижного фосфора и калия в почвогрунте, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

В 2022 г. наибольшее содержание подвижного фосфора в почвогрунте было отмечено в варианте с применением Ruscote, тогда как минимальное значение было зафиксировано в Контроле. Однако, уже на втором году во всех вариантах опыта в почвогрунте было обнаружено резкое снижение концентрации подвижного фосфора. В 2024 г. в ряде вариантов с foliarной обработкой, таких как NPK + ЛГ и Osmocote + ЛГ, наблюдали частичное восстановление уровня подвижного фосфора (рис. 5).

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа (ANOVA) продемонстрировали статистически значимое влияние как отдельного фактора «Лигногумат АМ» и фактора «Удобрения», так и взаимодействие этих двух факторов

на содержание подвижного фосфора в 2022 г. В последующие два года (2023–2024 гг.) влияние лигногумата не достигло уровня статистической значимости, тогда как фактор удобрения продолжал оказывать значительное воздействие, как и взаимодействие этих факторов.

Аналогичная тенденция была отмечена и по содержанию подвижного калия в почвогрунтах (рис. 5). По данным двухфакторного дисперсионного анализа, оба исследуемых фактора – вид применяемого удобрения и наличие/отсутствие фолиарной обработки Лигногуматом АМ – оказывали достоверное влияние на содержание подвижного калия.

Анализ валового содержания азота и фосфора в почвогрунте показал падение его содержания в сравнении с этим показателем до начала опыта. Однако по завершению вегетационного периода 2023 г. показатели валового фосфора значительно снизились во всех вариантах: минимальное содержание было зафиксировано в вариантах Ruscote + ЛГ и NPK, умеренное снижение наблюдалось в вариантах NPK + ЛГ, Osmocote + ЛГ, Ruscote, наибольшее сохранение уровня содержания валового фосфора было отмечено в Контроле, ЛГ и Osmocote. Сравнение с исходным уровнем фосфора показывает, что в некоторых вариантах содержание фосфора снизилось более чем в 5 раз. Это особенно выражено в вариантах с минеральным питанием без фолиарной обработки (например, NPK). Данные свидетельствуют о высоком потреблении фосфора растениями, что требует дополнительной коррекции схем питания. Наиболее эффективными в сохранении содержания подвижного фосфора в почвогрунте оказались варианты с применением минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия и Лигногумата, особенно Ruscote + ЛГ (рис. 6).

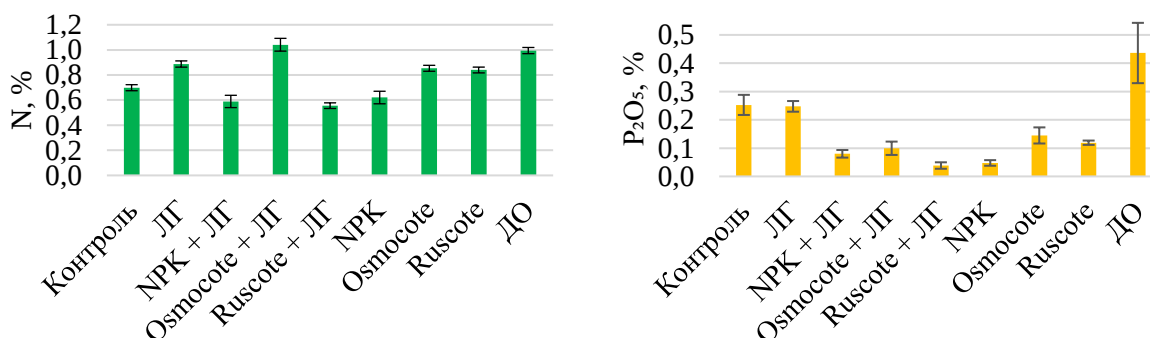


Рисунок 6. Содержание валового азота и фосфора в почвогрунте в 2023 г., %. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Согласно гидротермическому коэффициенту Селянинова (ГТК), в 2023 г. увлажнение было оптимальным в течение вегетационного периода (ГТК = 1,31, май–сентябрь). Это климатическое условие могло существенно повлиять на соотношение валового и подвижного фосфора в почвогрунте.

Оптимальное увлажнение способствует биологической активности почвы, в том числе активности фосфат-мобилизующих микроорганизмов. Это могло повышать минерализацию органических соединений фосфора и, как следствие, увеличивать содержание его подвижных форм (Jindo et al., 2023).

В течение трёх лет эксперимента наблюдали устойчивый рост содержания подвижных цинка и меди в почвогрунте (рис. 7): концентрация цинка увеличилась во всех вариантах в течение трех лет. Аналогичная ситуация наблюдалась в содержании меди.

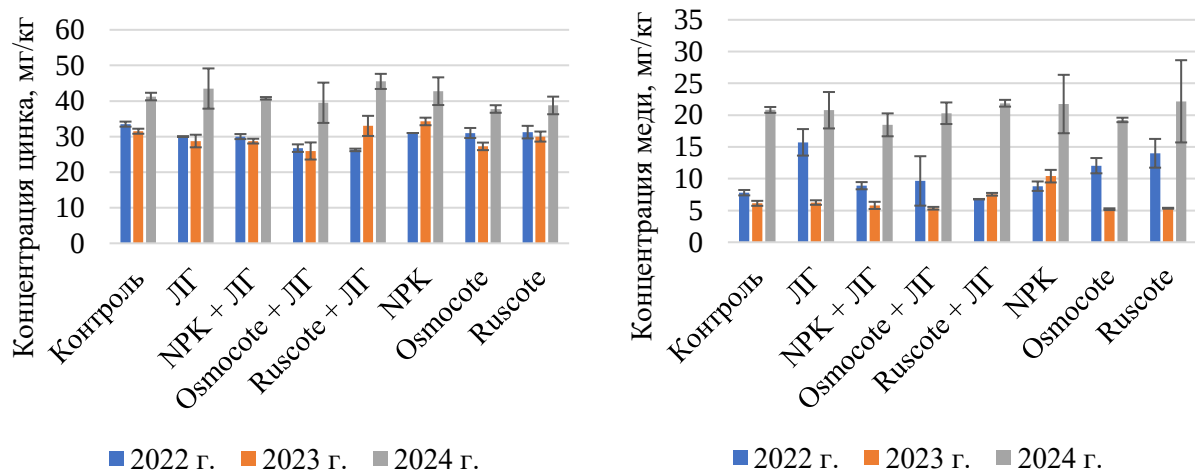


Рисунок 7. Содержание подвижного цинка и меди (вытяжка - ААБ) в почвогрунте, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Согласно приведенным ранее литературным источникам (Мистратова и др., 2021), оптимальные диапазоны содержания макроэлементов в листовой ткани черной смородины находятся в диапазоне: азот – 2,1-2,8 %, фосфор – 0,4-0,6 %, калий – 1,1-2,0 %. В условиях проведенного эксперимента в 2022 г. уровень азота был оптимальным во всех вариантах опыта, кроме Контроля. Обработка растений Лигногуматом увеличивала этот показатель. В 2023-2024 гг. этот показатель падал на всех вариантах, кроме Контроля, что, вероятно, связано с ростовым разбавлением (рис. 8).

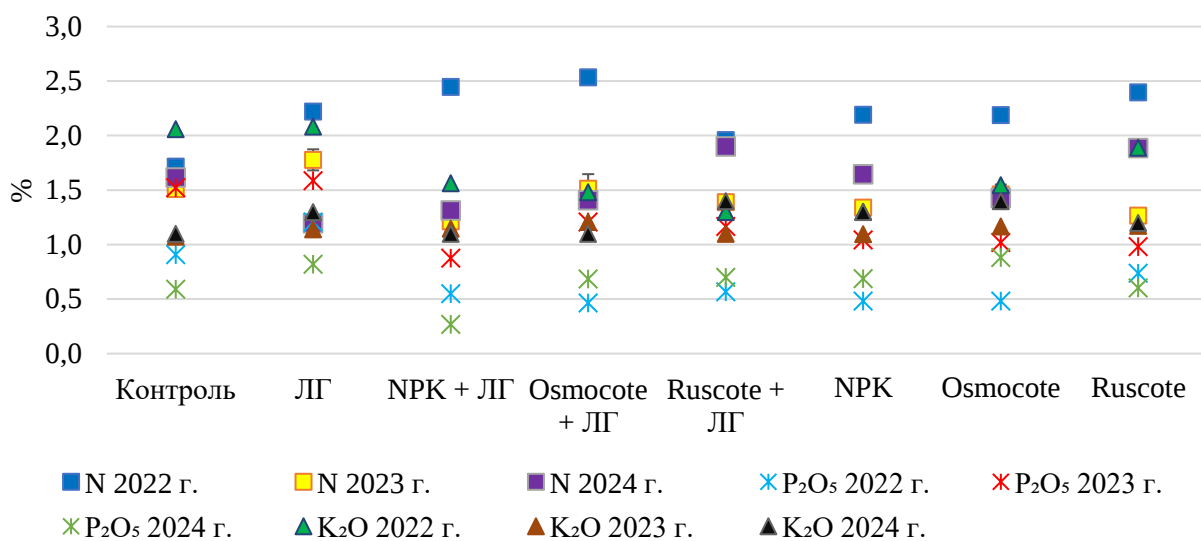


Рисунок 8. Содержание макроэлементов в листьях, %.

При оценке в листьях фосфора и калия отмечены аналогичные тенденции. В 2023 г. эти показатели растут на всех вариантах опыта, а в 2024 г. – падают, при этом содержание фосфора остается оптимальным, в отличие от калия. При этом фолиарная обработка растений Лигногуматом повышает эти показатели на всех вариантах опыта (рис. 8).

Таким образом, фосфор и калий, как и азот, подвержены влиянию не только типа удобрения, но и межфакторного взаимодействия удобрений с параметрами

почвенной среды, что подчеркивает необходимость комплексного подхода к оценке питательного статуса растений.

Проведенный анализ ягод черной смородины показал максимальное содержание азота в вариантах NPK и Ruscote, так и с фолиарной обработкой растений Лигногуматом, в контрольном варианте и в варианте с обработкой только лигногуматом содержание азота в ягодах оказалось наименьшим (рис. 9).

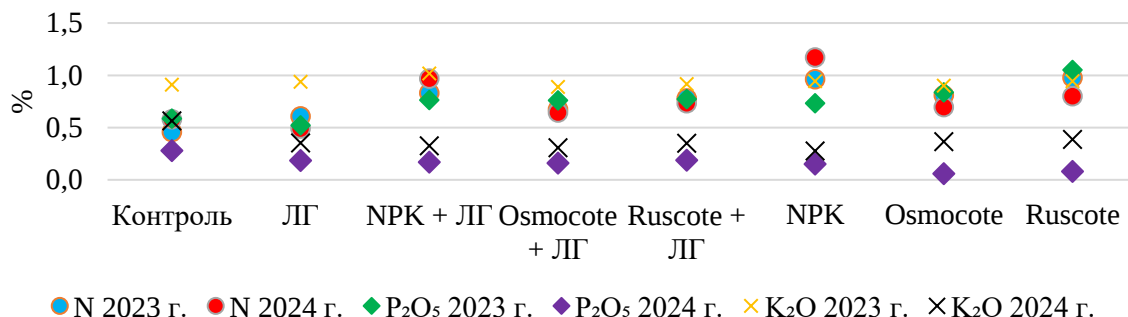


Рисунок 9. Содержание макроэлементов в ягодах, %.

Фосфор также демонстрировал высокую вариативность в зависимости от примененной агротехнологии (рис. 9). Максимальное его содержание (1,1 %) было зафиксировано на варианте с удобрением Ruscote, тогда как в варианте с одной фолиарной обработкой лигногуматом концентрация составила всего 0,5 %. В других вариантах фосфор в ягодах колебался в пределах от 0,6 до 0,8 %, что можно считать удовлетворительным уровнем обеспечения данного элемента. Содержание фосфора и калия имело одинаковый тренд, который совпадал с содержанием этих элементов в почвогрунтах. В 2023 г. содержание этих элементов было выше, чем в 2024 г.

Таким образом, наибольшие уровни накопления N, P и K в ягодах в целом были характерны для вариантов с применением традиционных удобрений и удобрения с пролонгированным действием Ruscote.

Концентрации цинка в листьях увеличивалась во всех вариантах опыта за исследуемый период и достигла максимума в 2024 г., с самыми высокими показателями на вариантах NPK + ЛГ, Ruscote, Osmocote + ЛГ и ЛГ, что может указывать на активное усвоение элемента при фолиарной обработке Лигногуматом.

Концентрация меди в листьях в 2022 г. была выше, чем в 2023-2024 гг. (рис. 10).

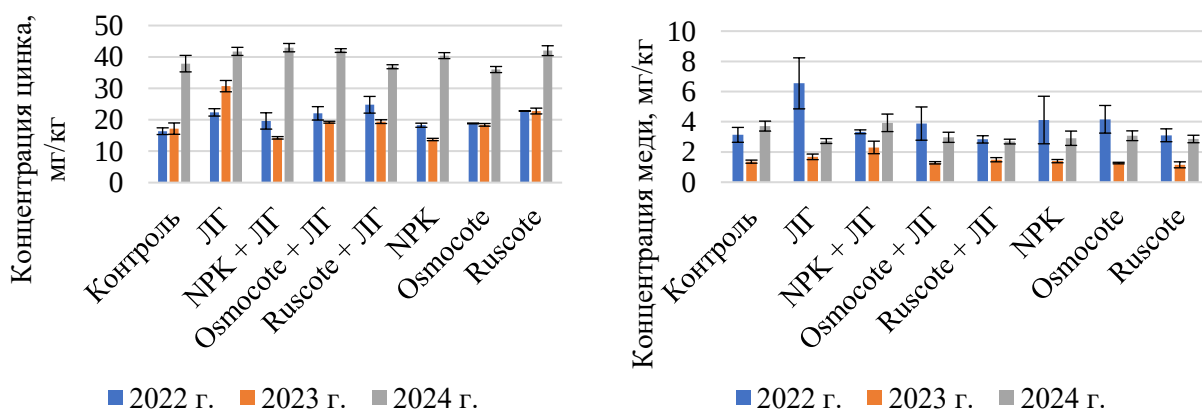


Рисунок 10. Содержание цинка и меди в листьях, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Содержание цинка в ягодах черной смородины в 2023 г. варьировалось от 10,2 до 12,2 мг/кг, в 2024 г. в большинстве вариантов снизились, особенно в варианте

Osmocote + ЛГ (8,8 мг/кг) (рис. 11), что может быть следствием перераспределения цинка в вегетативные органы. Содержание этих элементов в ягодах мало колебалось за период исследования. При анализе меди был определен ее стабильно низкий уровень - 1,0-1,9 мг/кг, что соответствует физиологическим нормам и не указывает на избыток микроэлемента (рис. 11).

Допустимые уровни токсичных элементов (СанПиН 2.3.2.560-96 пункт 8.1.3): медь - 5,0 мг/кг, цинк - 10,0 мг/кг. Согласно санитарным требованиям, большинство исследованных вариантов безопасны по содержанию меди и цинка, что указывает на ограниченную транслокацию металлов и возможную защитную роль гуминовых веществ/лигногуматов.

Одним из важных показателей экологической и пищевой безопасности плодов является накопление нитратов. В 2023 г. концентрация нитратов большинства вариантов (Контроль, ЛГ, Osmocote + ЛГ, Ruscote + ЛГ) превышала установленное нормативное значение 50 мг/кг, (СанПиН 2.3.2.560-96, пункт 8.1.3) как предельно допустимая концентрация нитратов в ягодах, предназначенных для детского питания. Особенно высокие уровни нитратов наблюдали в вариантах с отсутствием минерального питания. В 2024 г. этот показатель соответствовал ПДК практически на всех вариантах с внесением удобрений пролонгированного действия, в отличие от варианта NPK + ЛГ, где отмечено самое высокое его содержание (рис. 12).

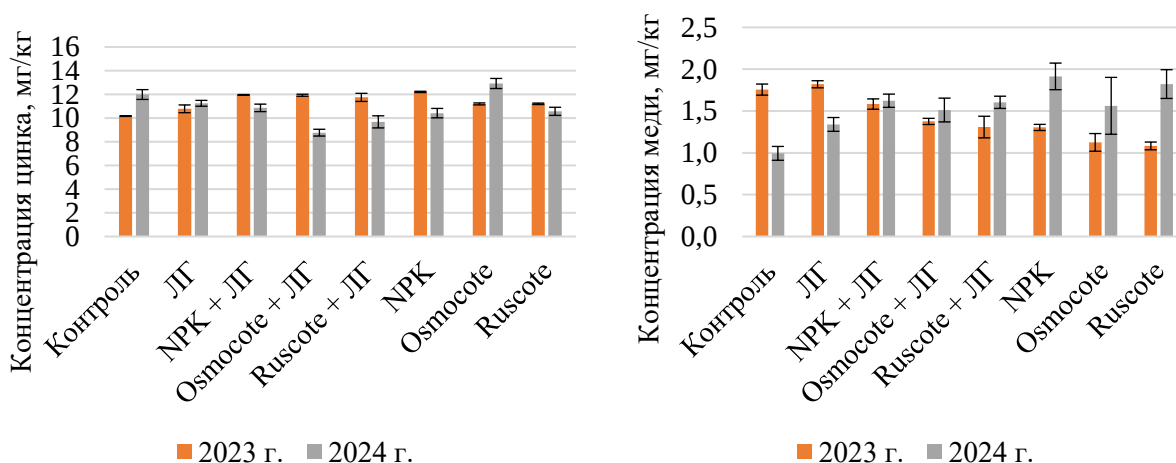


Рисунок 11. Содержание цинка и меди в ягодах, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

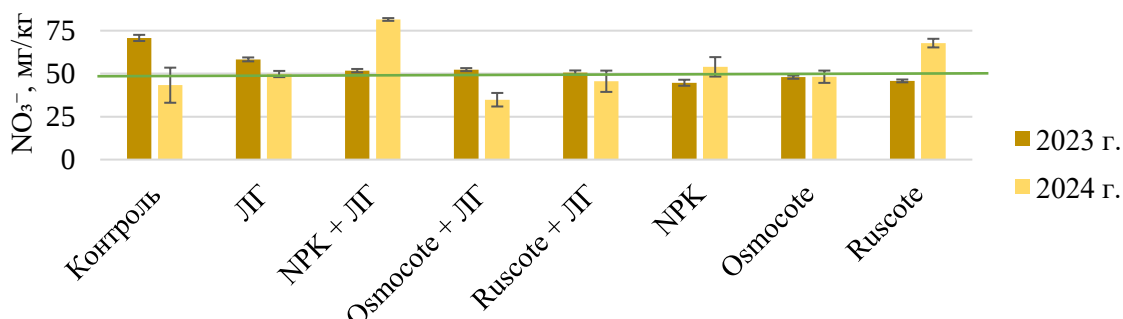


Рисунок 12. Содержание нитратов в ягодах черной смородины, мг/кг сырого вещества. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта, зеленым цветом – ПДК нитратов = 50 мг/кг.

По литературным данным, типичное содержание нитратов в ягодах черной смородины при стандартном минеральном питании варьирует от 28 до 45 мг/кг (Chen et al., 2021; Zhao et al., 2020).

Особый интерес вызывают данные по содержанию фенольных соединений, как важнейших биологически активных веществ, отражающих метаболическую активность растений и их адаптацию к условиям внешней среды в листьях и ягодах черной смородины. В 2022 г. наибольшее содержание фенольных соединений в листьях было зафиксировано в варианте с применением удобрения Ruscote, наименьшее – в варианте NPK. В 2023 году максимальное содержание – в варианте Osmocote, минимальное – в Osmocote и ЛГ. В 2024 году тенденция резко изменилась, отмечено резкое снижение содержания фенольных соединений за трёхлетний период наблюдений.

В ягодах отмечена общая тенденция повышения содержания фенольных соединений в 2024 г., особенно на варианте Ruscote (почти в 3 раза), наименьшее – в Контроле. При этом вариант Osmocote + ЛГ на протяжении двух лет демонстрировал устойчиво низкий уровень фенольных соединений как в листьях, так и в ягодах, что может указывать на подавление синтеза вторичных метаболитов при такой комбинации удобрений (рис. 13).

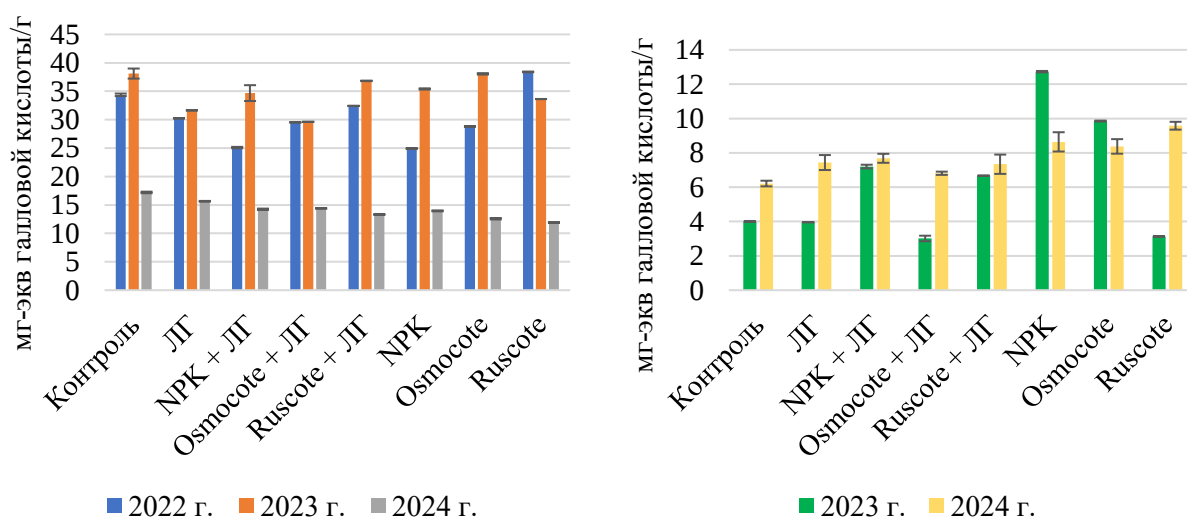


Рисунок 13. Содержание фенольных соединений в листьях и ягодах, мг-экв галловой кислоты/г сырого вещества. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Согласно исследованиям Громовой и соавт. (2021), а также Чугуновой и др. (2021), максимальная концентрация фенольных соединений в ягодах может достигать 627,9-643,0 мг-экв галловой кислоты на 100 г.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа (ANOVA) (табл. 2) продемонстрировали статистически значимое влияние факторов «Удобрение», «Лигногумат АМ», а также их взаимодействия на уровень фенольных соединений в листьях и ягодах чёрной смородины.

Таблица 2. Достоверность влияния 2-х изученных факторов и их взаимодействия на содержание фенольных соединений в черной смородине (дисперсионный анализ ANOVA)

Фактор	Листья						Ягоды			
	2022 г.		2023 г.		2024 г.		2023 г.		2024 г.	
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
Лигногумат АМ	41,6	<0,001	27,6	0,001	2,2	0,172	141,2	<0,001	15,3	0,005
Удобрение	169,4	<0,001	1,3	0,344	40,0	<0,001	190,0	<0,001	10,6	0,004
Лигногумат АМ*Удобрение	25,6	<0,001	20,6	<0,001	9,2	0,006	150,3	<0,001	12,4	0,002

Влияние ГТК отчетливо проявилось в динамике содержания фенольных соединений: в засушливом 2022 году их концентрация в листьях достигала максимальных значений, что согласуется с литературными данными о стресс-индуцированном усилении синтеза вторичных метаболитов. В последующие годы, на фоне оптимального увлажнения, наблюдали устойчивое снижение содержания фенольных соединений в листьях. При этом, в 2024 году зафиксирован рост их концентрации в ягодах, особенно в варианте Ruscote, что может свидетельствовать о перераспределении антиоксидантных соединений из вегетативных органов в генеративные в условиях снижения стрессовой нагрузки при применении минеральных удобрений пролонгированного действия.

Совместное применение Лигногумата АМ с удобрениями демонстрирует максимальный эффект на накопление фенольных соединений в обоих органах растения, что указывает на синергетическое действие агрохимических факторов в начальные периоды развития кустарника.

Учитывая, что антоцианы представляют собой структурный и функциональный подкласс фенольных соединений, обладающих высокой биологической активностью, был проведён отдельный анализ их содержания в ягодах чёрной смородины в разные годы вегетации. В содержании антоцианов в ягодах чёрной смородины прослеживается следующая закономерность (рис. 14): максимальные их концентрации отмечали в контрольных вариантах, в то время как внесение удобрений, особенно пролонгированного действия, приводит к снижению их накопления. Подобное снижение может быть связано с тем, что при улучшении условий питания и снижении влияния стресс-факторов синтез антоцианов, как компонентов антиоксидантной защиты, уменьшается.

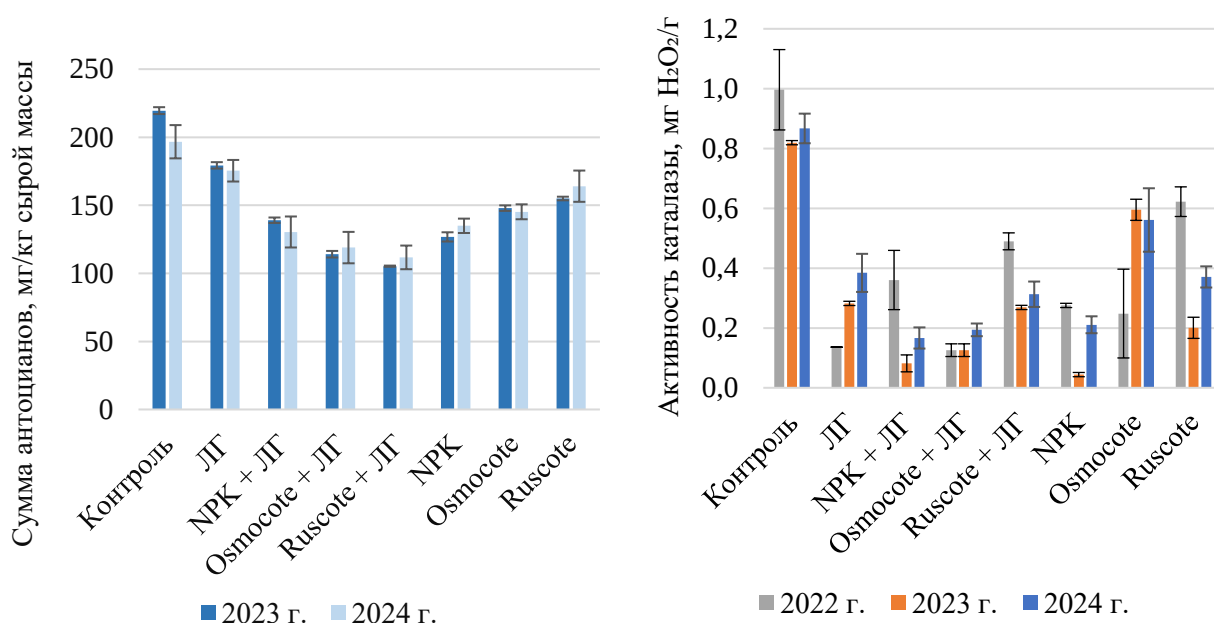


Рисунок 14. Содержание суммы антоцианов в ягодах, мг/кг сырой массы, активности каталазы в листьях, мг H₂O₂/1 г сырой массы. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

По литературным данным, типичный диапазон содержания антоцианов в ягодах чёрной смородины составляет от 200,0 до 700,0 мг/100 г свежего веса (Oszmiański, Wojdyło, 2009), а по данным Блинниковой (2019) — около 492,6 мг/100 г.

Поскольку антоцианы участвуют в неферментной защите растений от окислительного стресса, логично рассмотреть активность фермента каталазы, представляющего ферментативное звено антиоксидантной системы и играющего ключевую роль в детоксикации перекиси водорода.

В течение трёх лет опыта максимальная активность каталазы фиксировалась в контрольном варианте (рис. 14), где растения подвергались наибольшему воздействию абиотических факторов без применения удобрений и биостимулятора. Это подтверждает данные литературы о повышении активности антиоксидантных ферментов при стрессовых воздействиях (Dumanović et al., 2021; Ma et al., 2021). Напротив, низкие значения активности каталазы наблюдали в вариантах, где присутствовала фолиарная обработка растений Лигногуматом АМ, что может свидетельствовать о снижении стрессовой нагрузки на растения.

Активность антиоксидантного фермента каталазы была наивысшей в 2022 г., что подтверждает наличие окислительного стресса у растений в условиях недостаточного увлажнения (ГТК = 0,75). В оптимально увлажнённые годы (2023 и 2024 гг.) активность каталазы снижалась, особенно в вариантах с применением Лигногумата, что свидетельствует о стабилизации окислительно-восстановительного баланса в тканях (рис.14).

По сведениям научной литературы, активность каталазы в листьях растений в физиологически нормальном состоянии варьирует в пределах 0,2-0,5 мг H₂O₂/г сырой массы, в зависимости от вида культуры и условий среды (Navir & McNale, 1987; Gajewska & Skłodowska, 2008). При этом в условиях абиотического или биотического стресса (например, засуха, избыток минерального питания, высокая инсоляция) активность фермента может возрастать до 0,8-1,5 мг/г и выше (Gill & Tuteja, 2010).

Фотосинтетические пигменты чувствительны к стрессовым условиям и отражают общее функциональное состояние растений. Сумма хлорофиллов а и в была самой высокой в 2023 г., затем в 2024 г. падала до значений, ниже, чем в 2022 г. с максимальным значением на варианте Ruscote (рис. 15).

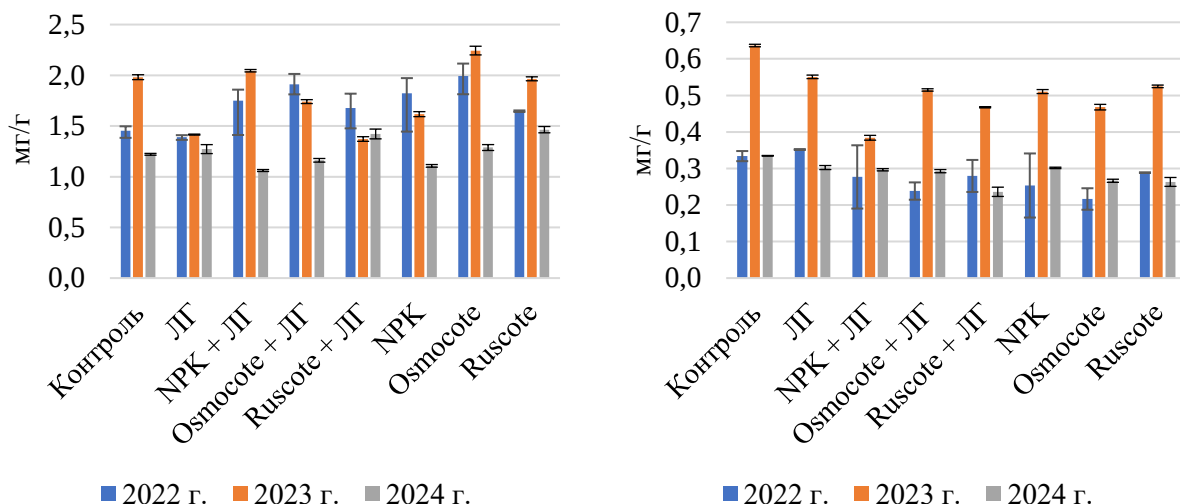


Рисунок 15. Содержание суммы хлорофилла а и в (слева) и каротиноидов (справа) в листьях в конце вегетационного сезона, мг/г сырого вещества. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Содержание каротиноидов (играют защитную роль в фотосинтетическом аппарате) было максимальным в 2023 г. на всех вариантах опыта, особенно в Контроле. В 2024 г. снижалось до минимума на варианте Ruscote + ЛГ (Рис. 15).

Важным показателем биохимического состава ягодных культур, определяющим их пищевую и антиоксидантную ценность, является содержание аскорбиновой кислоты. В ягодах чёрной смородины оно может значительно колебаться - от 96,2 до 241,0 мг/100 г, в зависимости от сорта и условий выращивания (Блинникова, 2019).

Наивысшее содержание аскорбиновой кислоты было зафиксировано в контрольном варианте, что почти в два раза превышает показатели других вариантов. Фолиарная обработка Лигногуматом совместно с этими удобрениями (Ruscote + ЛГ и Osmocote + ЛГ) не приводила к существенному увеличению аскорбиновой кислоты, а, напротив, к умеренному снижению (Рис.16).

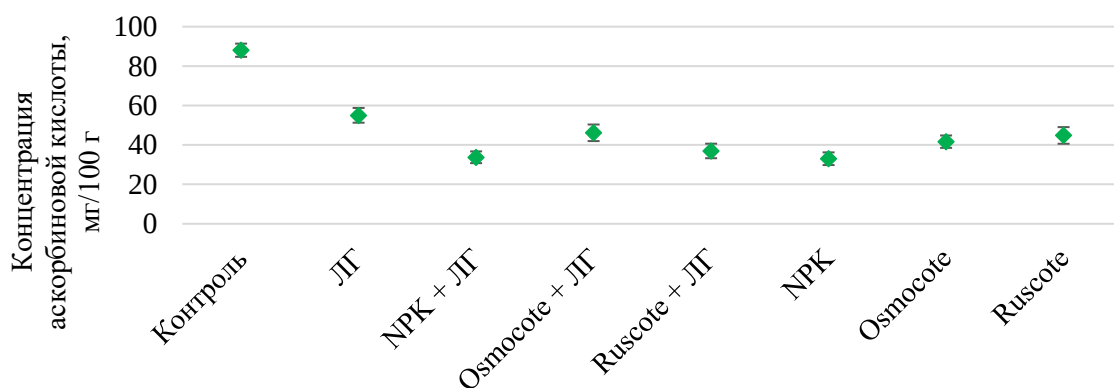


Рисунок 16. Содержание аскорбиновой кислоты в ягодах (урожай 2024 г.), мг/100 г. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Значение ГТК оказывало значительное влияние на физиолого-биохимическое состояние черной смородины. Недостаток влаги в 2022 г. стимулировал синтез антиоксидантов (фенольных соединений, антоцианов, аскорбиновой кислоты) и активность каталазы как механизмов стресс-адаптации, тогда как оптимальные условия в 2023-2024 гг. способствовали перераспределению биологически активных веществ в сторону плодов, снижая уровень защитных метаболитов в листьях и стабилизируя обмен веществ.

3.2. Опыт 2. Модельный опыт

Оболочки удобрений пролонгированного действия могут стать возможным источником фенольных соединений в агроэкосистеме. Анализ сухих капсул и Лигногумата показал, что в удобрении Osmocote концентрация фенольных соединений составила в среднем $0,6 \pm 0,12$ мг-экв. галловой кислоты/г, в Ruscote - $0,2 \pm 0,13$ мг-экв./г, в сухом Лигногумате - $92,8 \pm 10,73$ мг-экв. галловой кислоты/г.

Взвешивание образцов удобрений пролонгированного действия после проведения модельного опыта (через 21 суток) показало, что масса капсул удобрения Ruscote с 1,32 г уменьшилась за время модельного опыта до 0,75 г, т.е. снизилась на 44,2%, а масса навески Osmocote - до 0,97 г, т.е. на 27,5 %.

В модельном опыте была оценена скорость высвобождения основных питательных элементов из капсул удобрений пролонгированного действия за исследуемый период.

Получено, что из капсул удобрение Ruscote быстрее выделяется азот: уже к 20-му дню эксперимента из оболочек выделилось практически 100 % общего содержания азота (99,9 %). В то же время высвобождение фосфора и калия оказалось существенно менее выраженным и составило 49,9 % и 15,9 %, соответственно. Для удобрения Osmocote характерна более медленная кинетика выхода питательных веществ: за тот же период из гранул было высвобождено около 70 % азота, 30 % калия и лишь 11 % фосфора, что указывает на более контролируемое и пролонгированное действие по сравнению с Ruscote. Эти различия в профиле высвобождения могут оказывать влияние на доступность элементов для растений и агрохимические характеристики почвогрунта в процессе вегетации.

Ряд научных работ указывает на значительное влияние азотных удобрений на содержание фенольных соединений, флавоноидов и уровень антиоксидантной активности у растений. При этом установлено, что интенсивное внесение (поступление) азота способно снижать уровень накопления фенольных метаболитов, за счёт перераспределения метаболической активности в сторону первичного роста (Ковалева, Ковалев, 2023; Zhao et al., 2021; Chen et al., 2022). Это частично объясняет наблюдаемое в нашем исследовании снижение уровня фенольных соединений в листьях чёрной смородины при использовании удобрения Ruscote, поскольку на ранних этапах вегетации растения могли получать избыточные дозы азота, что активизировало ростовую реакцию, но одновременно подавляло синтез вторичных метаболитов, включая фенольные соединения (табл. 3).

Таблица 3. Содержание азота, фосфора и калия в минеральных комплексных капсулированных удобрениях пролонгированного действия до и после (через 21 день) модельного опыта, мг

	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	Ruscote		
Было в удобрениях	156,4	130,0	234,0
Вышло в раствор	156,3 (99,94%)	64,9 (49,92%)	37,1 (15,85%)
	Osmocote		
Было в удобрениях	151,3	88,2	226,9
Вышло в раствор	107,0 (70,72%)	9,6 (10,88%)	69,0 (30,41%)

В результате микроскопирования при разном увеличении капсул Ruscote, выполненного до закладки модельного опыта, на поверхности оболочек были выявлены поры, равномерно распределённые по всей площади гранулы. Структура капсулы характеризовалась визуальной однородностью матрицы и равномерной пористостью, через 21 сутки оболочки удобрения Ruscote имели более рыхлую, неоднородную структуру

При микроскопировании оболочек образцов удобрения Osmocote до начала модельного эксперимента было обнаружено, что они характеризовались гладкой, плотной и визуальнo однородной поверхностью, без выраженной пористости, что отличает её от более рыхлой и пористой структуры, наблюдаемой у Ruscote. При микроскопировании гранул Osmocote поры на поверхности не были обнаружены, а сама оболочка имела гомогенную и равномерную текстуру. После завершения опыта наблюдалась аналогичная закономерность, как и в случае с Ruscote: высвобождение питательных веществ из гранул происходило неравномерно.

Мониторинг фенольных соединений в растворах показал, что раствор Лигногумата АМ содержит значительно более высокую концентрацию этих соединений по сравнению с растворами удобрений пролонгированного действия и его показатели практически не изменялись за время эксперимента, в отличие от удобрений пролонгированного действия, где в течение 9 суток определяли крайне низкое содержание фенольных соединений, затем растворы оставались чистыми от этих соединений.

Полученные данные подтвердили, что Лигногумат АМ может служить дополнительным источником фенольных соединений, поступающих в растение, что свидетельствует о его потенциале в качестве эффективного поставщика биологически активных веществ при агрохимическом применении (рис. 17, 18).

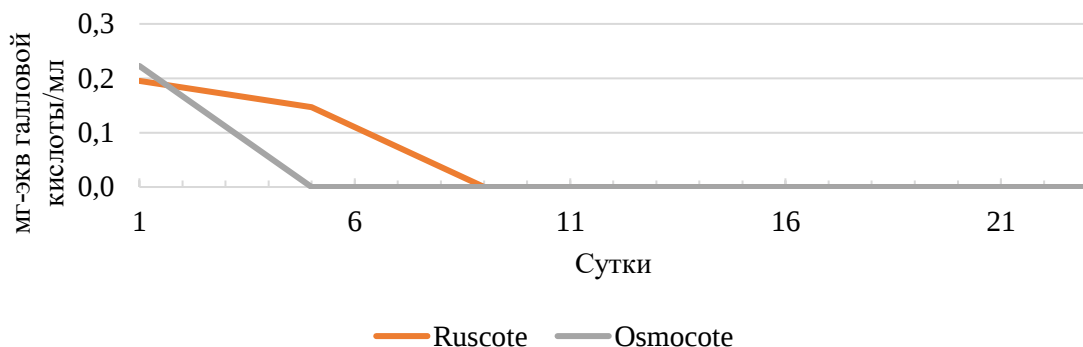


Рисунок 17. Динамика содержания фенольных соединений в растворе удобрений Osmocote и Ruscote в течение 21 суток, мг-экв галловой кислоты/мл.

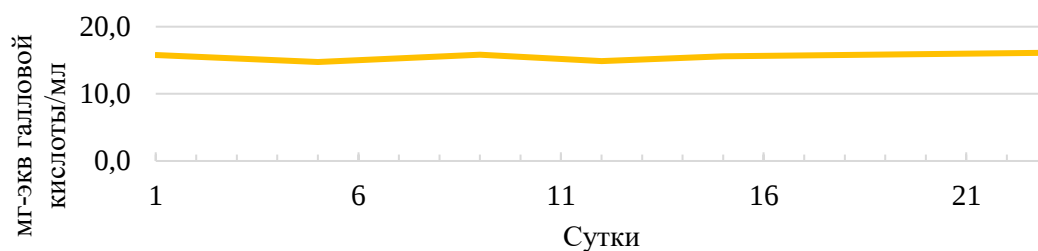


Рисунок 18. Динамика содержания фенольных соединений в растворе Лигногумата АМ, в течение 21 суток, мг-экв галловой кислоты/мл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наибольшее положительное влияние на морфометрические параметры чёрной смородины оказывали как традиционные, так и удобрения пролонгированного действия в сочетании с фоллиарной обработкой Лигногуматом АМ. Особенно эффективными оказались комбинации NPK, Ruscote + ЛГ и NPK + ЛГ, обеспечивавшие стабильный прирост побегов, увеличение площади листьев, массы ягод и числа кистей. Варианты без минерального питания (Контроль и ЛГ) характеризовались минимальными показателями.

Внесение в почвогрунт традиционных или удобрений пролонгированного действия оказывало влияние на содержание питательных элементов в нем. При внесении Ruscote было отмечено самое высокое содержание нитратного азота и подвижного фосфора, Osmocote - аммонийного азота, а при применении Osmocote совместно с Лигногуматом АМ содержание валового азота не изменилось, в отличие от других вариантов опыта. Валовой анализ выявил высокие потенциальные запасы азота, фосфора и калия в почвогрунте, при низкой их доступностью растениями.

ГТК имело очень большое влияние на физиолого-биохимические параметры черной смородины.

В ягодах черной смородины в 2023 г. наблюдали сбалансированное содержание N, P, K, а в 2024 г. - резкое снижение содержания фосфора и калия, указывающее на дефицит этих элементами питания.

Содержание фенольных соединений в листьях было максимальным в первый год опыта и снижалось к третьему, в то время как в ягодах оно возрастало. Ruscote обеспечивал наибольшее содержание фенолов в ягодах. Лигногумат проявлял антистрессовый эффект, стабилизируя уровень фенольных соединений. Наибольшее содержание антоцианов отмечено в контроле; внесение удобрений снижало их концентрацию в ягодах, что указывает на уменьшение стрессовой нагрузки на растение.

Определение активности каталазы показало наличие стресса у растений в контроле и ряде вариантов, тогда как фоллиарная обработка растений Лигногуматом уменьшал биотический или абиотический стресс у растений.

Модельный опыт показал, что из Ruscote быстрее высвобождается азот и фосфор, из Osmocote - калий. Признаков биоразложения оболочек за 21 сутки в водном растворе не выявлено. Лигногумат АМ - единственный препарат, содержащее значимое количество фенольных соединений, устойчивых в водном растворе, тогда как Osmocote и Ruscote фенолов практически не содержат.

Таким образом, применение минеральных удобрений пролонгированного действия или традиционных удобрений в сочетании с Лигногуматом АМ позволяет

повысить урожайность и качество ягод, оптимизировать минеральное питание и поддержать адаптационный потенциал растений, при этом эффективность зависит от состава удобрения и погодных условий.

ВЫВОДЫ

1. Все применяемые удобрения увеличивали содержание макроэлементов в почвогрунте по сравнению с контрольным вариантом. Однако, использование комплексных минеральных капсулированных удобрений пролонгированного действия приводило к более высоким показателям плодородия. Среди внесенных удобрений Ruscote увеличивал содержание нитратов (в 1,5-2 раза выше), подвижного фосфора (на 20–30 %) и калия (в 1,5-2 раза) в почвогрунте по сравнению с остальными удобрениями, тогда как Osmocote способствовал максимальному накоплению аммонийного азота (на 15-20 %). Фолиарная обработка Лигногуматом АМ не влияла на показатели плодородия почвогрунта.

2. Применение всех видов минеральных удобрений, особенно в сочетании с фолиарной обработкой препаратом Лигногумат АМ, оказывало положительное влияние на морфометрические показатели чёрной смородины. Варианты с традиционными минеральными удобрениями и Ruscote с применением Лигногумата АМ обеспечивали максимальную урожайность, почти в 4 раза выше, чем при применении удобрения Osmocote с Лигногуматом АМ. При этом удобрение Ruscote с Лигногуматом АМ эффективно увеличивали вегетативную массу: площадь листа была на 10% выше, чем на варианте с традиционными минеральными удобрениями и на 20–30% выше, чем с удобрением Osmocote.

3. В первый год опыта в листьях фиксировали максимальные значения фенольных соединений при применении удобрения Ruscote - (на 50% больше, чем с традиционными удобрениями, и на 33% больше, чем при Osmocote). К третьему году их содержание снижалось, тогда как в ягодах наблюдали обратную тенденцию: рост фенольных соединений. Активность каталазы оставалась выше в контрольных вариантах, что указывает на антистрессовый эффект минерального питания и Лигногумата. Фолиарная обработка Лигногуматом АМ влияла на показатели фенольных соединений в ягодах (снижение до 2 раз), суммы антоцианов (снижение на 30-40%), активности каталазы (снижение в 2-3 раза).

4. По результатам морфометрических, агрохимических и биохимических показателей наиболее перспективным удобрением для возделывания черной смородины на почвогрунтах стал Ruscote в сочетании с фолиарной обработкой Лигногуматом АМ.

5. Модельный опыт показал, что из оболочек Ruscote быстрее высвобождаются азот и фосфор (до 30% быстрее, чем из Osmocote), тогда как из Osmocote - преимущественно калий, содержание которого в растворе было в 1,5 раза выше. Мониторинг высвобождения фенольных соединений в раствор показал, что только Лигногумат АМ являлся единственным препаратом, содержащим значимое количество фенольных соединений, тогда как Osmocote и Ruscote фенольных соединений практически не содержали.

Список публикаций в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных WoS, SCOPUS и RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова:

1. **Почтенная А.И., Пашкевич Е.Б.** Влияние комплексных удобрений пролонгированного действия и фолиарной обработки лигногуматом на агрохимические свойства почвогрунта при выращивании черной смородины // Агрохимический вестник. – 2025. – № 2. – С. 16-22. – EDN: QKSZRC (ИФ РИНЦ = 0,617). Вклад автора в печатных листах: (0,875/0,66) (Здесь и далее в скобках приведен объем публикации в печатных листах и вклад автора в печатных листах).

2. **Почтенная А.И., Пашкевич Е.Б.** Влияние комплексных удобрений пролонгированного действия и фолиарной обработки лигногуматом на содержание макроэлементов и фенольных соединений в листьях и ягодах черной смородины (*Ribes nigrum* L.) // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2025. – Т. 80, № 2. – С. 147-155. – EDN: KKBSBX (ИФ РИНЦ = 0,775). (1,125/0,84) [Pochtennaia A.I., Pashkevich E.B. The influence of slow-release complex fertilizers and foliar treatment with lignohumate on the content of macroelements and phenolic compounds in leaves and berries of black currant (*Ribes nigrum* L.) // Moscow University Soil Science Bulletin. – 2025. – Vol. 80, № 2. – P. 258-265. – EDN: OVQRSI (ИФ РИНЦ = 0,323)]

3. **Пашкевич Е.Б., Почтенная А.И.** Действие комплексных минеральных удобрений пролонгированного действия и лигногумата на содержание макроэлементов в почвогрунтах, листьях и ягодах черной смородины (*Ribes nigrum* L.) // Проблемы агрохимии и экологии. – 2025. – № 1. – С. 10-16. – EDN: JZHCNI (ИФ РИНЦ = 0,339) (1,08/0,54).

4. **Почтенная А.И., Пашкевич Е.Б.** Влияние внесения в почвогрунт капсулированных удобрений пролонгированного действия и фолиарной обработки лигногуматом на содержание фенольных соединений в листьях и ягодах черной смородины (*Ribes nigrum* L.) // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2025. – Т. 80, № 3. – С. 207-216. – EDN: SRPKZI (ИФ РИНЦ = 0,775). (1,25/0,63) [Pochtennaia A.I., Pashkevich E.B. The effect of application of encapsulated prolonged-action fertilizer to soil mix and foliar treatment with lignohumate on content of phenolic compounds in leaves and berries of black currant (*Ribes nigrum* L.) // Moscow University Soil Science Bulletin. – 2025. – Vol. 80, № 3. – P. 463-472. – EDN: TXYCUJ (ИФ РИНЦ = 0,323)].