

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В.ЛОМОНОСОВА

ФАКУЛЬТЕТ ПОЧВОВЕДЕНИЯ

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

научный руководитель:

доктор биологических наук

Пашкевич Елена Борисовна

Москва – 2025

СОДЕРЖАНИЕ:

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ КАПСУЛИРОВАННЫХ УДОБРЕНИЙ ПРОЛОНГИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ И ЛИГНОГУМАТА НА ЧЕРНОЙ СМОРОДИНЕ. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	10
1.1. Биологические свойства черной смородины и внесение удобрений при ее выращивании	10
1.2. Характеристика минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия.....	15
1.3. Влияние фолиарной обработки лигнотумом на физиолого- биохимические свойства растений.....	19
1.4. Фенольные соединения и их роль в антистрессовом механизме растений.....	24
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	30
2.1. Опыт 1. Мелкоделяночный полевой опыт.....	30
2.2. Опыт 2. Модельный опыт.....	33
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ ¹	38
3.1. Опыт 1. Мелкоделяночный полевой опыт.....	38
3.2. Опыт 2. Модельный опыт.....	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	108
ВЫВОДЫ	110
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	112
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	124

ВВЕДЕНИЕ

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. Мнатсакяна (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 foliarной 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 foliarной 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 foliarной 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 foliarной 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 foliarной 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 2-3М (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 «Агробιοтехнологии: 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 4 печатные работы, 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 8 таблиц, 51 рисунок, список литературы из 98 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.

ГЛАВА 1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ КАПСУЛИРОВАННЫХ УДОБРЕНИЙ ПРОЛОНГИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ И ЛИГНОГУМАТА НА ЧЕРНОЙ СМОРОДИНЕ. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Биологические свойства черной смородины и внесение удобрений при ее выращивании

Смородина относится к роду *Ribes*, который включает более 150 описанных видов кустарников, произрастающих в Северной Европе, Азии, Северной Америке, а также в горных районах Южной Америки и северо-западной Африки (Brennan, 1996).

Это растение представляет собой невысокий куст с сильным ароматом, вырастающий до 2 м в высоту (Rehder, 1986). Листья лопастные, до 10 см с каждой стороны, голые сверху, слегка опушенные с многочисленными сидячими ароматическими желёзками снизу. Кисти поникшие и несут от четырех до десяти цветков с красновато- или коричневатозелеными колокольчатыми гипантиями, загнутыми чашелистиками и беловатыми лепестками, примерно на две трети длиннее чашелистиков. Плоды шаровидные, до 10 мм в диаметре, при созревании обычно блестяще-черные, хотя существуют формы с зелеными и желтыми плодами (Liberty Hyde Bailey Hortorium, 1976).

Смородину выращивают из-за съедобных плодов и декоративных качеств. Черную смородину в основном выращивают для получения сока, для изготовления джемов, желе, начинок для пирогов, начинки для десертов, йогуртов, мороженого, минеральной воды, чая, конфет, духов, ликеров (таких как *creme de cassis* во Франции), для превращения белых вин в розовые и в качестве ароматизаторов и красителей для молочных продуктов (Brennan, 1996; Dale, 2000). Сок черной смородины имеет насыщенный вкус. Также признаны нутрицевтиками высокая цветопередача, содержание аскорбиновой кислоты и других антиоксидантов. Семена смородины содержат гамма-линоленовую кислоту и используются для получения лечебных экстрактов.

Смородина приспособлена к умеренным условиям. Она известна своей холодостойкостью и может выдерживать минимальные средне-зимние температуры -40 С или ниже (Harmat et al., 1990). Культивируемой смородине требуется от 800 до 1600 часов при температуре от 0 до 7 С для удовлетворения требований к спячке. Смородина плохо переносит высокие температуры в середине лета, особенно в сочетании с интенсивным солнечным светом. Повреждение листвы может произойти при 30°С. Для посадки обычно рекомендуют склоны, обращенные на север. В южном климате эти культуры обычно лучше всего растут на больших высотах. Для цветения требуется от 160 до 200 градусо-дней роста, а для плодоношения требуется от 120 до 140 безморозных дней (Harmat et al., 1990). Растения лучше всего растут на глубоких, органических, хорошо дренированных почвах с хорошей водоудерживающей способностью. рН почвы должен быть между 5,5 и 7,0.

Здоровые, продуктивные растения смородины требуют регулярного внесения удобрений, обычно начиная с весны после осенней посадки. Некоторые производители удобряют весенне-летнюю посадку небольшой дозой в год посадки. Молодые кусты нуждаются в меньшем количестве удобрений, чем взрослые растения. Зрелым насаждениям смородины ежегодно требуется около 100 кг/га азота, 20 кг/га фосфора и 40 кг/га калия (Harmat et al., 1990). В Северной Америке обычно рекомендуются удобрения, содержащие около 10% N, P₂O₅ и K₂O (10N–4,4P–8,3K). Стандарты концентрации питательных веществ в тканях листа, основанные на работе со смородиной и другими плодовыми культурами, были представлены Боулдом (1969) и Брэдфилдом (1969). Уровни питательных веществ колеблются в течение вегетационного периода, и рекомендации основаны на листьях, собранных примерно первого августа.

Цинк и медь относятся к числу жизненно необходимых микроэлементов, обеспечивающих полноценное развитие и рост черной смородины (*Ribes nigrum* L.). Они играют важную роль в функционировании фотосинтетического

аппарата, участвуют в синтезе белков и активируют ключевые ферментативные системы. Недостаток этих элементов может привести к нарушению физиологических процессов, снижению урожайности и ухудшению качества ягод. Вместе с тем, их избыточное накопление в растительной ткани может вызывать токсические эффекты. Особенно актуальна проблема накопления тяжелых металлов, таких как свинец (Pb) и кадмий (Cd), обладающих выраженным кумулятивным и токсичным действием. Эти элементы способны накапливаться в различных органах растений, нарушая обмен веществ, снижая продуктивность и ухудшая качества плодов (Барсукова, 1997; Мотылева, 2015).

Согласно литературным источникам (Мистратова и др., 2021), оптимальные диапазоны содержания макро- и микроэлементов в листовой ткани черной смородины составляют: азот – 2,1–2,8 %, фосфор – 0,4–0,6 %, калий – 1,1–2,0 %, магний – 6763–7848 мг/кг, медь – 3,4–7,7 мг/кг, цинк – 30,6–41,3 мг/кг, железо – 103,0–272,5 мг/кг, кобальт – 0,7–0,8 мг/кг, марганец – 38,7–58,9 мг/кг. Распределение элементов по органам растения характеризуется следующей иерархией: по содержанию азота – листья > побеги > корни > ягоды; по фосфору – листья > корни > ягоды; по калию – ягоды > листья > корни > ветви. Подобная закономерность отражает функциональную специфику органов и их роль в обмене веществ, где листья выступают в качестве основного депо питательных веществ в период вегетации (Рыбинцев и др., 2015). Согласно результатам исследования (Nour et al., 2014), в листьях чёрной смородины была зафиксирована наиболее высокая концентрация кальция, за которым по содержанию следуют калий и магний. Учёные также проанализировали влияние сроков сбора урожая на уровень минеральных элементов в листьях. Установлено, что максимальное накопление этих макроэлементов наблюдается в образцах, собранных в середине июня. Это может быть связано с активной фазой вегетации растения, когда процессы минерального обмена наиболее интенсивны.

По результатам исследований А.И. Рыбинцева и др. (2015), с ростом растения наблюдается определённое увеличение биологического потребления элементов питания, однако темпы выноса макроэлементов из почвы в третий и четвёртый годы жизни черной смородины остаются умеренными. Так, на третий год вегетации биологическое потребление составило: 61,8–104,9 кг азота (N) на гектар, 12,6–22,3 кг фосфора (P_2O_5) и 38,1–64,5 кг калия (K_2O)/га, в зависимости от сорта и схемы посадки. Применение удобрений оказывало положительное влияние на эти показатели. Следует подчеркнуть, что около 13–17 % макроэлементов, преимущественно азота, возвращаются в почву с опавшими листьями, тогда как лишь около 2 % выносятся с урожаем ягод.

Смородина восприимчива ко многим вредителям и болезням, которые мешают производству во всем мире. В Северной Америке наиболее серьезные проблемы связаны такими болезнями как пузырчатая ржавчина белой сосны и мучнистую росу. Некоторые из наиболее распространенных и/или серьезных насекомых-вредителей в настоящее время в Северной Америке: смородиновую тлю (*Cryptomyzus ribis* L.), смородиновую мотыльк (*Synanthedon tipuliformis* Cl.), смородиновую плодовую мушку и тихоокеанского плоскоголового мотылька (*Chrysobothris mali* Horn.) (Harmat et al., 1990).

В Северной Европе «Jonkheer van Tets» является ведущим сортом красной смородины с урожайностью от 10,1 до 15,7 т/га. Вручную человек может собрать около 4 или 8 кг черной смородины или красной смородины в час, соответственно. В Европе производители опрыскивают плоды, предназначенные для машинного сбора, 240 мкл/л (частей на миллион или ppm) этефона за 10–12 дней до сбора урожая, чтобы стимулировать опадение ягод и увеличить скорость и однородность сбора урожая (Harmat et al., 1990).

Смородина созревает примерно за 2 недели, в зависимости от сорта. Ее можно собирать в два сбора, чтобы получить ягоды максимальной зрелости, хотя большинство спелых ягод смородины остаются на кусте, не опадая и не

перезревая в течение нескольких недель. Ягоды обычно начинают созревать в июле, в зависимости от местоположения, но холодная погода весной и в начале лета может задержать созревание (Hummer, Barney, 2002).

Для использования в свежем виде смородину обычно собирают вручную в контейнеры емкостью от 250 до 500 мл. Корзины и плоски, предназначенные для малины, хорошо подходят для свежей смородины, но следует избегать сетчатых корзин, потому что ягоды смородины достаточно малы, и некоторые из них могут быть повреждены, зацепившись за сетку или продавив ее. Сортировка смородины производится сборщиками в поле. Для смородины, предназначенной для переработки, часто используются контейнеры объемом от 1 до 4 л. Смородина, собранная машинным способом, используется только для переработки. Смородина весит около 0,57 кг/л (Hummer, Barney, 2002).

Смородину, предназначенную для желе и других консервов, часто собирают немного недозрелой, потому что в это время содержание фруктового пектина самое высокое. Однако в США существует тенденция слишком рано собирать плоды смородины и крыжовника из-за неправильного представления о том, что спелые плоды не превращаются в желе во время приготовления. Незрелая смородина невкусна. Спелые ягоды вкуснее и могут эффективно использоваться для переработки. Для использования в свежем виде ягодам дают полностью созреть перед сбором (Hummer, Barney, 2002).

Кожура черной смородины жесткая, и охлажденные ягоды сохраняют свои качества в течение 1-2 недель, в зависимости от спелости и условий хранения. Смородину замораживают для длительного хранения (Hummer, Barney, 2002).

Плоды смородины богаты питательными веществами. В них мало калорий и натрия, но много витамина А, аскорбиновой кислоты (витамина С) и калия. Они являются умеренными источниками тиамина (витамина В1), ниацина (витамина В3) и кальция. Содержание витамина С в сортах черной смородины очень высокое по сравнению с другими фруктами и колеблется от 50 до 250

мг/100 г свежего веса (0,05–0,25%) (Brennan, 1996), но образцы дикорастущих плодов могут содержать и 800 мг/100 г сырого веса (0,8%). Количество витамина С в плодах зависит от сорта, места и погодных условий. Черная смородина богата антоцианами, общим содержанием фенолов и антиоксидантной способностью (Moyer et al., 2002a, 2002b). Также плоды содержат кумарины, дубильные и красящие вещества, минеральные соли, содержащие К, Na, Ca, Mg, Fe, P, S (Зазулина, 1994).

1.2. Характеристика минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия

Минеральные комплексные капсулированные удобрения пролонгированного действия (МККУПД) (такие как Osmocote, Ruscote и Basacote) действия находят широкое применение в практике выращивания ягодных культур благодаря способности обеспечивать поступление питательных веществ на протяжении длительного времени. Их эффективность обусловлена технологией контролируемого высвобождения, при которой элементы питания поступают к корням растений в соответствии с фазами роста. Это особенно важно для культур с продолжительным вегетационным циклом. Производитель заявляет, что они обеспечивают растения питательными веществами на протяжении всего периода роста – 2-3, 3-4 или 5-6 месяцев. Эти удобрения представлены в виде гранул, заключённых в полимерную смолистую оболочку, через которую постепенно проникает влага (Bosiacki et al., 2021). Производители удобрений заявляют, что эта оболочка биоразлагаемая, что требует дальнейших исследований. Под её воздействием внутренние компоненты растворяются, обеспечивая контролируемое и равномерное поступление элементов питания к корневой системе растений (Товстик и др., 2022). Ряд исследований продемонстрировало, что применение Osmocote на культурах, таких как голубика и малина, ведёт к увеличению урожайности, улучшению органолептических и биохимических свойств плодов (в частности, повышению содержания сахаров и витаминов), а также

укреплению корневой системы. Дополнительно было установлено, что данное удобрение снижает чувствительность растений к стрессам, связанным с водным режимом – засухой или переувлажнением (Борисова и др., 2022).

Российский аналог Osmocote – удобрение серии Ruscote – также характеризуется длительным периодом действия и стабильным высвобождением элементов. Оно показало положительный эффект в агротехнике зерновых культур (Мнатсаканян и др., 2023а; Мнатсаканян, 2023б), однако в отношении черной смородины его потенциал ранее не изучался. Наибольшую эффективность такие удобрения проявляют при совместном использовании с другими агрохимическими средствами. Их применение также отличается высокой технологичностью: достаточно однократного внесения за сезон, что существенно упрощает агротехнические работы. Замедленное поступление питательных веществ снижает риск токсичного накопления элементов и способствует улучшению физико-химических характеристик почвы.

Выбор в пользу минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия обусловлен рядом агрономических, экономических и экологических факторов. Во-первых, такие удобрения позволяют существенно сократить потери питательных веществ, которые могут происходить в результате различных процессов: физико-химических (например, выщелачивание, поверхностный сток, иммобилизация), биологических (денитрификация) и других. Использование составов с контролируемым высвобождением питательных элементов способствует снижению этих потерь (Кармацких, Редозубов, 2017). В ряде научных работ показано, что использование минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия позволяет снизить экологическую нагрузку за счёт уменьшения потерь азота, вызванных его вымыванием из почвы или испарением в атмосферу (Мухина и др., 2021).

Во-вторых, немаловажным фактором является экономическая эффективность. Благодаря пролонгированному действию удобрения можно вносить однократно, что обеспечивает стабильное питание растений на протяжении всего вегетационного периода и позволяет сократить затраты на многократные подкормки (Богачев, Дорофеева, 2022). Это, в свою очередь, снижает потребность в краткосрочном ручном труде, особенно в период интенсивного роста, когда требуются фолиарные обработки.

Кроме прямой экономии, удобрения, заключённые в полимерную оболочку, обеспечивают агрономические преимущества за счёт более равномерного питания. Это способствует снижению стрессовых реакций у растений и уменьшает вероятность фитотоксичности. Избыточная концентрация минеральных веществ, типичная при применении традиционных удобрений, может вызвать повреждение корневой системы, ожоги листьев, полегание и снижение устойчивости к болезням (Goyal, Huffaker, 1984). Минеральные комплексные капсулированные удобрения пролонгированного действия, напротив, способствуют лучшему укоренению, повышенной всхожести и качественным характеристикам урожая (Shaviv, Mikkelsen, 1993; Богомолова, 2016). Кроме того, при применении таких удобрений на культурах, таких как черника и малина, отмечается не только повышение урожайности, но и улучшение качественных характеристик плодов: увеличение содержания сахаров и витаминов, а также активное развитие корневой системы (Борисова, 2022).

Дополнительным преимуществом является улучшение доступности макро- и микроэлементов. В ряде почв, особенно карбонатных или с высоким уровнем фиксации ионов, элементы, такие как калий, фосфор, микроэлементы и др., становятся недоступными из-за химического связывания (иммобилизации). Однократное внесение растворимых форм часто приводит к их быстрой фиксации. В этом контексте удобрения с контролируемым высвобождением позволяют поддерживать стабильную концентрацию

доступных форм питательных веществ в ризосфере, увеличивая их усвоение растениями (Аверкина, Науменко, 2017; Гопп, 2021). Так, Shaviv и Mikkelsen (1993) зафиксировали значительно более высокое накопление фосфора в растениях при использовании NPK-удобрений пролонгированного действия по сравнению с традиционными фосфорными удобрениями.

Также наблюдаются синергетические эффекты между элементами питания, когда они высвобождаются синхронно. Например, присутствие аммония или калия в зоне корней может повышать доступность железа в щелочных карбонатных почвах, предположительно за счёт локального подкисления ризосферы (Kafkafi, Neumann, 1985). Аналогичный эффект был зафиксирован для аммония, увеличивающего усвоение фосфора при замедленной нитрификации, что также объясняется изменением pH и улучшением растворимости фосфатных соединений.

Технология пролонгированного действия удобрений, основанная на капсулировании питательных веществ в полимерные или биоразлагаемые оболочки, получила развитие ещё в середине XX века – одним из первых промышленных продуктов в этой категории стал препарат Osmocote®. Несмотря на доказанную эффективность таких удобрений в обеспечении стабильного питания растений и снижении агроэкологических рисков, их широкомасштабное производство и применение в Российской Федерации пока остаётся ограниченным. Как отмечают исследователи (Хузиахметов, 2021), этому препятствуют несколько факторов: слабая интеграция между производителями и конечными потребителями (фермерскими хозяйствами), дефицит комплексных полевых исследований, охватывающих различные почвенно-климатические зоны страны, а также определённая инертность аграрного сектора к внедрению инновационных решений.

Тем не менее, в последние годы наблюдается тенденция к росту интереса к технологиям контролируемого высвобождения в отечественном

агропромышленном комплексе. В разработке и адаптации капсулированных удобрений к условиям России участвуют такие предприятия, как «Уралхим» и «ЗМУ», что свидетельствует о постепенном расширении научно-производственного потенциала в данной области. Дополнительно, всё чаще в фокус исследований попадают экологические аспекты применения таких форм, включая биodeградацию полимерных оболочек, влияние на микробиоту почвы и эффективность усвоения элементов питания в долгосрочной перспективе.

Несмотря на их агротехническую ценность, остаётся открытым вопрос об экологических последствиях применения таких удобрений. В ряде случаев защитные оболочки содержат потенциально вредные вещества, такие как микропластик, фенол или формальдегид, способные высвободиться при разложении и оказывать токсическое воздействие на почвенные организмы и сами растения (Lawrencina et al., 2021; Isakov et al., 2024). В связи с этим в рамках нашего исследования особое внимание было уделено определению содержания фенольных соединений в составе минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия, а также мониторингу их высвобождения в процессе деградации оболочек. Проведение такого анализа критически важно для объективной оценки экологической безопасности данных препаратов и их долгосрочного влияния на агроэкосистему.

1.3. Влияние foliarной обработки лигногуматом на физиолого-биохимические свойства растений

Гуминовые вещества оказывают многостороннее действие на физиологические и биохимические процессы в растениях. Они способствуют активации фотосинтетической деятельности, улучшают дыхательные процессы, а также участвуют в регуляции синтеза нуклеиновых кислот, играющих ключевую роль в метаболизме растений (Jindo et al., 2020). При внесении в почву гуминовые соединения стимулируют активность ряда ферментов, способствуют повышению содержания хлорофилла в листовом аппарате, что, в свою очередь, помогает предотвратить развитие хлороза. Этот

эффект достигается за счёт улучшенного усвоения таких элементов, как магний и железо (Rotondo et al., 2018).

Кроме того, гуминовые вещества повышают устойчивость растений к неблагоприятным экологическим условиям. Это связано с усилением антиоксидантной защиты, включая рост концентрации перекиси водорода и других защитных соединений. Препараты на основе лигнина, входящие в состав многих гуминовых продуктов, содержат биологически активные компоненты и антиоксиданты, что делает их эффективными биостимуляторами при внекорневой (фолиарной) обработке сельскохозяйственных культур (Лапин и др., 2007). Подобно природным гуминовым кислотам, они также способны активизировать почвенную микробиоту, улучшать структуру почвы, повышать её водоудерживающую способность и способствовать формированию устойчивых агрегатов (Suada et al., 2017).

Одним из перспективных отечественных гуминовых препаратов является Лигногумат АМ. Лигногумат относится к группе гуминовых удобрений и производится на основе лигносульфонатов – побочных продуктов, образующихся при сульфитной варке лигнина в целлюлозно-бумажной промышленности (Novák et al., 2015.). Эти соединения подвергаются щелочной переработке и окислению, в результате чего образуются соли гуминовых и фульвовых кислот – биологически активные вещества, обладающие выраженными стимулирующими свойствами. Благодаря высокой степени полимеризации и наличию функциональных групп (карбоксильных, фенольных и др.), они способствуют усилению роста растений, повышают их устойчивость к стрессам, активизируют обменные процессы и улучшают структуру почвы. Он зарекомендовал себя как эффективное средство для повышения стрессоустойчивости растений, стимулирования роста и увеличения урожайности. Также препарат способен снижать токсическое воздействие избытка микроэлементов, таких как тяжелые металлы, на метаболизм растений (Сабырбайкызы, и др., 2020). Применение препарата

способствует улучшению качества урожая за счёт активации синтеза физиологически активных веществ, одновременно укрепляя иммунную систему растений и повышая их толерантность к неблагоприятным воздействиям окружающей среды, включая дефицит влаги, температурный стресс и заражение фитопатогенами.

Термин «лигногумат» впервые был предложен Спрингером (1938) для описания гумусоподобного вещества, отличающегося от традиционного почвенного гумуса меньшей степенью гумификации (так называемой «спелостью»), пониженным содержанием азота и повышенным присутствием сульфокислотных групп. Лигногумат по своему химическому составу и функциональным свойствам близок к гуминовым соединениям природного происхождения, однако отличается по ряду параметров. Его получают в результате термохимической трансформации лигносульфонатов – побочных продуктов целлюлозно-бумажного производства, в условиях повышенной температуры и давления. Эта искусственно инициируемая модификация по сути имитирует естественные процессы гумификации, происходящие при разложении растительного материала в природе (Holub et al., 2020).

В ходе производственного процесса происходит разрушение исходных полимерных структур лигнина и образование гумусоподобного вещества с разнообразным набором функциональных групп: карбоксильных, гидроксильных, карбонильных и сульфокислотных. По сравнению с гуминовыми веществами, извлечёнными из торфа, почв или донных отложений, лигногумат характеризуется меньшей молекулярной массой, более простой структурой и значительно большей гетерогенностью молекул. Одновременно он содержит меньше азота, но больше кислородсодержащих функциональных групп, что придаёт ему высокую реакционную способность и делает эффективным в качестве агрохимического стимулятора (Holub et al., 2020).

Интерес к исследованию влияния лигногуматов на биологическую активность почвы обусловлен их экологической безопасностью – благодаря природному происхождению сырья, из которого они синтезируются, а также сочетанием доступной стоимости и высокой агрономической эффективности (Canellas et al., 2015; Olk et al., 2018). В литературе представлено значительное количество работ, подтверждающих благоприятное воздействие гуминовых веществ на физико-химические свойства почвы, а также на ростовые и физиологические параметры растений (Nardi et al., 2002; Morard et al., 2010; Степанов и др., 2018). Кроме того, гумусовые соединения, включая лигногуматы, способны усиливать микробиологическую активность почвенной биоты, что проявляется в увеличении численности микроорганизмов, интенсификации их ферментативной активности, росте темпов минерализации органического вещества и повышении интенсивности процессов трансформации азотистых соединений (Пукальчик и др., 2017.).

Учитывая способность препарата усиливать защитные функции растений и повышать устойчивость к абиотическим и биотическим стрессам, особый интерес представляет его взаимодействие с минеральным питанием. Одним из значимых достоинств Лигногумата является его способность усиливать усвоение макро- и микроэлементов, тем самым повышая эффективность минерального питания. Это позволяет снизить нормы внесения традиционных удобрений на 20–30%, одновременно уменьшая антропогенное воздействие на агроэкосистему. Кроме того, Лигногумат обладает выраженным антистрессовым потенциалом, ускоряя адаптацию растений к внешним неблагоприятным условиям, включая стресс, вызванный агротехническими приёмами и факторами окружающей среды (Мушинский, Тихонова, 2019; Бойко и др., 2021).

На сегодняшний день дозозависимые эффекты и оптимальные условия применения лигногуматов остаются недостаточно изученными. По мнению Куликовой и соавторов (Kulikova et al., 2005), высокая вариативность

наблюдаемых биологических эффектов может быть связана со сложностью и гетерогенностью молекулярной структуры гуминовых веществ. В зависимости от концентрации лигногуматы способны оказывать как стимулирующее, так и ингибирующее влияние на жизнедеятельность почвенных микроорганизмов – в том числе бактерий и грибов – а также модифицировать общую биологическую активность почвы.

Совместное применение Лигногумата АМ с традиционными и современными минеральными удобрениями длительного действия – такими как Osmocote и Ruscote – позволяет достигать синергетического эффекта. Такая агрохимическая комбинация способствует более полному обеспечению растений элементами питания, улучшает усвоение макро- и микроэлементов, а также оказывает благоприятное влияние на физико-химические свойства почвы (Якименко, Терехова, 2011; Коваль, Огородникова, 2021).

Препарат Лигногумат проявляет свойства регулятора роста, оказывая комплексное положительное влияние на морфофизиологическое развитие растений. Его применение способствует удлинению побегов, активации ферментных систем, а также усилению процессов фотосинтеза. Эти эффекты обуславливают повышение устойчивости растений к неблагоприятным абиотическим факторам, что особенно важно для регионов с резко континентальным климатом и зон рискованного земледелия (Тихонова и др., 2018).

На сегодняшний день оптимальная доза применения лигногумата окончательно не установлена, что обуславливает необходимость подбора эффективной концентрации с учетом конкретной культуры, условий выращивания и целей агротехнологии. Корректный выбор дозировки играет ключевую роль в повышении урожайности, улучшении качества продукции и усилении устойчивости растений к стрессовым факторам среды, особенно в зонах рискованного земледелия. Следует учитывать, что в широком диапазоне

концентраций лигногуматы могут оказывать как стимулирующее, так и подавляющее действие на микробиоту почвы, включая бактерии и грибы, а также оказывать влияние на общую биологическую активность почвы. Так, например, в одном из исследований (Неганова и др., 2012) был использован 0,05% раствор лигногумата для опрыскивания, что позволило выявить положительное влияние на развитие растений при определённых условиях.

В условиях растущего интереса к природным биостимуляторам количество новых соединений подобного типа продолжает увеличиваться, что требует более глубокого изучения их механизмов действия. Особое значение приобретает научно обоснованный подбор дозировок и условий применения, направленных на оптимизацию продуктивности, улучшение качественных характеристик урожая и повышение стрессоустойчивости растений в агроэкосистемах умеренной климатической зоны.

1.4. Фенольные соединения и их роль в антистрессовом механизме растений

При воздействии неблагоприятных внешних факторов, таких как водный дефицит (засуха), перегрев, интенсивное ультрафиолетовое излучение или заражение фитопатогенами, в клетках растений значительно возрастает уровень активных форм кислорода (АФК, или ROS). Эти молекулы, обладающие высокой реакционной способностью, при чрезмерном накоплении становятся причиной окислительного стресса, нарушающего клеточные структуры – липидные мембраны, белки и даже генетический материал. В ответ на подобное нарушение клеточного гомеостаза растения мобилизуют защитные механизмы, включая активацию антиоксидантных систем, одной из ключевых составляющих которых является синтез фенольных соединений.

Фенольные соединения представляют собой важные вторичные метаболиты, активно участвующие в основных биохимических процессах растений, таких как дыхание, фотосинтез, гликолиз и окислительное

фосфорилирование. Эти вещества выполняют не только структурную роль – участвуя в формировании клеточной стенки, – но и обеспечивают защиту растений от воздействия патогенов. Помимо этого, фенолы проявляют выраженные антимикробные и противовирусные свойства, что способствует адаптации растений к различным стрессовым факторам окружающей среды (Пояркова, Сапарклычева, 2019).

К числу наиболее эффективных природных антиоксидантов относятся флавоноиды и антоцианы. Эти соединения способны связывать и нейтрализовать свободные радикалы, тем самым предотвращая их разрушительное воздействие на живые клетки и ткани (Dumanović et al., 2021; Ma et al., 2021; Li et al., 2024; Chachar et al., 2024).

Черная смородина (*Ribes nigrum* L.) особенно богата антоцианами, которые определяют её интенсивную окраску и высокую биологическую активность. Среди них доминируют такие соединения, как цианидин-3-О-глюкозид и дельфинидин-3-О-глюкозид, обладающие выраженным антиоксидантным потенциалом. Их содержание в ягодах может достигать 2–4 г на килограмм свежего сырья, что обуславливает не только ценные питательные свойства, но и устойчивость растения к стрессовым воздействиям (Cao et al., 2021)

Листья и плоды чёрной смородины (*Ribes nigrum* L.), относящейся к семейству крыжовниковых (Grossulariaceae), представляют собой богатый источник фенольных соединений, обладающих выраженной антиоксидантной и противовоспалительной активностью (Беляева, 2009). В составе ягод выявлены такие мощные антиоксиданты, как эпигаллокатехин и эпигаллокатехин-3-галлат, которые доминируют в фенольном профиле экстрактов плодов черной смородины (Butnariu, 2014; Hovhannisyan et al., 2022).

Содержание фенольных соединений в чёрной смородине может значительно варьироваться в зависимости от сорта растения, условий его выращивания, сроков сбора урожая, а также применяемых аналитических методик. Листья растения, в свою очередь, характеризуются более широким и насыщенным спектром биоактивных веществ – в их составе обнаруживаются флавоноиды (в том числе кверцетин и рутин), антоциановые соединения, а также различные фенольные кислоты, которые в совокупности обеспечивают мощное антиоксидантное действие (Staszowska-Karkut, Materska, 2020; Minasyan et al., 2024).

В частности, концентрация фенолов в листьях варьирует в пределах от 40 до 87 мг галловой кислоты в пересчёте на грамм сухого вещества (mg GAE/g DW). Наиболее высокие значения фиксируются в определённые периоды роста, в том числе в середине июня (Karaagac, Şahan, 2020; Staszowska-Karkut, Materska, 2020). Некоторые авторы указывают, что содержание фенольных соединений может достигать $84,1 \pm 1,6$ мг GAE/g DW, при этом в состав входят биологически активные компоненты, такие как антоцианы, флавоноиды и фенольные кислоты (Minasyan A. et al., 2024).

В ягодах содержание фенольных соединений также подвержено значительным колебаниям в зависимости от сорта и условий культивирования. Так, в ягодах сорта Rosenthal общее содержание фенольных веществ может достигать 123,22 мг GAE/g, а у сорта Boskoop Giant – 112,01 мг GAE/g (Karaagac, Şahan, 2020). Тем не менее, в большинстве случаев фенольные соединения в ягодах накапливаются в меньшем количестве по сравнению с листьями и находятся в диапазоне от 35 до 68 мг GAE на грамм свежего веса (Staszowska-Karkut, Materska, 2020). Так, в других исследованиях (Громова и др., 2021; Чугунова и др., 2021) при анализе химического состава ягод черной смородины было зафиксировано максимальное содержание фенольных соединений в пределах 627,9–643 мг-эквивалентов галловой кислоты на 100 г свежего сырья. Эти различия подчеркивают высокую вариабельность

накопления фенольных соединений и необходимость комплексного подхода к оценке биохимического состава плодов.

Разнообразие данных о концентрации фенольных соединений в ягодах чёрной смородины может быть обусловлено не только сортовыми особенностями и агроклиматическими условиями, но и режимами минерального питания растений. В частности, исследования показали, что применение азотных удобрений оказывает значительное влияние на уровень содержания общих фенолов, флавоноидов и на антиоксидантную активность. При этом избыточное внесение азота способно снижать накопление фенольных соединений в растениях (Zhao C. et al., 2021; Chen et al., 2022; Ковалева, Ковалев, 2023). Это подчёркивает важность соблюдения сбалансированных доз удобрений при выращивании культур с высоким содержанием биоактивных веществ, таких как чёрная смородина.

Одной из ключевых групп фенольных соединений, присутствующих в чёрной смородине, являются антоцианы – мощные природные антиоксиданты, определяющие окраску ягод и их биологическую активность. Их содержание, как и общий уровень фенолов, зависит от множества факторов, включая сортовую принадлежность, агротехнику, климатические условия и используемые аналитические методы. В среднем концентрация антоцианов в ягодах чёрной смородины составляет 200-700 мг/100 г свежего веса (Oszmiański, Wojdyło, 2009). Эти соединения играют важную роль в формировании функциональных свойств ягоды и её ценности для питания и фармакологии.

В сочетании с богатым содержанием основных макроэлементов – азота, фосфора и калия – чёрная смородина представляет собой культуру с высокой пищевой и фармакологической ценностью. Листья рассматриваются как перспективное растительное сырьё для использования в фармацевтической и пищевой промышленности, а ягоды, благодаря насыщенности антоцианами и

другими антиоксидантами, продолжают оставаться ценным объектом для функционального питания и профилактической медицины (Беляева, 2009).

Листья и плоды чёрной смородины (*Ribes nigrum* L.) являются не только ценным источником фенольных соединений, но и содержат значительное количество макроэлементов, играющих важную роль в физиологических и биохимических процессах растений. Макроэлементы необходимы как для общего роста и развития, так и для активации путей синтеза вторичных метаболитов, включая флавоноиды, антоцианы и другие фенольные вещества. Между содержанием питательных элементов и накоплением фенолов прослеживается чёткая взаимосвязь. Так, азот участвует в формировании ферментных систем, ответственных за биосинтез фенольных соединений, калий способствует повышению антиоксидантной активности за счёт стабилизации фенольных структур, а фосфор обеспечивает энергетическую подпитку данных биохимических реакций (Петрова, Кузнецова, 2014; Степанова, Луговая, 2019).

Под воздействием стрессовых факторов – таких как присутствие тяжёлых металлов, дефицит влаги или резкие температурные колебания – растения часто демонстрируют увеличение содержания фенольных соединений. Это связано с их функцией в системах антиоксидантной защиты и адаптационных механизмах, позволяющих смягчить влияние неблагоприятных условий (Курамшина, Смирнова, 2019). Таким образом, рост уровня фенольных метаболитов может рассматриваться как биохимический маркер стресса у растений.

Применение минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия, таких как Osmocote, Basacote, Ruscote и их аналоги, оказывает заметное влияние на физиолого-биохимические характеристики растений. Эти удобрения обеспечивают равномерное и длительное поступление элементов питания, что способствует не только

увеличению вегетативной массы и устойчивости растений, но и активизации вторичного метаболизма, включая синтез фенольных соединений. Исследования показывают, что применение Osmocote, например, приводит к росту содержания калия и магния в тканях растений – элементов, участвующих в биохимическом пути образования антиоксидантов, таких как антоцианы и флавонолы (Bosiacki et al., 2021).

Таким образом, сбалансированное питание, обеспечиваемое МККУПД, не только способствует продуктивности и качеству урожая, но и опосредованно влияет на наращивание уровня биологически активных соединений. Это особенно актуально для ягодных культур, включая чёрную смородину, которая благодаря высокому содержанию полифенолов представляет интерес как функциональный пищевой продукт и потенциальный источник сырья для фармацевтической промышленности.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование включало два взаимодополняющих эксперимента: мелкоделяночный полевой опыт (Опыт 1) и модельный лабораторный опыт (Опыт 2), что позволило всесторонне оценить влияние различных типов удобрений на агрохимические параметры почвогрунта, морфометрические показатели растений, а также на количество и качество урожая чёрной смородины. Мелкоделяночный полевой опыт был направлен на изучение долговременного действия удобрений в реальных условиях выращивания культуры, тогда как модельный лабораторный эксперимент позволил детально исследовать процессы высвобождения элементов питания из минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия, что обеспечило комплексный анализ физиолого-биохимических и морфометрических откликов растений на агрохимическую нагрузку и дало возможность установить причинно-следственные связи между элементным составом, физиологическим ответом и продуктивностью растений.

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 (*Ribes nigrum* L.) 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 наполнен новым плодородным почвогрунтом, соответствующим требованиям ГОСТ Р 53381–2009. Состав почвогрунта (по объёму): верховой торф – 20 %, песок – 10 %, суглинок – 10 %, плодородный грунт – 60 % (производство компании ООО «Грин Трейд»). Агрохимические характеристики почвогрунта: pH (солевой) – 7,5; содержание нитратного азота – 15,7 мг/кг, аммонийного азота – 46,0 мг/кг; подвижного

фосфора (P_2O_5) – 542,0 мг/кг; подвижного калия (K_2O) – 300,0 мг/кг, подвижного цинка (Zn) – 37,3 мг/кг почвы, подвижной меди (Cu) – 10,7 мг/кг почвы.

В качестве минеральных удобрений применяли традиционные (аммиачная селитра, двойной суперфосфат, хлористый калий), так и минеральные комплексные капсулированные удобрения пролонгированного действия (МККУПД): Osmocote Bloom 2–3М (ICL, Нидерланды) - 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 (ООО ТД ЗМУ «Флоралайф»), 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 почвенному внесению проводили foliarную обработку растений биостимулятором Лигногумат АМ (0,05 % водный раствор), разработанный компанией ООО НПО «Реализация Экологических Технологий». Опрыскивания выполняли методом 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) (табл. 1, рис. П.1-2): 1. Контроль – почвогрунт без внесения удобрений и обработки в 1-й год. 2. ЛГ – почвогрунт без удобрений + опрыскивание Лигногуматом АМ. 3. NPK + ЛГ – почвогрунт + аммиачная селитра (17,4 г/м²), двойной суперфосфат (18 г/м²), хлористый калий (15 г/м²) + Лигногумат АМ. 4. Osmocote + ЛГ – почвогрунт + Osmocote Bloom 2–3М (50 г/м²) + Лигногумат АМ. 5. Ruscote + ЛГ – почвогрунт + Ruscote Цветочный (50 г/м²) + Лигногумат АМ. 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).

Таблица 1. Схема мелкоделяночного опыта

Вариант	Почвенное применение	Фолиарная обработка Лигногуматом АМ, 0,05%	Кол-во растений	Всего растений
Контроль	Нет	Нет	5	15
ЛГ	Нет	Да	5	15
НПК + ЛГ	Аммиачная селитра (17,4 г/м ²), двойной суперфосфат (18 г/м ²), хлористый калий (15 г/м ²)	Да	5	15
Osmocote + ЛГ	Osmocote Bloom 2-3М (50 г/м ²)	Да	5	15
Ruscote + ЛГ	Ruscote Цветочный (50 г/м ²)	Да	5	15
НПК	Аммиачная селитра (17,4 г/м ²), двойной суперфосфат (18 г/м ²), хлористый калий (15 г/м ²)	Нет	5	15
Osmocote	Osmocote Bloom 2-3М (50 г/м ²)	Нет	5	15
Ruscote	Ruscote Цветочный (50 г/м ²)	Нет	5	15
Всего растений				120

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 роста многолетних культур, в том числе ягодных кустарников, происходит интенсивное наращивание вегетативной массы, что обуславливает необходимость повышения уровня обеспечения растений азотом, калием и фосфором (Михайлова, 2012). С учетом возрастающего потребления элементов питания у многолетних культур на втором и третьем году вегетации, дозы минеральных удобрений были скорректированы: в 2023 г. – 70 кг по д.в. N/га, 40 кг по д.в. P₂O₅/га, 105 кг по д.в. K₂O/га; в 2024 г. – 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 г и в 2024 г

по 10 кг по д.в. N/га и по 20 кг по д.в. N/га, соответственно. На 2-й и 3-й год исследования удобрения вносили равномерно по поверхности 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 г. и продолжался в течение 21 суток, 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 солнечного освещения. Для исключения воздействия света все круглодонные колбы накрывали защитными колпаками, изготовленными из крафтовой бумаги (рис. П. 3).

Целью данного опыта стало изучение процессов высвобождения питательных элементов из минеральных комплексных капсулированных 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 удобрения были взвешены по 1,34 г удобрений 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 герметизировали бумажными пробками, а сверху закрывали крафтовыми колпаками.

По завершении опыта капсулированные удобрения извлекали из водных растворов 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 в течение 21 суток. Определение общего содержания фенольных соединений в растворе проводили фотометрическим методом с использованием реактива Фолина–Чокальтеу, результаты выражались в мг-эквивалентах галловой кислоты на грамм вещества (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

Образцы почвогрунта отбирали с глубины 0-10 см в конце вегетационного периода, согласно ГОСТ Р 58595–2019. Для каждого варианта формировали смешанный образец. Листья для анализа собирали в конце августа, ягоды – в июле. Все растительные образцы сушили на воздухе. Полив проводили по необходимости до уровня 60–70 % от полной влагоемкости почвы.

Агрохимические показатели почвогрунта определяли по следующим методикам, согласно ГОСТ Р 53381-2009: pH – 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); обменных кальция и магния - комплексонометрическим методом, подвижные формы цинка, меди, свинца и кадмия определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе ААС-3 фирмы «Hitachi» (Япония) в ацетатно-аммонийной (ААМ) вытяжке (Практикум по агрохимии, 2001).

За 2022-2023 гг. получены данные по средним приростам побега, площади листьев, массу ягод с 1 м², массе 50 ягод и количество 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 с использованием концентрированной серной и хлорной кислоты в качестве катализатора. Азот – методом Кьельдаля; фосфор – фотометрически по Дениже (фотометр КФК-3-01 «ЗОМЗ», Россия); калий – на фотометре «LEKI FP640» (Финляндия); кальция и магния – комплексонометрическим методом. 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) и тяжелых металлов (Pb, Cd) определяли после сухого озоления атомно-абсорбционным методом на приборе ААС-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) (табл. 2). Агроклиматическую характеристику тёплого периода года наиболее адекватно отражает гидротермический коэффициент по Г. Т. Селянинову (Селянинов,

1928), поскольку он учитывает одновременно два ключевых климатических параметра – количество атмосферных осадков и температурный режим. ГТК рассчитывается как отношение суммы осадков (в мм) за определённый период года к сумме среднесуточных температур воздуха выше 10 °С за тот же период, умноженное на коэффициент 0,1. По значению данного показателя можно судить о степени увлажнения территории. В частности, значения ГТК интерпретируются следующим образом: менее 0,2 – крайне засушливые условия; 0,2-0,4 – сильная засуха; 0,4-0,6 – умеренная засушливость; 0,6-0,7 – слабая засуха; 0,7-1,0 – недостаточное увлажнение; 1,0-1,4 – оптимальное увлажнение; 1,4-1,6 –повышенная влажность; более 1,6 – избыточное увлажнение.

Гидротермические коэффициенты Селянинова (ГТК), 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).

Таблица 2. Гидротермические коэффициенты Селянинова (помесячно)

Год	Месяц	ГТК	Характеристика ГТК
2022	июнь	0,77	недостаточное увлажнение
	июль	1,19	оптимальное увлажнение
	август	0,04	крайне засушливые условия
	сентябрь	1,72	избыточное увлажнение
2023	май	0,72	недостаточное увлажнение
	июнь	1,62	избыточное увлажнение
	июль	3,22	избыточное увлажнение
	август	0,40	умеренная засушливость
	сентябрь	0,23	сильная засуха
2024	май	0,50	умеренная засушливость
	июнь	2,80	избыточное увлажнение
	июль	0,98	недостаточное увлажнение
	август	0,87	недостаточное увлажнение
	сентябрь	0,18	крайне засушливые условия

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 ОБСУЖДЕНИЕ¹

3.1. Опыт 1. Мелкоделяночный полевой опыт

Одним из важнейших показателей физиологического состояния растений, отражающих эффективность действия агрохимических препаратов, являются морфометрические характеристики. Изменения длины побегов, площади листьев, а также массы и количества плодов позволяют судить о степени воздействия удобрений и регуляторов роста на вегетативное и генеративное развитие растений.

¹Ключевые результаты, представленные в данной главе, были опубликованы автором в рецензируемых научных журналах, рекомендованных для использования при защите диссертации 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 (Импакт-фактор 0,617 (РИНЦ)). 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 (Импакт-фактор 0,775 (РИНЦ)). (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 (Импакт-фактор 0,323(РИНЦ))].

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. – № 21. – С.10-16. – EDN: JZHCNI (Импакт-фактор 0,339 (РИНЦ)) (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 (Импакт-фактор 0,775 (РИНЦ)). (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 (Импакт-фактор 0,323 (РИНЦ))].

В рамках настоящего исследования была проведена оценка ключевых морфометрических параметров чёрной смородины (*Ribes nigrum* L.) в условиях различного питания в течение трёх лет вегетации.

Ниже приведён сравнительный анализ динамики роста и продуктивности растений по основным морфологическим признакам. Были проанализированы такие параметры, как площадь листьев, масса ягод с 1 м², масса 50 ягод, количество кистей, число ягод в кисти, а также величина прироста побега.

В течение трёх лет наблюдалась устойчивая тенденция к снижению площади листа во всех вариантах, особенно в 2024 г. (рис. 1, табл. П.1). Так, в контроле этот показатель снизился с 36,2 см² (2022 г.) до 27,1 см² (2024 г.), а в варианте с наибольшими значениями (Ruscote) с 56,9 до 54,0 см². Самые высокие значения в 2022 г. были в варианте Ruscote + ЛГ (57,1 см²), а минимальные в Контроле (36,2 см²). Несмотря на снижение, в 2024 г. варианты с МККУПД (в частности, Ruscote) сохраняли значения наибольшей площади листьев, что может свидетельствовать о лучшем физиологическом состоянии растений при их применении.

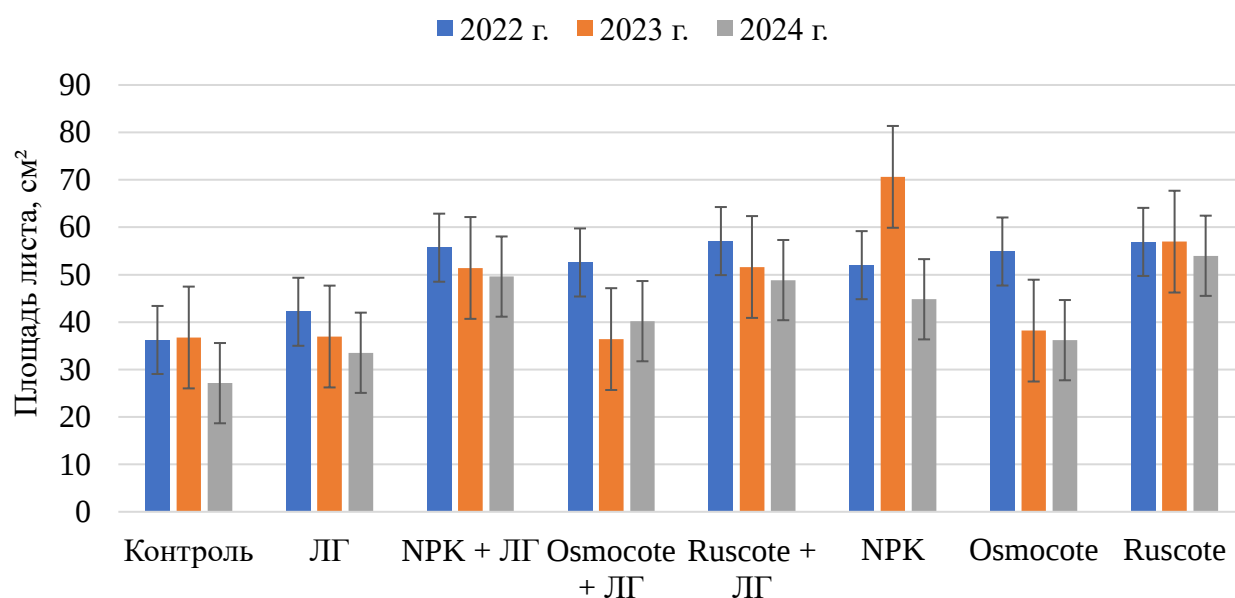


Рисунок 1. Площадь листа после вегетационного сезона за 3 года, см². Вертикальными линиями на графике отмечено значение НСР_{0,05}.

На основе анализа, 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 отличаются между собой. На варианте Ruscote + ЛГ отмечены наибольшие значения площади листа и достоверно отличается от большинства остальных вариантов. Контрольный вариант и ЛГ показывают достоверно меньшие значения по сравнению с вариантами, где применялись минеральные удобрения.

Самый высокий урожай ягод в 2023 г. показали варианты NPK (574,6 г/м²), NPK + ЛГ (542,5 г/м²), Ruscote + ЛГ (402,5 г/м²), а минимальный - ЛГ (64,9 г/м²) (табл. 3). В 2024 г. максимальный урожай был также получен в вариантах NPK (668,7 г/м²), NPK + ЛГ (328,5 г/м²), Ruscote + ЛГ (523,2 г/м²), а наименьший - в варианте ЛГ (15,0 г/м²), что указывает на неэффективность одной фолиарной обработки без внесения минеральных удобрений. Вариант Контроль показал самую низкую урожайность в исследуемый период - 80,8 г и 23,2 г, соответственно. 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 с максимальной урожайностью - Ruscote + ЛГ, NPK + ЛГ и NPK, которые статистически превосходили другие варианты. Osmocote и его комбинации давали урожай выше контроля, но значительно уступали Ruscote + ЛГ, NPK + ЛГ и NPK. Таким образом, именно традиционные минеральные удобрения и Ruscote в сочетании с Лигногуматом АМ оказались наиболее эффективными для повышения урожайности ягод чёрной смородины.

Таблица 3. Масса ягод с 1 м² (за 2023-2024 гг.), г (среднее ± ошибка опыта)

Вариант	Масса ягод с 1 м ² , г	
	2023 г.	2024 г.
Контроль	80,8±6,73	23,2±11,45
ЛГ	64,9±34,39	15,0±10,89
NPК + 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
NPК	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 достигала максимума в варианте NPK (102,5 г и 87,9 г, соответственно), что указывает на стабильное влияние традиционных удобрений на этот показатель (рис. 2-4, табл. П. 2). Минимальные значения массы 50 ягод были зафиксированы в вариантах ЛГ (57,1 г в 2023 г. и 43,1 г в 2024 г.) и Контроль (63,6 г в 2023 г. и 50,3 г в 2024 г.). По количеству кистей и количеству ягод в кисти лидировали следующие варианты: NPK (количество кистей - 114,0 шт. в 2023 г., 175,5 шт. в 2024 г. и количество ягод в кисти - 2,9 шт. в 2023 г., 2,2 шт. в 2024 г.), Ruscote + ЛГ (количество кистей - 97,0 шт. в 2023 г., 177,7 шт. в 2024 г. и количество ягод в кисти - 2,8 шт. в 2023 г., 2,2 шт. в 2024 г.), NPK + ЛГ (количество кистей - 130,3 шт. в 2023 г., 132,7 шт. в 2024 г. и количество ягод в кисти - 2,5 шт. в 2023 г., 1,9 шт. в 2024 г.). Варианты Контроль и ЛГ имели достоверно меньшие значения количества ягод по сравнению с другими вариантами, особенно с NPK + ЛГ, Ruscote + ЛГ и NPK. Особенно выражены различия между вариантами ЛГ и NPK. 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. Особенно высокие значения были отмечены у варианта NPK и Ruscote + ЛГ. Это подтверждает, что полноценное минеральное питание совместно с

фолиарными обработками лигногуматом стимулировали не только увеличение массы ягод, но и генеративную активность растения (число кистей, ягоды в кисти).

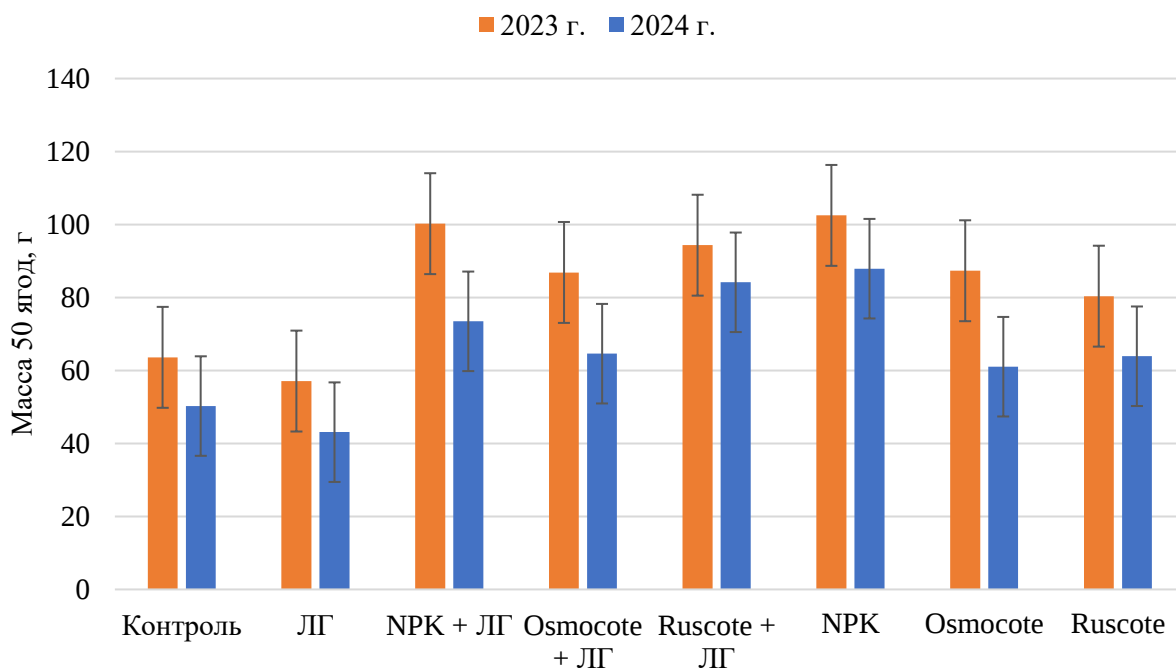


Рисунок 2. Масса 50 ягод (за 2023-2024 гг.), г. Вертикальными линиями на графике отмечено значение ошибки опыта.

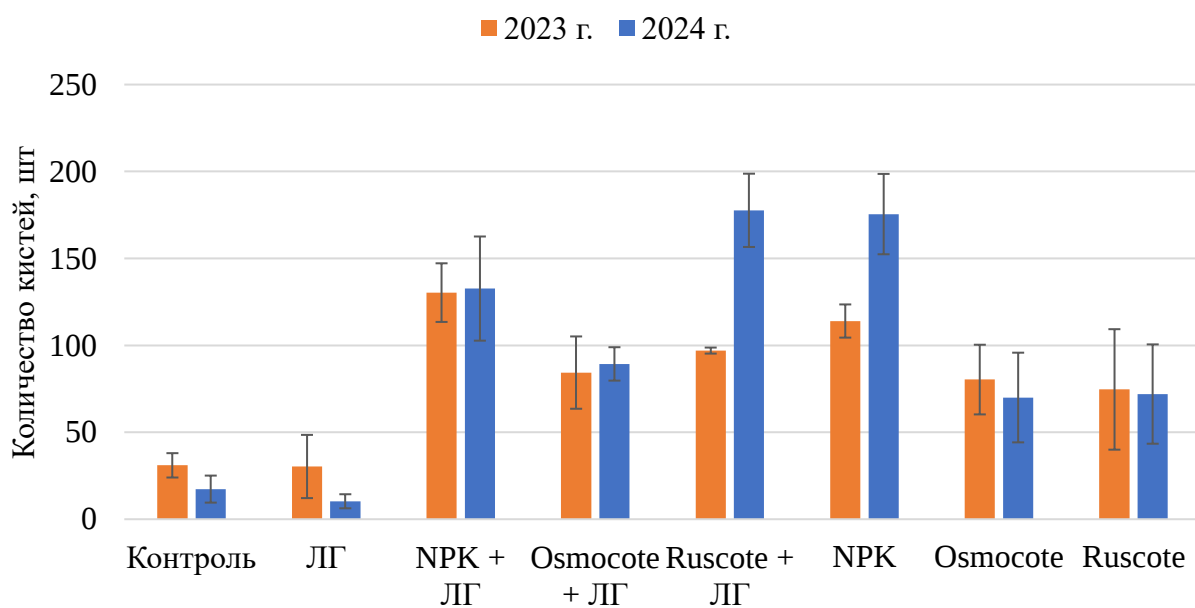


Рисунок 3. Количество кистей (за 2023-2024 гг.), шт. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

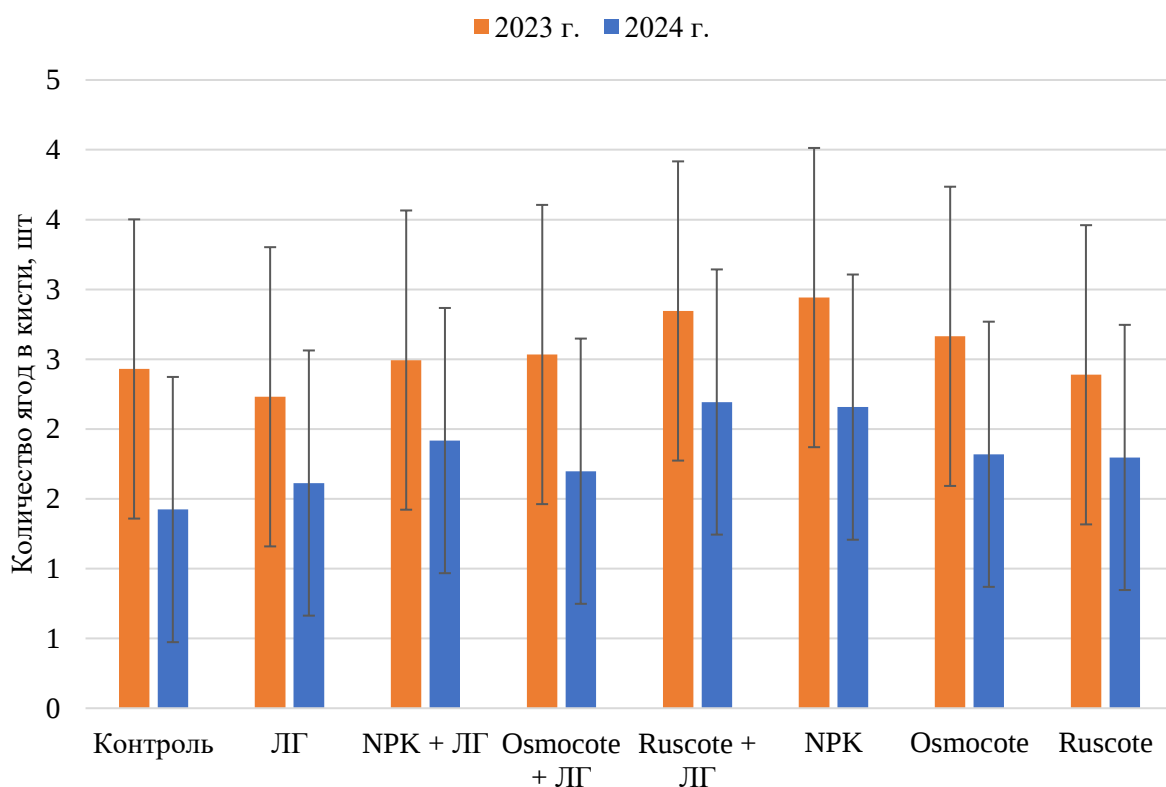


Рисунок 4. Количество ягод в кисти (за 2023-2024 гг.), шт. Вертикальными линиями на графике отмечено значение $НСР_{0,05}$.

Максимальный прирост побегов в 2022 г. наблюдали в варианте Osmocote (38,3 см), а в 2023 г. наибольший прирост отмечен в вариантах NPK + ЛГ (22,7 см) и NPK (21,5 см) (рис. 5, табл. П.3). Самые низкие значения были зафиксированы в варианте Osmocote (13,0 см) в 2023 г. Общее снижение прироста во второй год может быть связано с возрастной динамикой растения и перераспределением питательных веществ в сторону генеративных органов.

Значимые различия в приросте побегов наблюдались между вариантом ЛГ и практически всеми другими вариантами, особенно с вариантом NPK, который показал наивысший прирост побегов. Это указывает на то, что недостаток минерального питания может ограничивать вегетативный рост растений.

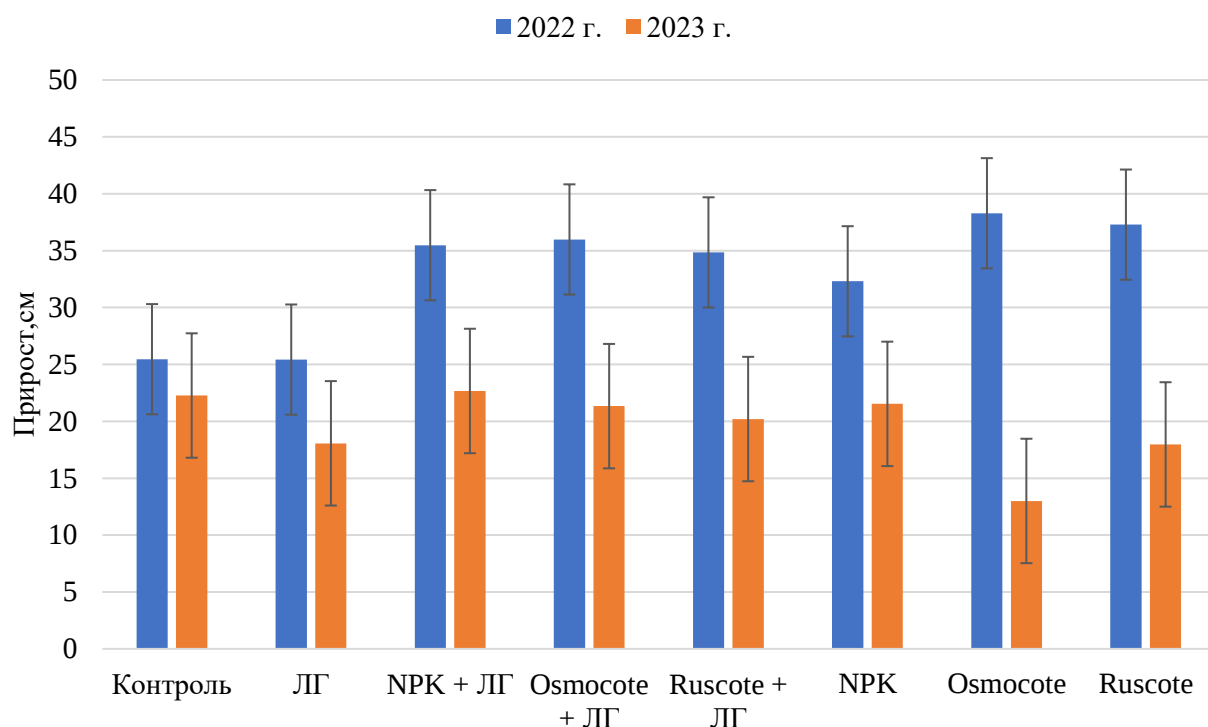


Рисунок 5. Величина прироста побега (2022-2023 гг.), см. Вертикальными линиями на графике отмечено значение $HCP_{0,05}$.

Корреляционный анализ между морфометрическими показателями черной смородины за 2023-2024 гг. позволил выявить ряд выраженных взаимосвязей, отражающих взаимодействие физиологических и продуктивных признаков растения. Наиболее высокая положительная корреляция наблюдалась между урожайностью и массой 50 ягод ($r = 0,95$), что указывает на прямую зависимость величины общего урожая от средней массы плодов. Также была установлена сильная связь между урожайностью и числом ягод в кисти ($r = 0,86$), а также 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.

Важной являлась также высокая корреляция между массой ягод и числом ягод в кисти ($r = 0,90$), а также между массой ягод и количеством кистей ($r = 0,63$). Это говорит о комплексном характере формирования продуктивности,

при котором важную роль играют как морфометрические характеристики соцветий, так и масса отдельных ягод.

Сильная положительная корреляция также была обнаружена между количеством ягод в кисти и количеством кистей ($r = 0,89$), а также с приростом побегов ($r = 0,84$) дополнительно подтверждает, что вегетативное развитие растений (особенно побегообразование) тесно связано с их продуктивностью.

За время проведения исследования pH почвогрунта изменился незначительно (рис. 6, табл. П.4). В 2022 г. наибольшее значение pH - 7,8 зафиксировано в варианте с применением удобрения Ruscote в сочетании с лигногуматом, что свидетельствует о слабовыраженном подщелачивании почвенной среды. Для контрольного варианта отмечено минимальное значение кислотности – pH 7,4 (рис. 6). В последующие годы (2023 и 2024 гг.) на участках, где использовались Ruscote и Osmocote, наблюдали увеличение pH на 0,1–0,2 единицы. Варианты с гранулированными удобрениями не демонстрировали существенных изменений кислотности, тогда как в вариантах без минеральных удобрений (Контроль) и с внесением только лигногумата также отмечен рост pH на 0,1–0,2.

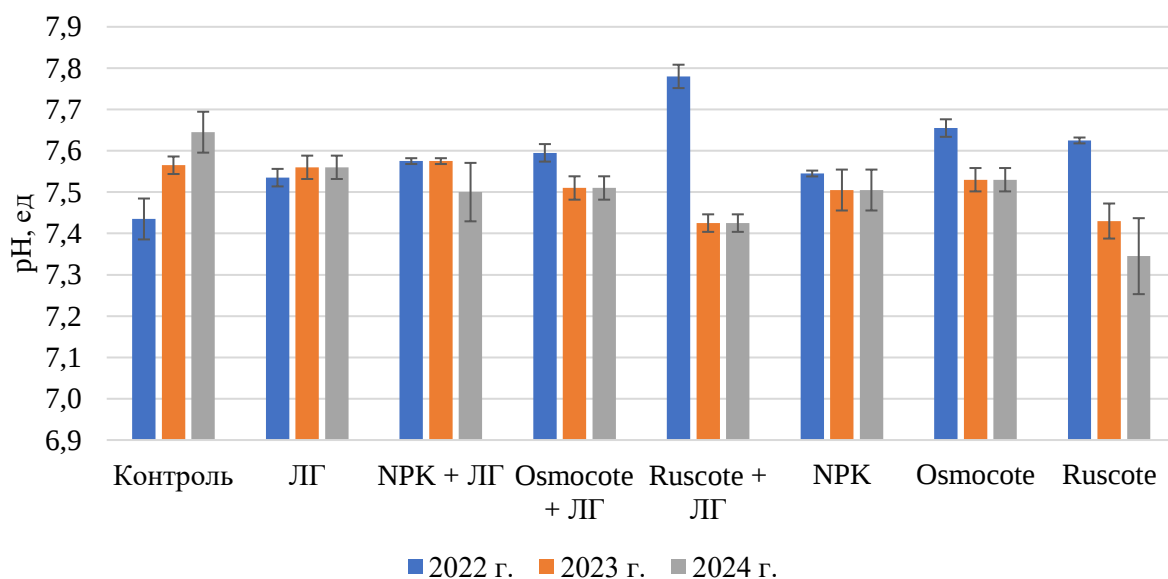


Рисунок 6. Значения pH солевого почвогрунта, ед. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

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: в 2022 г. – $F = 58,0$ при $p < 0,001$; в 2023 г. – $F = 14,8$ при $p = 0,001$; в 2024 г. – $F = 5,5$ при $p = 0,024$ (табл. 4).

Таблица 4. Достоверность влияния 2-х изученных факторов и их взаимодействия на агрохимические показатели почвогрунта после вегетации (дисперсионный анализ ANOVA)

Фактор	pH сол		NH ₄ ⁺		NO ₃ ⁻		P ₂ O ₅		K ₂ O	
	2022 г.									
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
Лигногумат АМ	21,0	0,002	0,4	0,53	4,3	0,071	15,4	0,004	9,9	0,014
Удобрение	58,0	0,000	2,0	0,20	21,9	0,000	77,6	0,000	29,7	0,000
Лигногумат АМ*Удобрение	15,0	0,001	2,0	0,20	17,7	0,001	130,0	0,000	46,0	0,000
2023 г.										
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
Лигногумат АМ	0,4	0,535	1,2	0,30	1,7	0,230	0,2	0,697	111,7	0,000
Удобрение	14,8	0,001	0,2	0,87	394,3	0,000	44,9	0,000	22,6	0,000
Лигногумат АМ*Удобрение	1,7	0,237	0,2	0,90	83,9	0,000	10,7	0,004	3,9	0,056
2024 г.										
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
Лигногумат АМ	0,0	0,888	0,5	0,48	2,7	0,140	1,5	0,250	5,8	0,042
Удобрение	5,5	0,024	2,6	0,13	147,0	0,000	34,7	0,000	73,2	0,000
Лигногумат АМ*Удобрение	0,6	0,657	2,3	0,16	162,8	0,000	12,4	0,002	28,9	0,000

Максимальная концентрация нитратного азота была зафиксирована в варианте NPK с применением гранулированных удобрений – 33,4 мг/кг (в 2022 г.), в то время как минимальные значения были отмечены в варианте с применением Лигногумата АМ (5,9 мг/кг) (рис. 7, табл. П.4). В 2023 г. в большинстве опытных вариантов наблюдалось снижение содержания NO_3^- (например, в контрольном варианте – до 12,7 мг/кг), однако в варианте с минеральным комплексным капсулированным удобрением пролонгированного действия Ruscote отмечен резкий рост нитратного азота – до 52,3 мг/кг. Такой результат, вероятно, свидетельствует о постепенном высвобождении нитрат-ионов из полимерной оболочки удобрений. Кроме того, в варианте ЛГ было зафиксировано увеличение содержания нитратов – с 5,9 мг/кг (в 2022 г.) до 12,5 мг/кг (в 2023 г.), что может указывать на опосредованное влияние некорневой обработки лигногуматом на накопление минерального азота в почвогрунте. В 2024 г. во всех вариантах эксперимента концентрация нитратов вновь снизилась.

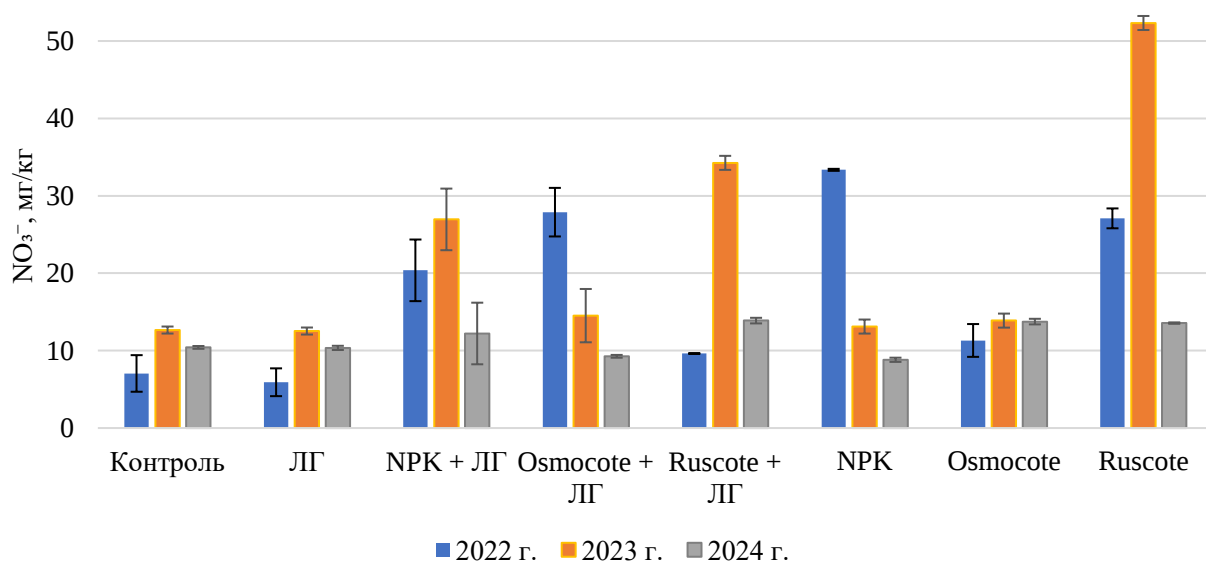


Рисунок 7. Значения нитратного азота в почвогрунте, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа показали, что в течение трёх лет достоверное влияние на содержание нитратного азота

оказывали фактор «Удобрения» (2022 г.: $F = 21,9$; $p < 0,001$; 2023 г.: $F = 394,3$; $p < 0,001$; 2024 г.: $F = 147,0$; $p < 0,001$), а также взаимодействие факторов «Удобрения $\times$ Лигногумат АМ» (2022 г.: $F = 17,7$; $p = 0,001$; 2023 г.: $F = 83,9$; $p < 0,001$; 2024 г.: $F = 162,8$; $p < 0,001$) (табл. 4).

Что касается NH_4^+ , в 2022 г. его содержание варьировало от 9,2 мг/кг (в контрольном варианте) до 43,9 мг/кг (в варианте с удобрением Osmocote) (рис. 8, табл. П.4). В 2023 г. на всех вариантах наблюдалось существенное снижение концентрации аммония, особенно в варианте ЛГ, где содержание составило всего 0,4 мг/кг. В 2024 г. тенденция к снижению сохранилась: наименьшие значения зафиксированы в вариантах NPK (1,5 мг/кг) и Ruscote (1,6 мг/кг). Указанные изменения, вероятно, связаны с усиленным потреблением аммонийного азота растениями в период активного роста, что подтверждается увеличением биометрических параметров черной смородины. По результатам дисперсионного анализа статистически значимого влияния исследуемых факторов на содержание NH_4^+ в почвогрунте установлено не было ($p > 0,05$) (табл. 4).

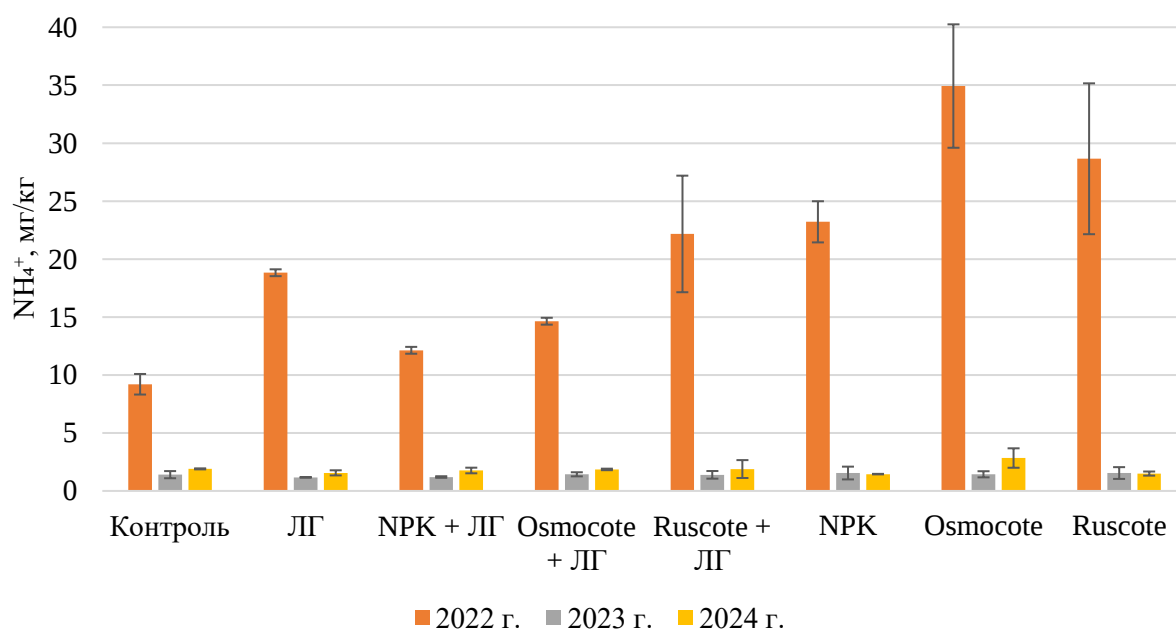


Рисунок 8. Значения аммонийного азота в почвогрунте, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

В 2022 г. наибольшее содержание подвижного фосфора (P_2O_5) в почвогрунте (рис. 9, табл. П.4) было отмечено в варианте с применением Ruscote и составило 681,5 мг/кг, тогда как минимальное значение было зафиксировано в Контроле – 507 мг/кг. Однако уже на втором году во всех вариантах опыта в почвогрунте было обнаружено резкое снижение концентрации P_2O_5 : в варианте Ruscote до 313,8 мг/кг, в варианте Контроль – до 198,1 мг/кг. Такое изменение, вероятно, обусловлено активным потреблением элемента растениями в период интенсивного роста. В 2024 г. в ряде вариантов с листовой обработкой, таких как NPK + ЛГ и Osmocote + ЛГ, наблюдалось восстановление уровня подвижного фосфора, тогда как в вариантах Контроль и ЛГ концентрации остались на относительно низком уровне, что указывает на потенциальное истощение почвенного резерва элемента при отсутствии минерального питания.

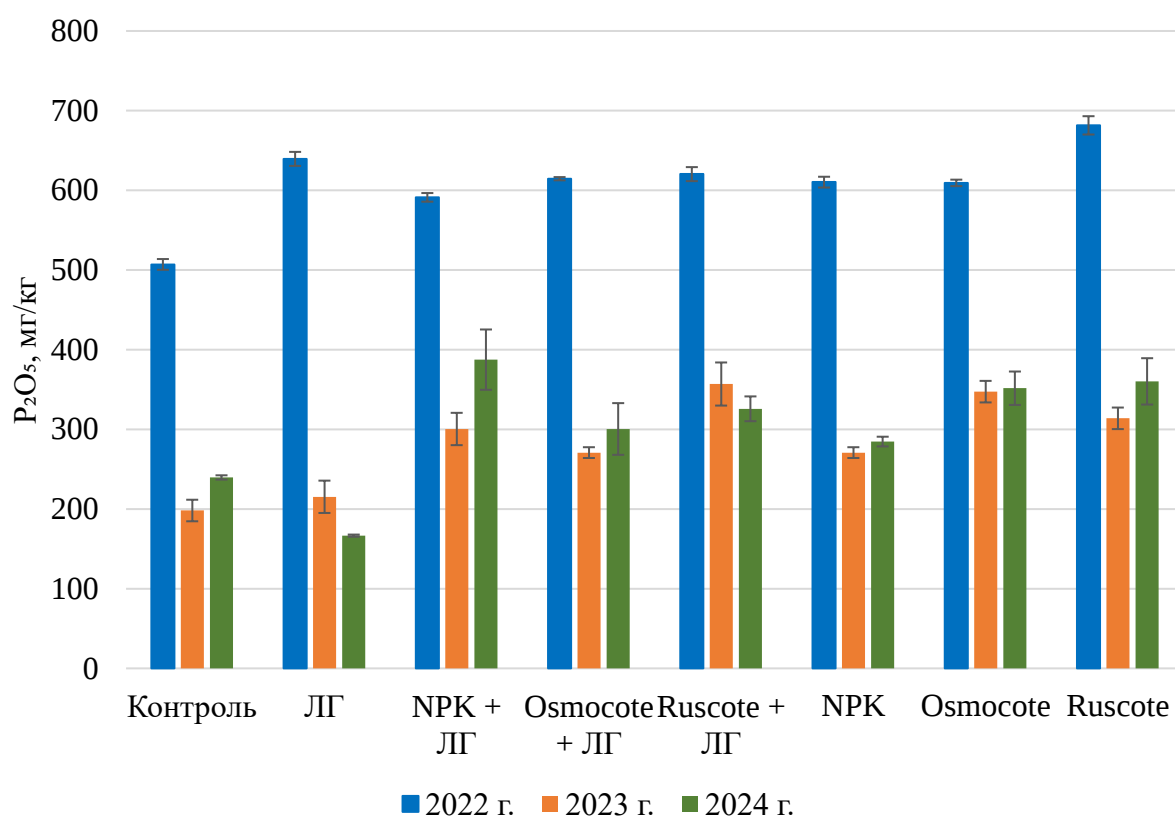


Рисунок 9. Значения подвижного фосфора в почвогрунте, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа (ANOVA) (табл. 4) продемонстрировали статистически значимое влияние как отдельного фактора «Лигногумат АМ» ($F = 15,4$; $p = 0,004$), так и фактора «Удобрения» ($F = 77,6$; $p < 0,0001$) на содержание подвижного фосфора в 2022 г.. Существенным оказалось и взаимодействие этих двух факторов ($F = 130,0$; $p < 0,0001$). В последующие два года (2023–2024 гг.) влияние лигногумата не достигло уровня статистической значимости ($p = 0,697$ и $p = 0,250$ соответственно), тогда как фактор удобрения продолжал оказывать значительное воздействие ($F = 147,0$ и $F = 28,9$; $p < 0,0001$). Взаимодействие факторов также сохраняло статистическую значимость в оба года ($F = 162,81$; $p < 0,0001$ и $F = 28,9$; $p = 0,0001$ соответственно).

Аналогичная тенденция была отмечена и по показателю обменного калия (K_2O) (рис. 10, табл. П.4). В 2022 г. его максимальное значение зафиксировано в варианте с применением комплексного удобрения Ruscote – 381,4 мг/кг, тогда как в контроле концентрация была минимальной – 168,1 мг/кг. На второй год опыта в большинстве вариантов содержание K_2O в почвогрунте снизилось: в варианте Ruscote – до 163,8 мг/кг, а в контроле уровень остался прежним. Однако в варианте Osmocote + ЛГ содержание обменного калия достигло 227,8 мг/кг, что является наивысшим показателем за этот год. В третьем вегетационном сезоне в вариантах Osmocote + ЛГ и Ruscote произошло повторное значительное увеличение содержания калия – до 390,0 и 426,0 мг/кг соответственно.

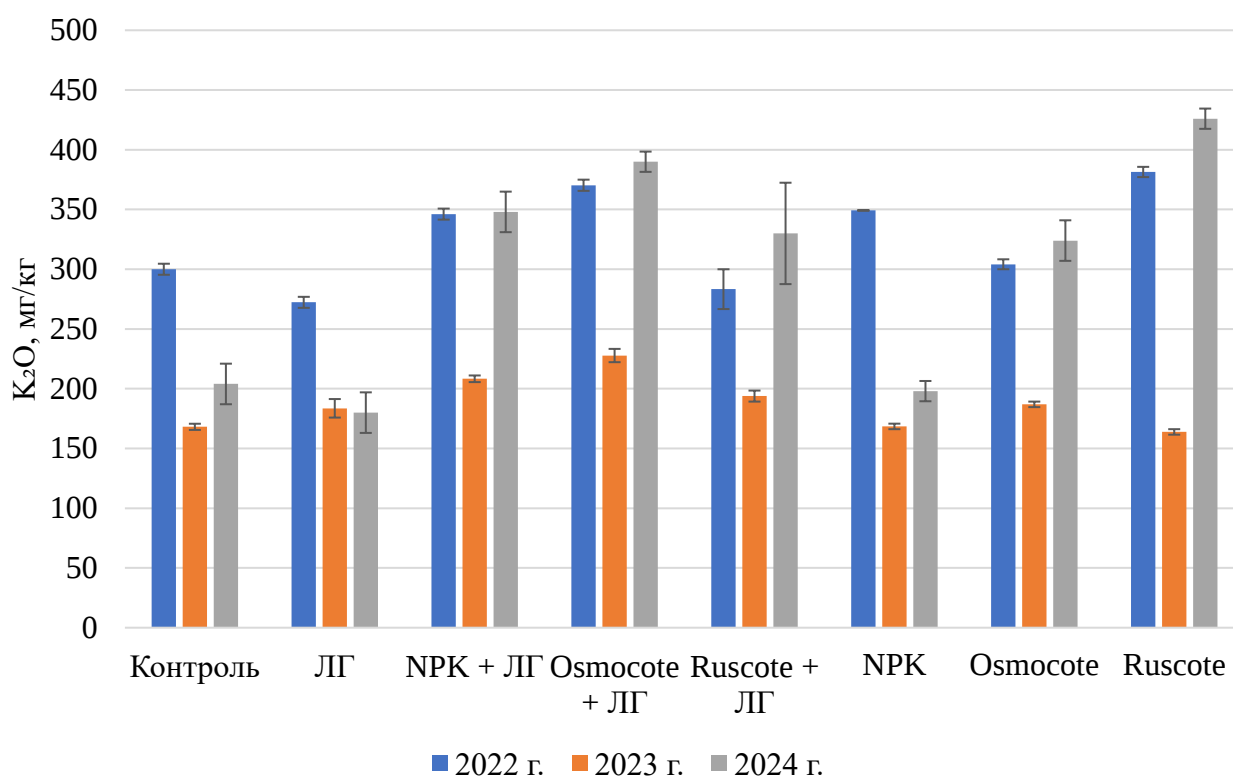


Рисунок 10. Значения обменного калия в почвогрунте, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

По данным двухфакторного дисперсионного анализа, оба исследуемых фактора – вид применяемого удобрения и наличие/отсутствие фолиарной обработки Лигногуматом АМ – оказывали достоверное влияние на содержание обменного калия ($p < 0,001$) (табл. 4). Зафиксированное в большинстве вариантов снижение уровня подвижных форм фосфора и калия в почвогрунте указывает на высокую потребность культур в этих элементах и, как следствие, возможное истощение минерального состава почвогрунта. Это подчеркивает необходимость регулярной коррекции доз и сроков внесения удобрений при длительном выращивании кустарниковых растений.

Таким образом, содержание подвижных форм фосфора и калия в почвогрунте демонстрировало общую тенденцию к снижению на протяжении трех лет опыта, за исключением некоторых вариантов, где в 2024 г. отмечено их повторное повышение.

Резкое снижение содержания подвижного фосфора в почвогрунте, зафиксированное по результатам агрохимических анализов в 2023 г. (табл. П.4), вызвало опасения относительно доступности данного элемента для растений. Несмотря на внесение удобрений в разной форме, уровень доступного фосфора значительно снизился по сравнению с предыдущим годом, что говорит о возможном перераспределении элемента в труднодоступные для растений формы. В связи с этим было принято решение провести валовой анализ почвы по определению валового содержания азота, фосфора и калия (рис. 11-12, табл. П.5). Данные валового анализа позволили оценить реальный запас элементов в почвогрунте и сопоставить его с данными по доступным формам, что дало возможность глубже понять причины наблюдаемого дефицита и проанализировать эффективность применяемых агротехнологических приёмов.

Валовое содержание азота в почвогрунте до закладки опыта – $0,99 \pm 0,025$ % (табл. П.5). Это значение отражает суммарный запас азота в почве, включая как доступные (аммонийная и нитратная формы), так и недоступные растениям органические соединения. В 2023 г. в большинстве вариантов было зафиксировано снижение (рис. 11): минимальные значения были обнаружены в вариантах Ruscote + ЛГ ($0,56 \pm 0,0222$ %), NPK ($0,62 \pm 0,05$ %), NPK + ЛГ ($0,59 \pm 0,049$ %), а максимум в варианте Osmocote + ЛГ – $1,04 \pm 0,051$ %. В ранее полученных агрохимических данных по почвогрунту, содержание аммонийного азота в разные годы варьировало от 8,5 до 18,9 мг/кг, а нитратного азота - от 14,2 до 42,1 мг/кг в зависимости от варианта опыта и года. Суммарное количество минеральных форм азота, доступных растениям, таким образом не превышало 61 мг/кг, что составляет менее 0,6 % от валового содержания.

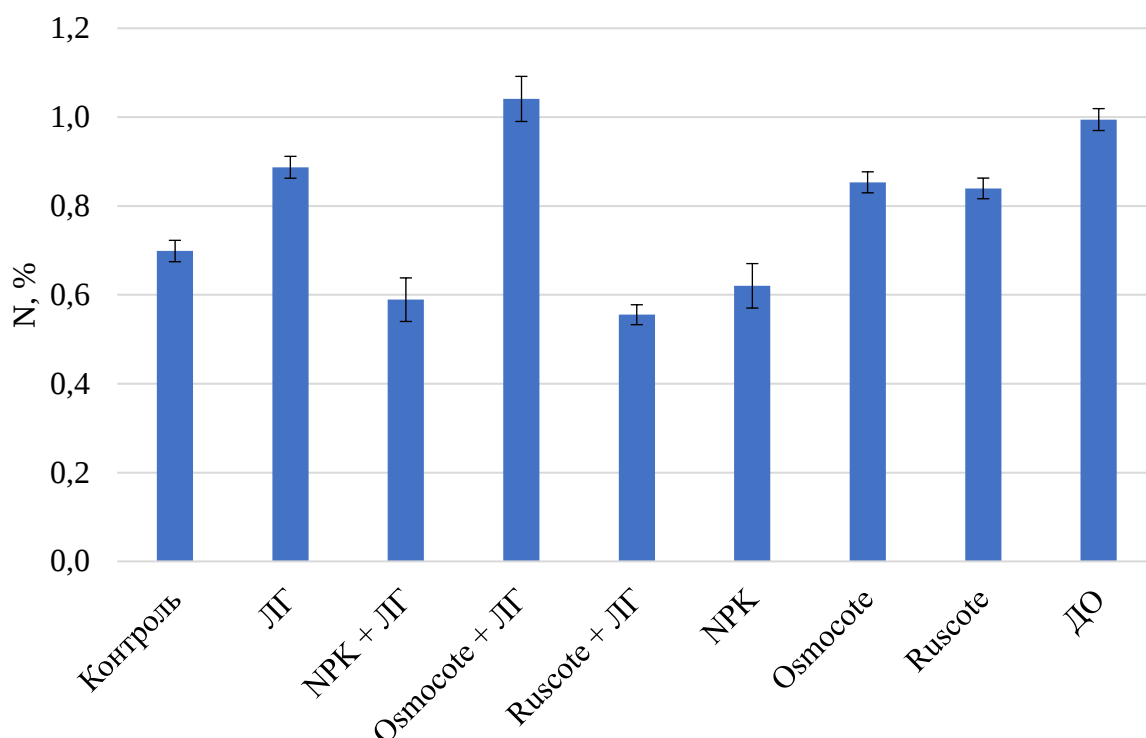


Рисунок 11. Содержание валового азота в почвогрунте в 2023 г., %. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Сравнительный анализ демонстрировал значительный запас валового азота в почвогрунте, но также указывал на низкую долю минеральных форм, что могло ограничивать питание растений и оказывать влияние на вегетативные показатели в течение вегетационного периода.

Валовое содержание фосфора в исходном образце почвогрунта составило $0,44 \pm 0,107$ % (рис. 12, табл. П.5), что свидетельствует о высоком исходном запасе фосфора в почвогрунте. Однако по завершению вегетационного периода 2023 г. показатели валового фосфора значительно снизились во всех вариантах: минимальное содержание было зафиксировано в вариантах Ruscote + ЛГ ($0,04 \pm 0,011$ %) и NPK ($0,048 \pm 0,01$ %), умеренное снижение наблюдалось в вариантах NPK + ЛГ ($0,08 \pm 0,013$ %), Osmocote + ЛГ ($0,10 \pm 0,024$ %), Ruscote ($0,12 \pm 0,008$ %), наибольшее сохранение уровня содержания валового фосфора было отмечено в Контроле ($0,25 \pm 0,036$ %), ЛГ ($0,25 \pm 0,019$ %) и Osmocote ($0,14 \pm 0,028$ %). 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 foliarной обработки (например, NPK). Данные свидетельствуют о высоком потреблении фосфора растениями или возможной его иммобилизации в недоступные формы, что требует дополнительной агрохимической оценки и коррекции схем питания. В то же время содержание подвижного фосфора варьировало от 198,1 мг/кг (вариант Контроль) до 356,9 мг/кг (вариант Ruscote + ЛГ). Таким образом, доступная для растений фракция фосфора составляла лишь около 5–8 % от общего его содержания в почве. Это подтверждает, что при неблагоприятных условиях (в частности, колебаниях pH, влажности, микробиологической активности) валовый запас фосфора может быть плохо мобилизован в доступную форму, что и наблюдалось в 2023 г. при резком снижении уровня подвижного фосфора. Наиболее эффективными в удержании подвижного фосфора оказались варианты с применением минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия и Лигногумата, особенно Ruscote + ЛГ.

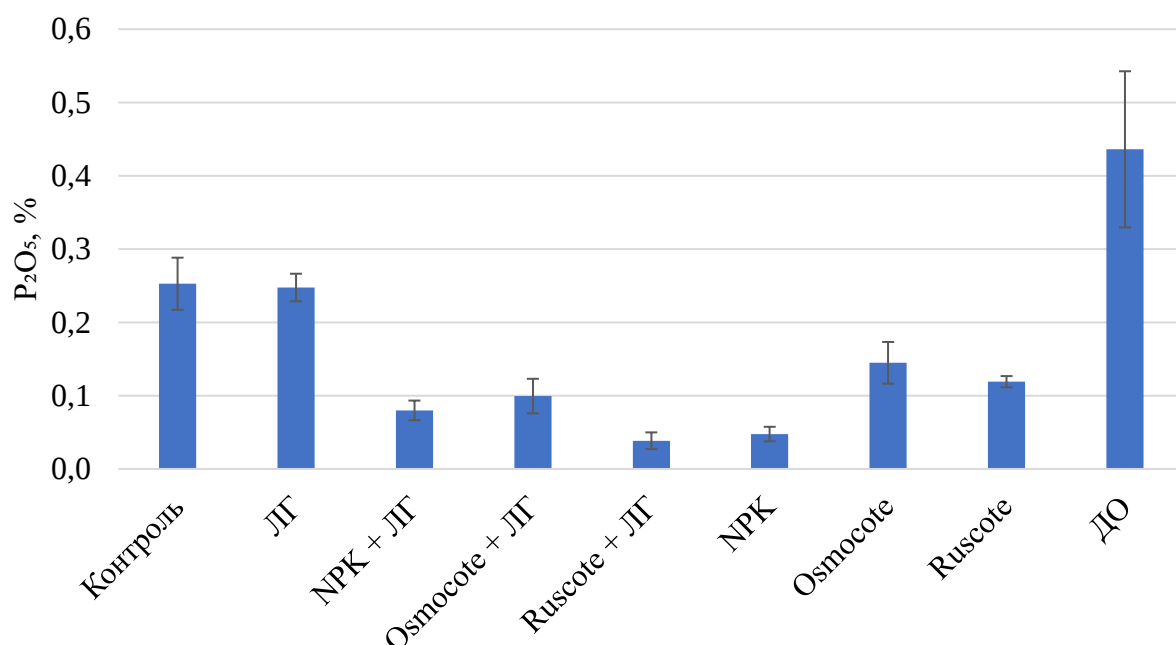


Рисунок 12. Содержание валового фосфора в почвогрунте в 2023 г., %. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Согласно гидротермическому коэффициенту Селянинова (ГТК), в 2023 г. наблюдалось оптимальное увлажнение 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). Однако при высоком уровне увлажнения также активизируются процессы сорбции и фиксации фосфора, особенно в присутствии ионов кальция, алюминия и железа, которые образуют труднорастворимые фосфаты. Это может ограничивать превращение валового фосфора в доступный, несмотря на его высокий исходный уровень (Mahmood et al., 2025).

В измеренных данных наблюдалось резкое снижение подвижного фосфора при высоком уровне валового, что может объясняться именно фиксацией доступного фосфора в результате химических процессов, усиленных при оптимальной влажности, и/или усиленным потреблением растениями на фоне активного роста в благоприятных условиях.

Валовое содержание калия было определено только в исходном образце и составило $0,038 \pm 0,009$ %. Для сравнения, обменный калий в почвогрунте в 2023 г. варьировал от 168,1 мг/кг (вариант Контроль) до 227,8 мг/кг (вариант Osmocote + ЛГ), то есть 44–60 % от валового содержания. Это указывает на относительно высокую доступность калия в почве, особенно в вариантах с регулярным внесением минеральных удобрений. Вариант Ruscote обеспечивал наибольшее накопление обменного калия - 426,0 мг/кг в 2024 г., что превышает валовую оценку, вероятно, за счет мобилизации ранее недоступных форм калия при накоплении органики и микробиологической активности.

Для комплексной оценки влияния различных видов удобрений и фолиарной обработки лигногуматом на содержание питательных элементов в почвогрунте также были проведены анализы содержания подвижного кальция и магния в почвогрунте (табл. П.6).

В первый год опыта (2022 г.) уровень кальция в почвогрунте находился на относительно низком уровне, варьируя от 1441,0 мг/кг (вариант Ruscote + ЛГ) до 1742,8 мг/кг (вариант ЛГ) (рис. 13). На втором году (2023 г.) произошло существенное увеличение содержания подвижного кальция во всех вариантах, за исключением варианта Ruscote, где было отмечено резкое снижение концентрации (1105,4 мг/кг), что может быть связано с трансформацией элемента в биомассу растений. Максимальное значение было зафиксировано при применении лигногумата (2322,7 мг/кг). К 2024 г. содержание кальция продолжало увеличиваться, достигнув максимума в варианте Ruscote + ЛГ (2838,8 мг/кг). Этот результат может свидетельствовать о накопительном эффекте минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия на уровень подвижного кальция в почвогрунте.

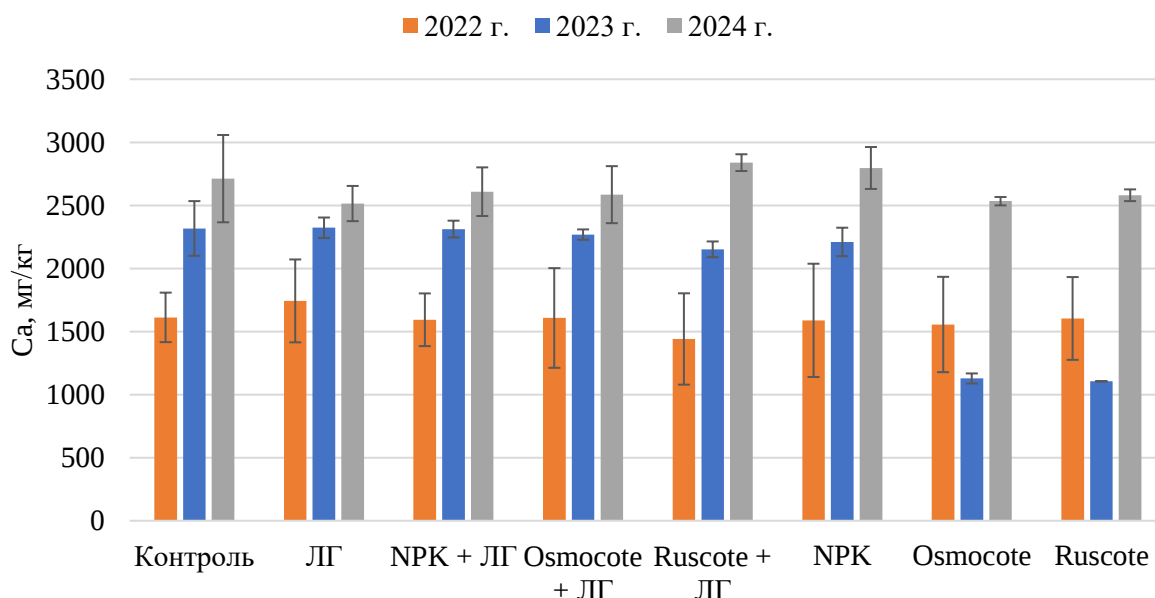


Рисунок 13. Значения подвижного кальция в почвогрунте, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Статистический анализ показал, что корреляция между содержанием подвижного кальция в почвогрунте в 2022 и 2023 гг. была слабой положительной ($r = 0,22$), а между 2023 и 2024 гг. — также слабой ($r = 0,19$). Напротив, между 2022 и 2024 гг. выявлена выраженная отрицательная корреляция ($r = -0,75$), что может указывать на изменение направления динамики под влиянием удобрений и адаптации растений к условиям среды.

Содержание подвижного магния в почвогрунте в 2022 г. было высоким практически во всех вариантах, особенно в вариантах Osmocote + ЛГ (516,2 мг/кг) и в Контроле (419,6 мг/кг) (рис. 14). Однако в 2023 г. во всех вариантах, за исключением контрольного варианта (237,0 мг/кг), произошло резкое снижение уровня подвижного магния: в варианте Osmocote он достиг минимального значения — 93,7 мг/кг. В 2024 г. содержание подвижного магния вновь начало расти, особенно в варианте ЛГ (576,8 мг/кг), что подтверждает антистрессовое и мобилизующее действие лигногумата на усвоение магния растениями из почвогрунта.

Анализ коэффициентов корреляции выявил умеренную положительную связь между 2022 и 2023 гг. ($r = 0,35$), а также между 2023 и 2024 гг. ($r = 0,30$). Между 2022 и 2024 гг. корреляция оказалась практически нулевой ($r = -0,03$), что отражает нестабильность содержания магния во времени и возможное влияние как почвенных, так и погодных факторов.

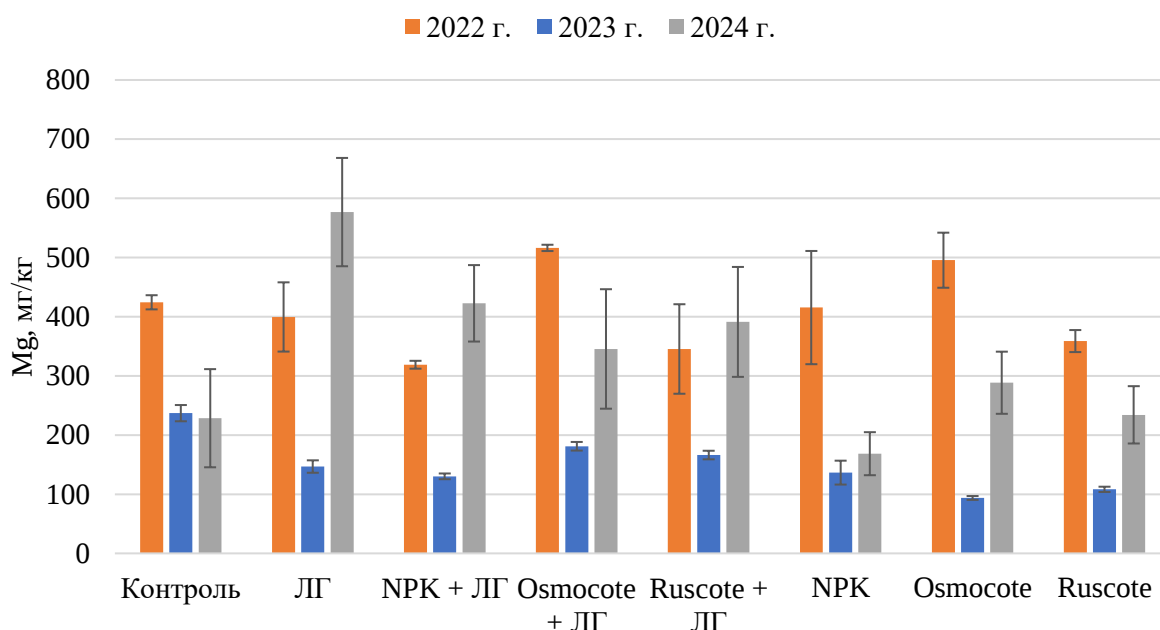


Рисунок 14. Значения подвижного магния в почвогрунте, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Анализ корреляционной зависимости между содержанием кальция и магния в почвогрунте за три года показал отсутствие устойчивой взаимосвязи между этими элементами. В 2022 и 2023 гг. наблюдалась слабая положительная корреляция ($r = 0,19$ и $r = 0,29$ соответственно), тогда как в 2024 г. зафиксирована умеренно отрицательная связь ($r = -0,40$). Это указывает на то, что динамика изменения кальция и магния формируется под действием разных факторов, и данные элементы, вероятно, не конкурируют напрямую в исследуемых условиях.

В течение трёх лет эксперимента наблюдали устойчивый рост содержания микроэлементов и тяжелых металлов в почвогрунте (рис. 15-18, табл. П.7): концентрация цинка увеличилась во всех вариантах в течении трех лет, например, в варианте Контроль с 33,5 мг/кг (в 2022 г.) до 41,3 мг/кг (в 2024 г.). Наибольшее значение было зафиксировано в варианте Ruscote + ЛГ в 2024 г. - 45,5 мг/кг. Аналогичная ситуация наблюдалась в содержании меди: максимальное значение в 2024 г. составляло 22,2 мг/кг (вариант Ruscote), тогда как в 2022 г. большинство значений не превышали 10–15 мг/кг. Также в 2024 г.

почти во всех вариантах опыта содержание свинца резко возросло (до 37,5 мг/кг в варианте NPK), что может быть связано с аккумуляцией металла или переводом в более доступные формы. Концентрация кадмия оставалась на стабильном уровне (0,1–0,2 мг/кг), без статистически значимых изменений за 3 года опыта.

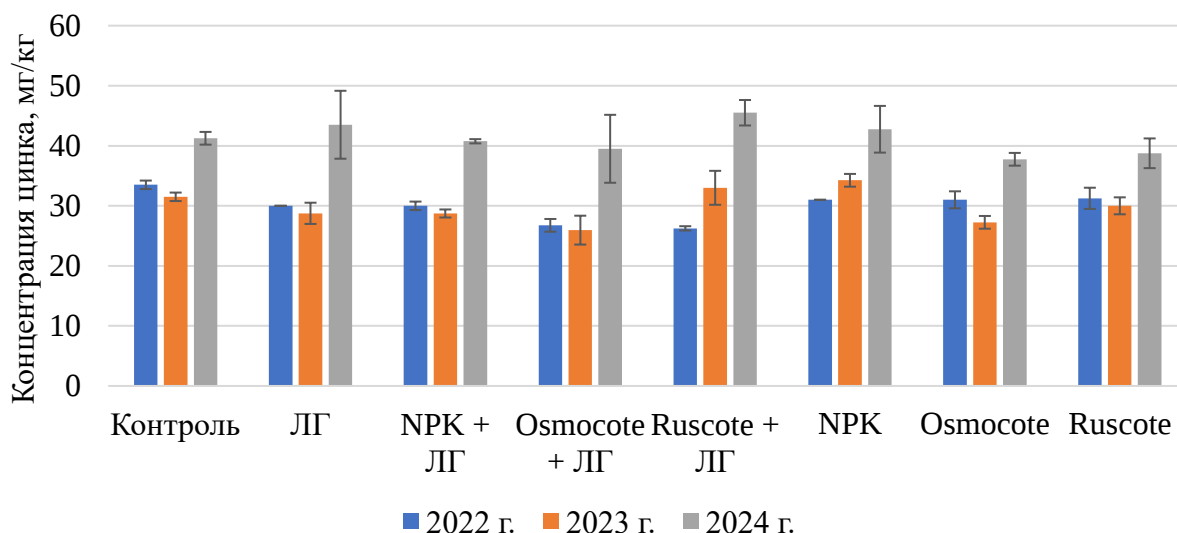


Рисунок 15. Содержание цинка (вытяжка - ААБ) в почвогрунте, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

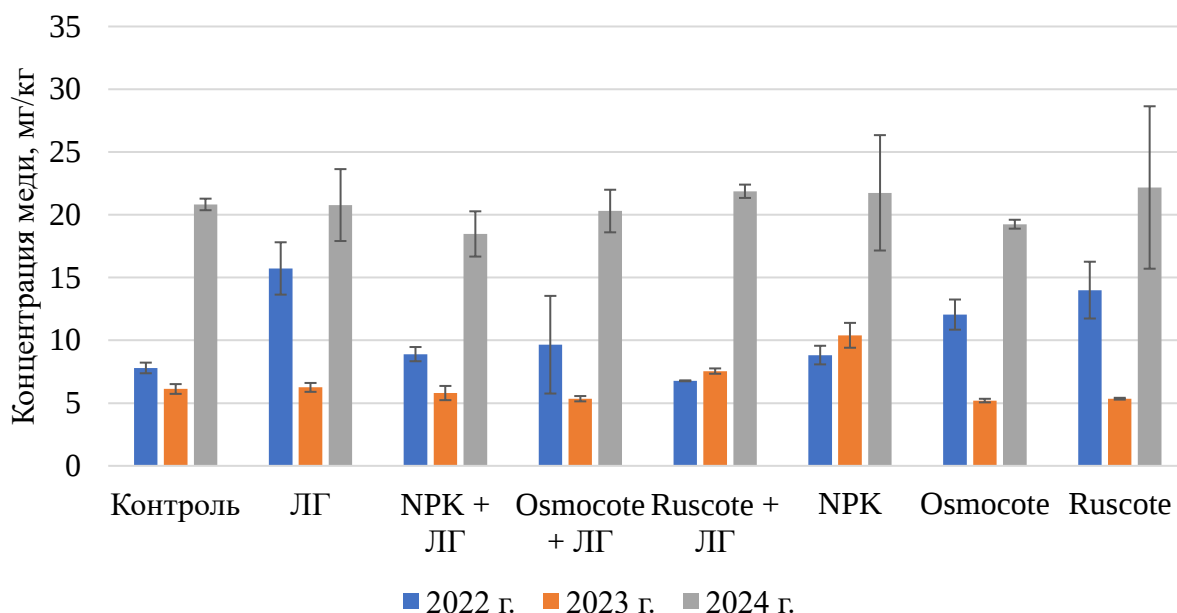


Рисунок 16. Содержание меди (вытяжка - ААБ) в почвогрунте, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

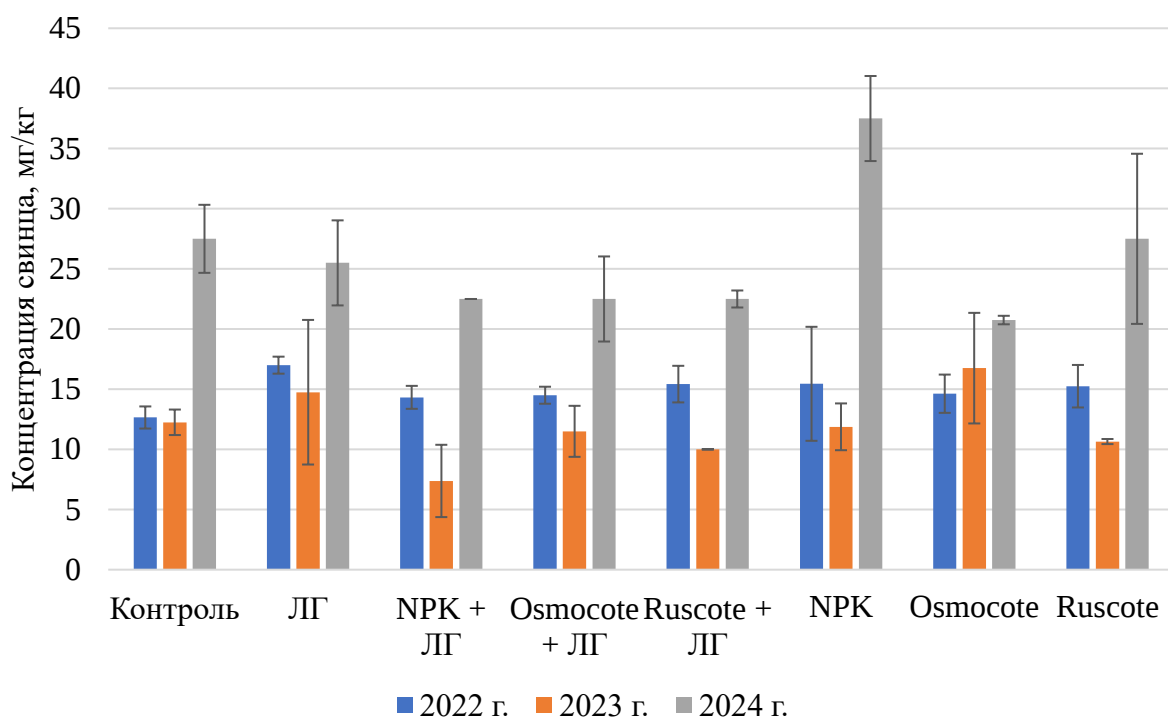


Рисунок 17. Содерание свинца (вытяжка - ААБ) в почвогрунте, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

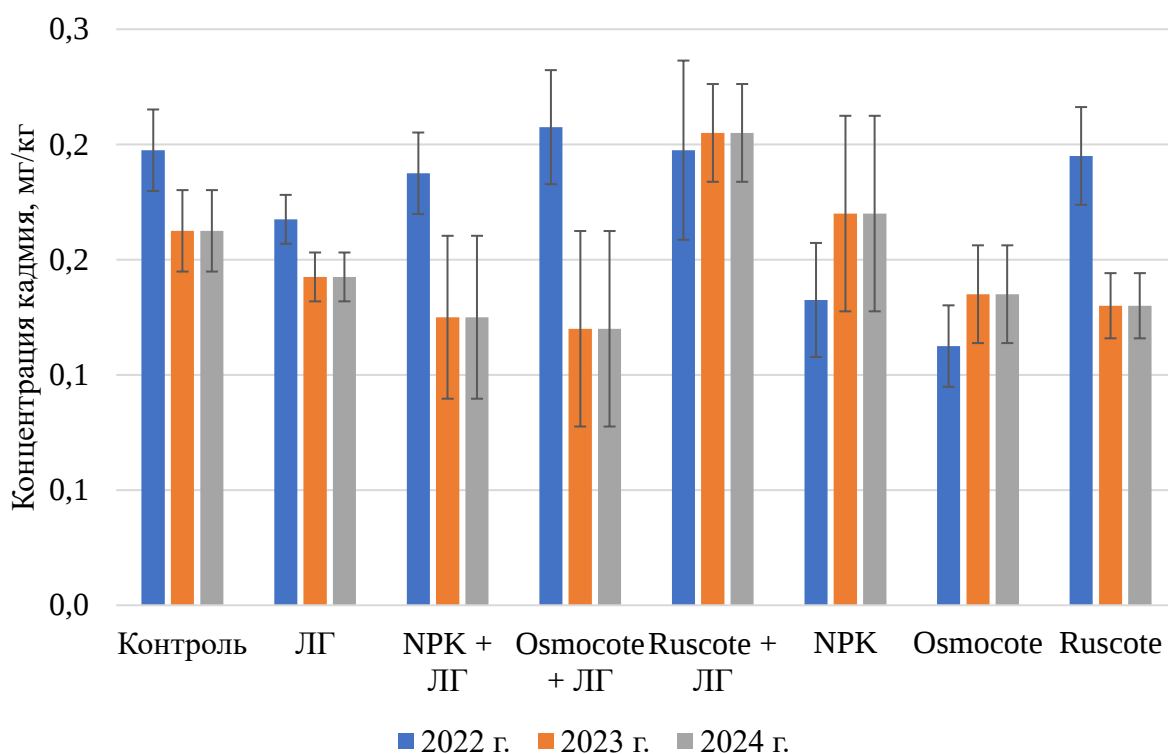


Рисунок 18. Содерание кадмия (вытяжка - ААБ) в почвогрунте, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Стоит отметить, что медь и цинк в почвогрунте присутствовали в концентрациях, превышающих допустимые уровни для подвижных форм (в 2–5 раз выше ПДК) – для свинца - 6,0 мг/кг, цинка - 23,0 мг/кг, меди - 3,0 мг/кг, что потенциально указывает на фактор стресса для растений, особенно в условиях недостаточного увлажнения или подкисления почвы. Свинец находится на границе ПДК или немного ниже – превышений не было зафиксировано.

Согласно приведенным ранее литературным источникам (Мистратов 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 первом году уровень общего азота в листьях варьировал от минимального значения 1,7 % в контрольном варианте до максимального – 2,5 % – при применении комплексного удобрения Osmocote в сочетании с фолиарной обработкой лигногуматом (рис. 19, табл. П.8). Однако уже на втором году вегетации (2023 г.) во всех вариантах опыта отмечено снижение содержания азота в листовой массе: минимальные значения составили 1,2 % (NPK + ЛГ), а максимальные зафиксированы в варианте с только фолиарной обработкой лигногуматом (1,8 %). Примером является снижение содержания азота до 1,5 % в варианте Osmocote + ЛГ, что, вероятно, связано с исчерпанием доступных форм азота в почве или снижением скорости его поступления в растения. В 2024 г. сохранялась тенденция к недостаточному обеспечению растений азотом: максимальный уровень (1,9 %) был зафиксирован в вариантах Ruscote и Ruscote + ЛГ, а наименьшее значение – в варианте ЛГ (1,2 %).

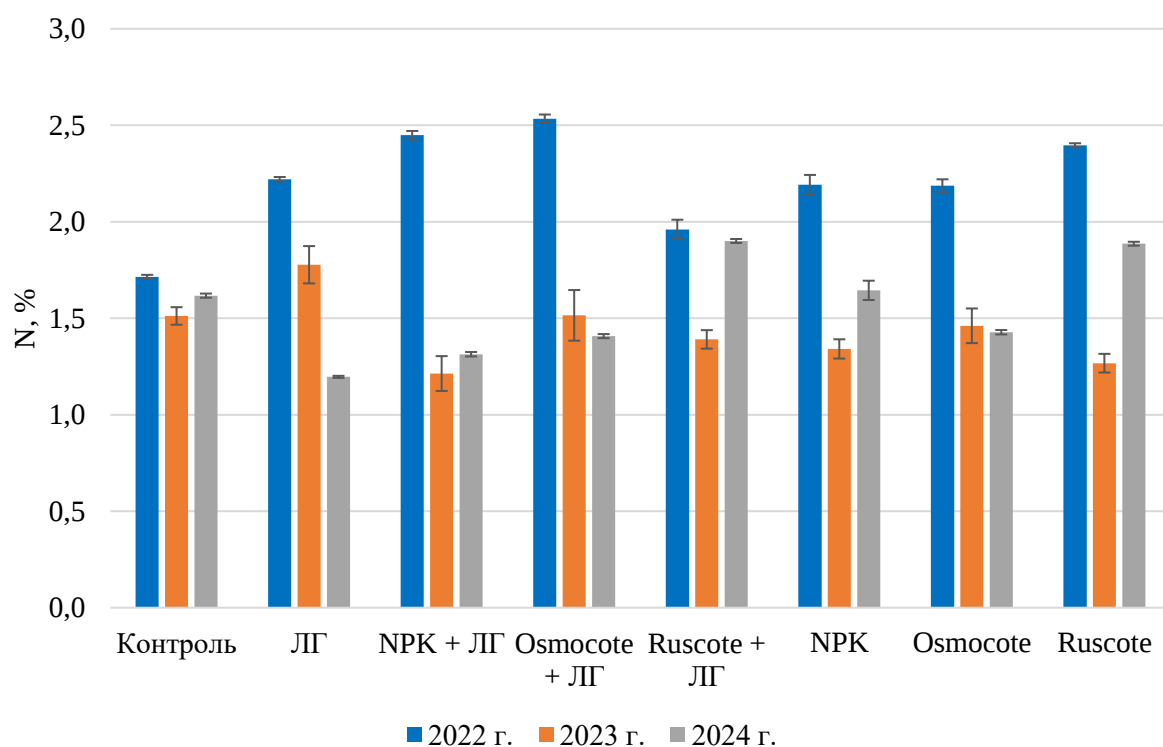


Рисунок 19. Содержание азота в листьях, %. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Отмеченное снижение содержания азота в листьях в течение вегетационного периода может быть обусловлено не только физиологическим старением растений, но и снижением листовой поверхности, а также уменьшением доступности макроэлементов в почвогрунте. Взаимосвязь между уровнем азота в растении и обеспеченностью почвы элементами питания подтверждается выявленной положительной корреляцией: между содержанием азота в листьях и концентрацией нитратов в почве ($r = 0,64$), подвижного фосфора ($r = 0,69$) и калия ($r = 0,68$). Это указывает на то, что высокое содержание данных элементов в почве способствует более активному накоплению азота в растительной массе. Таким образом, комплексное минеральное питание, обеспечивающее растения ключевыми макроэлементами, оказывает значительное влияние на уровень азота в листьях, что, в свою очередь, влияет на физиологическое состояние культуры и ее продуктивность.

Продолжая анализ динамики макроэлементного состава листьев черной смородины, стоит отметить изменения в содержании фосфора (P_2O_5), которые демонстрируют выраженную зависимость от вариантов удобрения и года наблюдений (рис. 20, табл. П.8). В 2022 г. наибольшее содержание фосфора в листьях (1,2 %) было зафиксировано в варианте с применением лигногумата, тогда как в вариантах Osmocote, Osmocote + ЛГ и NPK этот показатель составил лишь 0,5 %, что свидетельствует о недостаточном фосфорном питании. Даже в варианте NPK + ЛГ уровень фосфора оставался невысоким – около 0,6 %. В 2023 г. наблюдался расширенный диапазон значений: от минимальных 0,6 % (NPK + ЛГ) до максимальных 1,3 % (ЛГ), что подтверждает эффективность фолиарной обработки лигногуматом в улучшении усвояемости фосфора.

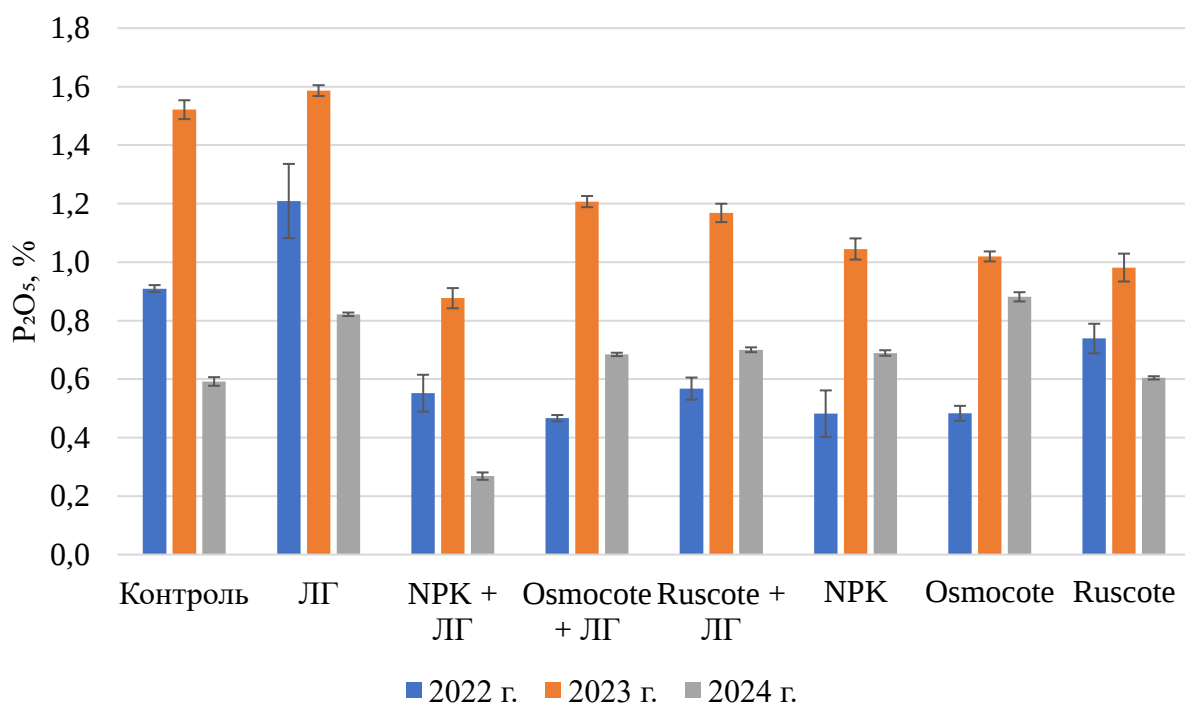


Рисунок 20. Содержание фосфора в листьях, %. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Интересной является отрицательная корреляция содержания фосфора в листьях с кислотностью (pH) и концентрацией нитратов (NO_3^-) почвогрунта: $r = -0,52$ и $r = -0,61$ соответственно. Это может указывать на то, что при повышении кислотности среды или накоплении нитратов доступность фосфора

для растений снижается, что согласуется с ранее выявленными тенденциями по азоту. В 2024 г. содержание фосфора значительно снизилось почти во всех вариантах, особенно в варианте NPK + ЛГ, где оно достигло лишь 0,3 %, в то время как наибольшее значение зафиксировано в варианте Osmocote (0,9 %), что указывает на постепенное освобождение фосфатов из гранул удобрения.

Что касается содержания калия в листьях, в 2022 г. его наивысшая концентрация (2,1 %) была отмечена в вариантах ЛГ и Контроль, в то время как минимальные показатели (1,3 %) были зафиксированы в вариантах NPK и Ruscote + ЛГ (рис. 21, табл. П.8). В варианте NPK + ЛГ содержание калия составило 1,6 %. В следующем году наблюдалось небольшое повышение содержания калия в листьях: максимальные значения (2,1 %) были получены в вариантах Osmocote, Osmocote + ЛГ и Ruscote, тогда как в других вариантах оно варьировалось в пределах 2,0 %. Таким образом, в течение 2022–2023 гг. уровень калия оставался относительно стабильным.

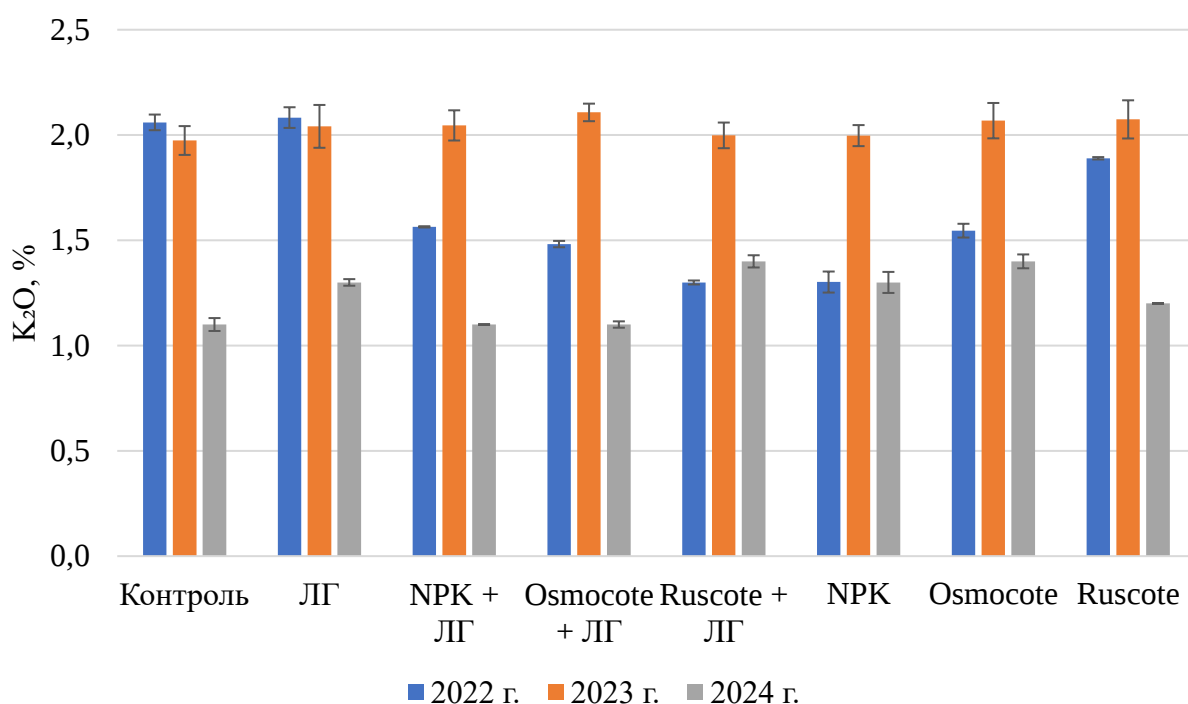


Рисунок 21. Содержание калия в листьях, %. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Аналогично фосфору, калий демонстрирует отрицательную корреляцию с рН ($r = -0,61$) и содержанием нитратов ($r = -0,48$), что указывает на снижение его усвоения при повышенной щелочности почвы и избыточном количестве нитратов. В 2024 г. содержание калия в листьях резко сократилось во всех вариантах опыта. Максимальные значения были зафиксированы в вариантах Ruscote + ЛГ и Osmocote (по 1,4 %), тогда как минимальные (1,1 %) были отмечены в вариантах Контроль, NPK + ЛГ и Osmocote + ЛГ. Вероятным объяснением снижения содержания макроэлементов в 2024 г. могут быть как агрометеорологические условия вегетационного периода, так и накопительный эффект истощения почвогрунта, а также снижение физиологической активности растений на заключительных этапах роста.

Таким образом, фосфор и калий, как и азот, подвержены влиянию не только технологии удобрения, но и межфакторного взаимодействия с параметрами почвенной среды, что подчеркивает необходимость комплексного подхода к оценке питательного статуса растений.

После анализа содержания макроэлементов в листьях черной смородины, который позволяет судить о текущем состоянии минерального питания растений и их физиологической активности, целесообразно рассмотреть накопление питательных веществ непосредственно в урожае – ягодах. Этот показатель отражает конечную эффективность применения различных агротехнических приёмов и удобрений, так как именно плоды являются основным объектом хозяйственной ценности. Далее представлены данные по содержанию азота, фосфора и калия в ягодах черной смородины за 2023 и 2024 гг., полученные в результате экспериментальных наблюдений.

В 2023 г. в ягодах черной смородины были отмечены сравнительно высокие концентрации макроэлементов, особенно азота и фосфора (рис. 22-23, табл. П.9), что говорит о благоприятных условиях питания растений в этот период. Содержание общего азота варьировало от минимальных 0,5 % (в

контрольном варианте и при применении только foliarной обработки Лигногуматом АМ) до максимальных 1,0 % в вариантах с внесением гранулированных удобрений, а также комплексного удобрения Ruscote, и их сочетания с листовой обработкой лигногуматом. Особенно выраженное накопление азота наблюдалось в вариантах NPK и Ruscote, что указывает на высокую эффективность этих типов удобрений в обеспечении азотного питания плодов. В то же время, в контрольном варианте и в варианте с обработкой только лигногуматом содержание азота в ягодах оказалось наименьшим.

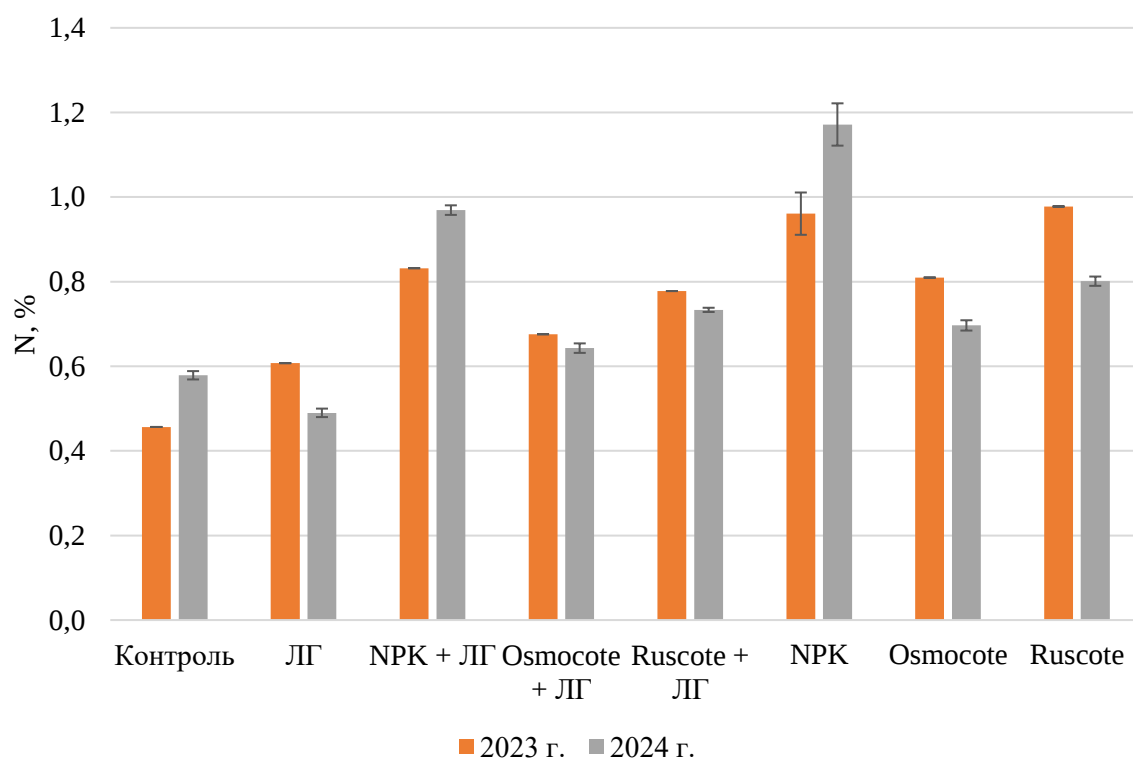


Рисунок 22. Содержание азота в ягодах, %. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Фосфор также демонстрировал высокую вариативность в зависимости от примененной агротехнологии (рис. 23, табл. П.9). Максимальное его содержание (1,1 %) было зафиксировано на варианте с удобрением Ruscote, тогда как в варианте с одной foliarной 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.

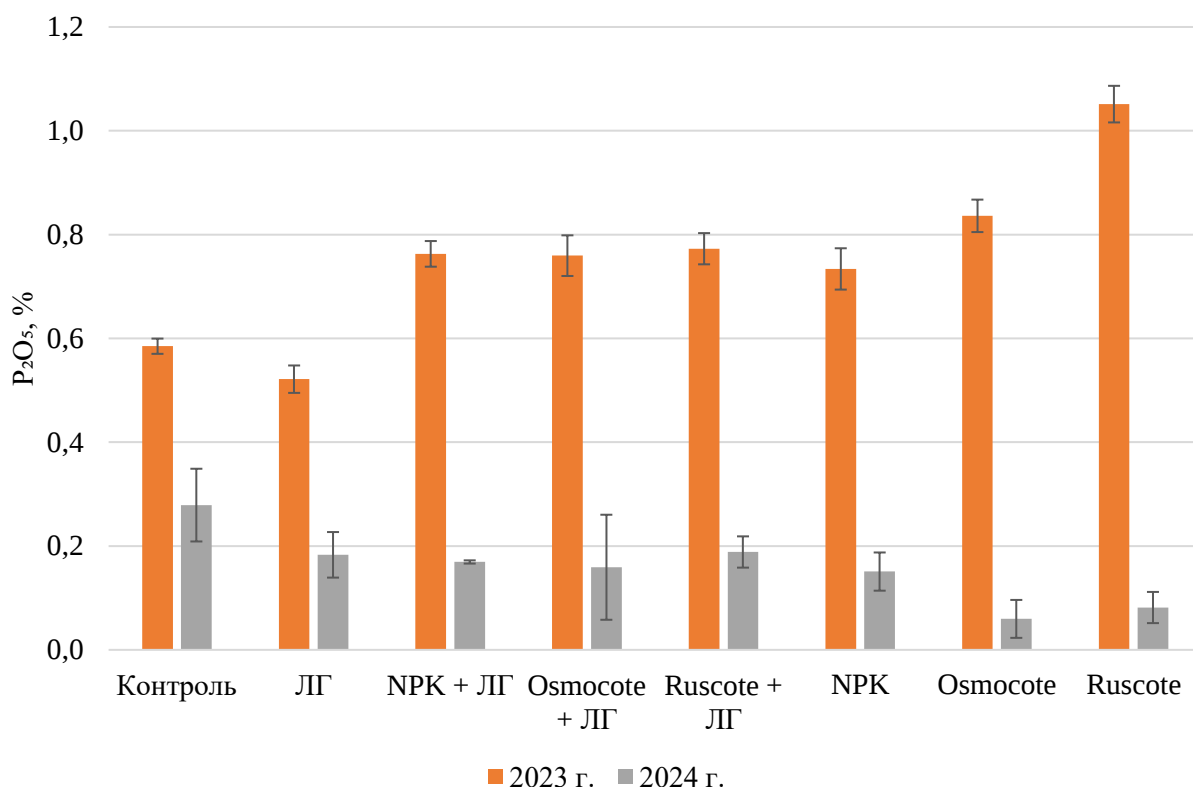


Рисунок 23. Содержание фосфора в ягодах, %. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Калий оказался наименее подвержен колебаниям (рис. 24, табл. П.9). Его содержание в ягодах оставалось стабильным во всех вариантах: максимальное значение (1,0 %) получено при использовании агротехнологии с применением гранулированных удобрений и некорневой обработкой лигногуматом, в то время как в остальных вариантах концентрация колебалась в пределах 0,9 %, что свидетельствует о равномерном поступлении калия в плоды независимо от метода удобрения.

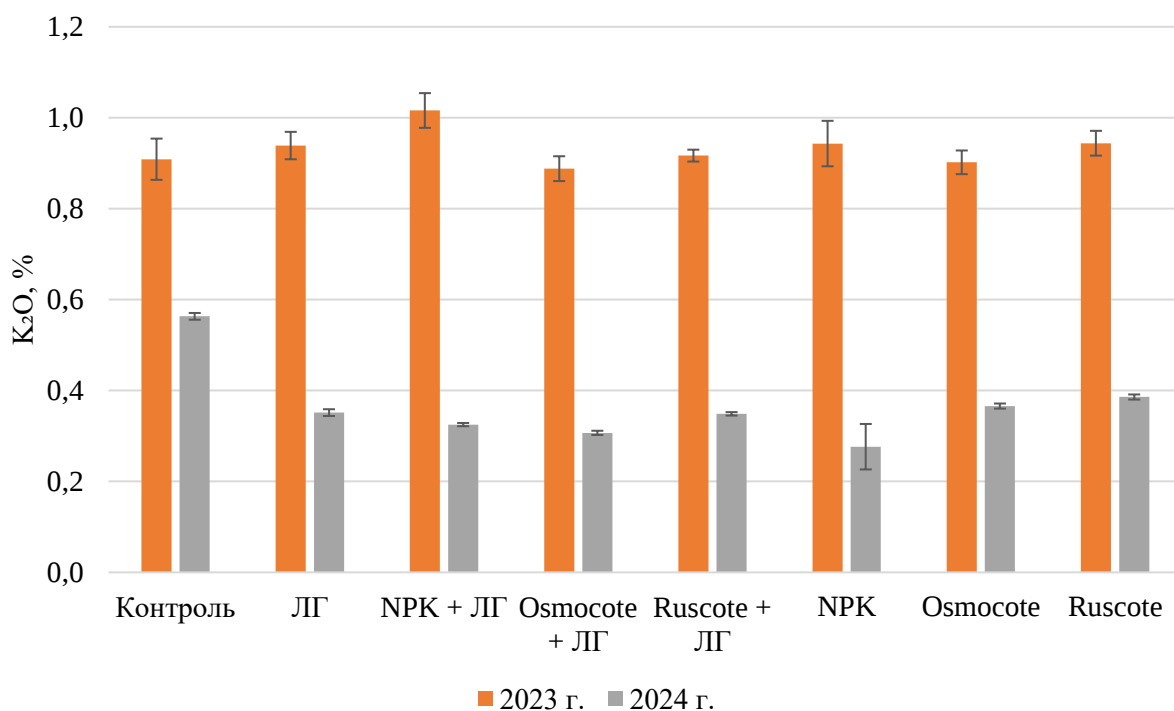


Рисунок 24. Содержание калия в ягодах, %. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

В 2024 г., напротив, наблюдалось общее снижение содержания макроэлементов в ягодах, особенно по фосфору и калию. Хотя максимальный уровень азота достиг 1,2 % в варианте NPK, в большинстве вариантов он не превышал 0,7 %, что говорит о возможном дефиците. Содержание фосфора снизилось значительно – максимум составил лишь 0,3 %, а калий достиг максимального уровня 0,6 % только в контрольном варианте.

Таким образом, наибольшие уровни накопления N, P и K в ягодах в целом были характерны для вариантов с применением традиционных гранулированных минеральных удобрений и минерального комплексного капсулированного удобрения пролонгированного действия Ruscote, что подтверждает их положительное влияние на питательную ценность урожая.

Для оценки динамики поступления макроэлементов в надземные органы растений был проведён анализ содержания кальция и магния в листьях чёрной смородины в течение трёх вегетационных периодов (табл. П.10). Полученные

значения позволяют судить о биологическом выносе элементов, а также о влиянии различных видов удобрений и лигногумата на обеспеченность растения этими элементами питания.

Концентрация кальция в листьях в 2022 г. находилась в пределах 1,1-1,7 %, в 2023 г. диапазон расширился до 1,4-2,2 % за счёт увеличения содержания элемента в большинстве вариантов, а в 2024 г. значения выровнялись и составляли 1,3-1,9 % (рис. 25). Для кальция в 2022 г. минимальное значение было отмечено в варианте NPK + ЛГ (1,10 %), а максимальное - в варианте Osmocote + ЛГ (1,70 %). В 2023 г. наименьшее содержание кальция было зафиксировано в варианте Osmocote + ЛГ (1,44 %), тогда как наибольшее - в варианте Ruscote (2,19 %). В 2024 г. минимальный уровень кальция был в варианте ЛГ (1,32 %), а максимальный - при применении NPK + ЛГ (1,91 %).

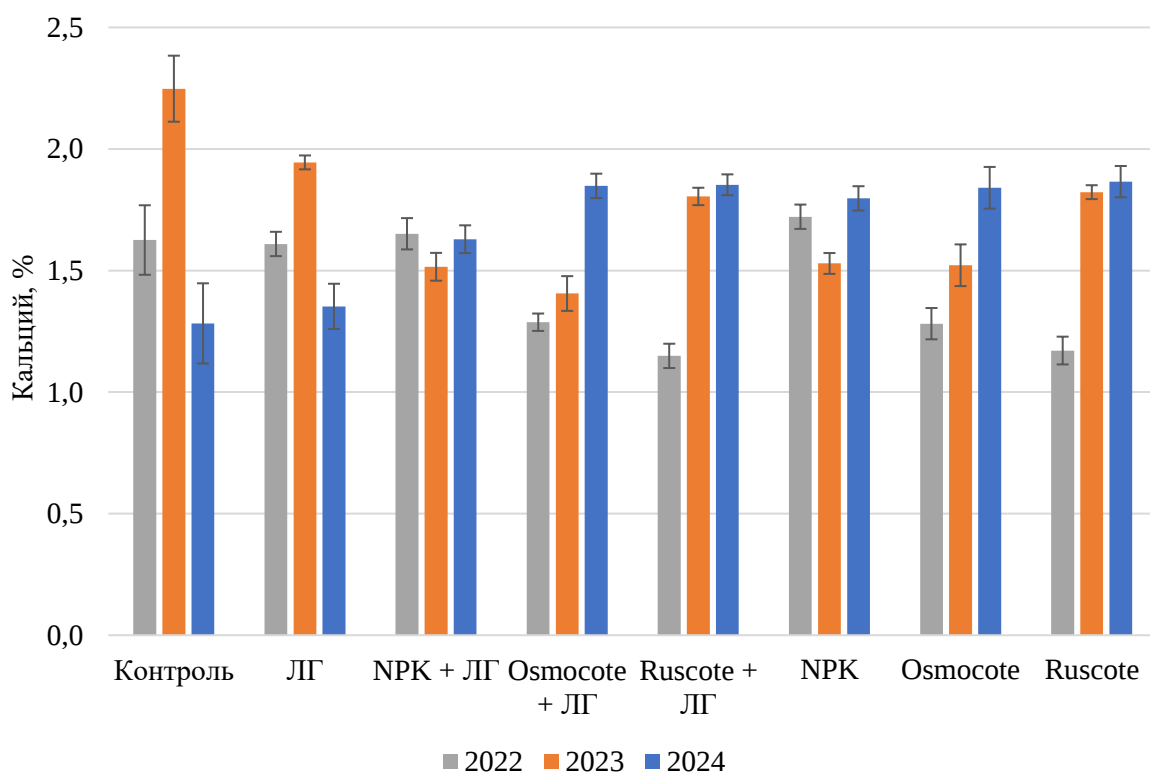


Рисунок 25. Содержание кальция в листьях, %. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

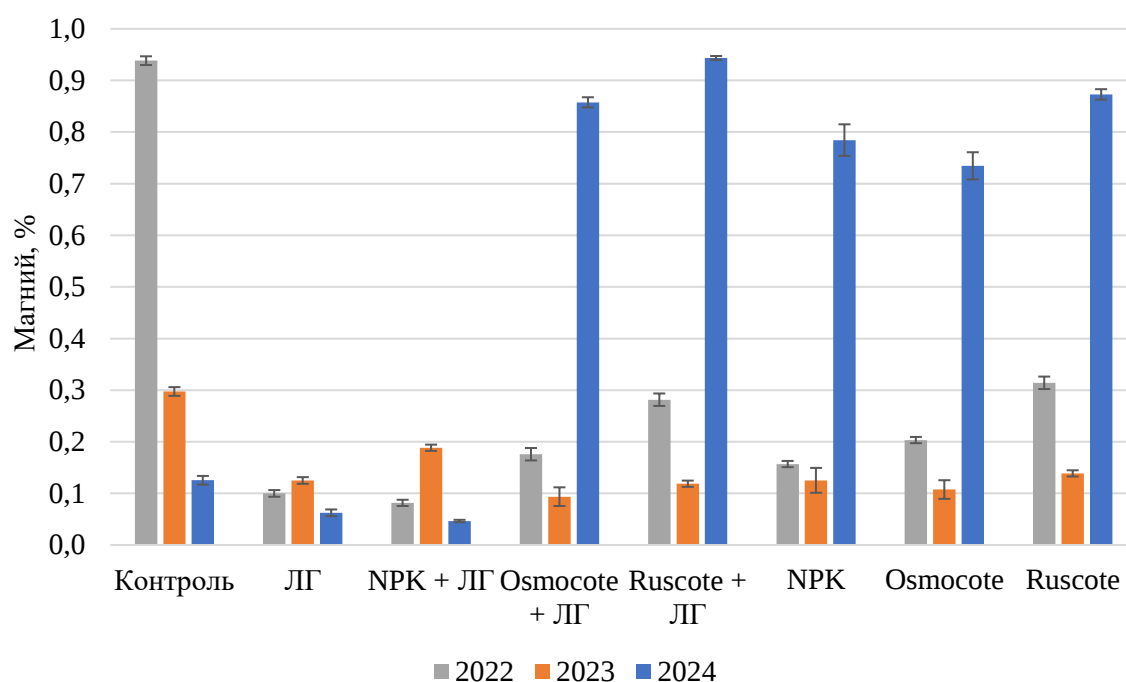


Рисунок 26. Содержание магния в листьях, %. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Магний в листьях в 2022–2023 гг. преимущественно находился на низком уровне (0,1–0,3 %), за исключением варианта Контроль в 2022 г. (0,9 %) (рис. 26). В 2024 г. в вариантах с минеральными комплексными капсулированными удобрениями пролонгированного действия (Osmocote + ЛГ, Ruscote + ЛГ, NPK, Ruscote) наблюдался резкий рост содержания магния до 0,7–0,9 %, что может быть связано с активизацией мобилизации этого элемента из почвогрунта на поздних стадиях вегетации. В 2022 г. минимальное значение наблюдалось в варианте Ruscote (0,12 %), а максимальное - в Контроле (0,93 %). В 2023 г. диапазон был уже меньше: от 0,15 % (Osmocote) до 0,27 % (Ruscote). В 2024 г., напротив, колебания вновь усилились: минимальное значение было отмечено в Контроле (0,32 %), а максимальное - в варианте Osmocote + ЛГ (0,92 %).

Корреляционный анализ показал, что в 2022 г. связь между содержанием Са и Mg в листьях была практически отсутствующей ($r = 0,06$), тогда как в 2023 г. наблюдалась умеренно положительная корреляция ($r = 0,64$), а в 2024 г. эта зависимость усилилась до высокой ($r = 0,88$). Такая динамика указывает на то,

что при стабилизации агрохимических условий и роста растений усвоение кальция и магния становится более согласованным, вероятно, за счёт общего улучшения физиологического состояния растений.

Согласно Agricultural Analytical Services Lab (Penn State), для листовой смородины установлены следующие ориентировочные нормы по сухому веществу: нормальный диапазон концентрации кальция 0,75-1,30 %, высокая концентрация считается до 2,50 %. Нормальный диапазон магния считается в пределах 0,10–0,20 %, высокий - до 0,50 %. Это значит, что минимальные показатели по концентрации кальция находились в пределах нормального диапазона, а максимальные - превышали верхнюю границу нормы, достигая уровня, который в данных Penn State классифицируется как «высокий» (до 2,50 %). Таким образом, в ряде вариантов наблюдалось накопление кальция выше оптимума, что может отражать как интенсивное поступление элемента из почвы, так и его перераспределение вегетативными органами. Содержание магния в листьях колебалось в диапазоне 0,18–0,32 %. Нижние значения укладывались в верхнюю границу нормального диапазона, а большинство вариантов демонстрировали концентрации, превышающие 0,20 %, то есть выходили за оптимум, переходя в условно высокий уровень (>0,20-0,50 %). Это может указывать на повышенное поступление магния в условиях опытов, особенно при внесении определённых форм удобрений.

При анализе содержания кальция в ягодах были выяснены следующие закономерности: в 2023 г. содержание кальция в ягодах варьировало в диапазоне от 0,06 % (вариант NPK) до 0,15 % (вариант Контроль) (рис. 27, табл. П.11). Средние значения по всем вариантам демонстрируют умеренные колебания. Наиболее высокие показатели зафиксированы в контроле (0,15 %) и при применении лигногумата (0,14 %), что может свидетельствовать о повышенном накоплении элемента в условиях отсутствия активного удобрения.

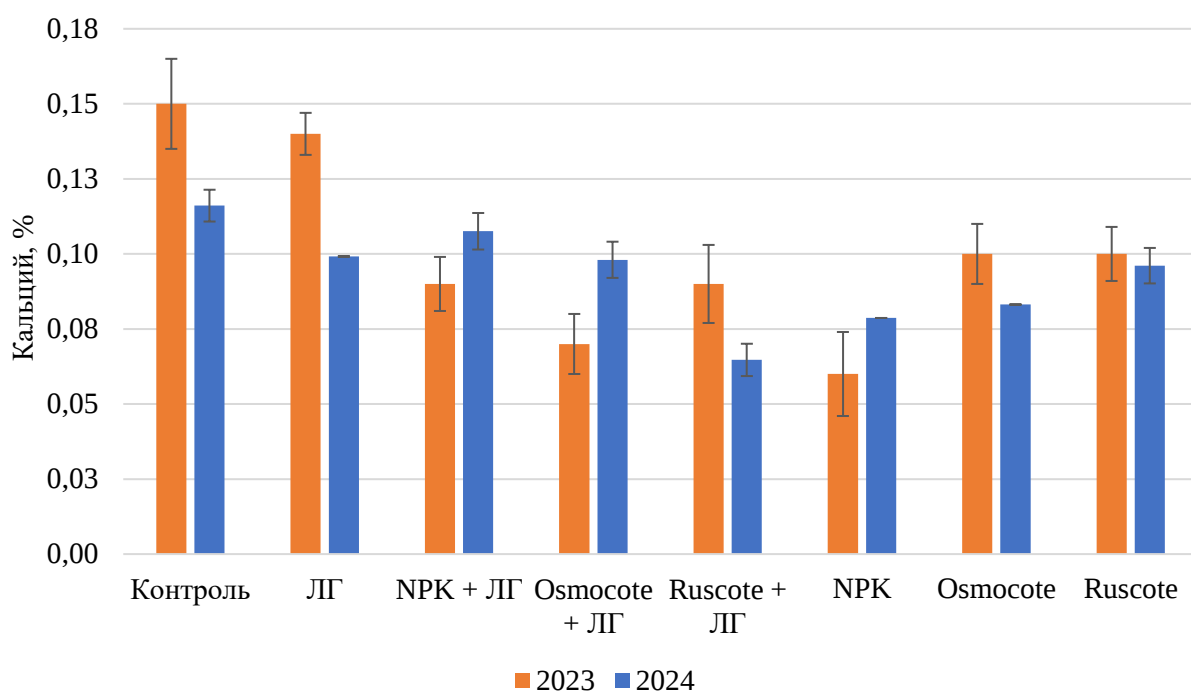


Рисунок 27. Содержание кальция в ягодах, %. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

В 2024 г. во всех вариантах наблюдалось некоторое снижение содержания кальция. Максимальные значения составили 0,12 % (Контроль) и 0,11 % (NPK + ЛГ), тогда как минимальные — 0,06 % (Ruscote + ЛГ). Минеральные комплексные капсулированные удобрения пролонгированного действия, особенно Ruscote, не способствовали увеличению накопления кальция в ягодах во третьем году наблюдений. Варианты с Osmocote и NPK показали стабильное удержание уровня Са около 0,08–0,10 %.

Таким образом, по кальцию выявлена тенденция к снижению содержания в ягодах на третий год в большинстве вариантов. Наблюдаемое снижение концентрации кальция может быть связано с истощением почвы, перераспределением элементов в листьях и ветвях.

В 2023 г. диапазон содержания магния в ягодах черной смородины составил от 0,01 % (NPK, NPK + ЛГ) до 0,03 % (Контроль, ЛГ) (рис. 28, табл. П.11). Наибольшее количество магния было зафиксировано при отсутствии применения минеральных удобрений, что может быть обусловлено более

равномерным распределением микроэлементов в условиях ограниченного питания.

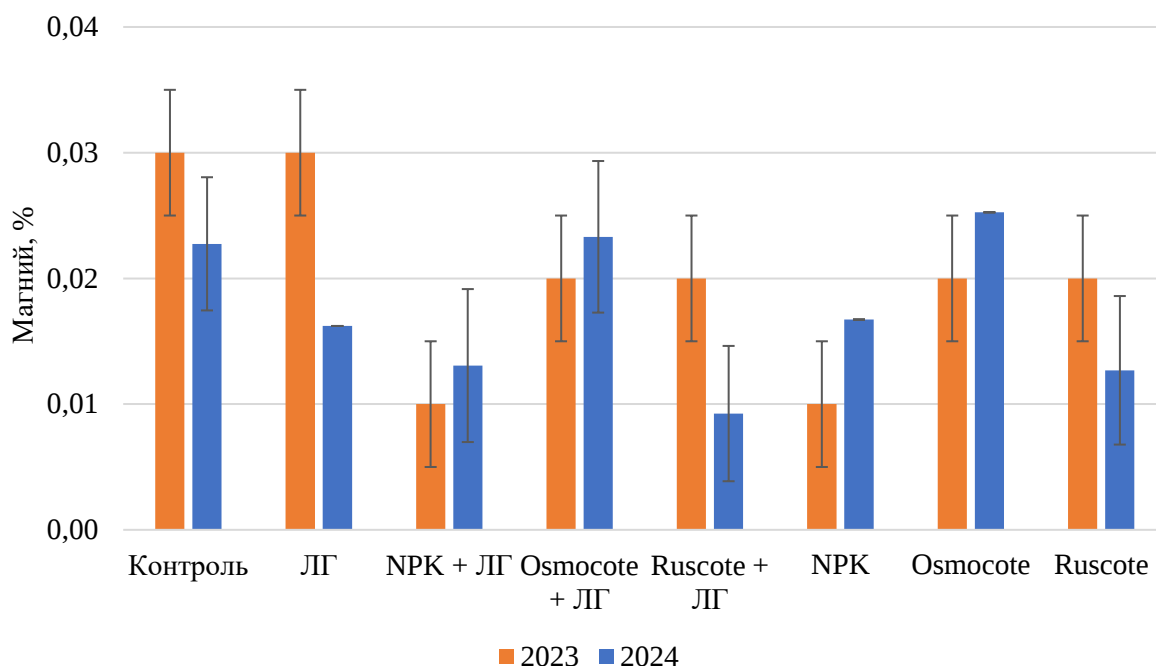


Рисунок 28. Содержание магния в ягодах, %. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

В 2024 г. концентрация магния варьировала менее значительно: минимальные значения составили 0,01 % (Ruscote + ЛГ, NPK + ЛГ, Ruscote), максимальные — 0,03 % (Osmocote). Варианты Osmocote и Контроль показали относительную стабильность по сравнению с предыдущим годом. В целом, содержание магния оставалось на низком уровне и варьировало в пределах 0,01–0,03 %, без выраженной зависимости от года или схемы удобрения.

Согласно исследованиям (Cosmulescu et al., 2015), содержание магния в ягодах варьирует в пределах 98–106 мг/кг (0,0098–0,0106 %), а кальция в пределах 590–675 мг/кг (0,059–0,068 %). Полученные в ходе исследования значения как по кальцию, так и по магнию, превышают указанные литературные нормы. Так, концентрация кальция в ягодах по различным вариантам опыта в 2023 г. составляла от 0,06 до 0,15 %, а в 2024 г. — от 0,06 до 0,12 %, что в отдельных случаях более чем в два раза превышает средние

значения, приведённые в литературе. Аналогично, содержание магния в ягодах в исследуемых образцах колебалось в пределах 0,01–0,03 %, что также заметно выше общепринятых норм. Повышенные уровни макроэлементов, зафиксированные в этом исследовании, могут быть обусловлены как использованием МККУПД, так и индивидуальными особенностями сорта, агротехники и условий вегетации.

В 2022 г. концентрации цинка в листьях (рис. 29, табл. П.12) варьировали от 16,4 мг/кг (вариант Контроль) до 24,8 мг/кг (Ruscote + ЛГ), что отражало умеренное его накопление в листьях. В 2023 г. был зафиксирован рост содержания цинка в большинстве вариантов, особенно в варианте ЛГ - 30,8 мг/кг, что может указывать на активное усвоение элемента при фоллиарной обработке лигногуматом. В 2024 г. содержание цинка значительно возросло во всех вариантах, достигнув показателя 43,0 мг/кг (вариант NPK + ЛГ), 42,0 мг/кг (варианты Ruscote и Osmocote + ЛГ), и даже в Контроле составило 37,7 мг/кг.

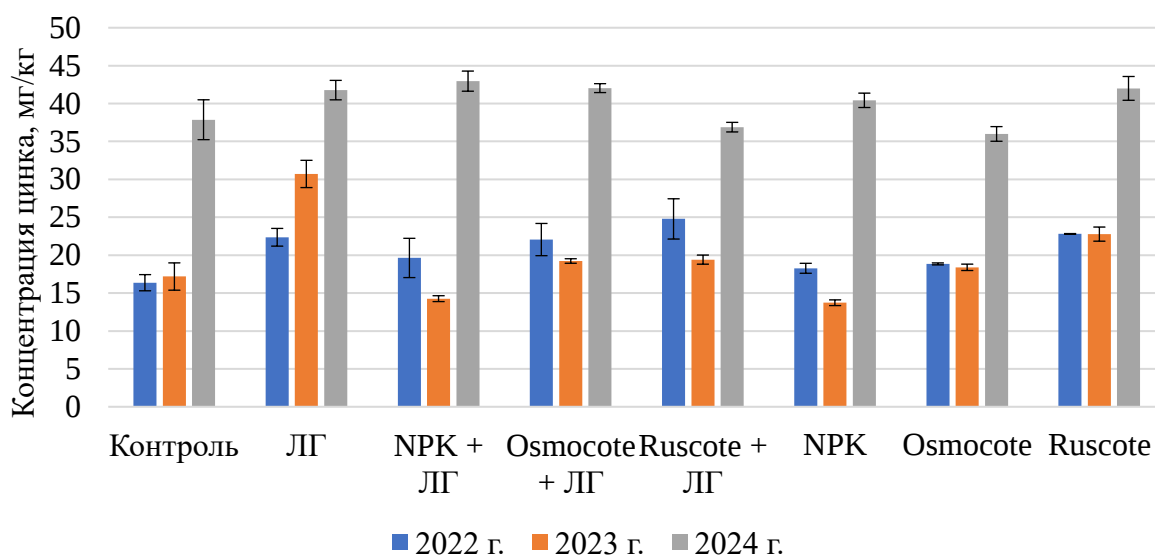


Рисунок 29. Содержание цинка в листьях, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

В 2022 году максимальное содержание меди (6,5 мг/кг) наблюдалось в варианте ЛГ (рис. 30, табл. П.12), но в 2023 году показатели меди существенно снизились и колебались в диапазоне от 1,2 до 2,3 мг/кг, тогда как в 2024 г. вновь

наблюдалось увеличение концентраций: до 3,9 мг/кг (вариант NPK + ЛГ), 3,7 мг/кг (вариант Контроль), 3,1 мг/кг (вариант Osmocote). Это свидетельствует о возможной аккумуляции меди в листовой массе или усиленном ее поглощении на фоне повышенного содержания в почве.

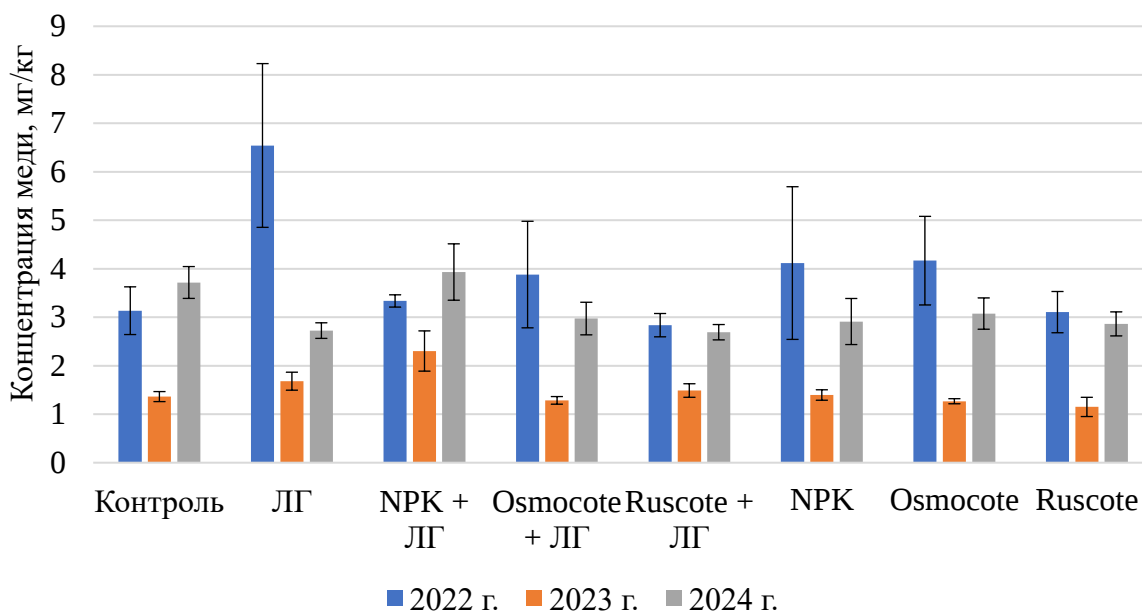


Рисунок 30. Содержание меди в листьях, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Содержание свинца в листьях в 2022–2023 гг. (рис. 31, табл. П.12) оставалось низким и не превышало 0,7 мг/кг, но в 2024 г. во всех вариантах наблюдался резкий рост: до 2,0 мг/кг (вариант Osmocote + ЛГ), 1,5 мг/кг (вариант Osmocote), 1,3 мг/кг (варианты NPK, Ruscote + ЛГ). В контрольном варианте содержание составило 0,5 мг/кг. Во все годы концентрация кадмия в листьях черной смородины оставалась на постоянном уровне 0,1 мг/кг, независимо от варианта опыта, что может свидетельствовать о низкой миграционной способности элемента и его слабом поглощении растениями при текущих агрохимических условиях.

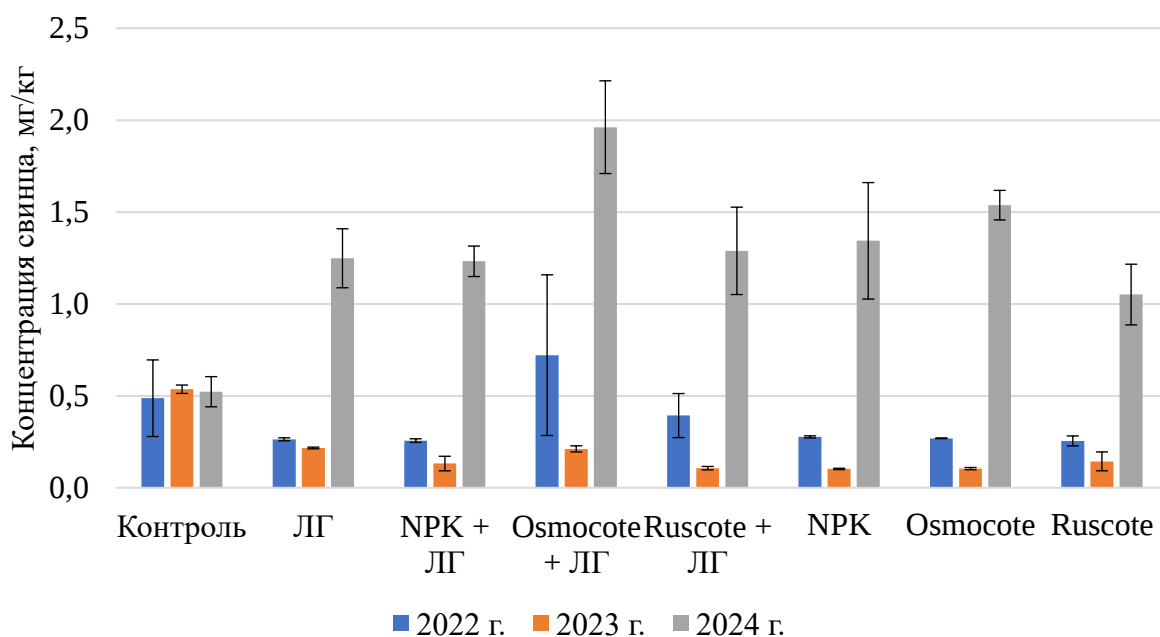


Рисунок 31. Содержание свинца в листьях, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

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. 32, табл. П.13), что может быть следствием перераспределения цинка в вегетативные органы.

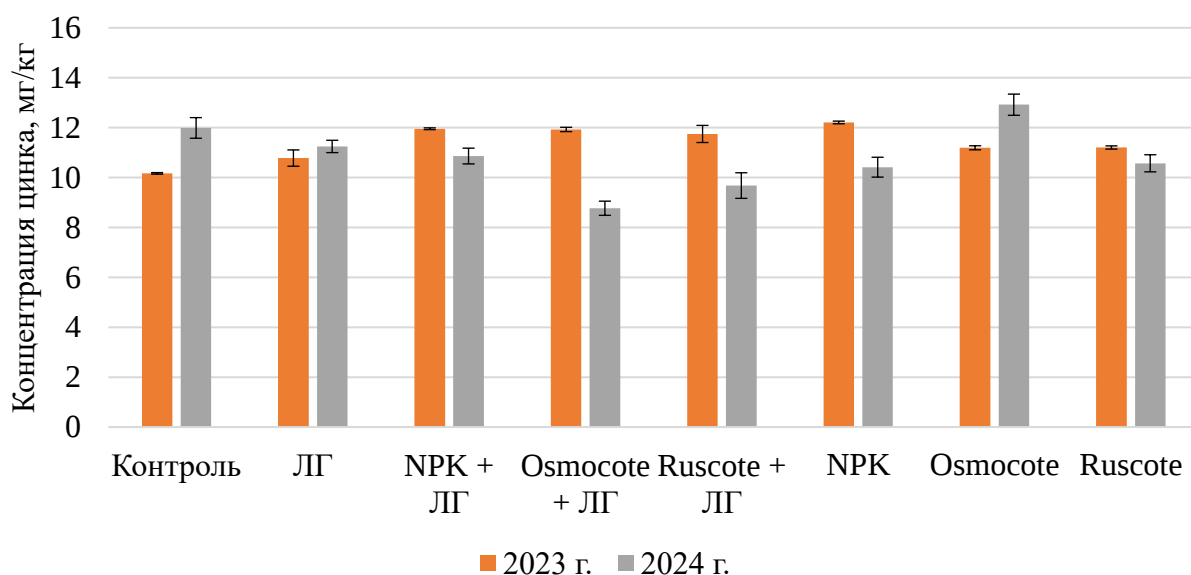


Рисунок 32. Содержание цинка в ягодах, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

При анализе меди был определен ее стабильно низкий уровень - 1,0-1,9 мг/кг (рис. 33, табл. П.13), что соответствует физиологическим нормам и не указывает на избыток микроэлемента.

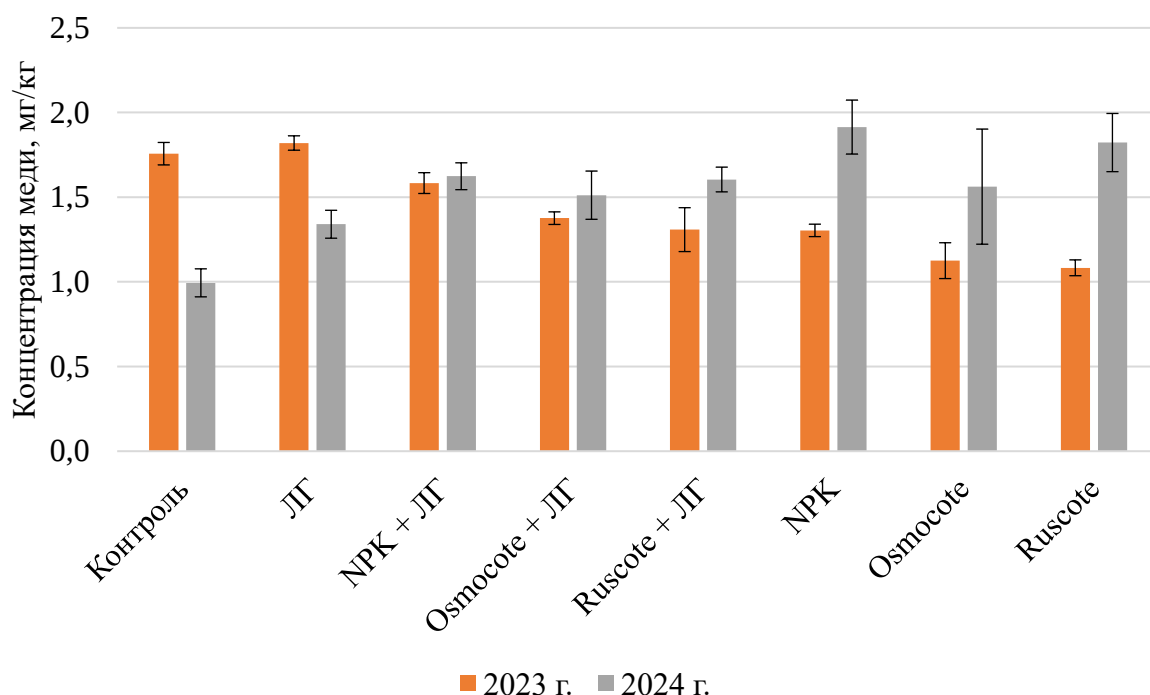


Рисунок 33. Содержание меди в ягодах, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

В 2024 г. был зафиксирован резкий рост концентрации свинца в контрольном варианте до 2,6 мг/кг. В других вариантах он не поднимался выше 1,6 мг/кг (рис. 34, табл. П.13). Варианты Osmocote + ЛГ и Ruscote + ЛГ в 2024 г. показали накопление свинца в листьях и ягодах, что требует дополнительного мониторинга. Повышение Pb в 2024 г. вызывает беспокойство. Особенно значительное - в варианте NPK (до 37,5 мг/кг в почве и 1,3-2,0 мг/кг в листьях и ягодах). Это может быть следствием миграции свинца из окружающей среды либо нарушения норм накопления.

Содержание кадмия оставалось в пределах безопасного уровня 0,1 мг/кг, подтверждающий отсутствие накопления.

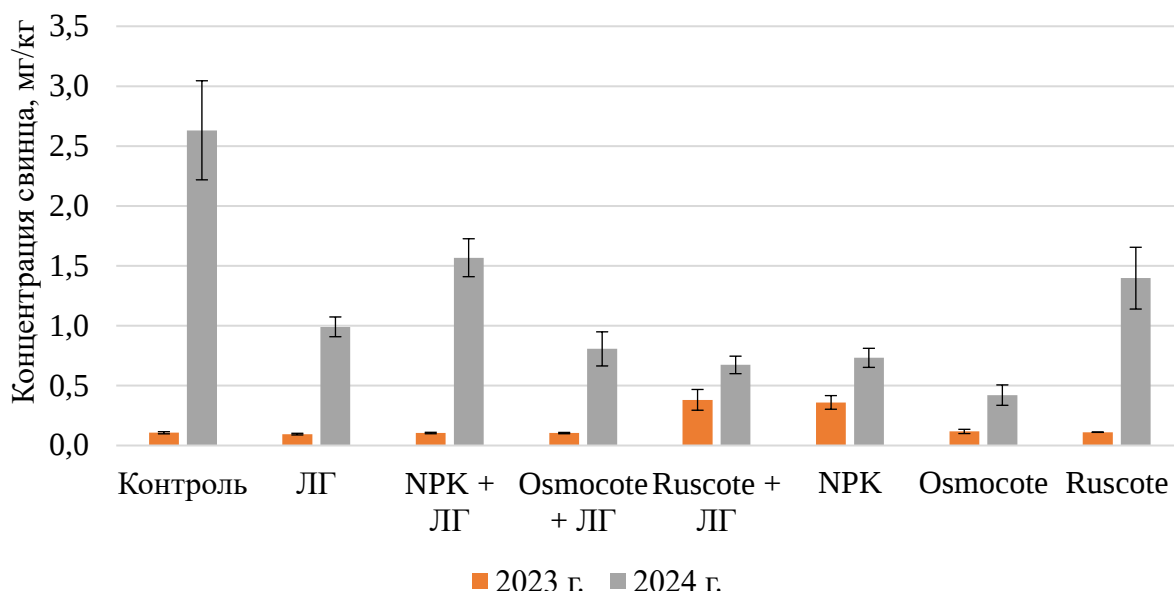


Рисунок 34. Содержание свинца в ягодах, мг/кг. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Допустимые уровни токсичных элементов (СанПиН 2.3.2.560-96 пункт 8.1.3): свинец - 0,3 мг/кг, кадмий - 0,02 мг/кг, медь - 5,0 мг/кг, цинк - 10,0 мг/кг. Согласно санитарным требованиям, большинство исследованных вариантов безопасны по содержанию меди, цинка и свинца. Однако по кадмию наблюдается систематическое превышение ПДК: во всех вариантах 2024 г. значительно превышает допустимый уровень по СанПиН (0,02 мг/кг). Например, в варианте Osmocote + ЛГ зафиксировано 0,07 мг/кг, что в 3,5 раза выше нормы. Это тревожный сигнал, особенно с учётом тенденции к накоплению кадмия с возрастом растений, что требует дополнительной оценки почвогрунта, источников загрязнения и пересмотра агротехники при длительном применении удобрений, особенно пролонгированных форм.

Несмотря на превышение ПДК микроэлементов в почвогрунте, фактическое накопление в ягодах и листьях растений было в пределах допустимого, 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, поскольку их избыток может свидетельствовать о нарушении баланса минерального питания и потенциально снижать качество продукции. В связи с этим в ходе исследования была проведена оценка нитратного накопления в урожае как индикатора метаболического состояния растений и потенциального риска превышения допустимых санитарных норм.

В 2023 г. концентрация нитратов варьировала от 44,7 мг/кг (вариант NPK) до 70,8 мг/кг (Контроль) (рис. 35, табл. П.14). Показатели большинства вариантов (включая Контроль, ЛГ, Osmocote + ЛГ, Ruscote + ЛГ) превышали 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 наблюдались в вариантах с отсутствием или ограничением минерального питания, что может указывать на снижение метаболической активности растений и накопление нитратного азота.

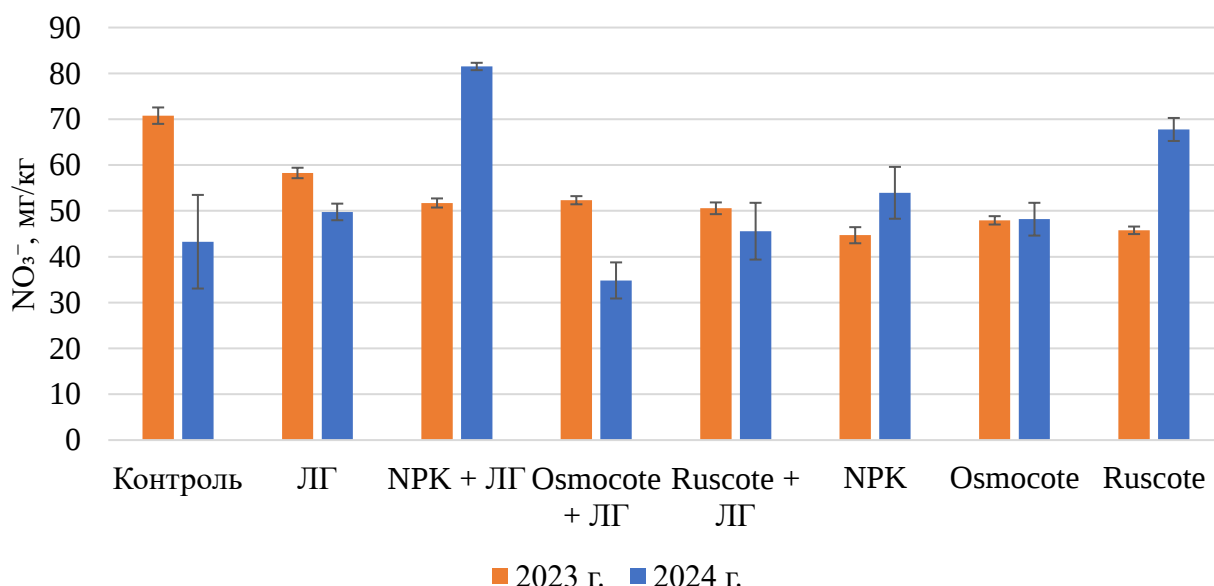


Рисунок 35. Содержание нитратов в ягодах черной смородины, мг/кг сырого вещества. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

В 2024 г. характер распределения нитратов изменился. Наименьшее содержание зафиксировано в варианте Osmocote + ЛГ (34,8 мг/кг), что может свидетельствовать о положительном эффекте минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия в сочетании с лигногуматом на метаболизм азота. В то же время, максимальный уровень нитратов в 2024 г. был отмечен в варианте NPK + ЛГ (81,5 мг/кг), что существенно выше как нормативного уровня, так и всех других вариантов опыта. Это может быть связано с усиленным поступлением и накоплением азота, особенно в сочетании органических и минеральных форм, в условиях, способствующих нарушению баланса между поступлением и усвоением нитратов.

Сравнение значений между 2023 и 2024 гг. показывает разнонаправленные тенденции. Так, в Контроле содержание нитратов снизилось с 70,8 до 43,3 мг/кг, в то время как в NPK + ЛГ произошло существенное увеличение (с 51,7 до 81,5 мг/кг). При этом доверительные интервалы не перекрываются, что позволяет считать эти изменения статистически значимыми. В большинстве остальных вариантов наблюдаются умеренные колебания в пределах доверительных границ, что говорит об устойчивости метаболизма нитратов при определённых условиях питания (например, варианты Osmocote, Osmocote + ЛГ).

Содержание общего азота в листьях демонстрировало зависимость от водного режима. В первый год (2022 г.), несмотря на гидротермический стресс (ГТК = 0,75 (недостаточное увлажнение), концентрация азота в листьях была высокой (до 2,5 %), что указывает на его аккумуляцию и ограниченное использование. В условиях оптимального ГТК в 2023-2024 гг. содержание азота в листьях снижалось, что может быть связано с усилением вегетативного роста и перераспределением азота к другим развивающимся органам.

По данным литературы, 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). Таким образом, в данном исследовании по ряду вариантов были зафиксированы значения, как укладывающиеся в указанный диапазон (например, вариант Osmocote + ЛГ - 34,8 мг/кг), так и превышающие его более чем в 1,5 раза (например, Контроль, Ruscote, NPK + ЛГ).

Общее превышение ПДК в ряде вариантов, особенно в NPK + ЛГ, может свидетельствовать о стрессовой нагрузке на растения, связанной с нарушением усвоения азота или избытком доступных нитратов. В то же время, пониженные значения нитратов в вариантах с минеральными комплексными капсулированными удобрениями пролонгированного действия и примененным лигногуматом могут указывать на антистрессовое действие этих препаратов, нормализующее метаболизм азота.

После изучения макроэлементного состава вегетативных и генеративных органов чёрной смородины, особое внимание было уделено содержанию фенольных соединений в различных частях биомассы как важнейших биологически активных веществ, отражающих метаболическую активность растений и их адаптацию к условиям внешней среды.

В 2022 г. наибольшее содержание фенольных соединений в листьях чёрной смородины было зафиксировано в варианте с применением удобрения Ruscote - 38,2 мг-экв галловой кислоты/г сырой массы, тогда как минимальные значения наблюдались в одном из вариантов обработки - 25,0 мг-экв галловой кислоты/г сырой массы (вариант NPK) (рис. 36, табл. П.15). В 2023 г. максимальное содержание фенольных соединений, обнаруженное в листьях, в варианте с применением удобрения Osmocote (38,0 мг-экв галловой кислоты/г), а наименьшее значение было отмечено при совместном применении Osmocote и ЛГ - 29,3 мг-экв галловой кислоты/г. В 2024 г. тенденция резко изменилась:

наивысший уровень фенольных соединений в листьях был зафиксирован в контроле - 17, мг-экв. галловой кислоты/г, а минимальный - в варианте Ruscote (12,1 мг-экв. галловой кислоты/г), что указывает на выраженное снижение содержания фенолов за трёхлетний период наблюдений.

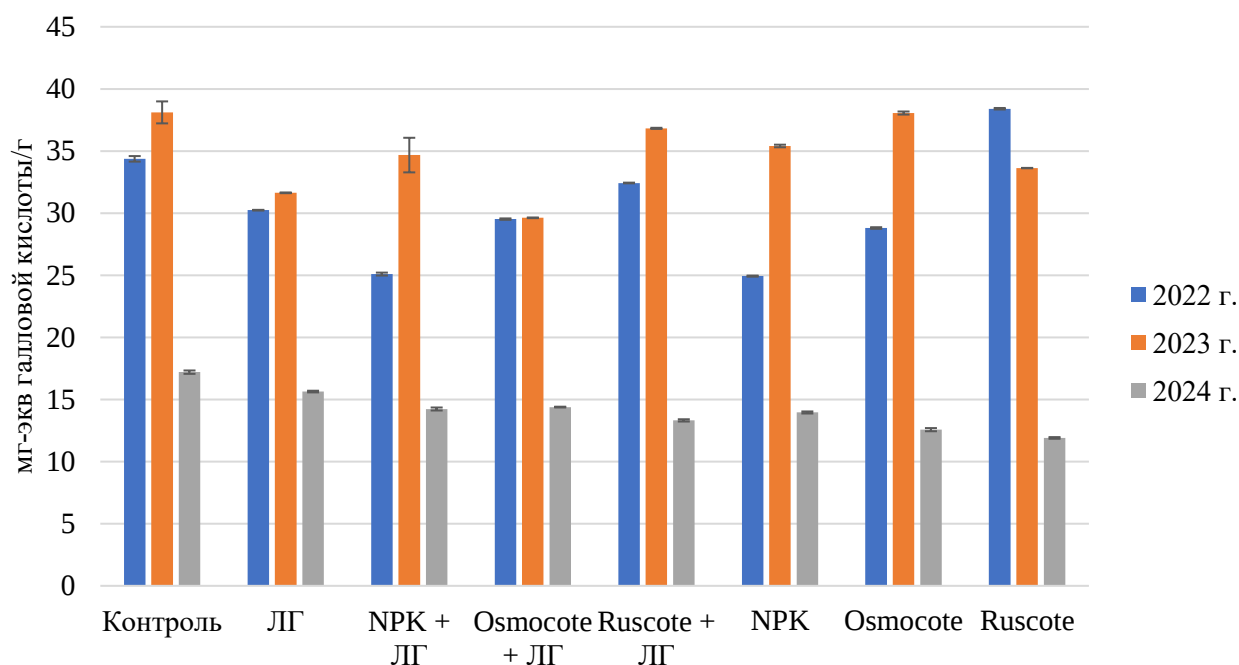


Рисунок 36. Содержание фенольных соединений в листьях, мг-экв галловой кислоты/г. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

В ягодах максимальная концентрация фенольных соединений в 2023 г. была определена в варианте с минеральными удобрениями (NPK) — 12,8 мг-экв галловой кислоты/г сырой массы, тогда как минимальные значения были зарегистрированы при применении удобрения Osmocote в сочетании с обработкой лигногуматом — 3,0 мг-экв. галловой кислоты/г (рис. 37, табл. П.15). В 2024 г. наибольшее содержание фенолов наблюдалось в варианте Ruscote — 9,6 мг-экв галловой кислоты/г, а наименьшее — в контроле (6,2 мг-экв. галловой кислоты/г).

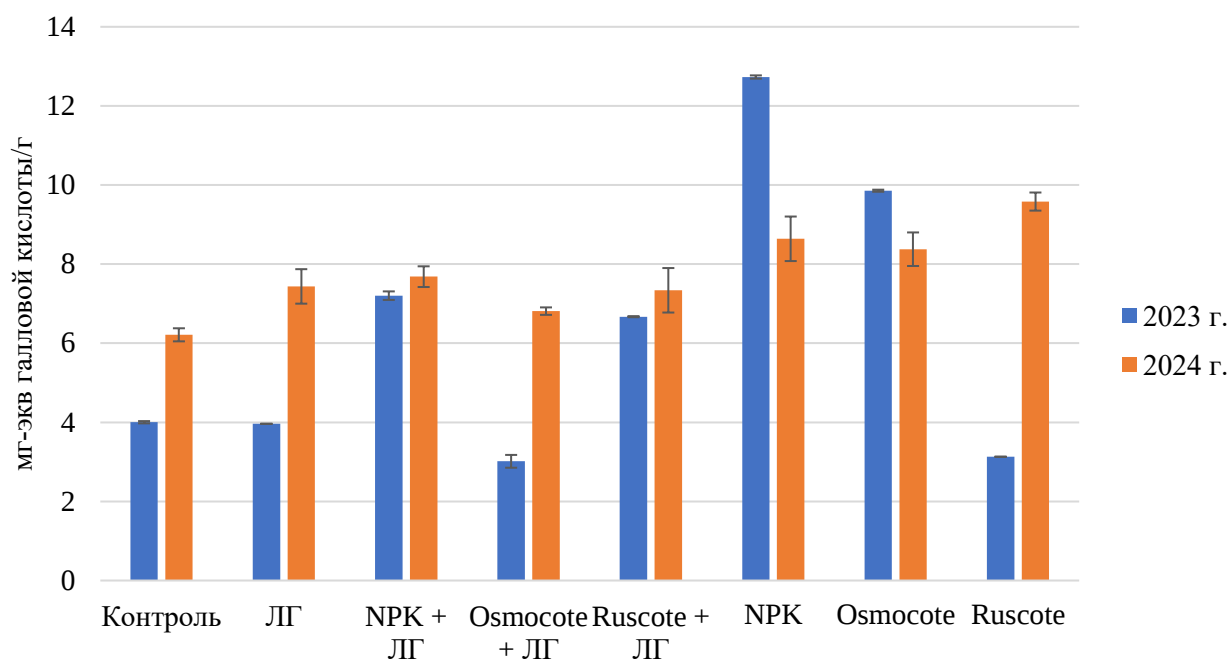


Рисунок 37. Содержание фенольных соединений в ягодах, мг-экв. галловой кислоты/г. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Общая динамика содержания фенольных соединений в листьях характеризовалась отчётливым снижением от первого к третьему году вегетации. Так, например, в контроле снижение составило более чем в два раза - с 34,4 до 17,2 мг-экв. галловой кислоты/г, а в варианте NPK + ЛГ - с 25,5 до 14,2 мг-экв. галловой кислоты/г. Напротив, в ягодах отмечена положительная динамика накопления фенольных соединений между 2023 и 2024 гг. во всех вариантах, за исключением варианта с гранулированными минеральными удобрениями (NPK), где содержание фенолов снизилось с 12,8 до 8,6 мг-экв галловой кислоты/г. Особенно выраженный прирост был зарегистрирован в варианте Ruscote - почти в три раза, с 3,2 до 9,6 мг-экв. галловой кислоты/г, что может свидетельствовать о перераспределении метаболитов от листьев к генеративным органам. 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.

Сопоставление полученных результатов с опубликованными данными по содержанию фенольных соединений в ягодах чёрной смородины выявляет значительные расхождения в уровнях их накопления. Согласно исследованиям Громовой и др. (2021), а также Чугуновой и др. (2021), максимальная концентрация фенольных соединений в ягодах может достигать 627,9-643 мг-экв. галловой кислоты на 100 г. В рамках нашего эксперимента наивысшее содержание фенольных соединений наблюдалось в 2023 г. при использовании гранулированных минеральных удобрений (вариант NPK) и составило 12,8 мг-экв галловой кислоты/г, что эквивалентно 1280 мг-экв. галловой кислоты /100 г сырого вещества, то есть значительно превосходит указанные в литературе значения.

Кроме того, опытные варианты, не включавшие фолиарную обработку Лигногуматом АМ, характеризовались относительно высокими концентрациями фенольных соединений в ягодах (более 8 мг-экв галловой кислоты/г). Это может свидетельствовать о выраженной метаболической реакции растений на отсутствие антистрессового компонента и подтверждает участие Лигногумата АМ в активации антиоксидантного ответа и регулировании синтеза вторичных метаболитов.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа (ANOVA) (табл. 5) продемонстрировали статистически значимое влияние факторов «Удобрение», «Лигногумат АМ», а также их взаимодействия на уровень фенольных соединений в листьях и ягодах чёрной смородины. В частности, влияние Лигногумата АМ на содержание фенольных соединений в листьях было достоверным в 2022 ($F = 41,6$; $p < 0,001$) и 2023 гг. ($F = 27,6$; $p = 0,001$), тогда как в 2024 г. статистически значимого эффекта зафиксировано не было ($F = 2,2$; $p = 0,172$). Для ягод наибольшая чувствительность к обработке лигногуматом наблюдалась в 2023 г. ($F = 141,2$; $p < 0,001$), но в следующем сезоне эффект ослабел, хоть и остался значимым ($F = 15,3$; $p = 0,005$).

Таблица 5. 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

Фактор удобрений оказывал выраженное влияние на содержание фенольных соединений в листьях в 2022 ($F = 169,4$; $p < 0,001$) и 2024 гг. ($F = 40,0$; $p < 0,001$), однако в 2023 г. статистическая значимость оказалась невысокой ($F = 1,3$; $p = 0,344$). Что касается ягод, наибольшее влияние удобрений было отмечено в 2023 г. ($F = 190,0$; $p < 0,001$), тогда как в 2024 г. оно существенно снизилось ($F = 10,6$; $p = 0,004$).

Значимое взаимодействие между факторами (Удобрение - Лигногумат АМ) фиксировалось во всех случаях, особенно в ягодах в 2023 г., где оно достигло максимальной силы ($F = 150,3$; $p < 0,001$), что подчёркивает важность синергетического подхода при применении различных форм питания. В листьях этот эффект также проявлялся в 2022 и 2023 гг. ($F = 25,6$ и $F = 20,6$ соответственно; $p < 0,001$), но несколько ослаб в 2024 г. ($F = 9,2$; $p = 0,006$).

Также влияние ГТК отчетливо проявилось в динамике содержания фенольных соединений: в засушливом 2022 г. (ГТК = 0,75 (недостаточное увлажнение) концентрация фенолов в листьях достигала максимальных

значений (до 38,2 мг-экв галловой кислоты/г сырого вещества), что согласуется с литературными данными о стресс-индуцированном усилении синтеза вторичных метаболитов. В последующие годы, на фоне оптимального увлажнения (в 2023 и 2024 гг. значения ГТК были существенно выше 1,31 и 1,14 соответственно (оптимальное увлажнение), наблюдалось устойчивое снижение содержания фенолов в листьях. При этом, в 2024 г. 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 комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия.

Следовательно, влияние удобрений на содержание фенольных соединений проявляется наиболее выражено в листьях в первый и третий годы вегетации, а также в ягодах во второй год. При этом характер воздействия варьируется в зависимости от фазы онтогенеза растения. Совместное применение Лигногумата АМ с удобрениями демонстрирует максимальный эффект на накопление фенольных соединений в обоих органах растения, особенно в первые два года выращивания, что указывает на синергетическое действие агрохимических факторов в начальные периоды развития кустарника.

В 2022 г. наблюдалась слабая отрицательная корреляция между содержанием свинца в почвогрунте и уровнем фенольных соединений в листьях ($r = -0,517$), а также между кадмием и фенольными соединениями в листьях ($r = -0,442$), что может свидетельствовать о стрессовом влиянии этих элементов на метаболизм растений и снижении синтеза вторичных метаболитов. Влияние меди и цинка в тот же период оказалось незначительным ($r = -0,099$ и $r = 0,153$ соответственно). В 2023 г. была отмечена более выраженная отрицательная связь между содержанием кадмием в почвогрунте и содержанием фенолов в листьях ($r = -0,722$), что подтверждает фитотоксичность этого элемента даже в малых концентрациях. В то же время

установлена положительная связь между уровнем свинца и содержанием фенольных соединений в ягодах ($r = 0,583$), которая может отражать компенсаторную активность фенольных антиоксидантов при накоплении металла в генеративных органах. В 2024 г. взаимосвязи между микроэлементами в почве и уровнем фенолов в ягодах оставались слабо выраженными.

Таким образом, среди изученных микроэлементов наибольшее влияние на уровень фенольных соединений оказали кадмий (преимущественно угнетающее) и свинец (возможный стресс-индуцирующий фактор, способствующий синтезу фенолов в ягодах). Эти наблюдения согласуются с литературными данными о роли фенольных метаболитов как антиоксидантов и их участии в защите растений от тяжёлых металлов (Baran et al., 2020; Kulikova et al., 2022).

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.

Содержание антоцианов в ягодах чёрной смородины значительно варьировало в зависимости от вариантов агротехнического воздействия (рис. 38, табл. П.16). В 2023 г. минимальные концентрации антоцианов были зафиксированы в варианте с совместным применением препаратов Ruscote и Лигногумата АМ (105,3 мг/кг), тогда как максимальные значения отмечены в Контроле (219,5 мг/кг). В 2024 г. картина сохранилась: наименьшее содержание антоцианов вновь было зарегистрировано в варианте Ruscote + ЛГ (111,7 мг/кг), а наивысшее — в варианте Контроль (196,7 мг/кг).

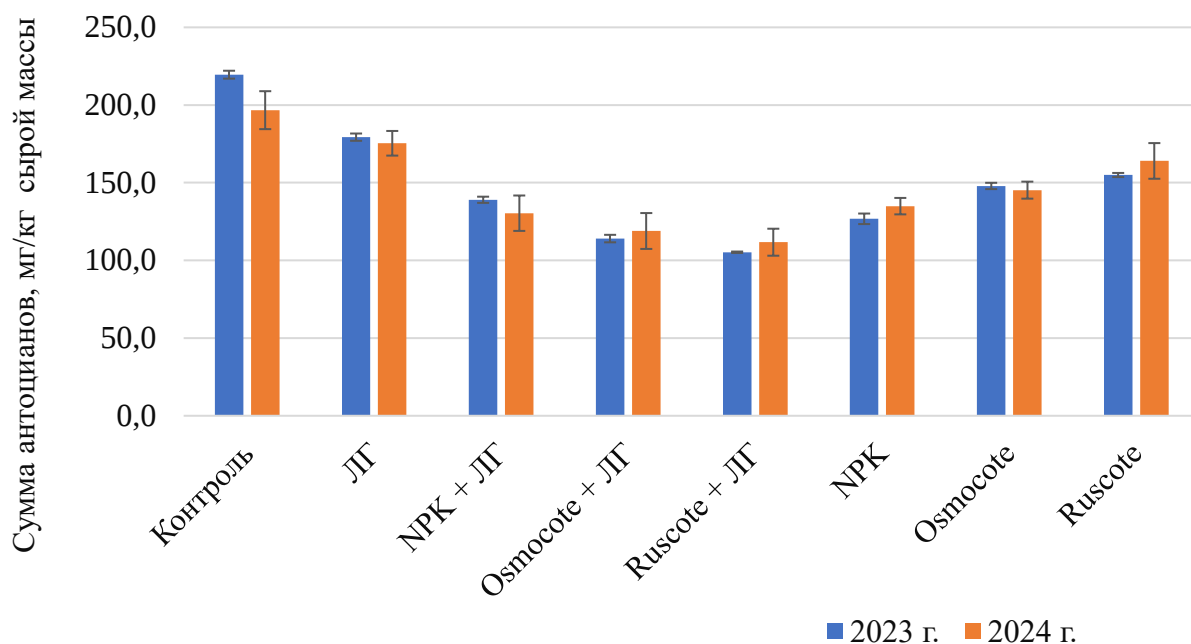


Рисунок 38. Содержание суммы антоцианов в ягодах, мг/кг сырой массы. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Как известно, уровень антоцианов в ягодах определяется целым рядом факторов, включая сортовые особенности, агротехнические приёмы, погодные условия и методологию анализа. По литературным данным, типичный диапазон содержания антоцианов в ягодах чёрной смородины составляет от 200 до 700 мг/100 г свежего веса (Oszmiański, Wojdyło, 2009), а по данным Блинниковой (2019) — около 492,6 мг/100 г. В настоящем исследовании были зафиксированы относительно низкие значения, что может быть обусловлено спецификой используемого сорта или сниженной стрессовой нагрузкой на растения.

Отчётливо прослеживается следующая закономерность: максимальные концентрации антоцианов наблюдаются в контрольных вариантах, в то время как внесение удобрений, особенно минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия, приводит к снижению их накопления. Подобное снижение может быть связано с тем, что при улучшении условий питания и снижении влияния стресс-факторов

(например, дефицита элементов, засухи) синтез антоцианов, как компонентов антиоксидантной защиты, уменьшается вследствие снижения потребности в них.

Сравнение данных за 2023 и 2024 гг. свидетельствует о тенденции к снижению содержания антоцианов во всех вариантах опыта в последнем году. Это, вероятно, связано с изменением погодных условий или общим улучшением минерального питания, что уменьшило уровень индуцированного стресса у растений. Несмотря на абсолютное снижение показателей, общая динамика осталась стабильной: контроль сохраняет наивысшие значения, тогда как применение удобрений (независимо от их типа) приводит к снижению концентрации антоцианов в ягодах.

Показатели антоцианов также продемонстрировали связь с погодными условиями. Наибольшее их содержание было зафиксировано в контрольных вариантах в 2023 г., при переходе от засушливого года к оптимальному. При этом внесение удобрений, особенно пролонгированных, приводило к снижению уровня антоцианов, вероятно, за счёт снижения стрессовой нагрузки и активации первичного метаболизма.

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

В течение трёх лет опыта была обнаружена высокая вариативность активности каталазы между вариантами опыта и сезонами (рис. 39, табл. П.17). В 2022 г. значения показателя колебались от 0,1 мг H_2O_2 /1 г (варианты Osmocote + ЛГ, ЛГ) до 1,0 мг H_2O_2 /1 г (Контроль), при этом самый высокий уровень активности каталазы был зарегистрирован в контрольном варианте, что может свидетельствовать о стрессовом состоянии растений при отсутствии внесения удобрений. Также относительно высокие значения были

зафиксированы в вариантах Ruscote (0,6 мг H_2O_2 /1 г) и Ruscote + ЛГ (0,5 мг H_2O_2 /1 г).

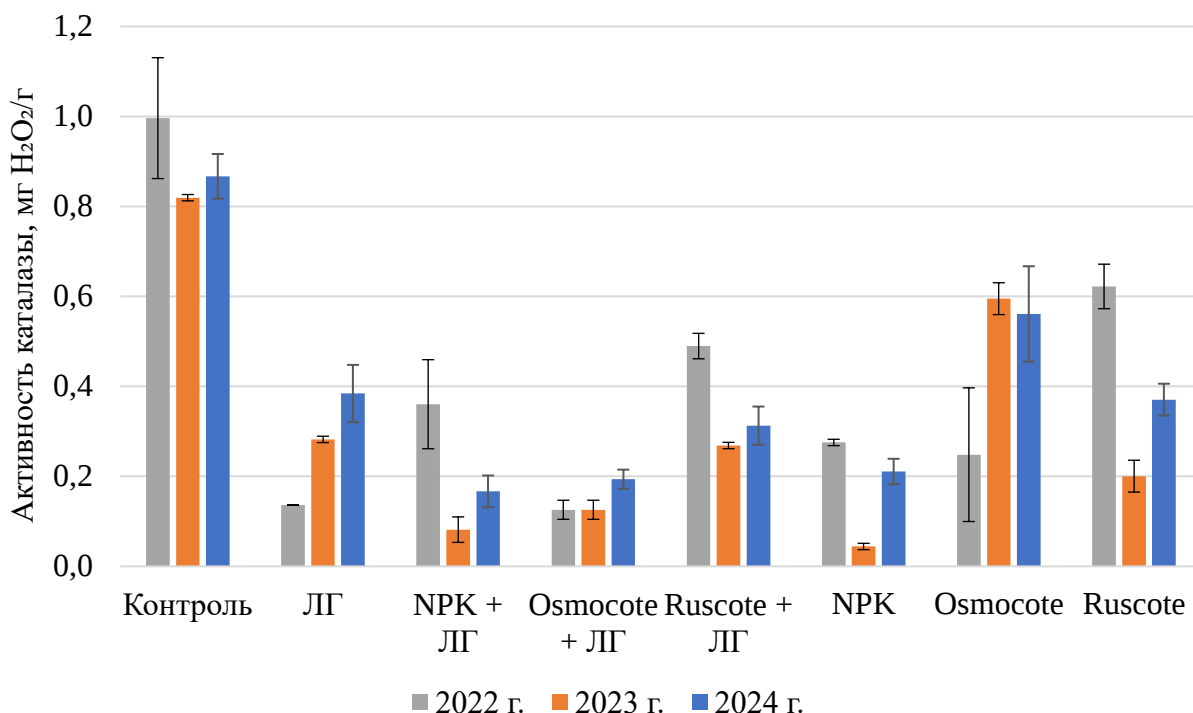


Рисунок 39. Активность каталазы, мг H_2O_2 /1 г растительной массы. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

В 2023 г. в большинстве вариантов наблюдалось снижение активности каталазы: минимальные значения были зарегистрированы в вариантах NPK (0,01 мг H_2O_2 /1 г), NPK + ЛГ (0,1 мг H_2O_2 /1 г), Osmocote + ЛГ (0,1 мг H_2O_2 /1 г). Контроль также показал значимое снижение до 0,8 мг H_2O_2 /1 г. Максимальное значение было зафиксировано в варианте Osmocote (0,6 мг H_2O_2 /1 г). В 2024 г. уровень активности каталазы находился в диапазоне от 0,2 мг H_2O_2 /1 г (варианты Osmocote + ЛГ, NPK + ЛГ) до 0,9 мг H_2O_2 /1 г (Контроль). Минимальные значения были характерны для вариантов с внесением минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия и обработкой лигногуматом. Варианты Ruscote и Osmocote без фолиарной обработки демонстрировали умеренно повышенные значения (0,4–0,6 мг H_2O_2 /1 г), что может быть связано с накоплением продуктов распада из

оболочек или более активным метаболизмом или подтвердить действие лигногумата, как антистресс-препарата.

Максимальная активность каталазы на протяжении всех лет фиксируется в контрольном варианте, где растения подвергались наибольшему воздействию абиотических факторов без применения удобрений и антиоксидантов. Это подтверждает данные литературы о повышении активности антиоксидантных ферментов при стрессовых воздействиях (Dumanović et al., 2021; Ma et al., 2021). Напротив, низкие значения каталазы (0,1–0,3 мг/г) наблюдались в вариантах, где присутствовала листовая обработка 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.

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).

Сравнение этих значений с данными исследования позволяет утверждать, что в контрольном варианте и частично в вариантах без фоллиарной обработки Лигногуматом АМ у растений наблюдался повышенный уровень каталазы, что указывает на реализацию защитных механизмов в ответ на стресс. Напротив, в условиях применения Лигногумата АМ активность каталазы снижалась, что

может свидетельствовать о снижении окислительной нагрузки и нормализации физиологических процессов.

Так как фотосинтетические пигменты чувствительны к стрессовым условиям и отражают общее функциональное состояние растений, следующим этапом исследования стало изучение содержания хлорофиллов а и b, а также каротиноидов в листьях черной смородины.

Содержание хлорофилла а варьировало в широком диапазоне (рис. 40, табл. П.18). В 2022 г. концентрация хлорофилла а колебалась от 0,99 мг/г (вариант ЛГ) до 1,16 мг/г (Osmocote). В 2023 г. пигмент накапливался интенсивнее: максимальное значение было зафиксировано в варианте Osmocote (1,45 мг/г), а минимальное — в варианте Ruscote + ЛГ (1,01 мг/г). В 2024 г. наблюдалось общее снижение: от 0,74 мг/г (вариант NPK + ЛГ) до 0,86 мг/г (Ruscote), что может указывать на ухудшение условий или старение растений.

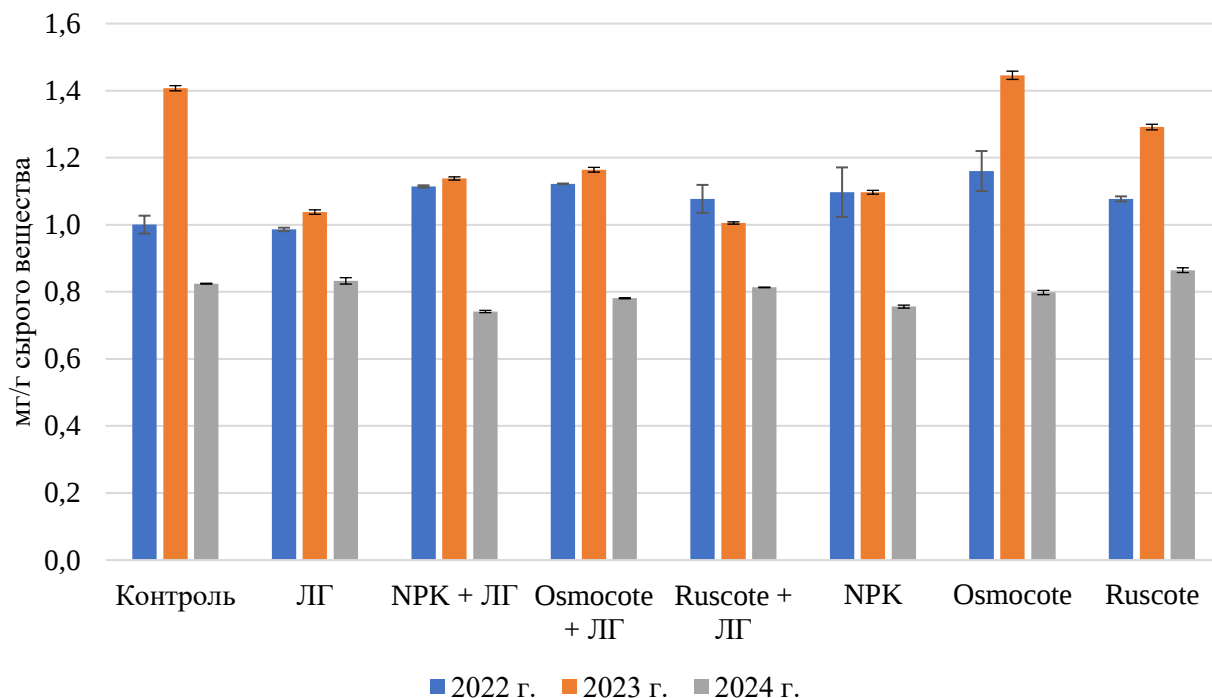


Рисунок 40. Содержание хлорофилла а в листьях в конце вегетационного сезона, мг/г сырого вещества. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Хлорофилл b также демонстрировал высокую межгодовую изменчивость: в 2022 г. максимум был 0,83 мг/г (Osmocote), минимум - 0,40 мг/г (ЛГ) (рис. 41, табл. П.18). В 2023 г. диапазон остался широким: от 0,37 мг/г (Ruscote + ЛГ) до 0,91 мг/г (NPK + ЛГ), при этом в вариантах только с минеральным питанием содержание было выше. В 2024 г. снова наблюдалось снижение: от 0,32 мг/г (NPK + ЛГ) до 0,61 мг/г (Ruscote + ЛГ).

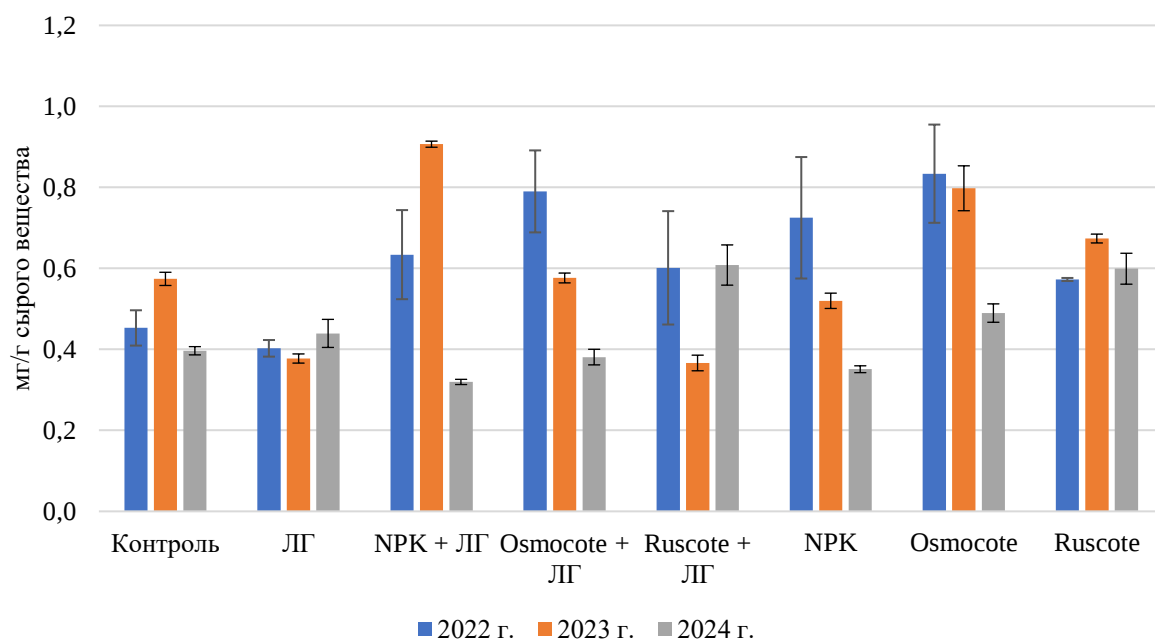


Рисунок 41. Содержание хлорофилла b в листьях в конце вегетационного сезона, мг/г сырого вещества. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

При анализе суммарного содержания хлорофиллов (a + b) в 2022 г. наибольшая сумма хлорофиллов была отмечена в варианте Osmocote (1,99 мг/г), а наименьшая в ЛГ (1,39 мг/г) (рис. 42, табл. П.18). В 2023 г. суммарное содержание достигло 2,24 мг/г (Osmocote), а минимум 1,37 мг/г (Ruscote + ЛГ). В 2024 г. диапазон значений снизился: от 1,06 мг/г (NPK + ЛГ) до 1,46 мг/г (Ruscote). Это снижение в 2024 г. может быть связано с возрастом растений, агроклиматическими факторами или менее эффективным фотосинтезом в условиях стресса.

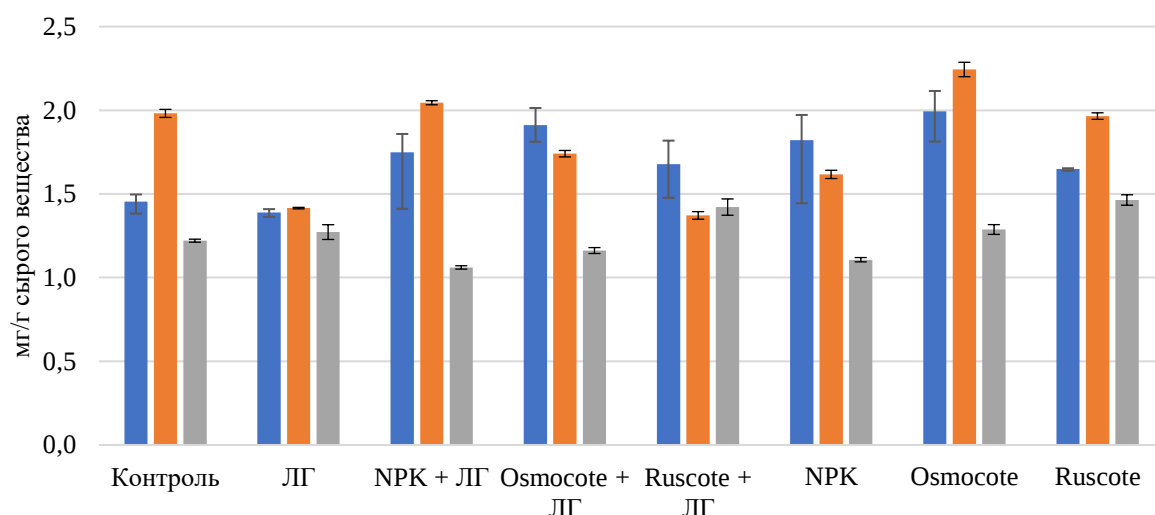


Рисунок 42. Содержание суммы хлорофилла а и b в листьях в конце вегетационного сезона, мг/г сырого вещества. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

По литературным источникам, типичный уровень суммы хлорофилла (а + b) в листьях большинства культурных растений составляет от 1,2 до 2,5 мг/г сырой массы, в зависимости от условий среды и возраста листьев (Gitelson et al., 2003). Данные в 2022–2023 гг. соответствовали этим значениям, а в 2024 г. произошло снижение, что может быть признаком старения листьев или стрессовой нагрузки.

Показатель соотношения «хлорофилл а : хлорофилл b» отражает баланс светособирающих комплексов: в 2022-2024 гг. наиболее сбалансированное соотношение наблюдалось в вариантах Osmocote, Ruscote, а также NPK (табл. П.18). Максимальные значения (до 2,75) наблюдались в вариантах без применения удобрений или с применением только Лигногумата, что может свидетельствовать о стрессе, нарушающем пропорции между двумя типами хлорофиллов.

Анализ содержания каротиноидов (играют защитную роль в фотосинтетическом аппарате) выявил следующие тенденции: в 2022 г. максимум был обнаружен в варианте ЛГ (0,35 мг/г), а минимум (0,22 мг/г) в

варианте Osmocote (рис. 43, табл. П.18). В 2023 г. наблюдался значительный рост, особенно в контроле (0,64 мг/г), при этом наименьшее значение составляло 0,38 мг/г (NPK + ЛГ). В 2024 г. значения вновь были снижены и варьировались от 0,24 мг/г (Ruscote + ЛГ) до 0,33 мг/г (Контроль). Каротиноиды показали тенденцию к повышению в условиях стресса (в контроле и неудобренных вариантах), что согласуется с их функцией защиты от оксидативного повреждения.

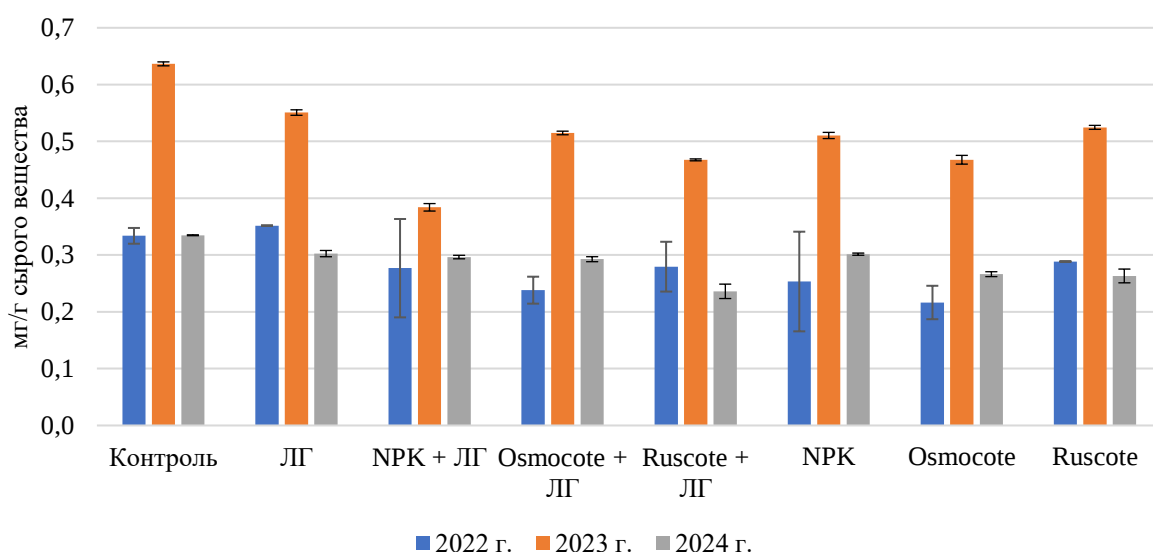


Рисунок 43. Содержание каротиноидов в листьях в конце вегетационного сезона, мг/г сырого вещества. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

В то же время, содержание фенольных соединений в листьях и ягодах в 2024 г. проявляли высокую степень взаимосвязи с каротиноидами. Так, концентрация фенольных соединений в ягодах положительно коррелировала с уровнем каротиноидов ($r = 0,84$), что может свидетельствовать о синхронном включении этих компонентов в антиоксидантную защиту растения.

Важным показателем биохимического состава ягодных культур, определяющим их пищевую и антиоксидантную ценность, является содержание аскорбиновой кислоты (витамина С). Черная смородина (*Ribes nigrum* L.) традиционно рассматривается как один из лидеров по накоплению

этого витамина среди плодово-ягодных культур, однако его уровень может существенно варьировать в зависимости от агротехнологических условий, сортовых особенностей и погодных факторов. Аскорбиновая кислота известна своей антиоксидантной активностью и способностью замедлять процессы свободнорадикального окисления, оказывающего повреждающее действие на клетки. Однако в научной литературе всё чаще подчёркивается её роль как синергиста других антиоксидантов: аскорбат способен восстанавливать окисленные формы фенольных соединений, тем самым усиливая их антиоксидантный эффект и повышая суммарную антиоксидантную активность растительного сырья (Шелеметьева, 2006). Содержание аскорбиновой кислоты в ягодах чёрной смородины может значительно колебаться - от 96,2 до 241,0 мг/100 г, в зависимости от сорта и условий выращивания. Всего 50 г ягод сортов со средней витаминной насыщенностью могут обеспечить суточную потребность человека в аскорбиновой кислоте и витамине Р (Блинникова, 2019).

Наивысшее содержание аскорбиновой кислоты было зафиксировано в контрольном варианте ($88,1 \pm 3,34$ мг/100 г), что почти в два раза превышает показатели других вариантов (рис. 44, табл. П.19). Минимальные значения были получены в вариантах NPK ($33,0 \pm 3,21$ мг/100 г) и NPK + ЛГ ($33,8 \pm 2,98$ мг/100 г), что может указывать на угнетающее влияние избытка доступного азота из гранулированных удобрений на биосинтез вторичных метаболитов, включая аскорбат. В вариантах с МККУПД, такими как Ruscote ($44,8 \pm 4,22$ мг/100 г) и Osmocote ($41,7 \pm 3,14$ мг/100 г), содержание аскорбиновой кислоты находилось на промежуточном уровне, при этом фолиарная обработка Лигногуматом совместно с этими удобрениями (Ruscote + ЛГ и Osmocote + ЛГ) не приводило к его существенному увеличению и даже, напротив, ассоциировалось с умеренным снижением (до 37,0 и 46,2 мг/100 г соответственно). Аналогичная тенденция наблюдалась и в варианте ЛГ ($55,0 \pm 3,74$ мг/100 г), что позволяет предположить наличие слабого

стимулирующего эффекта органического компонента в отсутствии крупного источника азота из удобрений.

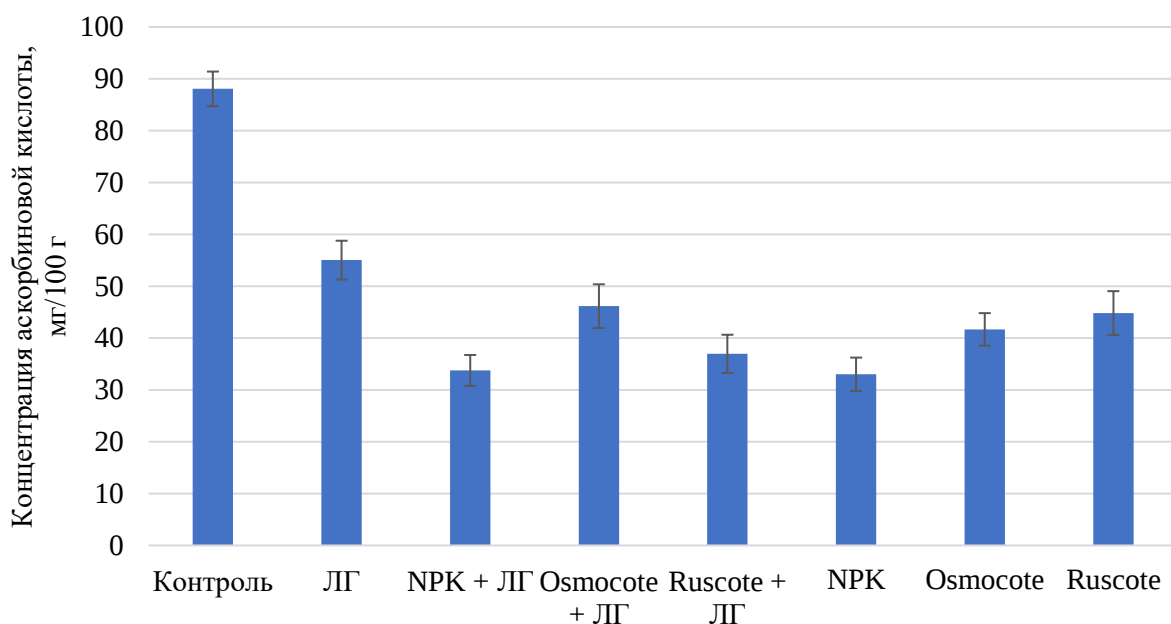


Рисунок 44. Содержание аскорбиновой кислоты в ягодах (урожай 2024 г.), мг/100 г. Вертикальными линиями на графике отмечена ошибка опыта.

Полученные значения варьировали от 33,0 до 88,1 мг/100 г сырого вещества, что в целом соответствует данным литературы: по сведениям Блишниковой (2019), содержание аскорбиновой кислоты в ягодах чёрной смородины колеблется в пределах 96,2-241,0 мг/100 г, а согласно обзору Oszmianński и Wojdyło (2009), составляет примерно 100-150 мг/100 г в среднем. Таким образом, большинство полученных значений характеризуются сниженным уровнем аскорбиновой кислоты по сравнению с литературными данными, что может быть связано с агротехническими условиями, погодными факторами 2024 г., особенностями сортового материала, а также возможным подавлением синтеза аскорбиновой кислоты в условиях избыточного минерального питания.

Стоит отметить, что в контрольном варианте наблюдалось наибольшее накопление аскорбиновой кислоты, что может свидетельствовать о реализации стресс-индуцированного механизма антиоксидантной защиты: при отсутствии

удобрений растения могут активировать синтез антиоксидантов, включая аскорбиновую кислоту, в ответ на ограничение питания. Напротив, в вариантах с обильным минеральным питанием (вариант NPK) наблюдается снижение уровня аскорбиновой кислоты, что согласуется с гипотезой об ослаблении синтеза вторичных метаболитов при избытке доступных макроэлементов.

Была установлена отрицательная корреляция между фенольными соединениями в листьях и ягодах ($r = -0,78$), а также между содержанием аскорбиновой кислоты и фенольных соединений в ягодах ($r = -0,78$). Это может указывать на перераспределение антиоксидантных метаболитов между органами растения, обусловленное либо стрессовой нагрузкой, либо фазой развития растения. Кроме того, наблюдается отрицательная связь между содержанием каротиноидов и фенольных соединений в листьях ($r = -0,75$), что также подтверждает конкурентное распределение антиоксидантов в зависимости от условий среды и питания.

Таким образом, результаты указывают на то, что умеренное органоминеральное питание (постепенное высвобождение питательных веществ совместно с фолитарной обработкой) может способствовать поддержанию более высокого содержания аскорбиновой кислоты по сравнению с вариантами, включающими исключительно традиционные минеральные формы удобрений в высоких дозах. Это имеет важное значение при выборе агротехнической стратегии для получения высококачественного, витаминного сырья.

Значение ГТК оказывало значительное влияние на физиолого-биохимическое состояние черной смородины. Недостаток влаги в 2022 г. стимулировал синтез антиоксидантов (фенолов, 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.

По результатам сравнения удобренных вариантов (табл. П.20) с контролем было установлено, что разные удобрений и их комбинации с фоллиарной обработкой препаратом Лигногумат АМ по-разному влияли на агрохимические характеристики почвогрунта, биометрические показатели растений, урожайность, а также физиолого-биохимический состав чёрной смородины.

По биометрическим показателям наибольший эффект обеспечивали варианты с минеральным питанием (NPK, NPK+ЛГ) и вариант Ruscote+ЛГ. Так, по площади листа вариант Ruscote+ЛГ превосходил NPK на 10% (57,1 против 52,0 см² в 2022 г.), тогда как варианты Osmocote и Osmocote+ЛГ отставали на 20-30%. По урожайности безусловными лидерами были NPK (574,6±111,78 г в 2023 г. и 668,7±413,94 г в 2024 г.), NPK + ЛГ (542,5±118,74 г в 2023 г. и 328,5±146,96 г в 2024 г.), Ruscote + ЛГ (402,5±178,60 г в 2023 г. и 523,2±120,19 г в 2024 г.): в 2024 г. их урожайность была на 20-30% выше, чем при Osmocote+ЛГ. В 2023 г. разрыв между NPK и Ruscote+ЛГ был минимальным, в то время как Osmocote+ЛГ отставал почти в два раза. По массе 50 ягод также лидировал варианты NPK, NPK + ЛГ и Ruscote+ЛГ, а Контроль и ЛГ характеризовались минимальными значениями по всем параметрам.

Содержание питательных веществ в почвогрунте также значительно зависел от применяемого удобрения. Ruscote обеспечивал более высокое накопление нитратов и подвижного фосфора (на 30–40% больше, чем Osmocote), тогда как Osmocote давал на 15–20% больше аммонийного азота при стабильном содержании калия. Наибольшее накопление микроэлементов (цинк, медь) также наблюдалось при внесении NPK и Ruscote, причём комбинация Ruscote+ЛГ часто выделялась как единственный вариант с достоверным улучшением.

По физиолого-биохимическим показателям влияние удобрений проявлялось разнонаправленно. В листьях в первый год опыта отмечали максимальные значения фенольных соединений и пигментов, при этом Ruscote давал на 50% больше фенольных соединений, чем NPK, и на 33% больше, чем Osmocote. К третьему году их уровень снижался, тогда как в ягодах фиксировали противоположную тенденцию - рост фенольных соединений и аскорбиновой кислоты. По содержанию аскорбиновой кислоты наиболее благоприятным оказался вариант Ruscote+ЛГ, где ее содержание было на 16% выше, чем при NPK, и на 10% выше, чем при Osmocote. Антоцианы, напротив, во всех вариантах снижались, особенно в Ruscote+ЛГ (на 20% ниже, чем при NPK, и на 35% ниже, чем при Osmocote). По фотосинтетическим пигментам отмечено, что сумма хлорофиллов была максимальной при Ruscote, а каротиноиды - в Контроле.

Анализ активности каталазы показал, что в контрольных вариантах её уровень был выше, что указывает на наличие окислительного стресса у растений. Применение удобрений и особенно фолиарная обработка Лигногуматом снижали активность каталазы, что свидетельствует об антистрессовом эффекте минерального питания.

3.2. Опыт 2. Модельный опыт

Для более глубокого понимания возможного источника фенольных соединений в агроэкосистеме было проведено исследование их содержания непосредственно в минеральных комплексных капсулированных удобрениях пролонгированного действия и в Лигногумате, применённых в опыте.

Анализ показал, что препараты различаются по уровню содержания фенольных соединений (табл. 6). В удобрении Osmocote концентрация фенолов составила в среднем $0,60 \pm 0,12$ мг-экв. галловой кислоты/г, тогда как в удобрении Ruscote это значение оказалось значительно ниже - $0,20 \pm 0,13$ мг-экв/г. Таким образом, Osmocote содержит почти в три раза больше фенольных

компонентов по сравнению с российским аналогом, что может оказывать различное влияние на биохимические процессы в почвогрунте и растениях при длительном применении.

Таблица 6. Содержание фенольных соединений в удобрениях, мг-экв. галловой кислоты/г (среднее $\pm$ ошибка опыта)

Вариант	мг-экв. галловой кислоты/г
Ruscote	0,2 $\pm$ 0,13
Osmocote	0,6 $\pm$ 0,12
ЛГ	92,8 $\pm$ 10,73

Взвешивание образцов минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия после проведения модельного опыта (табл. 7) выявило, что масса навески удобрения Ruscote за время модельного опыта снизилась на 44,2%, а масса навески Osmocote снизилась на 27,5 %.

Таблица 7. Результаты взвешивания минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия до и после (через 21 день) модельного опыта

Удобрение	Масса удобрения до начала опыта, г	Масса удобрения через 21 сутки, г
Ruscote	1,342	0,749
Osmocote	1,340	0,971

В рамках лабораторного модельного опыта также была оценена скорость высвобождения основных питательных элементов из гранул минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия с целью сравнения их поведения в почвенной среде.

Полученные данные свидетельствуют о том, что удобрение Ruscote характеризуется высокой скоростью отдачи азота: уже к 20-му дню эксперимента из оболочек выделилось практически 100 % общего содержания азота (99,9 %). В то же время высвобождение фосфора и калия из этого препарата оказалось существенно менее выраженным и составило 49,9 % и 15,9 %, соответственно (табл. 8).

Таблица 8. 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%)

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.

Для оценки морфологических характеристик гранул удобрений до начала эксперимента была проведена световая микроскопия поверхностной структуры капсул.

В результате микроскопического анализа гранул Ruscote, выполненного до закладки модельного опыта, на поверхности оболочек были выявлены поры, равномерно распределённые по всей площади гранулы (рис. 45). Структура капсулы свежеприготовленного удобрения характеризовалась визуальной однородностью матрицы и равномерной пористостью, что потенциально обуславливает механизм контролируемого высвобождения питательных веществ при контакте с влагой.

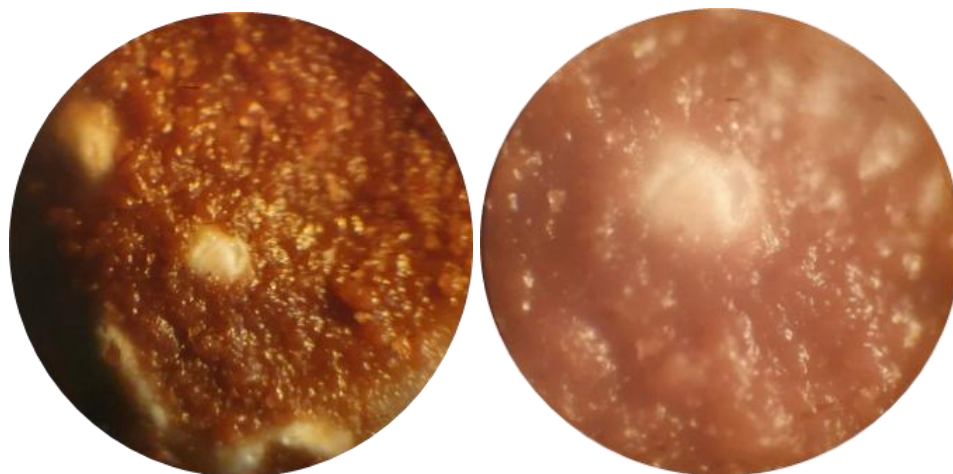


Рисунок 45. Оболочка удобрения Ruscote до проведения модельного опыта, увеличении в 40 раз (слева) и в 100 раз (справа).

Но уже через 21 сутки оболочки удобрения Ruscote имели более рыхлую, неоднородную структуру (рис. 46).

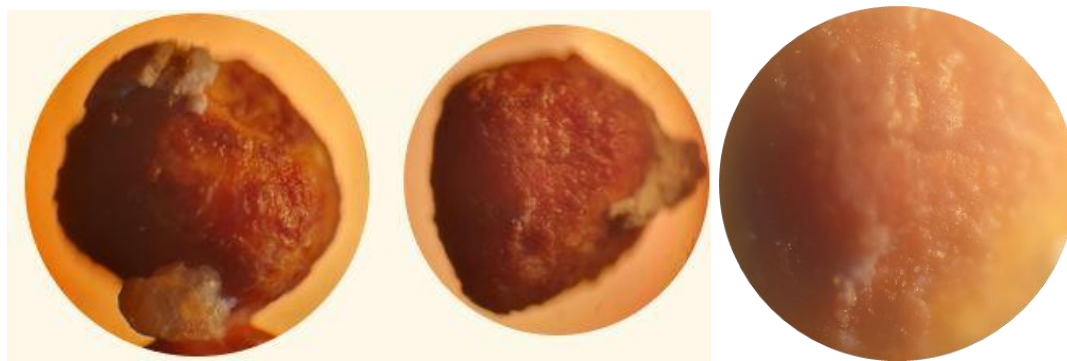


Рисунок 46. Оболочка удобрения Ruscite после проведения модельного опыта (через 21 сутки), увеличении в 40 раз (2 фото слева) и в 100 раз (справа).

При микрокопировании оболочек образцов удобрения Osmocote до начала модельного эксперимента было обнаружено, что они характеризовались гладкой, плотной и визуалью однородной поверхностью, без выраженной пористости, что отличает её от более рыхлой и пористой структуры, наблюдаемой у Ruscite (рис. 47). При микрокопировании 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 Ruscite: высвобождение питательных веществ из гранул происходило неравномерно, что, вероятно, связано с локальными изменениями проницаемости оболочки при гидратации.

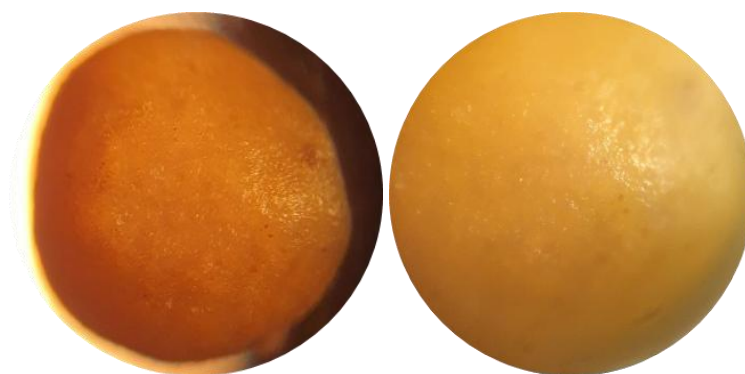


Рисунок 47. Оболочка удобрения Osmocote до опытов при увеличении в 40 раз (слева) и в 100 раз (справа).

Капсулы удобрения Osmocote использованные в модельном опыте имеют более гладкую оболочку. А также на некоторых гранулах на оболочке наблюдались скопления вышедших из удобрений питательных элементов (рис. 48, 49).



Рисунок 48. Оболочки удобрения Osmocote после проведения опыта (через 21 сутки) при увеличении в 40 раз.



Рисунок 49. Оболочки удобрения Osmocote после проведения опыта (через 21 сутки) при увеличении в 100 раз.

Выявленные различия в морфологической структуре оболочек удобрений позволяют объяснить разную степень их воздействия на уровень фенольных соединений в растениях. В ходе модельного эксперимента не было зафиксировано признаков разложения капсул Ruscote и Osmocote, что указывает на их структурную устойчивость в условиях водной среды на протяжении всего периода наблюдений.

Динамика изменения содержания фенольных соединений в растворах, полученных из удобрений Osmocote, Ruscote и Лигногумата АМ в течение 23 суток, представлена на рисунках 50 и 51.

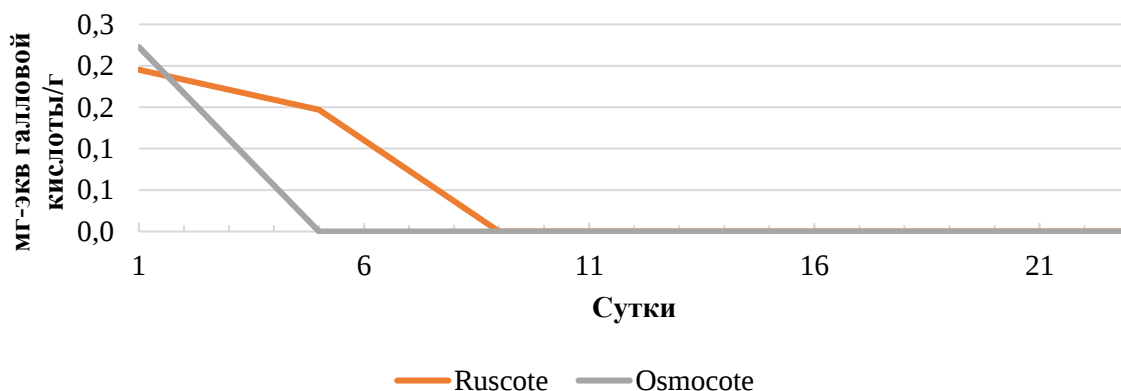


Рисунок 50. Динамика содержания фенольных соединений в растворе удобрений Osmocote и Ruscote в течение 23 суток, мг-экв. галловой кислоты/г.

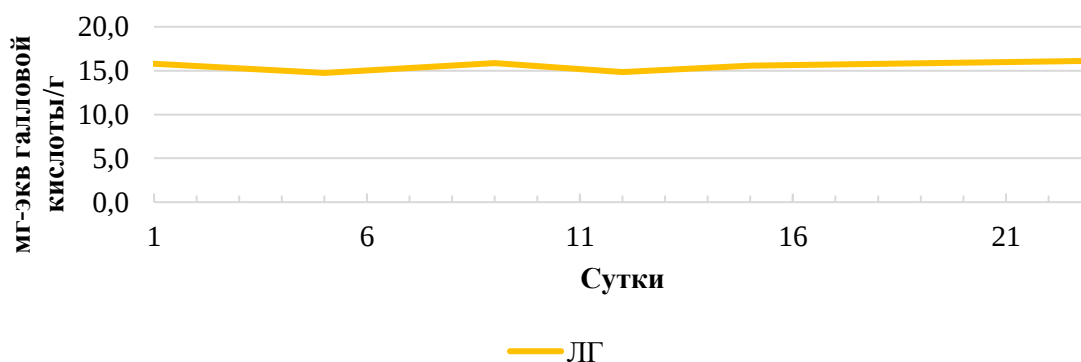


Рисунок 51. Динамика содержания фенольных соединений в растворе Лигногумата АМ, в течение 23 суток, мг-экв. галловой кислоты/г.

Результаты анализа показали, что раствор Лигногумата АМ содержит значительно более высокую концентрацию фенольных соединений по сравнению с растворами минеральных комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия. Исходное содержание фенолов в Лигногумате АМ составило 15,8 мг-экв. галловой кислоты/г, при этом в течение всего периода наблюдений (23 суток) отмечались лишь незначительные колебания: минимальное значение - 14,7 мг-экв. галловой

кислоты/г (на 5-е сутки), максимальное - 16,1 мг-экв. галловой кислоты/г (на 23-е сутки), что свидетельствует о высокой стабильности содержания фенольных соединений в растворе и об отсутствии высвобождения новых соединений в раствор.

В растворах комплексных удобрений Osmocote и Ruscote изначально была определена низкая концентрация фенольных соединений - около 0,2 мг-экв. галловой кислоты/г. Однако уже к 9 суткам их содержание снижалось до нулевых значений, которые сохранялись до конца эксперимента. Таким образом, данные препараты не являются источником фенольных соединений, а выявленные на начальном этапе значения, вероятно, обусловлены незначительными примесями или следами веществ, входящих в состав оболочек.

Полученные данные содержания фенольных соединений в модельной опыте подтвердили, что Лигногумат АМ может служить дополнительным источником фенольных соединений, поступающих в растение, а также оказывать стабилизирующее влияние на их уровень в различных органах. Высокая устойчивость фенольных компонентов в составе препарата свидетельствует о его потенциале в качестве эффективного поставщика биологически активных веществ при агрохимическом применении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Положительное влияние на морфометрические параметры чёрной смородины оказывали как традиционные, так и минеральные комплексные капсулированные удобрения пролонгированного действия в сочетании с фолиарной обработкой Лигногуматом АМ. Особенно эффективными оказались комбинации 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, что подчёркивает необходимость полноценного минерального питания для формирования вегетативной и генеративной массы.

Внесение в почвогрунт традиционных или минеральных комплексных капсулированных 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 при проведении опыта. Содержание валового и подвижного фосфора упало на всех вариантах. Кальций имел тенденцию к накоплению при длительном внесении всех видов минеральных удобрений, тогда как магний проявлял колебательную динамику. В первый год опыта фиксировались максимальные значения макроэлементов, ко второму году - снижение азота при росте фосфора, а на третий год - общее уменьшение всех элементов, особенно фосфора и калия.

Валовой анализ выявил высокие потенциальные запасы фосфора и калия в почвогрунте, при низкой их доступностью растениями. Высокий ГТК в 2023 г. мог способствовать активному потреблению доступного фосфора растениями с одновременной его фиксации в недоступные формы, что объясняет разрыв между валовыми и подвижными формами.

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 питания этими элементами. В листьях выявлена зависимость содержания кальция и магния от вида удобрения и фазы развития растения. К третьему году зафиксировано накопление Zn и Pb, особенно при комбинированном внесении удобрений и ЛГ.

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 фолиарная обработка растений Лигногуматом уменьшал биотический или абиотический стресс у растений.

Модельный опыт показал, что из Ruscote быстрее высвобождается азот и фосфор, из Osmocote - калий. Биразложения оболочек за 21 сутки в водном растворе не происходило. 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 комплексных капсулированных удобрений пролонгированного действия или традиционных удобрений в сочетании с Лигногуматом АМ позволяло 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 традиционным 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверкина С. С., Науменко И. В. Изучение агрохимии фосфора на почвах Западной Сибири //Иновации и продовольственная безопасность. – 2017. – №. 2. – С. 49-70.
2. Барсукова В. С. Физиолого-генетические аспекты устойчивости растений к тяжелым металлам //Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. – 1997. – № 47. – С. 1-67.
3. Беляева Л.А. Биохимия растений: тексты лекций по разделу «Растительные вещества вторичного происхождения» для студентов биологического факультета. Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2009. – 108 с.
4. Блинникова О. М. Ягоды черной смородины-ценное сырьё при производстве обогащенных пищевых продуктов //Приоритетные направления развития садоводства (I Потаповские чтения). – 2019. – С. 296-298.
5. Богачев А. И., Дорофеева Л. Н. Российский рынок минеральных удобрений: особенности функционирования в новых реалиях и метаморфозы развития //Вестник аграрной науки. – 2022. – №. 3 (96). – С. 78-92.
6. Богомолова А. А. Технология возделывания огурца в защищенном грунте: выпускная бакалаврская работа по направлению подготовки: 35.03. 04-Агрономия. – Место защиты: НИ ТГУ, 2016. – 42 с.
7. Бойко В. А., Левченко С. В., Белаш Д. Ю., Романов А. В. Влияние некорневой подкормки на продуктивность плодовых культур в условиях республики Крым // Плодоводство и виноградарство Юга России. – 2021. – №. 68. – С. 204-214.
8. Борисова А. А., Коновалов С. Н., Помякшева Л. В., Бычков Н. В. Эффективность регуляторов роста растений и удобрения пролонгированного действия Osmocote при выращивании клоновых подвоев яблони высших категорий качества в защищенном грунте //Агрохимический вестник. – 2022. – № 1. – С. 51-58.

9. Гопп Н. В. Влияние агрохимикатов на пространственно-временные изменения агрохимических свойств почвы и урожай брокколи// Почвы и окружающая среда. – 2021. – Т. 4. – №. 2. – С. 1-26.
10. ГОСТ 24556-89. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витамина С. М.: Стандартиформ, 2003. – 11 с.
11. ГОСТ 29270-95. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения нитратов. М.: Стандартиформ, 2010. – 15 с.
12. ГОСТ Р 53381-2009 Почвы и грунты. Грунты питательные. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2009. – 12 с.
13. ГОСТ Р 58595-2019 Почвы. Отбор проб. – М.: Стандартиформ, 2019. – 8 с.
14. Громова И. А., Воронина М. С., Макарова Н. В. Исследование химических характеристик продуктов и отходов переработки ягод черники и черной смородины //Химия растительного сырья. – 2021. – №. 1. – С. 251-257.
15. Ермаков А. И., Арасимович В. В., Ярош Н. П., Перуанский Ю. В., Луковникова Г. А., Иконникова М. И.. Методы биохимического исследования растений //Л.: Агропромиздат. – 1987. – 430 с.
16. Ершова И. В. Сорта смородины черной как источники высокого содержания биологически активных соединений //Достижения науки и техники АПК, 2019. –Т. 33. – № 11. – С. 60-62.
17. Зазулина Н.А. Морфологические признаки сортов черной смородины белорусской селекции / Плодоводство: сб. науч. тр. – Минск: Белсад. – 1994. – Т. 9. – Ч. 1. – С. 96-104.
18. Кармацких А. А., Редозубов Д. С. Обзор удобрений на основе мочевины с контролируемым высвобождением азота //Вестник Государственного аграрного университета Северного Зауралья. – 2017. – №. 2. – С. 63-66.

19. Ковалева Н.О., Ковалев И.В. Лигнификация тканей как регуляторный механизм растений по отношению к факторам среды // Материалы IV Международной научной конференции «Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего» (13–15 сентября 2023 г) /СПб.: ФГБНУ АФИ Санкт-Петербург, 2023. – С. 951–446.

20. Коваль Е. В., Огородникова С. Ю. Влияние цианобактерий и лигногумата на рост и биохимические показатели растений ячменя //Агрохимия. – 2021. – № 6. – С. 65-72.

21. Курамшина З. М., Смирнова Ю. В. Влияние кадмия на накопление фенольных соединений в побегах *Triticum aestivum*, инокулированных эндофитными бактериями //Universum: химия и биология. – 2019. – №. 3 (57). – С. 11-13.

22. Лапин А. А., Борисенков М. Ф., Карманов А. П., Бердник И. В., Кочева Л. С., Мусин Р. З., Магдеев И. М. Антиоксидантные свойства продуктов растительного происхождения //Химия растительного сырья. – 2007. – № 2. – С. 79-83.

23. Мистратова Н. А., Теряева А. В., Южакова А. А. Влияние некорневых обработок растворами наночастиц на накопление микроэлементов в листьях черной смородины //Научно-практические аспекты развития АПК: материалы национальной научной конференции (12 ноября 2021) / Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск, 2021. – С. 88-89.

24. Михайлова Л. А. Особенности питания и удобрения основных сельскохозяйственных культур на почвах Предуралья. – Пермь: Пермская ГСХА, 2012. – 223 с.

25. Мнатсаканян А. А., Чуварлеева Г. В., Волкова А. С., Петелин И. С. Применение удобрений длительного периода действия при выращивании сои

в условиях Краснодарского края //Достижения науки и техники АПК. – 2023а. – Т. 37. – № 7. – С. 24-28.

26. Мнатсаканян А. А. Пролонгированные удобрения в технологии возделывания озимой пшеницы в условиях Краснодарского края //Земледелие. – 2023б. – № 3. – С. 27-31.

27. Мотылева С. М. Особенности содержания биогенных элементов в плодах и ягодах //Современные тенденции развития науки и технологий. – 2015. – № 2-1. – С. 128-131.

28. Мухина М. Т., Боровик Р. А., Коршунов А. А. Удобрения пролонгированного действия: основные этапы и направления развития //Плодородие. – 2021. – №. 4 (121). – С. 77-82.

29. Мушинский А. А., Тихонова М. А. Влияние лигногуматов на черенки винограда в условиях закрытого грунта //Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. – 2019. – №. 4. – С. 40-40.

30. Неганова Н. М., Полиенко Е. А., Безуглова О. С. Влияние лигногумата на плодородие чернозема обыкновенного карбонатного под различными культурами //Почвы России: современное состояние, перспективы изучения и использования. – 2012. – С. 191-193.

31. Николаева Т. Н., Лапшин П. В., Загоскина Н. В. Метод определения суммарного содержания фенольных соединений в растительных экстрактах с реактивом Фолина-Дениса и реактивом Фолина-Чокальтеу: модификация и сравнение //Химия растительного сырья. – 2021. – №. 2. – С. 291-299.

32. Петрова С. Н., Кузнецова А. А. Состав плодов и листьев смородины черной *Ribes nigrum* (обзор) //Химия растительного сырья. – 2014. – №. 4. – С. 43-50.

33. Плешков Б. П. Практикум по биохимии растений/ – М.: Агропромиздат, 1985. – 225 с.

34. Пояркова Н. М., Сапарклычева С. Е. Физиологическая роль фенольных соединений //Аграрное образование и наука. – 2019. – №. 4. – С. 14-19.

35. Пукальчик М.А., Панова М. И., Терехова В. А., Якименко О. С., Федосеева О. В. Действие гуминовых препаратов на активность почвенных ферментов в модельном опыте //Агрохимия. – 2017. – №. 8. – С. 84-91.
36. Руководство по проведению регистрационных испытаний регуляторов роста растений, дефолиантов и десикантов в сельском хозяйстве: производственнопракт. издание. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. – 216 с.
37. Рыбинцев А. И., Гиченкова О. Г., Орлова Т. Ф. Биологический вынос элементов питания растениями черной смородины //Стратегическое развитие АПК и сельских территорий РФ в современных международных условиях. – 2015. – С. 173-177.
38. Сабырбайкызы А., Воробьев А., Конакбаева А. Влияние комплексного препарата, содержащего фуллеренол, бентонит и гумины на всхожесть семян, динамику роста и развития растений овса //Journal of science. Lyon. – 2020. – № 13-1. – С. 13-21.
39. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 14 ноября 2001 г. N 36 «О введении в действие санитарных правил») [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5214/
40. Селянинов Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. – 1928. – Вып. 20. – С. 165-177.
41. Степанов А. А., Якименко О. С., Госсе Д. Д., Смирнова М. Е. Изучение эффективности гуминового удобрения ЭДАГУМ® СМ как стимулятора роста и мелиоранта в вегетационном и мелкоделяночном опытах с пшеницей //Агрохимия. – 2018. – №. 6. – С. 36-43.
42. Степанова Е. М., Луговая Е. А. Макро-и микроэлементный профиль плодов смородины черной (*Ribes nigrum* L.), произрастающей в Северо-Восточном регионе России //Вопросы питания. – 2019. – Т. 88. – №. 4. – С. 83-87.

43. Тихонова М. А., Мурсалимова Г. Р., Нигматянова С. Э. Регулирование процессов роста и развития винограда в условиях Приуралья //Инновационный путь развития садоводства в Казахстане: от науки до производства. – 2018. – С. 61-64.
44. Товстик Е. В., Скугорева С. Г., Адамович Т. А., Ашихмина Т. Я. Подходы к испытанию удобрений контролируемого действия //Теоретическая и прикладная экология. – 2022. – №. 1. – С. 182-190.
45. Третьяков Н.Н., Карнаухова Т.В., Паничкин Л.А. Практикум физиологии растений –М.: Агропромиздат, 1990. – 271 с.
46. Хузиахметов Р. Х. Перспективные направления производства пролонгированных азотных удобрений-дефендеров //Устойчивое развитие, экоинновации и «зеленые» экономика и технологии: III Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, посвященная 90-летию СГЭУ. – ГБУК «Самарская областная универсальная научная библиотека», 2021. – Т. 3. – С. 259-269.
47. Чугунова О. В., Вяткин А. В., Тиунов В. М., Чеботок Е. М., Арисов А. В. Исследование антиоксидантного комплекса интродуцированных сортов черной смородины Свердловской области //Ползуновский вестник. – 2024. – №. 2. – С. 12-18.
48. Шелеметьева, О. В. Особенности хроматографического определения биологически активных веществ в лекарственном растительном сырье, БАД и пищевых продуктах на их основе// Химия, химическая технология и биотехнология на рубеже тысячелетий: матер. междунар. науч. конф., Томск, 11–16 сент. 2006 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.onti.tpu.ru>
49. Якименко О. С., Терехова В. А. Гуминовые препараты и оценка их биологической активности для целей сертификации //Почвоведение. – 2011. – № 11 – С. 1334-1343.

50. Янчук Т. В. Питательные вещества элитных и отборных форм смородины чёрной селекции ВНИИСПК //Современное садоводство – Contemporary horticulture. – 2013. – № 1 (5). – С. 70-78.

51. Agricultural Analytical Services Lab. Currant, Any. Nutrient standards for plant tissue analysis [Электронный ресурс]. – Penn State College of Agricultural Sciences. – URL: <https://agsci.psu.edu/aasl/plant-analysis/interpretation> (дата обращения: 12.08.2025).

52. Bailey L. H., Bailey E. Z. Hortus third. Macmillan, New York. – 1976. – P. 969–971.

53. Bosiacki M., Czuchaj P., Szczepaniak S., Walkowiak Ł., Abramowicz A. The Influence of Slow-Release Fertilizers on the Growth, Flowering, and the Content of Macro-and Micronutrients in the Leaves of *Cyclamen persicum* Mill. //Agronomy. – 2021. – Vol. 11. – №. 11. – art. № 2147.

54. Bould C. Leaf analysis as a guide to the nutrition of fruit crops: VIII. – Sand culture N, P, K, mg experiments with black currant (*Ribes nigrum* L.) //Journal of the Science of Food and Agriculture. – 1969. – Vol. 20. – №. 3. – P. 172-181.

55. Bradfield E. G. The effect of intensity of nutrient supply on growth, yield and leaf composition of black currant grown in sand culture //Journal of Horticultural Science. – 1969. – Vol. 44. – №. 2. – P. 211-218.

56. Brennan R. M. Currants and gooseberries //Temperate fruit crop breeding: Germplasm to genomics. – Dordrecht: Springer Netherlands. – 2008. – P. 177-196.

57. Butnariu M. Detection of the polyphenolic components in *Ribes nigrum* L. //Annals of agricultural and environmental medicine. – 2014. – Vol. 21. – №. 1. – P. 11–14.

58. Canellas L. P., Olivares F. L., Aguiar N. O., Jones D. L., Nebbioso A., Mazzei P., Piccolo A. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture //Scientia horticultrae. – 2015. – Vol. 196. – P. 15-27.

59. Cao L., Park Y., Lee S., Kim D. O. Extraction, identification, and health benefits of anthocyanins in blackcurrants (*Ribes nigrum* L.) //Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – №. 4 – art. № 1863.
60. Chachar Z., Lai R., Ahmed N., Lingling M., Chachar S., Paker N. P., Qi Y. Cloned genes and genetic regulation of anthocyanin biosynthesis in maize, a comparative review //Frontiers in Plant Science. – 2024. – Vol. 15. – art. № 1310634.
61. Chen C. C., Huang M. Y., Lin K. H., Hsueh M. T. The effects of nitrogen application on the growth, photosynthesis, and antioxidant activity of *Amaranthus viridis* //Photosynthetica. – 2022. – Vol. 60. – №. 3. – art. № 420.
62. Cosmulescu S., Trandafir I., Nour V. Mineral composition of fruit in black and red currant //South Western Journal of Horticulture, Biology and Environment. – 2015. – Vol. 6. – №. 1. – P. 45-51.
63. Dale A. Potential for *Ribes* cultivation in North America. HortTechnology. – 2000. – № 10(3). – P. 548–554.
64. Dumanović J., Nepovimova E., Natić M., Kuča K., Jaćević V. The significance of reactive oxygen species and antioxidant defense system in plants: A concise overview //Frontiers in plant science. – 2021. – Vol. 11. – art. № 552969.
65. Gajewska E., Skłodowska M. Differential biochemical responses of wheat shoots and roots to nickel stress: antioxidative reactions and proline accumulation //Plant Growth Regulation. – 2008. – Vol. 54. – P. 179-188.
66. Gill S. S., Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants //Plant physiology and biochemistry. – 2010. – Vol. 48. – №. 12. – P. 909-930.
67. Gitelson A. A., Gritz Y., Merzlyak M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves //Journal of plant physiology. – 2003. – Vol. 160. – №. 3. – P. 271-282.

68. Goyal S. S., Huffaker R. C. Nitrogen toxicity in plants //Nitrogen in crop production. – 1984. – P. 97-118.
69. Harmat L., Porpaczy A., Himelrick D. G., Galletta G. J. Currant and gooseberry management //Small fruit crop management. Prentice hall, Englewood cliffs, NJ. – 1990. – P. 245-272.
70. Havir E. A., McHale N. A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves //Plant physiology. – 1987. – Vol. 84. – №. 2. – P. 450-455.
71. Holub P., Klem K., Tůma I., Vavříková J., Surá K., Veselá B., Urban O., Záhora J. Application of organic carbon affects mineral nitrogen uptake by winter wheat and leaching in subsoil: Proximal sensing as a tool for agronomic practice //Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 717. – art. № 137058.
72. Hovhannisyan Z., Timotina M., Manoyan J., Gabrielyan L., Petrosyan M., Kusznierevich B., Bartoszek A., Jacob C., Ginovyan M., Trchounian K., Sahakyan N., Nasim M. J. *Ribes nigrum* L. extract-mediated green synthesis and antibacterial action mechanisms of silver nanoparticles //Antibiotics. – 2022. – Vol. 11. – №. 10. – art. № 1415.
73. Hummer K. E., Barney D. L. Currants //HortTechnology. – 2002. – Vol. 12. – №. 3. – P. 377-387.
74. Isakov V., Vlasova E., Forer V., Kenny J., Lyulin S. Analysis of Slow-Released Fertilisers as a Source of Microplastics //Land. – 2024. – Vol. 14. – №. 1. – art. № 38.
75. Jindo K., Audette Y., Olivares F. L., Canellas L. P., Smith D. S., Paul Voroney R. Biotic and abiotic effects of soil organic matter on the phytoavailable phosphorus in soils: A review //Chemical and Biological Technologies in Agriculture. – 2023. – Vol. 10. – №. 1. – art. № 29.
76. Jindo K., Olivares F. L., Malcher D. J. D. P., Sánchez-Monedero M. A., Kempenaar C., Canellas L. P. From lab to field: role of humic substances under

open-field and greenhouse conditions as biostimulant and biocontrol agent //Frontiers in plant science. – 2020. – Vol. 11. – art. № 426.

77. Kafkafi U., Neumann R. G. Correction of iron chlorosis in peanut (*Arachis hypogea* Shulamit) by ammonium sulfate and nitrification inhibitor //Journal of plant nutrition. – 1985. – Vol. 8. – №. 4. – P. 303-309.

78. Karaagac H. E., Şahan Y. Comparison of phenolics, antioxidant capacity and total phenol bioaccessibility of *Ribes* spp. grown in Turkey //Food Science and Technology. – 2020. – Vol. 40. – P. 512-520.

79. Kulikova N. A., Stepanova E. V., Koroleva O. V. Mitigating activity of humic substances: direct influence on biota //Use of Humic Substances to Remediate Polluted Environments: From Theory to Practice: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Use of Humates to Remediate Polluted Environments: From Theory to Practice Zvenigorod (23–29 September 2002, Russia). – Springer Netherlands, 2005. – P. 285-309.

80. Lawrencia D., Wong S. K., Low D. Y. S., Goh B. H., Goh J. K., Ruktanonchai U. R., Soottitantawat A., Lee L. H., Tang S. Y. Controlled release fertilizers: A review on coating materials and mechanism of release //Plants. – 2021. – Vol. 10. – №. 2. – art. № 238.

81. Li T., Wang J., Zhang Z., Fan Y., Qin H., Yin Y., Dai G., Cao Y., Tang L. Anthocyanin biosynthesis in goji berry is inactivated by deletion in a bHLH transcription factor LrLAN1b promoter //Plant Physiology. – 2024. – Vol. 195. – №. 2. – P. 1461-1474.

82. Ma Y., Ma X., Gao X., Wu W., Zhou B. Light induced regulation pathway of anthocyanin biosynthesis in plants //International journal of molecular sciences. – 2021. – Vol. 22. – №. 20. – art. № 11116.

83. Mahmood M., Wang J., Mehmood S., Ahmed W., Ayyoub A., Seleiman M. F., Elrys A. S., Elnahal A. S. M., Mustafa A., Wei X., Li W. Influence of drought stress on phosphorus dynamics and maize growth in tropical ecosystems //BMC plant biology. – 2025. – Vol. 25. – №. 1. – art. № 62.

84. Minasyan A., Pires V., Gondcaille C., Ginovyan M., Mróz M., Savary S., Cherkaoui-Malki M., Kusznierevich B., Bartoszek A., Andreoletti P., Sahakyan N. *Ribes nigrum* leaf extract downregulates pro-inflammatory gene expression and regulates redox balance in microglial cells //BMC Complementary Medicine and Therapies. – 2025. – Vol. 25. – №. 1. – P. 25-49.
85. Morard P., Eyheraguibel B., Morard M., Silvestre J. Direct effects of humic-like substance on growth, water, and mineral nutrition of various species //Journal of Plant Nutrition. – 2010. – Vol. 34. – №. 1. – P. 46-59.
86. Moyer R. A., Hummer K. E., Finn C. E., Frei B., Wrolstad R. E. Anthocyanins, phenolics, and antioxidant capacity in diverse small fruits: *Vaccinium*, *Rubus*, and *Ribes* //Journal of agricultural and food chemistry. – 2002. – Vol. 50. – №. 3. – P. 519-525.
87. Nardi S., Pizzeghello D., Muscolo A., Vianello A. Physiological effects of humic substances on higher plants //Soil Biology and Biochemistry. – 2002. – Vol. 34. – №. 11. – P. 1527-1536.
88. Nour V., Trandafir I., Cosmulescu S. Antioxidant capacity, phenolic compounds and minerals content of blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) leaves as influenced by harvesting date and extraction method //Industrial Crops and Products. – 2014. – Vol. 53. – P. 133-139.
89. Novák F., Šestauberová M., Hrabal R. Structural features of lignohumic acids //Journal of Molecular Structure. – 2015. – Vol. 1093. – P. 179-185.
90. Olk D. C., Dinnes D. L., Rene Scoresby J., Callaway C. R., Darlington J. W. Humic products in agriculture: potential benefits and research challenges – a review //Journal of Soils and Sediments. – 2018. – Vol. 18. – №. 8. – P. 2881-2891.
91. Oszmiański J., Wojdyło A. Effects of blackcurrant and apple mash blending on the phenolics contents, antioxidant capacity, and colour of juices //Czech Journal of Food Sciences. – 2009. – Vol. 27. – №. 5. – P. 338-351.
92. Rehder, A. Manual of cultivated trees and shrubs. 2nd ed. Rev. Discorides Press, Portland, Ore. – 1986. – P. 293-311.

93. Rotondo F., Coniglio R., Cantera L., Di Pascua I., Clavijo L., Dieste, A. Lignin-based coatings for controlled P-release fertilizer consisting of granulated simple superphosphate //Holzforschung. – 2018. – Vol. 72, № 8. – P. 637-643.
94. Shaviv A., Mikkelsen R. L. Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation – A review //Fertilizer research. – 1993. – Vol. 35. – №. 1. – P. 1-12.
95. Springer U. Der heutige Stand der Humusuntersuchungsmethodik mit besonderer Berücksichtigung der Trennung, Bestimmung und Charakterisierung der Huminsäuretypen und ihre Anwendung auf charakteristische Humusformen //Bodenkunde und Pflanzenernährung. – 1938. – Vol. 6. – № 5 - 6. – P. 312-373.
96. Staszowska-Karkut M., Materska M. Phenolic composition, mineral content, and beneficial bioactivities of leaf extracts from black currant (*Ribes nigrum* L.), raspberry (*Rubus idaeus*), and aronia (*Aronia melanocarpa*) //Nutrients. – 2020. – Vol. 12. – №. 2. – art. № 463.
97. Suada K., Rai N., Budiasa W., Santosa G. N., Sunarta N., Adnyana G. M., Shchegolkova N., Poloskin R., Gladkov O., Yakimenko O. Effect of lignohumate on yield and quality of rice in a paddy field in Bali, Indonesia //Вода: химия и экология. – 2017. – № 5. – P. 3-11.
98. Zhao C., Wang Z., Cui R., Su L., Sun X., Borrás-Hidalgo O., Li K., Wei J., Yue Q., Zhao L. Effects of nitrogen application on phytochemical component levels and anticancer and antioxidant activities of *Allium fistulosum* //PeerJ. – 2021. – Vol. 9. – art. № e11706.

ПРИЛОЖЕНИЯ



Рис. П.1. Закладка микроделяночного опыта на территории Почвенного стационара факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова в 2022 г.



Рис. П.2. Микроделяночный опыт на территории Почвенного стационара факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова в 2023 г.



Рис. П.3. Модельный опыт.

Таблица П.1. Площадь листа в конце вегетационного сезона (за 2022-2024 гг.), см²

Вариант	Средняя площадь листа		
	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Контроль	36,2	36,8	27,1
ЛГ	42,2	37,0	33,5
NPK + ЛГ	55,7	51,4	49,6
Osmocote + ЛГ	52,6	36,4	40,2
Ruscote + ЛГ	57,1	51,6	48,9
NPK	52,0	70,6	44,8
Osmocote	54,9	38,2	36,2
Ruscote	56,9	57,0	54,0
<i>HCP</i> _{0,05}	14,35	21,47	16,92

Таблица П.2. Морфометрические показатели черной смородины: масса 50 ягод, г, количество кистей, шт, количество ягод в кисти, шт (за 2023-2024 гг.)

Вариант	Масса 50 ягод		Количество кистей		Количество ягод в кисти	
	2023 г.	2024 г.	2023 г.	2024 г.	2023 г.	2024 г.
Контроль	63,6	50,3	31,0	17,3	2,4	1,4
ЛГ	57,1	43,1	30,3	10,3	2,2	1,6
NPK + ЛГ	100,2	73,5	130,3	132,7	2,5	1,9
Osmocote + ЛГ	86,9	64,6	84,3	89,3	2,5	1,7
Ruscote + ЛГ	94,3	84,2	97,0	177,7	2,8	2,2
NPK	102,5	87,9	114,0	175,5	2,9	2,2
Osmocote	87,3	61,0	80,3	70,0	2,7	1,8
Ruscote	80,4	63,9	74,7	72,0	2,4	1,8
HCP 0,05	27,7	27,3	63,1	114,5	2,1	1,9

Таблица П.3. Величина прироста побега (2022-2023 гг.), см

Вариант	Средний прирост с трех делянок с 27.06.22 г. по 28.08.22 г.	Средний прирост с трех делянок с 28.08.22 г. по 28.08.23 г.
Контроль	25,5	22,3
ЛГ	25,4	18,1
NPK + ЛГ	35,5	22,7
Osmocote + ЛГ	36,0	21,3
Ruscote + ЛГ	34,8	20,2
NPK	32,3	21,5
Osmocote	38,3	13,0
Ruscote	37,3	18,0
HCP _{0,05}	9,7	10,9

Таблица П.4. Агрохимические показатели почвогрунта после вегетации
(среднее $\pm$ ошибка опыта)

Вариант	pH _{KCL}	NO ₃ [−]	NH ₄ ⁺	P ₂ O ₅	K ₂ O
	ед	мг/ кг воздушно-сухой почвы			
	2022 г.				
Контроль	7,4 ± 0,04	7,1 ± 1,67	9,2 ± 0,63	507,0 ± 4,78	300,0 ± 4,62
ЛГ	7,5 ± 0,01	5,9 ± 1,27	18,8 ± 0,21	639,5 ± 6,22	272,3 ± 4,62
NPK + ЛГ	7,6 ± 0,01	20,4 ± 2,81	12,1 ± 0,21	591,2 ± 3,83	346,2 ± 4,62
Osmocote + ЛГ	7,6 ± 0,02	27,9 ± 2,22	14,6 ± 0,21	614,6 ± 1,43	370,3 ± 4,69
Ruscote + ЛГ	7,8 ± 0,02	9,6 ± 0,02	41,0 ± 22,38	620,3 ± 6,22	283,3 ± 16,67
NPK	7,5 ± 0,01	33,4 ± 0,09	23,2 ± 1,25	610,3 ± 4,78	349,3 ± 0,00
Osmocote	7,7 ± 0,01	11,3 ± 1,50	43,9 ± 15,69	609,3 ± 2,87	304,2 ± 4,17
Ruscote	7,6 ± 0,01	27,1 ± 0,91	28,7 ± 5,44	681,5 ± 8,13	381,4 ± 4,29
2023 г.					
Контроль	7,6 ± 0,01	12,7 ± 0,32	2,0 ± 1,46	198,1 ± 9,56	168,1 ± 2,59
ЛГ	7,6 ± 0,02	12,5 ± 0,32	0,4 ± 0,10	215,3 ± 14,34	183,6 ± 7,76
NPK + ЛГ	7,6 ± 0,01	27,0 ± 2,81	0,6 ± 0,31	300,5 ± 14,34	208,3 ± 2,78
Osmocote + ЛГ	7,5 ± 0,02	14,5 ± 2,44	2,2 ± 0,84	270,8 ± 4,78	227,8 ± 5,56
Ruscote + ЛГ	7,4 ± 0,02	34,3 ± 0,64	1,9 ± 1,57	356,9 ± 19,13	193,8 ± 4,62
NPK	7,5 ± 0,04	13,1 ± 0,64	2,9 ± 2,61	270,8 ± 4,78	168,5 ± 2,31
Osmocote	7,5 ± 0,02	13,9 ± 0,64	2,2 ± 1,25	347,3 ± 9,56	186,9 ± 2,31
Ruscote	7,4 ± 0,03	52,3 ± 0,64	2,9 ± 2,41	313,8 ± 9,56	163,8 ± 2,31
2024 г.					
Контроль	7,6 ± 0,12	10,4 ± 0,18	2,0 ± 0,05	239,6 ± 2,70	204,0 ± 16,97
ЛГ	7,6 ± 0,03	10,4 ± 0,27	1,6 ± 0,23	166,6 ± 1,35	180,0 ± 16,97
NPK + ЛГ	7,5 ± 0,10	12,2 ± 3,98	1,8 ± 0,25	387,5 ± 37,87	348,0 ± 16,97
Osmocote + ЛГ	7,5 ± 0,03	9,3 ± 0,18	1,9 ± 0,07	300,5 ± 32,46	390,0 ± 8,49

Продолжение таблицы П.4					
Ruscote + ЛГ	7,4 ± 0,02	13,9 ± 0,36	2,0 ± 0,80	325,8 ± 15,55	330,0 ± 42,43
NPK	7,5 ± 0,05	8,8 ± 0,27	1,5 ± 0,02	284,7 ± 6,09	198,0 ± 8,49
Osmocote	7,5 ± 0,03	13,8 ± 0,36	2,9 ± 0,87	351,6 ± 20,96	324,0 ± 16,97
Ruscote	7,3 ± 0,09	13,6 ± 0,09	1,6 ± 0,18	360,2 ± 29,08	426,0 ± 8,49

Таблица П.5. Содержание валовых форм азота и фосфора в почвогрунте после вегетационного периода в 2023 г., % (среднее ± ошибка опыта)

Вариант	N	P ₂ O ₅
Контроль	0,70±0,024	0,25±0,036
ЛГ	0,89±0,025	0,25±0,019
NPK + ЛГ	0,59±0,049	0,08±0,013
Osmocote + ЛГ	1,04±0,051	0,10±0,024
Ruscote + ЛГ	0,56±0,022	0,04±0,011
NPK	0,62±0,050	0,05±0,010
Osmocote	0,85±0,024	0,14±0,028
Ruscote	0,84±0,023	0,12±0,008
До закладки опыта	0,99±0,025	0,44±0,107

Таблица П.6. Содержание подвижного кальция и магния в почвогрунте после вегетационного периода (среднее $\pm$ ошибка опыта)

Вариант	2022 г.		2023 г.		2024 г.	
	CaO	MgO	CaO	MgO	CaO	MgO
	мг/кг					
Контроль	1612,1 $\pm$ 196,24	424,3 $\pm$ 11,96	2317,1 $\pm$ 216,69	237,0 $\pm$ 13,73	2711,9 $\pm$ 346,02	228,4 $\pm$ 82,95
ЛГ	1742,8 $\pm$ 328,56	399,5 $\pm$ 58,49	2322,7 $\pm$ 81,09	146,8 $\pm$ 10,50	2514,5 $\pm$ 139,58	576,8 $\pm$ 91,52
NPK + ЛГ	1593,3 $\pm$ 208,99	318,8 $\pm$ 6,65	2312,4 $\pm$ 66,47	130,2 $\pm$ 4,85	2608,5 $\pm$ 192,76	422,6 $\pm$ 64,61
Osmocote + ЛГ	1607,4 $\pm$ 395,18	516,2 $\pm$ 5,32	2268,2 $\pm$ 41,21	181,0 $\pm$ 7,27	2585,0 $\pm$ 225,99	345,5 $\pm$ 100,95
Ruscote + ЛГ	1441,0 $\pm$ 362,06	345,4 $\pm$ 75,65	2151,7 $\pm$ 62,48	166,2 $\pm$ 7,27	2838,8 $\pm$ 66,47	391,2 $\pm$ 92,87
NPK	1588,6 $\pm$ 449,02	415,4 $\pm$ 95,67	2210 $\pm$ 113,00	136,5 $\pm$ 20,19	2796,5 $\pm$ 166,17	168,5 $\pm$ 36,34
Osmocote	1555,7 $\pm$ 377,98	495,4 $\pm$ 46,53	1128 $\pm$ 39,88	93,7 $\pm$ 3,23	2533,3 $\pm$ 33,23	288,4 $\pm$ 52,49
Ruscote	1603,6 $\pm$ 328,15	358,8 $\pm$ 18,61	1105,4 $\pm$ 1,33	108,2 $\pm$ 4,44	2580,3 $\pm$ 46,53	234,1 $\pm$ 48,46

Таблица П.7. Содержание микроэлементов и тяжелых металлов в почвогрунте после вегетации, мг/кг (среднее $\pm$ ошибка опыта)

Вариант	Цинк	Медь	Свинец	Кадмий
	2022 г.			
Контроль	33,5 $\pm$ 0,50	7,8 $\pm$ 0,30	12,7 $\pm$ 0,65	0,2 $\pm$ 0,01
ЛГ	30,0 $\pm$ 0,00	15,7 $\pm$ 1,48	17,0 $\pm$ 0,50	0,2 $\pm$ 0,01
NPК + ЛГ	30,0 $\pm$ 0,50	8,9 $\pm$ 0,40	14,3 $\pm$ 0,68	0,2 $\pm$ 0,01
Osmocote + ЛГ	26,8 $\pm$ 0,75	9,7 $\pm$ 2,05	14,5 $\pm$ 0,50	0,2 $\pm$ 0,02
Ruscote + ЛГ	26,3 $\pm$ 0,25	6,8 $\pm$ 0,02	15,4 $\pm$ 1,08	0,2 $\pm$ 0,03
NPК	31,0 $\pm$ 0,00	8,8 $\pm$ 0,52	15,5 $\pm$ 2,34	0,1 $\pm$ 0,02
Osmocote	31,0 $\pm$ 1,00	12,1 $\pm$ 0,85	14,6 $\pm$ 1,13	0,1 $\pm$ 0,01
Ruscote	31,3 $\pm$ 1,25	14,0 $\pm$ 1,60	15,3 $\pm$ 1,25	0,2 $\pm$ 0,02
	2023 г.			
Контроль	31,5 $\pm$ 0,50	6,1 $\pm$ 0,28	12,3 $\pm$ 0,75	0,2 $\pm$ 0,01
ЛГ	28,8 $\pm$ 1,25	6,3 $\pm$ 0,25	14,8 $\pm$ 4,25	0,1 $\pm$ 0,01
NPК + ЛГ	28,7 $\pm$ 0,48	5,8 $\pm$ 0,40	7,4 $\pm$ 2,13	0,1 $\pm$ 0,03
Osmocote + ЛГ	26,0 $\pm$ 1,70	5,4 $\pm$ 0,15	11,5 $\pm$ 1,50	0,1 $\pm$ 0,03
Ruscote + ЛГ	33,0 $\pm$ 2,00	7,6 $\pm$ 0,15	10,0 $\pm$ 0,00	0,2 $\pm$ 0,02
NPК	34,3 $\pm$ 0,75	10,4 $\pm$ 0,70	11,9 $\pm$ 1,38	0,2 $\pm$ 0,03
Osmocote	27,3 $\pm$ 0,75	5,2 $\pm$ 0,10	16,8 $\pm$ 3,25	0,1 $\pm$ 0,02
Ruscote	30,0 $\pm$ 1,00	5,4 $\pm$ 0,05	10,7 $\pm$ 0,15	0,1 $\pm$ 0,01
	2024 г.			
Контроль	41,3 $\pm$ 1,06	20,8 $\pm$ 0,46	27,5 $\pm$ 2,83	0,2 $\pm$ 0,02
ЛГ	43,5 $\pm$ 5,66	20,8 $\pm$ 2,86	25,5 $\pm$ 3,54	0,1 $\pm$ 0,01
NPК + ЛГ	40,8 $\pm$ 0,35	18,5 $\pm$ 1,80	22,5 $\pm$ 0,02	0,1 $\pm$ 0,04
Osmocote + ЛГ	39,5 $\pm$ 5,66	20,3 $\pm$ 1,70	22,5 $\pm$ 3,54	0,1 $\pm$ 0,04
Ruscote + ЛГ	45,5 $\pm$ 2,12	21,9 $\pm$ 0,53	22,5 $\pm$ 0,71	0,2 $\pm$ 0,02
NPК	42,8 $\pm$ 3,89	21,8 $\pm$ 4,60	37,5 $\pm$ 3,54	0,2 $\pm$ 0,04
Osmocote	37,8 $\pm$ 1,06	19,3 $\pm$ 0,35	20,8 $\pm$ 0,35	0,1 $\pm$ 0,02
Ruscote	38,8 $\pm$ 2,47	22,2 $\pm$ 6,47	27,5 $\pm$ 7,07	0,1 $\pm$ 0,01

Таблица П.8. Содержание макроэлементов в листьях черной смородины, % (среднее $\pm$ ошибка опыта)

Вариант	Азот	Фосфор	Калий
2022 г.			
Контроль	1,7 $\pm$ 0,01	0,9 $\pm$ 0,01	2,1 $\pm$ 0,03
ЛГ	2,2 $\pm$ 0,01	1,2 $\pm$ 0,09	2,1 $\pm$ 0,03
NPК + ЛГ	2,4 $\pm$ 0,02	0,6 $\pm$ 0,04	1,6 $\pm$ 0,00
Osmocote + ЛГ	2,5 $\pm$ 0,02	0,5 $\pm$ 0,01	1,5 $\pm$ 0,01

Продолжение таблицы П.8			
Ruscote + ЛГ	2,0±0,04	0,6 ± 0,03	1,3 ± 0,01
NPK	2,2±0,04	0,5 ± 0,06	1,3 ± 0,04
Osmocote	2,2±0,02	0,5 ± 0,02	1,6 ± 0,02
Ruscote	2,4±0,01	0,7 ± 0,04	1,9 ± 0,01
	2023 г.		
Контроль	1,5 ± 0,03	1,2 ± 0,02	2,0 ± 0,05
ЛГ	1,8 ± 0,07	1,3 ± 0,01	2,0 ± 0,07
NPK + ЛГ	1,2 ± 0,06	0,6 ± 0,02	2,0 ± 0,05
Osmocote + ЛГ	1,5 ± 0,09	0,9 ± 0,01	2,1 ± 0,03
Ruscote + ЛГ	1,4 ± 0,03	0,9 ± 0,02	2,0 ± 0,04
NPK	1,3 ± 0,04	0,7 ± 0,03	2,0 ± 0,04
Osmocote	1,5 ± 0,06	0,7 ± 0,01	2,1 ± 0,06
Ruscote	1,3 ± 0,03	0,7 ± 0,03	2,1 ± 0,06
	2024 г.		
Контроль	1,6 ± 0,01	0,6 ± 0,01	1,1 ± 0,06
ЛГ	1,2 ± 0,01	0,8 ± 0,01	1,3 ± 0,03
NPK + ЛГ	1,3 ± 0,01	0,3 ± 0,01	1,1 ± 0,00
Osmocote + ЛГ	1,4 ± 0,01	0,7 ± 0,01	1,1 ± 0,03
Ruscote + ЛГ	1,9 ± 0,01	0,7 ± 0,01	1,4 ± 0,06
NPK	1,6 ± 0,05	0,7 ± 0,01	1,3 ± 0,10
Osmocote	1,4 ± 0,01	0,9 ± 0,02	1,4 ± 0,07
Ruscote	1,9 ± 0,01	0,6 ± 0,01	1,2 ± 0,00

Таблица П.9. Содержание макроэлементов в ягодах черной смородины, %
(среднее $\pm$ ошибка опыта)

Вариант	N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
	2023 г.	2024 г.	2023 г.	2024 г.	2023 г.	2024 г.
Контроль	0,5 $\pm$ 0,00	0,6 $\pm$ 0,01	0,6 $\pm$ 0,01	0,3 $\pm$ 0,07	0,9 $\pm$ 0,05	0,6 $\pm$ 0,01
ЛГ	0,6 $\pm$ 0,00	0,5 $\pm$ 0,01	0,5 $\pm$ 0,03	0,2 $\pm$ 0,04	0,9 $\pm$ 0,03	0,4 $\pm$ 0,01
NPK + ЛГ	0,8 $\pm$ 0,00	1,0 $\pm$ 0,01	0,8 $\pm$ 0,02	0,2 $\pm$ 0,00	1,0 $\pm$ 0,04	0,3 $\pm$ 0,00
Osmocote + ЛГ	0,7 $\pm$ 0,00	0,6 $\pm$ 0,01	0,8 $\pm$ 0,04	0,2 $\pm$ 0,10	0,9 $\pm$ 0,03	0,3 $\pm$ 0,00
Ruscote + ЛГ	0,8 $\pm$ 0,00	0,7 $\pm$ 0,01	0,8 $\pm$ 0,03	0,2 $\pm$ 0,03	0,9 $\pm$ 0,01	0,3 $\pm$ 0,00
NPK	1,0 $\pm$ 0,05	1,2 $\pm$ 0,05	0,7 $\pm$ 0,04	0,2 $\pm$ 0,04	0,9 $\pm$ 0,05	0,3 $\pm$ 0,05
Osmocote	0,8 $\pm$ 0,00	0,7 $\pm$ 0,01	0,8 $\pm$ 0,03	0,1 $\pm$ 0,04	0,9 $\pm$ 0,03	0,4 $\pm$ 0,01
Ruscote	1,0 $\pm$ 0,00	0,8 $\pm$ 0,01	1,1 $\pm$ 0,04	0,1 $\pm$ 0,03	0,9 $\pm$ 0,03	0,4 $\pm$ 0,01

Таблица П.10. Содержание кальция и магния в листьях черной смородины, %
(среднее $\pm$ ошибка опыта)

Вариант	2022 г.		2023 г.		2024 г.	
	CaO	MgO	CaO	MgO	CaO	MgO
Контроль	1,6 $\pm$ 0,14	0,9 $\pm$ 0,01	2,2 $\pm$ 0,14	0,3 $\pm$ 0,01	1,3 $\pm$ 0,16	0,1 $\pm$ 0,01
ЛГ	1,6 $\pm$ 0,05	0,1 $\pm$ 0,01	1,9 $\pm$ 0,03	0,1 $\pm$ 0,01	1,4 $\pm$ 0,09	0,1 $\pm$ 0,01
NPK + ЛГ	1,7 $\pm$ 0,06	0,1 $\pm$ 0,01	1,5 $\pm$ 0,06	0,2 $\pm$ 0,01	1,6 $\pm$ 0,06	0,1 $\pm$ 0,01
Osmocote + ЛГ	1,3 $\pm$ 0,04	0,2 $\pm$ 0,01	1,4 $\pm$ 0,07	0,1 $\pm$ 0,02	1,8 $\pm$ 0,05	0,9 $\pm$ 0,01
Ruscote + ЛГ	1,1 $\pm$ 0,05	0,3 $\pm$ 0,01	1,8 $\pm$ 0,04	0,1 $\pm$ 0,01	1,9 $\pm$ 0,04	0,9 $\pm$ 0,01
NPK	1,7 $\pm$ 0,05	0,2 $\pm$ 0,01	1,5 $\pm$ 0,04	0,1 $\pm$ 0,02	1,8 $\pm$ 0,05	0,8 $\pm$ 0,03
Osmocote	1,3 $\pm$ 0,06	0,2 $\pm$ 0,01	1,5 $\pm$ 0,09	0,1 $\pm$ 0,02	1,8 $\pm$ 0,09	0,7 $\pm$ 0,03
Ruscote	1,2 $\pm$ 0,06	0,3 $\pm$ 0,01	1,8 $\pm$ 0,03	0,1 $\pm$ 0,01	1,9 $\pm$ 0,06	0,9 $\pm$ 0,01

Таблица П.11. Содержание кальция и магния в ягодах черной смородины, % (среднее $\pm$ ошибка опыта)

Вариант	2023 г.		2024 г.	
	CaO	MgO	CaO	MgO
Контроль	0,15 $\pm$ 0,015	0,03 $\pm$ 0,002	0,12 $\pm$ 0,005	0,02 $\pm$ 0,006
ЛГ	0,14 $\pm$ 0,007	0,03 $\pm$ 0,002	0,10 $\pm$ 0,000	0,02 $\pm$ 0,003
NPK + ЛГ	0,09 $\pm$ 0,009	0,01 $\pm$ 0,004	0,11 $\pm$ 0,006	0,01 $\pm$ 0,004
Osmocote + ЛГ	0,07 $\pm$ 0,010	0,02 $\pm$ 0,002	0,10 $\pm$ 0,006	0,02 $\pm$ 0,004
Ruscote + ЛГ	0,09 $\pm$ 0,013	0,02 $\pm$ 0,001	0,06 $\pm$ 0,005	0,01 $\pm$ 0,000
NPK	0,06 $\pm$ 0,014	0,01 $\pm$ 0,003	0,08 $\pm$ 0,000	0,02 $\pm$ 0,003
Osmocote	0,10 $\pm$ 0,010	0,02 $\pm$ 0,001	0,08 $\pm$ 0,000	0,03 $\pm$ 0,004
Ruscote	0,10 $\pm$ 0,009	0,02 $\pm$ 0,001	0,10 $\pm$ 0,006	0,01 $\pm$ 0,004

Таблица П.12. Содержание микроэлементов и тяжелых металлов в листьях черной смородины, мг/кг сухого вещества (среднее $\pm$ ошибка опыта)

Вариант	Цинк	Медь	Свинец	Кадмий
	2022 г.			
Контроль	16,4 $\pm$ 1,07	3,1 $\pm$ 0,49	0,5 $\pm$ 0,09	0,1 $\pm$ 0,00
ЛГ	22,4 $\pm$ 1,17	6,5 $\pm$ 3,69	0,3 $\pm$ 0,01	0,1 $\pm$ 0,00
NPK + ЛГ	19,6 $\pm$ 2,59	3,3 $\pm$ 0,13	0,3 $\pm$ 0,01	0,1 $\pm$ 0,00
Osmocote + ЛГ	22,1 $\pm$ 2,13	3,9 $\pm$ 1,01	0,7 $\pm$ 0,09	0,1 $\pm$ 0,01
Ruscote + ЛГ	24,8 $\pm$ 2,65	2,8 $\pm$ 0,24	0,4 $\pm$ 0,09	0,1 $\pm$ 0,00
NPK	18,3 $\pm$ 0,66	4,1 $\pm$ 1,57	0,3 $\pm$ 0,01	0,1 $\pm$ 0,00
Osmocote	18,8 $\pm$ 0,13	4,2 $\pm$ 0,91	0,3 $\pm$ 0,00	0,1 $\pm$ 0,00
Ruscote	22,8 $\pm$ 0,04	3,1 $\pm$ 0,43	0,3 $\pm$ 0,03	0,1 $\pm$ 0,01

Продолжение таблицы П.12				
	2023 г.			
Контроль	$17,2 \pm 1,80$	$1,4 \pm 0,10$	$0,5 \pm 0,02$	$0,1 \pm 0,00$
ЛГ	$30,8 \pm 1,80$	$1,7 \pm 0,19$	$0,2 \pm 0,01$	$0,1 \pm 0,00$
НПК + ЛГ	$14,3 \pm 0,39$	$2,3 \pm 0,41$	$0,1 \pm 0,04$	$0,1 \pm 0,00$
Osmocote + ЛГ	$19,2 \pm 0,30$	$1,3 \pm 0,08$	$0,2 \pm 0,02$	$0,1 \pm 0,00$
Ruscote + ЛГ	$19,4 \pm 0,60$	$1,5 \pm 0,14$	$0,1 \pm 0,01$	$0,1 \pm 0,00$
НПК	$13,7 \pm 0,38$	$1,4 \pm 0,11$	$0,1 \pm 0,01$	$0,1 \pm 0,00$
Osmocote	$18,4 \pm 0,42$	$1,3 \pm 0,05$	$0,1 \pm 0,01$	$0,1 \pm 0,00$
Ruscote	$22,8 \pm 0,93$	$1,2 \pm 0,20$	$0,1 \pm 0,04$	$0,1 \pm 0,00$
	2024 г.			
Контроль	$37,7 \pm 2,63$	$3,7 \pm 0,33$	$0,5 \pm 0,08$	$0,1 \pm 0,00$
ЛГ	$41,8 \pm 1,28$	$2,7 \pm 0,16$	$1,2 \pm 0,16$	$0,1 \pm 0,00$
НПК + ЛГ	$43,0 \pm 1,33$	$3,9 \pm 0,58$	$1,2 \pm 0,08$	$0,1 \pm 0,00$
Osmocote + ЛГ	$42,0 \pm 0,59$	$3,0 \pm 0,34$	$2,0 \pm 0,25$	$0,1 \pm 0,00$
Ruscote + ЛГ	$36,9 \pm 0,63$	$2,7 \pm 0,16$	$1,3 \pm 0,24$	$0,1 \pm 0,00$
НПК	$40,4 \pm 0,95$	$2,9 \pm 0,48$	$1,3 \pm 0,32$	$0,1 \pm 0,00$
Osmocote	$36,0 \pm 0,97$	$3,1 \pm 0,32$	$1,5 \pm 0,08$	$0,1 \pm 0,00$
Ruscote	$42,0 \pm 1,57$	$2,9 \pm 0,25$	$1,1 \pm 0,17$	$0,1 \pm 0,00$

Таблица П.13. Содержание микроэлементов и тяжелых металлов в ягодах черной смородины, мг/кг сухого вещества (среднее $\pm$ ошибка опыта)

Вариант	Цинк	Медь	Свинец	Кадмий
	2023 г.			
Контроль	10,2 $\pm$ 0,03	1,8 $\pm$ 0,07	0,1 $\pm$ 0,01	0,1 $\pm$ 0,00
ЛГ	10,8 $\pm$ 0,33	1,8 $\pm$ 0,04	0,1 $\pm$ 0,01	0,1 $\pm$ 0,00
НПК + ЛГ	12,0 $\pm$ 0,03	1,6 $\pm$ 0,06	0,1 $\pm$ 0,01	0,1 $\pm$ 0,00
Osmocote + ЛГ	11,9 $\pm$ 0,09	1,4 $\pm$ 0,04	0,1 $\pm$ 0,01	0,1 $\pm$ 0,00
Ruscote + ЛГ	11,7 $\pm$ 0,34	1,3 $\pm$ 0,13	0,4 $\pm$ 0,09	0,1 $\pm$ 0,00
НПК	12,2 $\pm$ 0,05	1,3 $\pm$ 0,04	0,4 $\pm$ 0,06	0,1 $\pm$ 0,00
Osmocote	11,2 $\pm$ 0,08	1,1 $\pm$ 0,11	0,1 $\pm$ 0,02	0,1 $\pm$ 0,00
Ruscote	11,2 $\pm$ 0,06	1,1 $\pm$ 0,05	0,1 $\pm$ 0,00	0,1 $\pm$ 0,00
	2024 г.			
Контроль	12,0 $\pm$ 0,41	1,0 $\pm$ 0,08	2,6 $\pm$ 0,41	0,1 $\pm$ 0,00
ЛГ	11,2 $\pm$ 0,25	1,3 $\pm$ 0,08	1,0 $\pm$ 0,08	0,1 $\pm$ 0,00
НПК + ЛГ	10,9 $\pm$ 0,32	1,6 $\pm$ 0,08	1,6 $\pm$ 0,16	0,1 $\pm$ 0,00
Osmocote + ЛГ	8,8 $\pm$ 0,29	1,5 $\pm$ 0,14	0,8 $\pm$ 0,14	0,1 $\pm$ 0,00
Ruscote + ЛГ	9,7 $\pm$ 0,51	1,6 $\pm$ 0,07	0,7 $\pm$ 0,07	0,1 $\pm$ 0,00
НПК	10,4 $\pm$ 0,40	1,9 $\pm$ 0,16	0,7 $\pm$ 0,08	0,1 $\pm$ 0,00
Osmocote	12,9 $\pm$ 0,42	1,6 $\pm$ 0,34	0,4 $\pm$ 0,08	0,1 $\pm$ 0,00
Ruscote	10,6 $\pm$ 0,34	1,8 $\pm$ 0,17	1,4 $\pm$ 0,26	0,1 $\pm$ 0,00

Таблица П.14. Содержание нитратов в ягодах черной смородины, мг/кг сырого вещества (среднее $\pm$ ошибка опыта)

Вариант	Нитраты	
	2023 г.	2024 г.
Контроль	70,8$\pm$1,79	43,3 $\pm$ 10,21
ЛГ	58,3$\pm$1,14	49,8 $\pm$ 1,81
NPK + ЛГ	51,7$\pm$0,99	81,5$\pm$0,80
Osmocote + ЛГ	52,3$\pm$0,89	34,8 $\pm$ 3,94
Ruscote + ЛГ	50,6$\pm$1,28	45,6 $\pm$ 6,19
NPK	44,7 $\pm$ 1,76	53,9$\pm$5,65
Osmocote	47,9 $\pm$ 0,91	48,2 $\pm$ 3,58
Ruscote	45,8 $\pm$ 0,82	67,8$\pm$2,51

Таблица П.15. Содержание фенольных соединений в черной смородине, мг-экв галловой кислоты/г сухого вещества (среднее $\pm$ ошибка опыта)

Вариант	2022 г.	2023 г.		2024 г.	
	Листья	Листья	Ягоды	Листья	Ягоды
Контроль	34,4 $\pm$ 0,54	37,9 $\pm$ 1,34	4,0 $\pm$ 0,31	17,2 $\pm$ 0,82	6,2 $\pm$ 0,29
ЛГ	30,3 $\pm$ 0,39	31,8 $\pm$ 0,69	3,8 $\pm$ 0,63	15,5 $\pm$ 0,58	7,5 $\pm$ 0,52
NPK + ЛГ	25,5 $\pm$ 0,92	34,4 $\pm$ 2,56	7,2 $\pm$ 0,34	14,2 $\pm$ 0,34	7,8 $\pm$ 0,42
Osmocote + ЛГ	29,6 $\pm$ 0,25	29,3 $\pm$ 0,63	3,0 $\pm$ 0,49	14,3 $\pm$ 0,45	6,8 $\pm$ 0,28
Ruscote + ЛГ	32,3 $\pm$ 0,42	36,8 $\pm$ 0,35	6,6 $\pm$ 0,40	13,1 $\pm$ 0,57	7,3 $\pm$ 0,56
NPK	25,0 $\pm$ 0,42	35,4 $\pm$ 0,71	12,8 $\pm$ 0,38	14,0 $\pm$ 0,33	8,6 $\pm$ 0,61
Osmocote	28,7 $\pm$ 0,83	38,0 $\pm$ 0,99	9,9 $\pm$ 0,22	12,4 $\pm$ 0,50	8,4 $\pm$ 0,42
Ruscote	38,2 $\pm$ 1,05	33,4 $\pm$ 0,53	3,2 $\pm$ 0,15	12,1 $\pm$ 0,32	9,6 $\pm$ 0,23

Таблица П.16. Концентрация антоцианов в ягодах черной смородины, мг/кг сырой массы (среднее $\pm$ ошибка опыта)

Вариант	2023 г.	2024 г.
Контроль	219,5 $\pm$ 2,54	196,7 $\pm$ 12,22
ЛГ	179,3 $\pm$ 2,35	175,4 $\pm$ 7,93
NPK + ЛГ	139,0 $\pm$ 1,99	130,4 $\pm$ 11,39
Osmocote + ЛГ	114,1 $\pm$ 2,41	118,9 $\pm$ 11,54
Ruscote + ЛГ	105,3 $\pm$ 0,44	111,7 $\pm$ 8,69
NPK	126,8 $\pm$ 3,39	134,9 $\pm$ 5,29
Osmocote	147,9 $\pm$ 2,02	145,2 $\pm$ 5,48
Ruscote	155,0 $\pm$ 1,33	164,0 $\pm$ 11,48

Таблица П.17. Активность каталазы, мг H₂O₂/1 г сырой растительной массы (среднее $\pm$ ошибка опыта)

Вариант	Активность каталазы		
	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Контроль	1,0 $\pm$ 0,13	0,8 $\pm$ 0,01	0,9 $\pm$ 0,05
ЛГ	0,1 $\pm$ 0,00	0,3 $\pm$ 0,01	0,4 $\pm$ 0,06
NPK + ЛГ	0,4 $\pm$ 0,10	0,1 $\pm$ 0,03	0,2 $\pm$ 0,04
Osmocote + ЛГ	0,1 $\pm$ 0,02	0,1 $\pm$ 0,02	0,2 $\pm$ 0,02
Ruscote + ЛГ	0,5 $\pm$ 0,03	0,3 $\pm$ 0,01	0,3 $\pm$ 0,04
NPK	0,3 $\pm$ 0,01	0,01 $\pm$ 0,01	0,2 $\pm$ 0,03
Osmocote	0,2 $\pm$ 0,15	0,6 $\pm$ 0,04	0,6 $\pm$ 0,11
Ruscote	0,6 $\pm$ 0,05	0,2 $\pm$ 0,04	0,4 $\pm$ 0,04

Таблица П.18. Содержание пигментов в листьях в конце вегетационного сезона, мг/г сырого веса (среднее $\pm$ ошибка опыта)

Вариант	Хлорофилл а	Хлорофилл б	Σ хлорофиллов	Хлорофилл а/хлорофилл б	Каротиноиды
2022 г.					
Контроль	1,0 $\pm$ 0,03	0,5 $\pm$ 0,04	1,5 $\pm$ 0,07	2,2 $\pm$ 0,09	0,3 $\pm$ 0,01
ЛГ	1,0 $\pm$ 0,01	0,4 $\pm$ 0,02	1,4 $\pm$ 0,03	2,4 $\pm$ 0,08	0,4 $\pm$ 0,00
NPK + ЛГ	1,1 $\pm$ 0,00	0,6 $\pm$ 0,11	1,7 $\pm$ 0,34	1,8 $\pm$ 0,04	0,3 $\pm$ 0,09
Osmocote + ЛГ	1,1 $\pm$ 0,00	0,8 $\pm$ 0,10	1,9 $\pm$ 0,10	1,4 $\pm$ 0,03	0,2 $\pm$ 0,02
Ruscote + ЛГ	1,1 $\pm$ 0,04	0,6 $\pm$ 0,14	1,7 $\pm$ 0,20	1,8 $\pm$ 0,04	0,3 $\pm$ 0,04
NPK	1,1 $\pm$ 0,07	0,7 $\pm$ 0,15	1,8 $\pm$ 0,38	1,5 $\pm$ 0,02	0,3 $\pm$ 0,09
Osmocote	1,2 $\pm$ 0,06	0,8 $\pm$ 0,12	2,0 $\pm$ 0,18	1,4 $\pm$ 0,03	0,2 $\pm$ 0,03
Ruscote	1,1 $\pm$ 0,01	0,6 $\pm$ 0,00	1,6 $\pm$ 0,01	1,9 $\pm$ 0,04	0,3 $\pm$ 0,00
2023 г.					
Контроль	1,4 $\pm$ 0,01	0,6 $\pm$ 0,02	2,0 $\pm$ 0,02	2,5 $\pm$ 0,07	0,6 $\pm$ 0,00
ЛГ	1,0 $\pm$ 0,01	0,4 $\pm$ 0,01	1,4 $\pm$ 0,00	2,7 $\pm$ 0,08	0,6 $\pm$ 0,00
NPK + ЛГ	1,1 $\pm$ 0,00	0,9 $\pm$ 0,01	2,0 $\pm$ 0,01	1,3 $\pm$ 0,03	0,4 $\pm$ 0,01
Osmocote + ЛГ	1,2 $\pm$ 0,01	0,6 $\pm$ 0,01	1,7 $\pm$ 0,02	2,0 $\pm$ 0,08	0,5 $\pm$ 0,00
Ruscote + ЛГ	1,0 $\pm$ 0,00	0,4 $\pm$ 0,02	1,4 $\pm$ 0,02	2,7 $\pm$ 0,09	0,5 $\pm$ 0,00
NPK	1,1 $\pm$ 0,01	0,5 $\pm$ 0,02	1,6 $\pm$ 0,02	2,1 $\pm$ 0,10	0,5 $\pm$ 0,01
Osmocote	1,4 $\pm$ 0,01	0,8 $\pm$ 0,06	2,2 $\pm$ 0,04	1,8 $\pm$ 0,08	0,5 $\pm$ 0,01
Ruscote	1,3 $\pm$ 0,01	0,7 $\pm$ 0,01	2,0 $\pm$ 0,02	1,9 $\pm$ 0,07	0,5 $\pm$ 0,00
2024 г.					
Контроль	0,8 $\pm$ 0,00	0,4 $\pm$ 0,01	1,2 $\pm$ 0,01	2,1 $\pm$ 0,09	0,3 $\pm$ 0,00
ЛГ	0,8 $\pm$ 0,01	0,4 $\pm$ 0,03	1,3 $\pm$ 0,04	1,9 $\pm$ 0,08	0,3 $\pm$ 0,01
NPK + ЛГ	0,7 $\pm$ 0,00	0,3 $\pm$ 0,01	1,1 $\pm$ 0,01	2,3 $\pm$ 0,04	0,3 $\pm$ 0,00
Osmocote + ЛГ	0,8 $\pm$ 0,00	0,4 $\pm$ 0,02	1,2 $\pm$ 0,02	2,0 $\pm$ 0,02	0,3 $\pm$ 0,00
Ruscote + ЛГ	0,8 $\pm$ 0,00	0,6 $\pm$ 0,05	1,4 $\pm$ 0,05	1,3 $\pm$ 0,05	0,2 $\pm$ 0,01
NPK	0,8 $\pm$ 0,00	0,4 $\pm$ 0,01	1,1 $\pm$ 0,01	2,2 $\pm$ 0,09	0,3 $\pm$ 0,00
Osmocote	0,8 $\pm$ 0,01	0,5 $\pm$ 0,02	1,3 $\pm$ 0,03	1,6 $\pm$ 0,07	0,3 $\pm$ 0,00
Ruscote	0,9 $\pm$ 0,01	0,6 $\pm$ 0,04	1,5 $\pm$ 0,03	1,4 $\pm$ 0,05	0,3 $\pm$ 0,01

Таблица П.19. Содержание аскорбиновой кислоты в ягодах в 2024 г., мг/100 г сырого вещества (среднее ± ошибка опыта)

Вариант	Содержание аскорбиновой кислоты
Контроль	88,1±3,34
ЛГ	55,0±3,74
НPK + ЛГ	33,8±2,98
Osmocote + ЛГ	46,2±4,21
Ruscote + ЛГ	37,0±3,69
НPK	33,0±3,21
Osmocote	41,7±3,14
Ruscote	44,8±4,22

Таблица П.20. Отрицательное или положительное действие удобрений и фолиарной обработки Лигногуманом на основные показатели чёрной смородины (самое сильное влияние выделено красным цветом)

Блок	Показатель	Год	ЛГ	НPK	НPK+ ЛГ	Osmo cote	Osmoc ote+ЛГ	Ruscot e	Ruscot e+ЛГ
Биоме тричес кие показа тели	Прирост побегов	2022			+	+	+	+	
		2023				-			
	Площадь листа	2022		+	+	+	+	+	+
		2023		+					
		2024		+	+			+	+
	Масса 50 ягод	2023		+	+				+
		2024		+					+
	Количество кистей	2023		+	+				+
		2024		+	+				+
	Масса ягод с 1 м²	2023		+	+	+	+	+	+
		2024		+	+	+	+	+	+

Продолжение таблицы П.20									
Блок	Показатель	Год	ЛГ	NP К	NPK +ЛГ	Osmo cote	Osmoc ote+ЛГ	Ruscot e	Ruscot e+ЛГ
Листья	Азот	2022	+	+	+	+	+	+	+
		2023	+	-	-			-	-
		2024	-		-	-	-	+	+
	Фосфор	2022	+	-	-	-	-	-	-
		2023	+	-	-	-	-	-	-
		2024	+	+	-	+	+		+
	Калий	2022		-	-	-	-	-	-
		2023					+		
		2024	+	+		+		+	+
	Кальций	2022				-	-	-	-
		2023	-	-	-	-	-	-	-
		2024		+	+	+	+	+	+
	Магний	2022	-	-	-	-	-	-	-
		2023	-	-	-	-	-	-	-
		2024		+		+	+	+	+
	Цинк	2022	+	+		+	+	+	+
		2023	+	-	-			+	
		2024	+		+		+	+	
	Медь	2022							
		2023	+		+				
		2024	-				-	-	-
	Свинец	2022	-	-	-	-	+	-	
		2023	-	-	-	-	-	-	-
		2024	+	+	+	+	+	+	+
Ягоды	Азот	2023	+	+	+	+	+	+	+
		2024	-	+	+	+		+	+
	Фосфор	2023	-	+	+	+	+	+	+
		2024			-	-		-	
	Калий	2023			+				
		2024	-	-	-	-	-	-	-
	Кальций	2023		-	-	-	-	-	-
		2024	-	-		-	-	-	-
	Магний	2023		-	-	-	-	-	-
		2024							-
	Цинк	2023	+	+	+	+	+	+	+
		2024	-	-	-	+	-	-	-
	Медь	2023		-	-	-	-	-	-
		2024	+	+	+	+	+	+	+
	Свинец	2023		+					+
		2024	-	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы П.20									
Блок	Показатель	Год	ЛГ	NP К	NPК +ЛГ	Osmo cote	Osmoc ote+ЛГ	Ruscot e	Ruscot e+ЛГ
Биохимические показатели	Нитраты	2023	-	-	-	-	-	-	-
		2024			+			+	
	Аскорбиновая кислота	2023							
		2024	-	-	-	-	-	-	-
	Фенольные соединения (листья)	2022	-	-	-	-	-	+	-
		2023	-	-			-	-	
		2024	-	-	-	-	-	-	-
	Фенольные соединения (ягоды)	2023		+	+	+	-	-	+
		2024	+	+	+	+	+	+	+
Пигменты	Антоцианы	2023	-	-	-	-	-	-	-
		2024	-	-	-	-	-	-	-
	Хлорофилл а	2022							
		2023	-	-	-		-	-	-
		2024			-			+	
	Хлорофилл b	2022	-	+	+	+	+		+
		2023	-	-	+	+		+	-
		2024			-	+		+	+
	Сумма хлорофилла а и b	2022				+	+	+	
		2023	-	-		+	-		-
		2024	+	-	-	+		+	+
	Каротиноиды	2022				-	-		
		2023		-	-		-		-
		2024							-
Фермент	Каталаза	2022	-	-	-	-	-	-	-
		2023	-	-	-	-	-	-	-
		2024	-	-	-	-	-	-	-