

На правах рукописи



ТРУНОВ Александр Юрьевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЗОТНОГО ПИТАНИЯ НА РОСТ
И ПЛОДНОШЕНИЕ ЯБЛОНИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ
УДОБРЕНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ НАСАЖДЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНО-
ЧЕРНОЗЁМНОГО РЕГИОНА**

Специальность 4.1.4. Садоводство, овощеводство, виноградарство и
лекарственные культуры

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Краснодар, 2026

Работа выполнена на кафедре садоводства, биотехнологий и селекции сельскохозяйственных культур ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет»

Научный руководитель: Кузин Андрей Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, доцент

Официальные оппоненты: Щеглов Сергей Николаевич, доктор биологических наук, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», кафедра генетики, микробиологии и биохимии, профессор

Фоменко Тарас Григорьевич, кандидат сельскохозяйственных наук, ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия», старший научный сотрудник, заведующий лабораторией управления воспроизводством в плодовых агроценозах и экосистемах

Ведущая организация: ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур»

Защита состоится «01» июня 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 35.2.019.08 при ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13 (главный корпус, 1 этаж, ауд.106).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайтах: ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» – <http://www.kubsau.ru> и ВАК – www.vak.ed.gov.ru, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: www.vak.minobrnauki.gov.ru

Автореферат разослан «14» апреля 2026 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
д.с.-х.н., профессор

Р.Ш. Заремук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы научных исследований. Россия территориально располагается в природно-климатических условиях, которые отличаются критическими значениями по многим показателям: температуре, влажности и т.д., что ограничивает возможности использования территории для выращивания плодовых культур, – лишь некоторые южные регионы можно сравнить по благоприятным условиям со странами Европы (Кашин, 1995; Загиров и др., 2010; Муханин, 2011; Кузин, Трунов, 2015). Несмотря на это, для выращивания наиболее зимостойких и устойчивых культур в нашей стране имеются достаточно благоприятные условия, особенно это касается яблони и некоторых ягодных культур (Загиров и др., 2010; Савельева, Савельев, 2013; Соловьёв и др., 2022).

Однако, успешное ведение садоводства в средней полосе России предполагает достаточно высокую урожайность и качество плодов, что невозможно в насаждениях старого, экстенсивного типа, которых ещё много сохранилось в нашей стране (Завражнов и др., 2013; Концепция системы..., 2019). Поэтому здесь нужны интенсивные насаждения, способные переходить к плодоношению с года посадки и максимально реализовать генетический потенциал, – закладка которых в России в настоящее время ведётся высокими темпами (Трунов, Трунова, 2013; Бунцевич, Щеглов, 2014; Концепция системы..., 2019; Грушева, 2022; Расулов и др., 2024).

Для того, чтобы достичь максимальной реализации потенциала продуктивности яблони в условиях воздействия различных экологических факторов, необходимо определить характер взаимосвязей между этими факторами и растениями. Одним из важнейших экологических факторов, интенсивно влияющих на рост и плодоношение деревьев яблони, качества плодов, является обеспеченность растений почвенными элементами минерального питания (Трунов, 2007; 2016; Фоменко, 2017; 2021; Дорошенко, 2022; Кузин, 2018; 2023). Потребность в удобрении тем выше, чем большую биомассу и урожай формируют растения в саду, особенно это касается современных высокоурожайных сортов на карликовых подвоях в интенсивных садах с уплотнённым размещением деревьев (Будаговский, 1976; Лебедев, 1985; Кондаков, 2001, Савельева, Савельев, 2013; Юшков и др., 2019).

Для того чтобы прогнозировать ход естественных биологических процессов, происходящих в растении, планировать величину и качество урожаев в течение всего цикла эксплуатации насаждений, применяют математические методы. Моделируя вынос и возврат минеральных элементов в системе «растение-почва-атмосфера», можно делать прогнозы продуктивности и накопления биомассы в плодовых насаждениях, с учётом биологических особенностей сортов и подвоев (Кехаев, 1995; Бобрович, 1998; Петрушин, Бобрович, 1999; Щеглов, 2004).

Степень изученности проблемы. Вопросами минерального питания и удобрения яблони в России занимались ведущие учёные: А.К. Приймак (1969), Д.А. Сабинин (1971), В.М. Лебедев (1985), К.Н. Кондратьев (1991), А.А. Кладь (2001), В.П. Попова (2004), Т.Н. Дорошенко (2005), Н.Н. Сергеева (2005), А.К. Кондаков (2007), Ю.В. Трунов (2003, 2016), А.И. Кузин (2018, 2023) и многие другие.

К сожалению, в работах авторов недостаточно сведений о минеральном питании яблони в интенсивных садах в условиях Центрально-Черноземного региона, а также о выносе и потреблении минеральных элементов деревьями яб-

лони на карликовых подвоях. Эта проблема приобретает еще большую актуальность в условиях изменяющегося климата, влияние которого распространяется и на минеральный баланс растений.

Цель исследований – разработка модели минерального питания яблони для повышения продуктивности интенсивных садов на основе изучения биологических особенностей роста и плодоношения деревьев яблони и выноса ими минеральных элементов в зависимости от уровня азотного питания.

Задачи исследований:

1. Изучить биометрию штамба и листьев, накопление вегетативной биомассы деревьями яблони в течение жизненного цикла в интенсивном саду.
2. Разработать модель продуктивности и определить биологический потенциал урожайности сортов яблони в интенсивном саду.
3. Изучить локализацию минеральных элементов в почве и динамику их концентрации при внесении удобрений.
4. Дать оценку ростовым показателям и компонентам продуктивности яблони при различных уровнях азотного питания.
5. Определить содержание и вынос азота и калия деревьями яблони с биомассой и урожаем и разработать модели азотного и калийного питания.
6. Сделать расчёт экономической эффективности производства плодов яблони в интенсивном саду при различных уровнях минерального питания.

Научная новизна исследования. Впервые в интенсивных садах в условиях ЦЧР изучены биологические особенности азотного питания деревьев яблони при различных уровнях почвенного удобрения. Получены математические уравнения, моделирующие нелинейные связи между агробиологическими параметрами деревьев в интенсивном яблонево-м саду.

Впервые разработаны биологические модели минерального питания и урожайности сортов яблони на карликовом подвое Парадизка Будаговского на основе логистической функции. Изучена динамика содержания и распределения азота и калия в деревьях яблони и в агроэкосистеме интенсивного сада, получены новые данные по локализации и выносу минеральных элементов сортами яблони на карликовых подвоях.

Получены новые формулы и коэффициенты, позволяющие оперативно уточнять дозировки азотного и калийного удобрения яблони в условиях интенсивного сада. На основе метода элементного баланса разработано комплексное уравнение минерального питания яблони на карликовых подвоях. Для условий ЦЧР России в интенсивных яблоневых садах подобное уравнение отсутствовало.

Теоретическая и практическая значимость. В ходе исследования получены знания о динамике продуктивности и накопления биомассы, выноса азота и калия из почвы деревьями яблони и ее потребности в элементах питания в процессе онтогенеза. Рассчитаны обобщающие математические модели, предложена биологическая интерпретация их параметров.

Определены регрессионные кривые зависимости и взаимосвязи между содержанием минеральных элементов в почве интенсивного сада и органах яблони и её биологическими параметрами: урожайностью, площадью листьев, диаметром штамба, продукцией вегетативной биомассы.

Изучена и математически описана динамика азота и калия в почве интенсивного яблоневого сада в условиях внесения минеральных удобрений по сравнению с контролем. Предложено и научно обосновано понятие «индуцированных потерь» элементов минерального питания при внесении в почву минераль-

ных удобрений, рассчитаны соответствующие поправочные коэффициенты для корректировки доз удобрений в интенсивных садах.

Доработана и усовершенствована комплексная модель элементного баланса в системе «растение-почва-атмосфера» для сортов яблони на основании содержания элементов в корнеобитаемом слое почвы и прогнозируемого биологического выноса элементов с урожаем и вегетативной биомассой. Модель учитывает развитость деревьев, биологическую продуктивность сортов, соотношение урожая и вегетативного прироста, актуальный и требуемый уровни азотного питания. Разработан «калькулятор выноса» минеральных элементов на основе обобщенного уравнения элементного баланса, позволяющий проводить более тонкие расчеты минеральных удобрений по сравнению с ранее применявшимися методами. Методика расчетов рекомендована к использованию в интенсивных яблоневых садах в условиях ЦЧР.

Разработанное обобщенное уравнение элементного баланса позволяет проводить более тонкие расчеты минеральных удобрений по сравнению с ранее применявшимися методами. Оно рекомендовано к использованию в интенсивных яблоневых садах в условиях ЦЧР.

Результаты исследований внедрены в системы минерального питания яблони ЗАО «Агрофирма имени 15 лет Октября», ООО «Агроном-Сад» Лебедянского района Липецкой области.

Результаты работы могут быть использованы в технологиях возделывания интенсивных промышленных насаждений яблони в Центрально-Черноземном регионе при оптимизации минерального режима садовых агроэкосистем с целью реализации биологического потенциала сортов по продуктивности и качеству плодов.

Методология и методы исследования базируются на принципах системного подхода и общепризнанных апробированных методиках, применяемых в научных исследованиях с плодовыми культурами. Научная деятельность связана с определением выноса азота и калия деревьями яблони на карликовых подвоях для разработки биологически обоснованной системы минерального питания яблони в интенсивных садах. Основные результаты получены с использованием полевых и лабораторных наблюдений и экспериментов, а также статистических методов планирования исследований, обработки эмпирических данных, моделирования нелинейных взаимосвязей и экономического анализа.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Биологические модели продуктивности и накопления биомассы деревьями яблони в ходе онтогенеза строятся на основе логистической функции, основными параметрами которой выступают: биологический потенциал сорта, биологическая откликаемость на действующий фактор и уровень вкладываемых биологических ресурсов в динамику системы.

2. Между показателями биологической продукции яблони и уровнем вносимых азотных удобрений наблюдается нелинейная зависимость, которая определяет минимальную эффективную дозу удобрений и описывается логистической кривой регрессии.

3. Для покрытия потребности деревьев яблони интенсивного сада в минеральных элементах питания и сохранении их почвенного баланса необходимо учитывать обратные связи в системе «почва-растение-атмосфера» при построении расчетов доз удобрений, включая вынос и потери элементов.

Апробация работы. Результаты исследований опубликованы в научных статьях, доложены на международных и всероссийских научных и научно-

практических конференциях: 76-я Международная научно-практическая конференция студентов и аспирантов «Обеспечение технологического и научного суверенитета: роль университетского сообщества» (г. Мичуринск, 19-21 марта 2024 г.); IV Международная научно-практическая конференция «Аграрная наука и инновационные сельскохозяйственные технологии» (г. Мичуринск, 24-25 апреля 2024 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Новые знания и инновационные технологии – в развитие современного садоводства» в рамках XVIII Всероссийской выставки «День садовода-2024» (г. Мичуринск, 12-13 сентября 2024 г.); Международная научная конференция «Научное обеспечение устойчивого развития Черноморского региона» (г. Сочи, 2-4 октября 2024 г.); Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция, посвящённая 90-летию со дня рождения профессора В.А. Потапова «Актуальные вопросы современного садоводства и питомниководства: VI Потаповские чтения» (г. Мичуринск, 14 ноября 2024 г.); Международная научно-практическая конференция «Современные способы технологии выращивания плодовоошных культур в Узбекистане, вопросы повышения качества продукции и урожайности, проблемы и решения» (г. Ташкент, 3 июня 2025 г.).

Публикации результатов исследования. Основные результаты, выводы и рекомендации диссертационного исследования отражены в 24 работах, общим объемом 17,1 п.л. (автору принадлежит 9,9 п.л.), в том числе в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК России, опубликовано 7 работ.

Личный вклад автора. Диссертация содержит фактический и аналитический материал, полученный автором в течение 2020-2024 гг. Автор принимал непосредственное участие в разработке программы исследований, планировании и проведении экспериментов по изучению продуктивности, биологических параметров и выноса азота и калия деревьями яблони в интенсивных садах в условиях ЦЧР, а также разработке биологических моделей продукционного процесса яблони в процессе онтогенеза и при внесении в почву азотных удобрений. Анализ полученных результатов, сделанные на его основе выводы и рекомендации выполнены лично автором.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 202 страницах текста, содержит 39 таблиц, 50 рисунков, состоит из введения, 3 глав, заключения, рекомендаций по использованию результатов в производстве, списка использованной литературы, включающего 299 источников (в том числе 49 – на иностранных языках) и 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Во введении сформулированы актуальность работы, цель и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, апробация результатов исследования. Выделены основные положения, выносимые на защиту, указано количество публикаций и личный вклад соискателя в диссертационную работу.

1. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ ЯБЛОНИ В СРЕДНЕЙ ПОЛОСЕ РОССИИ (ЛИТОБЗОР)

В разделе рассматривается роль азота и калия в минеральном питании и формировании биологического потенциала яблони. Показано влияние азота и

калия на формирование почвенного плодородия яблоневого сада. Рассмотрено движение азота и калия в биологической системе «растение – почва – атмосфера». Сделан анализ методов моделирования биологических процессов в садоводстве. Дано обоснование необходимости проведения исследований по теме диссертации.

2. УСЛОВИЯ, ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проведены в 2020-2024 гг. в интенсивных садах закрытого акционерного общества «Агрофирма им. 15 лет Октября» Лебедянского района Липецкой области.

Климат Липецкой области умеренно-континентальный, с выраженными сезонами, зима умеренная, с развитым снежным покровом. Средняя температура воздуха составляет $+6,5^{\circ}\text{C}$ и колеблется от $+4,6$ до $+8,1^{\circ}\text{C}$. Наиболее холодный месяц январь, средняя температура: -8°C , минимум: $-33,8^{\circ}\text{C}$. На территории области могут возникать поздние весенние заморозки, представляющие опасность для цветков и завязей яблони. Лето тёплое, продолжительное. Период активной вегетации плодовых культур (больше $+10^{\circ}\text{C}$) длится 155-170 дней, с суммой положительных температур $2600-2800^{\circ}\text{C}$. Средняя температура июля – $+20-21^{\circ}\text{C}$, абсолютный максимум $+39,2^{\circ}\text{C}$. Среднегодовое количество осадков Липецкой области варьирует в пределах 400-500 мм, но бывают и более резкие колебания по годам от 300 до 700, что приводит к засухе и суховеям.

Почвы – среднесплошные, среднесуглинистые лугово-чернозёмные, слабокислые, среднеобеспеченные элементами минерального питания. Анализ почв позволяет отнести их к глееватому подтипу глинисто-иллювиальных почв или к оподзоленному роду лугово-чернозёмных почв. Схема посадки деревьев в интенсивном саду – 4×1 м (2500 шт./га); система формирования кроны – веретеновидная; залужение междурядий многолетними злаковыми травами; бетонно-проволочная опора (5 проволок); система капельного орошения и фертигации.

Первый этап эмпирического исследования – измерительно-описательный – был нацелен на изучение и моделирование взаимосвязей между биологическими параметрами яблони в интенсивном саду. Объекты – сорта яблони: Лобо, Альва, Беркутовское, Лигол, Спартан, Хоней крисп, на карликовом подвое Парадизка Будаговского, который отличается высокой морозостойкостью корневой системы. Второй этап – экспериментальный – был нацелен на изучение и моделирование влияния азотных удобрений на биологические параметры системы «растение – почва – атмосфера» в плодоносящем интенсивном яблоневом саду и поиск оптимального способа расчета доз минеральных удобрений с учетом этого влияния. Объектами экспериментального исследования были сорта яблони Лобо и Хоней крисп на карликовом подвое Парадизка Будаговского.

Количество учётных деревьев каждого сорта составляло 10 (по принципу: «дерево = деланка») для каждого уровня независимой переменной в течение 5 лет. Независимая переменная – азотные удобрения (аммиачная селитра) в дозах:

0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 кг/га д.в. Модельные деревья рандомизированно располагались на протяжении участка. Изучались морфобиологические параметры, показатели продуктивности и содержание азота и калия в растениях (зависимые переменные). Исследования проводили в соответствии с «Методическими указаниями по агротехническим опытам с плодовыми и ягодными культурами» (ВНИИС им. И.В. Мичурина, 1956, 1973) и «Программой и методикой

сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур» (ВНИИСПК, 1999).

Определение минерального состава листьев, стеблей, корней и плодов проводили по методикам: общего азота в тканях растений – колориметрическим методом по П.Т. Усович и А.Т. Лебедеву (1976); калия – методом пламенной фотометрии по В.А. Розумову (Плешков, 1985; Минеев, 2001).

Вынос минеральных элементов из почвы отдельными органами яблони (листьями, плодами, стволами и ветвями, корнями) определяли как валовое содержание элемента в ежегодном приросте биомассы этих органов.

При математическом моделировании взаимосвязей в системе «растение – почва – атмосфера» применялись уравнения регрессии с учетом биологического смысла их параметров и теоретически возможной динамики описываемых процессов. Построение формулы расчета доз минеральных удобрений основывалось на формуле базовой дозы удобрений на основе элементного баланса, предложенной Ю.В. Труновым (2003, 2016). Математическую обработку полученных результатов проводили методами дисперсионного, корреляционного, регрессионного анализа (Гмурман, 1977; Доспехов, 1985; Щеглов, 2004). Для расчетов и построения графиков использовали программу Microsoft Excel 2007, регрессионный анализ – с помощью программы SPSS 15.0.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Моделирование основных биологических параметров яблони в интенсивном саду

3.1.1. Ключевые морфобиологические показатели яблони и их взаимосвязь

Площадь листьев яблони (S_l) изучаемых сортов в динамике описывается логистической кривой:

$$S_l = \frac{K}{K \times 3,073e^{-0.734t} + 1}$$

где: K – биологический предел площади листьев, принятый за 5,2 м²/дер. на основании анализа опытных данных; t – время с момента посадки (гг.).

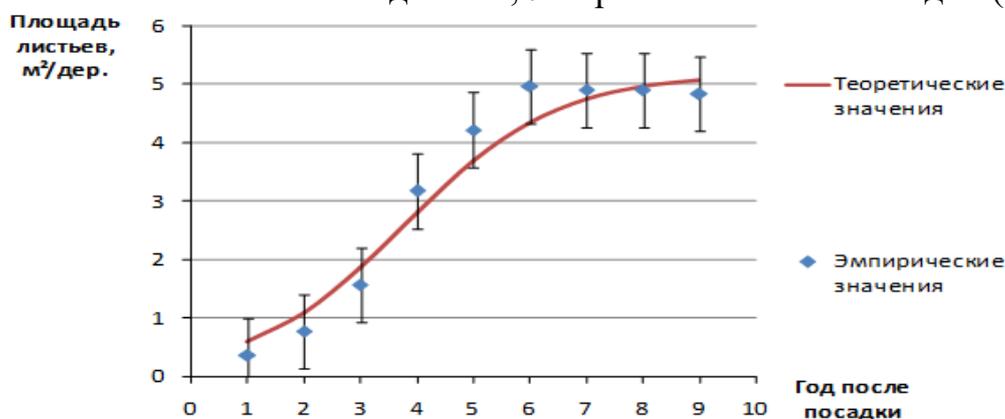


Рисунок 1. Динамика средней площади листьев на деревьях яблони за 9 лет наблюдений, м²/дер.

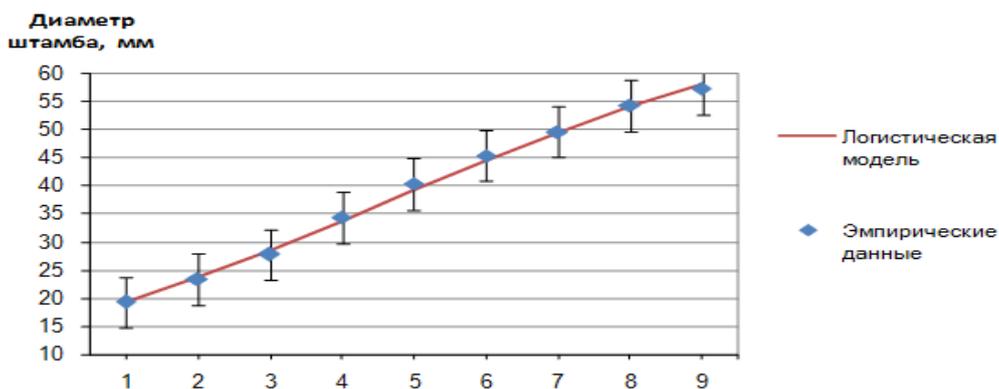


Рисунок 2. Модель прироста штамба яблони за 9 лет наблюдений, мм (Трунов и др., 2024).

Диаметр штамба яблони изучаемых сортов в динамике может быть удовлетворительно описан логистической моделью вида:

$$Ш_{\phi} = 75,2 / (75,2 \times 0,51 e^{-0,286 t} + 1).$$

Изменение в скорости ежегодного нарастания диаметра штамба в интенсивном саду ниже, чем в скорости нарастания площади листьев. Морфобиологические показатели деревьев связаны друг с другом нелинейными соотношениями.

В течение 9 лет исследований от года посадки вегетативная биомасса деревьев яблони постепенно увеличивалась, в среднем по 6 сортам с 0,68 кг/дер. до 4,16 кг/дер.

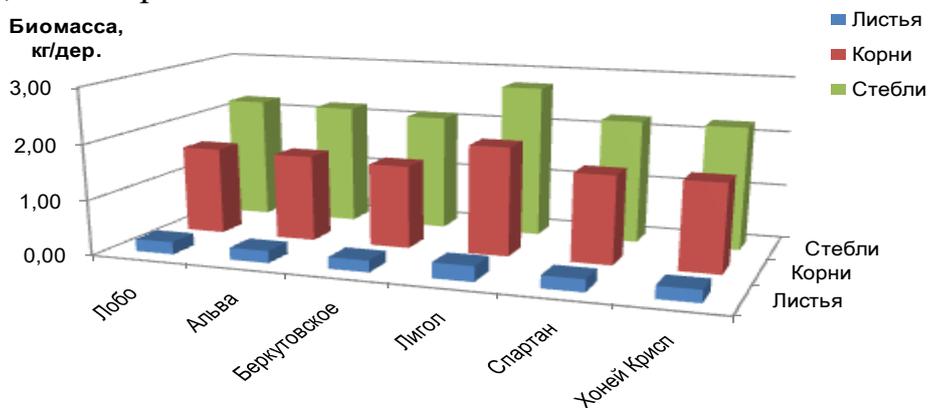


Рисунок 3. Средняя биомасса деревьев яблони за 9 лет после посадки, кг/дер.

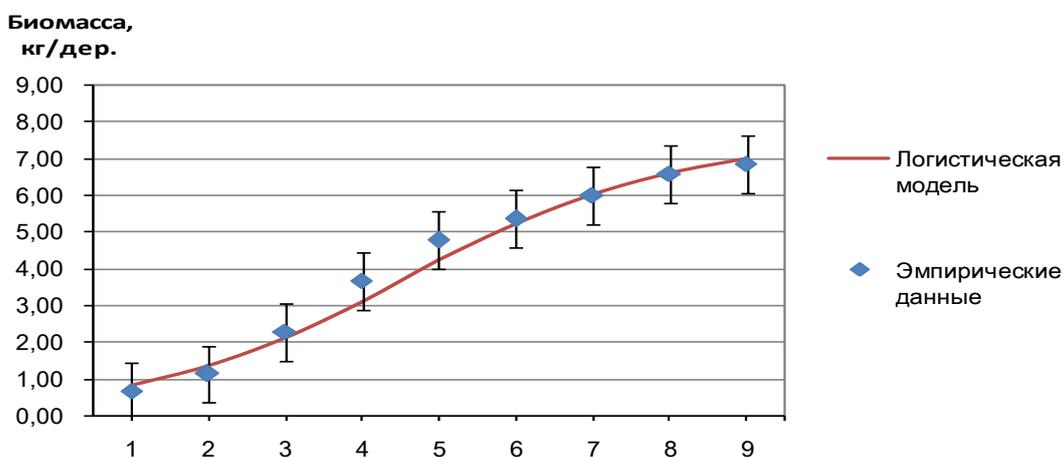


Рисунок 4. Динамика суммарной вегетативной биомассы деревьев яблони за 9 лет после посадки в среднем по 6 сортам, кг/дер (Трунов и др., 2025).

Логистическая модель нарастания вегетативной биомассы описывается уравнением регрессии:

$$M_{\text{вег.}} = 7,55 / (14,383 e^{-0,58 t} + 1),$$

где: $M_{\text{вег.}}$ – вегетативная биомасса яблони, t – время (гг.).

Активное усиление роста деревьев яблони в интенсивном саду на карликовых подвоях идет до 4 летнего возраста, а затем начинает снижаться.

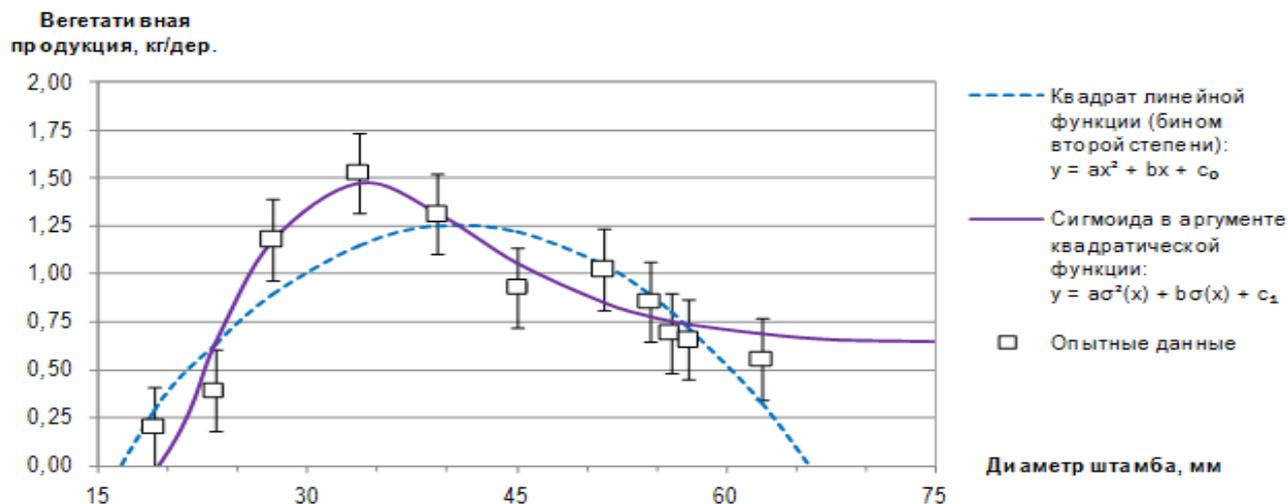


Рисунок 5. Связь вегетативной продукции (прироста) деревьев яблони в интенсивном саду с диаметром штамба (Трунов, Кузин, Трунов, 2025).

Морфобиологические характеристики яблони могут быть использованы для прогноза ее биологической продукции. Связь прироста вегетативной биомассы ($\Delta M_{\text{вег.}}$) осевых органов у деревьев яблони с диаметром штамба описывается биномом второй степени с вложенной логистической функцией (Рис. 5):

$$\Delta M_{\text{вег.}} = \frac{0,164 \times 61,5}{44,7 e^{-(\text{Ш\phi} / 7,5)} + 1} - \frac{0,002 \times 61,5^2}{(44,7 e^{-(\text{Ш\phi} / 7,5)} + 1)^2} - 1,888$$

Измерение диаметра штамба яблони позволяет прогнозировать до ~88% динамики будущего прироста её вегетативной биомассы.

3.1.2. Моделирование динамики урожайности различных сортов яблони в интенсивном саду

Наиболее высокая средняя урожайность была у сорта Лигол (27,8 т/га), существенно выше средней (на 44,0%). Наиболее низкая урожайность была у сортов Спартан и Беркутовское (15,4 т/га и 15,8 т/га, соответственно), что существенно ниже средней (на 25,3% и 22,2%). Сорта Хоней крисп, Лобо и Альва формировали среднюю урожайность: на уровне 17,6 т/га, 19,1 т/га и 20,1 т/га, соответственно. С увеличением возраста деревьев наблюдается последовательное увеличение средней урожайности до 46,2 т/га с «провалами» в 2021-2022 гг.

Урожайность деревьев в зависимости от их возраста описывается логистической кривой с прогнозируемым плато на уровне $\sim 56 \pm 14$ т/га и при этом зависит от сортовых особенностей:

$$Ур. = 55,88 / (55,88 \times 0,872 e^{-0,536 t} + 1)$$

Коэффициент ковариации (R^2) с эмпирическими данными составляет 0,741; по отношению к отдельным сортам теоретическая кривая демонстрирует связь (R) на уровне 0,684-0,950 (от умеренной до тесной).

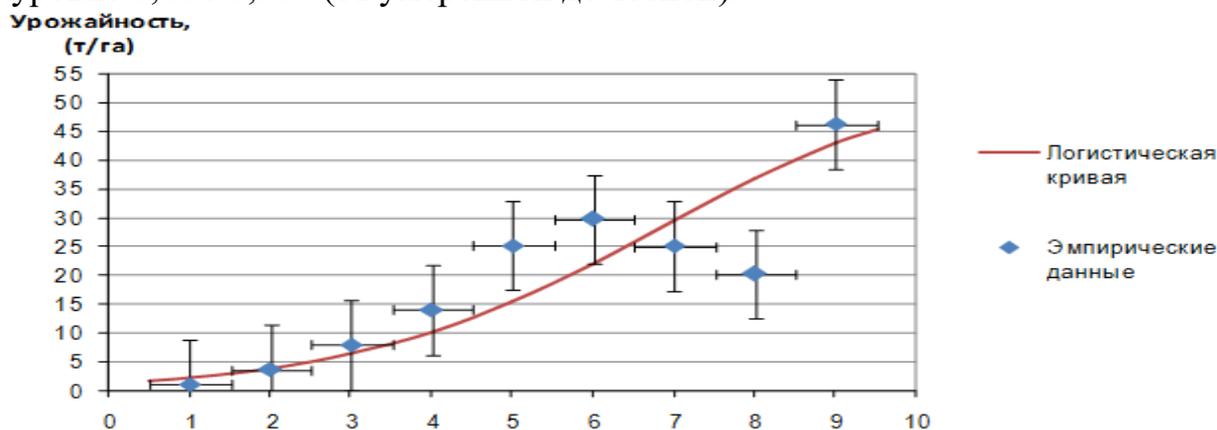


Рисунок 6. Динамика урожайности деревьев яблони за период наблюдений, т/га (Трунов и др., 2024; Трунов, Трунов, Загиров, 2024)

Уравнение регрессии ($R^2 = 0,774$), описывающее теоретическую связь продукции плодов с диаметром штамба ($Ш_{\phi}$), имеет вид:

$$M_{ур.} = \frac{19,55}{95,79 e^{-0,092 \cdot Ш_{\phi}} + 1}$$

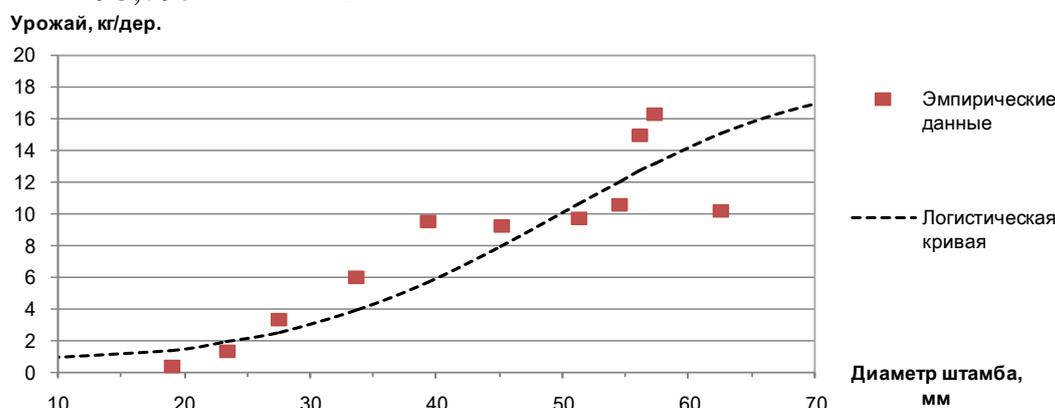


Рисунок 7. Связь урожая с деревьев яблони в интенсивном саду с диаметром штамба.

Измерение диаметра штамба яблони позволяет прогнозировать не менее $\frac{3}{4}$ динамики будущего урожая. Поскольку форма кривой одинакова для всех сортов, продукцию каждого можно рассчитать с помощью линейного уравнения регрессии.

3.2. Экспериментальное исследование влияния азотных удобрений в системе «растение-почва-атмосфера»

3.2.1. Динамика содержания минеральных элементов в почве интенсивного яблоневого сада

В процессе эксплуатации интенсивного яблоневого сада без внесения в почву удобрений за 5 лет отмечено снижение легкогидролизуемого азота в приствольной полосе в корнеобитаемом слое почвы со 124,1 мг/кг до 112,8 мг/кг (на 9,1%), что объясняется интенсивным поглощением азота корнями растений с восполнением за счёт миграции азота из пахотного горизонта. Концентрация легкогидролизуемого азота в более глубоком слое почвы (от 60 до 100 см) снижалась в меньшей степени: со 112,2 мг/кг до 109,4 мг/кг (на 2,5%). При ежегодном внесении удобрений наблюдается накопление элементов. Однако связь фактического накопления и дозы вносимых удобрений описывается кривой дробной степени.

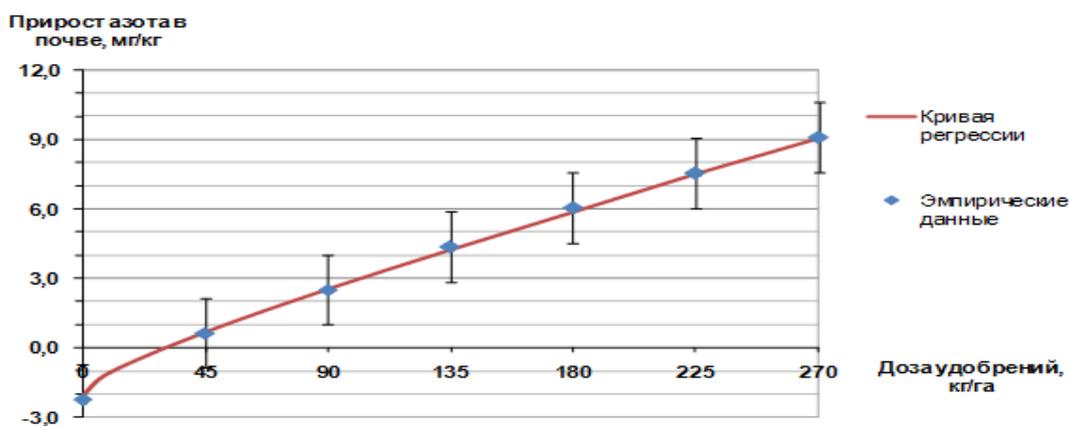


Рисунок 8. Динамика прироста азота в корнеобитаемых слоях почвы приствольной полосы (0-60 см) интенсивного яблоневого сада при различном уровне внесения азотных удобрений (кг/га д.в.).

Динамика прироста азота в корнеобитаемом слое почвы интенсивного яблоневого сада в зависимости от вносимой дозы азотных удобрений описывается уравнением регрессии вида:

$$\Delta\omega_N = 0,028 x_N + 0,215 \sqrt{x_N} - 2,055,$$

где: $\Delta\omega_N$ – среднегодовое изменение доли азота в почве (мг/кг), x_N – доза вносимых удобрений (кг/га).

Индукцированные потери элемента связаны с усилением его поглощения или подвижности при повышении концентрации. Они определяют поправочный коэффициент (q_{II}) при расчете доз удобрений равный отношению ожидаемой доли элемента в корнеобитаемом слое к фактической при внесении удобрений. Итоговый коэффициент поправки на потери азота, $q_{II(N)} = 2,08$; на потери калия, $q_{II(K)} = 1,64$.

Формула элементного баланса приобретает вид:

$$y_1 = d\omega_{(почв.)} \times K_M \times q_{II}.$$

3.2.2. Влияние азотных удобрений на рост и формирование вегетативной биомассы яблони

Существенное увеличение площади и массы листьев на деревьях яблони отмечено при внесении аммиачной селитры в дозах от 180 кг/га д.в. по сорту Лобо и в дозах от 90 кг/га д.в. – по сорту Хоней крисп. При внесении в почву азотных удобрений в дозах 90-270 кг/га д.в. наблюдалось увеличение диаметра штамба деревьев яблони сорта Лобо (на 5,0%-6,2%) и сорта Хоней крисп (на 5,0%-6,7%). Средняя масса надземных и подземных осевых органов у исследуемых сортов яблони значительно увеличивалась при внесении в почву азотных удобрений в дозах от 135 кг/га д.в. У растений яблони сорта Хоней крисп реакция листьев на повышение дозы азота возникала раньше, а реакция осевых органов – позже, чем у сорта Лобо.

Таблица 1. Морфобиологические параметры: площадь листьев (S_L), диаметр штамба ($Ш_0$), масса листьев (M_L), стеблей ($M_{H/O}$) и корней ($M_{П/O}$) яблони при внесении в почву азотных удобрений

Сорта	Лобо					Хоней крисп				
Варианты	S_L (м ²)	$Ш_0$ (см)	M_L (кг)	$M_{H/O}$ (кг)	$M_{П/O}$ (кг)	S_L (м ²)	$Ш_0$ (см)	M_L (кг)	$M_{H/O}$ (кг)	$M_{П/O}$ (кг)
Контроль	4,53	52,0	0,35	3,44	2,49	4,83	52,2	0,36	3,54	2,49
N ₄₅	4,73	53,2	0,37	3,58	2,60	5,15	53,4	0,38	3,67	2,61
N ₉₀	4,95	54,4	0,39	3,75	2,72	5,53	54,6	0,41	3,82	2,72
N ₁₃₅	5,06	54,8	0,40	3,88	2,86	5,67	55,1	0,42	3,96	2,86
N ₁₈₀	5,17	55,1	0,40	3,97	2,94	5,81	55,6	0,43	4,05	2,94
N ₂₂₅	5,25	55,2	0,41	4,02	3,00	5,91	55,7	0,44	4,11	3,01
N ₂₇₀	5,25	55,1	0,41	4,01	3,00	5,90	55,7	0,44	4,12	3,01
НСР ₀₅	0,64	2,5	0,051	0,321	0,299	0,66	2,6	0,047	0,318	0,316

Повышение дозы удобрения выше минимально эффективной по каждому сорту не приводило к существенному пропорциональному увеличению диаметра штамба, что говорит о нелинейной зависимости между дозой вносимых азотных удобрений и диаметром штамба деревьев яблони на карликовых подвоях.

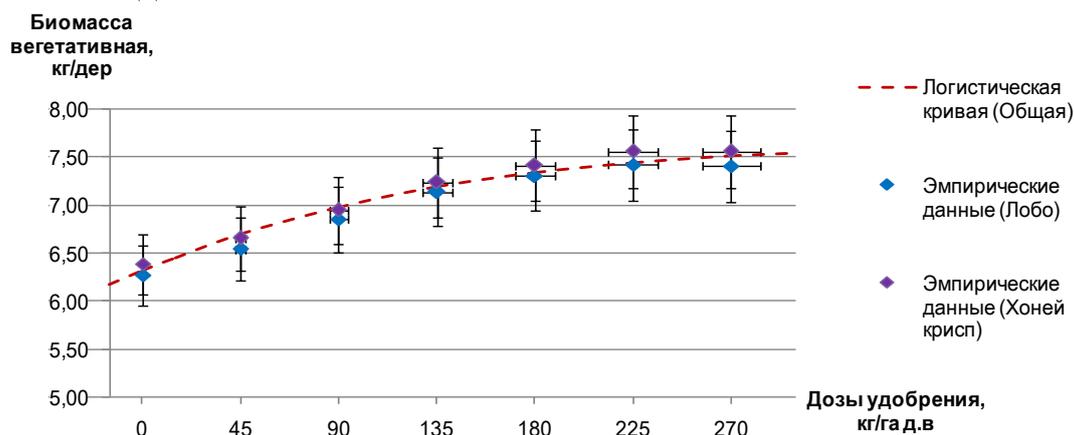


Рисунок 9. Изменение диаметра штамба у деревьев яблони при внесении в почву азотных удобрений.

Общая вегетативная биомасса яблони при внесении в почву возрастающих доз азотных удобрений описывается логистической кривой вида:

$$M_{\text{вез.}} = 7,680 / (0,215 e^{-0,0085 x_N} + 1)$$

Значимое увеличение общей вегетативной биомассы деревьев яблони было отмечено по сорту Лобо – на 5,4%-7,6%, по сорту Хоней Крисп – на 5,2%-7,8% при внесении аммиачной селитры 90-270 кг/га д.в.

Наращение вегетативной биомассы для сорта Лобо составляло в среднем 0,82 кг/дер. в контрольной группе и 1,12-1,25 кг/дер. в группе с удобрениями в дозе от 135 кг/га д.в. (без существенного различия по сортам).

3.2.3. Влияние азотных удобрений на урожайность и компоненты продуктивности яблони

При внесении в почву азотных удобрений наблюдается увеличение продуктивности изучаемых деревьев. Увеличивались: прирост вегетативной биомассы; число плодов на дереве; средняя масса плодов; общая урожайность. Динамика урожайности яблони (т/га) при повышении доз азотных удобрений (кг/га) в интенсивном саду на карликовых подвоях описывается логистическими уравнениями регрессии вида:

$$Ур. (Лобо) = 27,1 / (0,520 \times e^{-0,007 \times x_N} + 1) + 7,6$$

$$Ур. (Хоней крисп) = 26,9 / (0,788 \times e^{-0,009 \times x_N} + 1) + 8,5$$

Коэффициенты детерминации для уравнений составляют не менее 0,975, что указывает на тесную корреляцию теоретической модели и опытных данных.

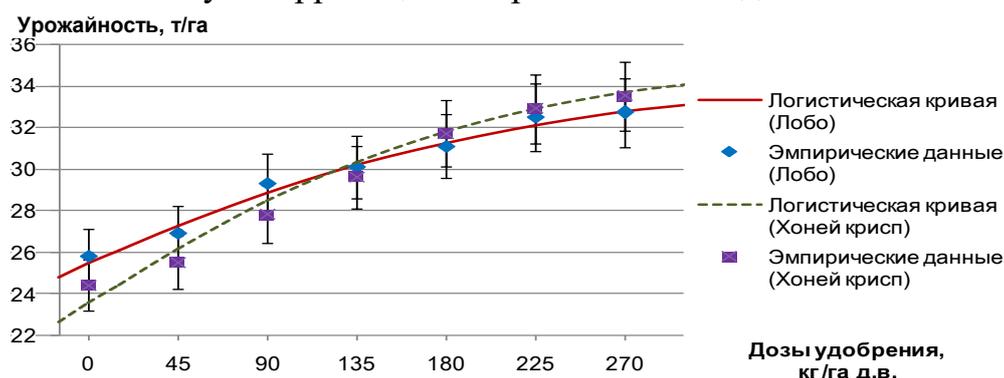


Рисунок 10. Изменение средней урожайности яблони в интенсивном саду при внесении в почву азотных удобрений, т/га (Трунов, Трунов, 2025; Трунов, Трунов, Брюхина, Меделяева, 2025).

Азотные удобрения влияют на рост урожая опосредованно – через накопление азота в почве и усиление развития фотосинтезирующих органов. Зависимость массы вегетативной продукции ($\Delta M_{вег.}$) и плодов яблони ($M_{ур.}$) от доли азота в корнеобитаемом слое почвы описывается логистическими уравнениями регрессии с коэффициентами детерминации не менее 0,98:

$$M_{ур.} = \frac{12,2}{149,755 \cdot e^{-0,044 \cdot \omega_{N(почв.)}} + 1} + 3,08$$

$$\Delta M_{вег.} = \frac{1,1}{2258,443 \cdot e^{-0,064 \cdot \omega_{N(почв.)}} + 1} + 0,305$$

Таким образом, существенное увеличение компонентов продуктивности деревьев яблони на карликовом подвое Парадизка Будаговского в интенсивном саду зависит от поддержания определенного уровня почвенного азота.

3.2.4. Динамика азота и калия в растениях яблони под влиянием азотных удобрений

В среднем за время исследований содержание азота в листьях яблони контрольной группы по обоим сортам составляло около 2,4% сухой массы. Существенное увеличение содержания азота в листьях яблони по сорту Лобо (на 6%-8% по сравнению с контролем) было отмечено при внесении аммиачной селитры в дозах от 225 кг/га д.в.; по сорту Хоней крисп (на 8%-10%) – при внесении аммиачной селитры в дозах 135 кг/га д.в. Содержание азота в корнях яблони обоих сортов повышалось при внесении аммиачной селитры в высоких дозах (от 225 кг/га д.в.). Значимых изменений в содержании стеблевого азота выявлено не было. Также не было выявлено влияния азотных удобрений на содержание калия.

Динамика содержания азота в органах яблони (ω_N , % сухого вещества) хорошо описывается биномами 1 или 2 степени ($R^2 \geq 0,96$). Учитывая теоретическое наличие верхних и нижних границ для этого показателя, можно говорить, что его рост с повышением дозы азотных удобрений в пределах поставленных экспериментальных условий является квазилинейным.

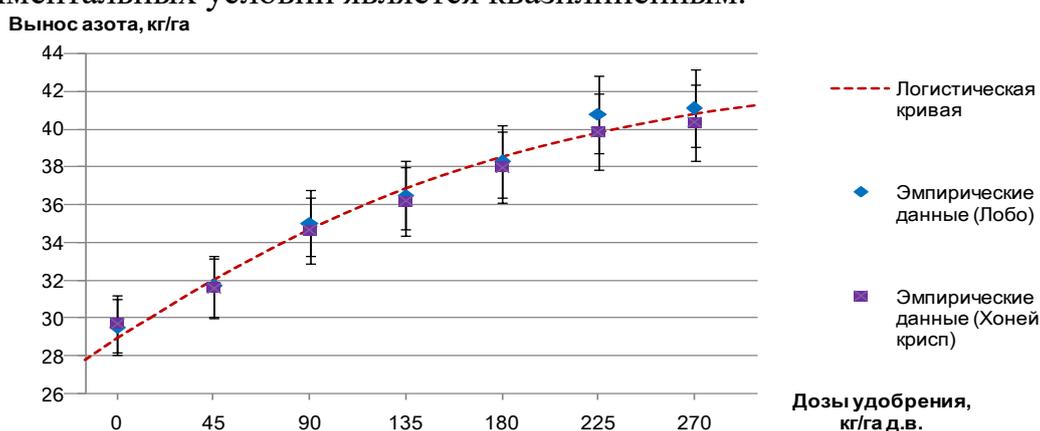


Рисунок 11. Динамика суммарного выноса азота деревьями яблони при внесении в почву азотных удобрений (в среднем за 5 лет, кг/га) (Трунов, Кузин, Трунов, 2025).

В исследовании установлены отрицательные корреляционные связи между урожайностью и содержанием в листьях азота – на умеренном и заметном уровне (от $-0,475$ до $-0,779$); калия – на заметном уровне ($-0,704$), что свидетельствует о реутилизации азота и, особенно, калия из листьев в пользу урожая плодов.

Вынос азота и калия деревьями яблони в интенсивном саду на карликовом подвое Парадизка Будаговского тесно связан с величиной урожая плодов. Зависимость выноса азота и калия деревьями яблони от дозы вносимых удобрений описывается логистическими уравнениями регрессии с высокими коэффициентами детерминации.

3.3. Расчет биологически обоснованных доз удобрений и оценка эффективности их применения в интенсивном саду

3.3.1. Сравнительная оценка методов расчета доз удобрений

Расчетная доза удобрений, по усовершенствованному методу элементного баланса, складывается из базовой дозы и компенсирующей дозы, равной прогнозируемому выносу элемента в предстоящем году. Последняя зависит от прогноза биологической продукции, на которую, в свою очередь, оказывает влияние уровень имеющегося азота в почве и степень физического развития растения. Учитывается также коэффициент компенсации индуцированных потерь элемента (q_{II}). На рисунке 12. отражена совокупность основных показателей, определяющих расчетную дозу минеральных удобрений для интенсивного сада.

По *методу почвенно-лиственной диагностики* в почву вносили расчётную дозу $N_{135} K_{240}$. По *методу элементного баланса* в почву вносили расчётную дозу $N_{54} K_{137}$ (кг/га д.в.).

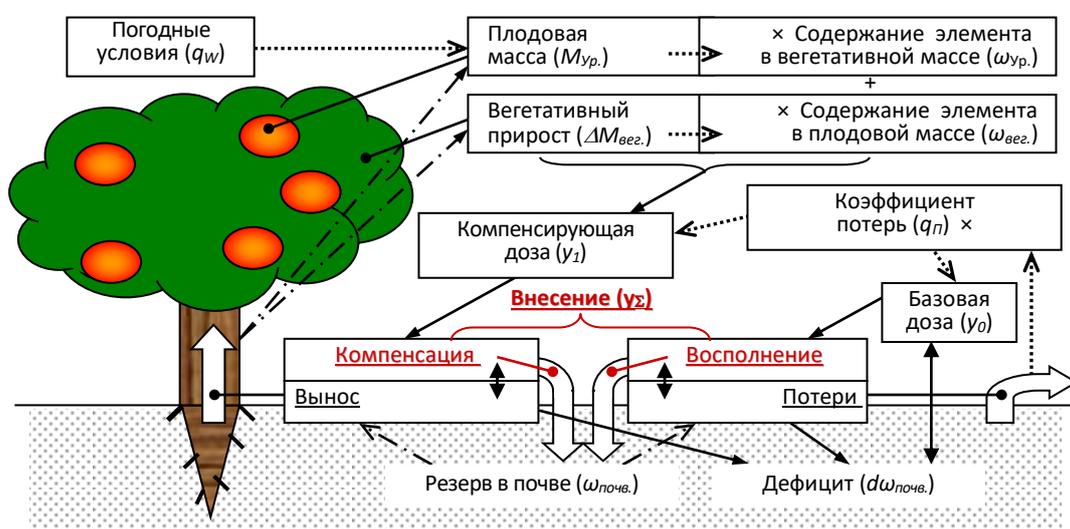


Рисунок 12. Обобщенная модель расчетов дозировки минеральных удобрений в интенсивном саду.

Условные обозначения:

- « \leftarrow » – непосредственный вклад (суммация);
- « $\leftarrow \dots$ » – опосредованный вклад (пропорционирование);
- « $\leftarrow \cdot \rightarrow$ » – нелинейное влияние (логистические и т.п. связи);
- « $\leftarrow \rightleftarrows$ » – комплементарное (зеркальное) соотношение;
- « \rightleftarrows » – движение в системе; « $\bullet \rightarrow$ » – название компонента.

Таблица 2. Урожайность яблони в 2024 г. при внесении минеральных удобрений с использованием различных методов расчёта доз

Сорта	Варианты опыта	Урожайность яблони	
		т/га	% к контролю
Лобо	По методу почвенно-лиственной диагностики $N_{135}K_{240}$ (к)	25,48	-
	По методу элементного баланса $N_{54}K_{137}$	24,79	-2,7%
	HCP_{05}	5,52	-
Хоней	По методу почвенно-лиственной диагностики $N_{135}K_{240}$	26,38	-

крисп	(к)		
	По методу элементного баланса N ₅₄ K ₁₃₇	25,79	-2,2%
	HCP ₀₅	5,74	-

В результате проведённого эксперимента установлено, что между вариантами опыта отсутствует существенная разница по показателю урожайности яблоны. Однако между вариантами сравниваемых методов имеется заметная разница в дозе удобрений в сторону её снижения (азотных – в 2,5 раза, калийных – в 1,75 раза) при расчёте по методу элементного баланса.

3.3.2. Экономическая эффективность внесения азотных удобрений в интенсивном саду

При внесении азотных удобрений наблюдается тенденция к снижению себестоимости производства плодов сорта Лобо с 29,6 руб./кг в контроле до 25,5-28,9 руб./кг в вариантах с удобрениями. Себестоимость яблок сорта Хоней крисп снижалась с 31,7 руб./кг в контроле до 25,8-29,9 руб./кг в вариантах с удобрениями. При этом выигрыш в себестоимости яблок перестает быть существенным при использовании удобрений в дозах свыше 135 кг/га д.в. Уровень рентабельности производства яблок сорта Лобо при внесении азотных удобрений составил 103,0-132,3% (на 4,6-33,9 процентных пункта выше, чем в контроле); Хоней крисп – 98,5%-130,7% (на 11,5-43,7 процентных пункта выше по сравнению с контролем).

Таблица 3. Экономическая эффективность производства яблок при внесении в почву азотных удобрений (по данным 2024 г.)

Варианты		Стоимость продукции, тыс. руб./га	Расходы, тыс. руб./га	Прибыль, тыс. руб./га	Уровень рисков, %	Рентабельность, %
Лобо	Контроль	1560,0	770,0	790,0	4,1%	98,4%
	N ₄₅	1620,0	781,1	838,9	4,1%	103,0%
	N ₉₀	1740,0	797,2	942,9	4,0%	113,6%
	N ₁₃₅	1800,0	808,2	991,8	3,8%	118,0%
	N ₁₈₀	1860,0	819,3	1040,7	3,7%	122,4%
	N ₂₂₅	1980,0	835,4	1144,6	3,5%	132,3%
	N ₂₇₀	1980,0	841,5	1138,6	3,5%	130,6%
Хоней крисп	Контроль	1440,0	760,0	680,0	2,8%	87,0%
	N ₄₅	1560,0	776,1	783,9	2,5%	98,5%
	N ₉₀	1680,0	792,2	887,9	2,5%	109,2%
	N ₁₃₅	1800,0	808,2	991,8	3,1%	118,9%
	N ₁₈₀	1920,0	824,3	1088,5	3,1%	126,9%
	N ₂₂₅	1980,0	835,4	1137,1	3,1%	130,7%
	N ₂₇₀	1980,0	841,5	1130,0	3,3%	128,5%

Преимуществами метода элементного баланса является его бóльшая гибкость, возможность варьировать условия расчетов, с одной стороны, и ориентированность на конкретные почвенные условия и жизнедеятельность растений, с другой, как фактор снижения химической нагрузки на почву (Трунов, Соловьев, Трунов, 2024).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования сделаны следующие выводы:

1. В изучаемом интенсивном яблоневом саду наблюдалось существенное увеличение морфобиологических параметров деревьев яблони в среднем по 6 сортам: площади листьев – с 0,38 до 4,98 м²/дер.; диаметра штамба – с 19,3 до 59,9 мм; вегетативной биомассы деревьев – с 0,68 до 6,87 кг/дер. Морфобиологические показатели деревьев связаны друг с другом прямыми и нелинейными соотношениями и в динамике эффективно описываются логистической функцией ($R^2 \geq 0,85$). При этом измерение диаметра штамба яблони позволяет прогнозировать до 88% динамики прироста её вегетативной биомассы и до 77% динамики урожая.

2. Урожайность яблони возрастала в среднем с 1,2 т/га до 46,2 т/га. Сорт Хоней Крисп проявил себя как наиболее стабильно плодоносящий (ковариация с прогнозируемым урожаем 0,903), сорт Лигол – как нестабильно плодоносящий (ковариация с прогнозируемым урожаем 0,557), в отдельные благоприятные годы дающий очень высокую урожайность (более 75 т/га). Средняя урожайность деревьев в зависимости от их возраста описывается логистическим уравнением с коэффициентом детерминации $R^2 \geq 0,74$ и прогнозируемым плато на уровне около 56 ± 14 т/га, но чувствительна к погодным условиям. Сортвые особенности могут быть учтены с помощью введения линейных коэффициентов ($R^2 \geq 0,89$).

3. В процессе эксплуатации интенсивного яблоневого сада без внесения в почву соответствующих удобрений наблюдается снижение содержания легкогидролизуемого азота и обменного калия в корнеобитаемом слое почвы за 5 лет на 6,7% и 10,1%, соответственно. При ежегодном внесении в почву приствольной полосы интенсивного яблоневого сада азотных удобрений в дозах от 45 до 270 кг/га д.в. наблюдается накопление от 2,9% до 34,1% легкогидролизуемого азота. При ежегодном внесении калия в дозе 120 кг/га д.в. наблюдается накопление 23,2% обменного калия в метровом слое почвы.

4. При внесении в почву азотных удобрений наблюдается существенное увеличение морфобиологических параметров деревьев яблони сортов Лобо и Хоней Крисп в интенсивном саду на карликовом подвое Парадизка Будаговского: площади листьев на дереве – на 14,1%-22,4%; диаметра штамба деревьев – на 5,0%-6,7%; вегетативной биомассы – на 5,2%-7,8%. Прирост вегетативной биомассы у деревьев яблони сортов Лобо и Хоней Крисп увеличивался на 12,6%-53,1%, причем его чувствительность к внесению азотных удобрений была выше в неурожайные годы. Увеличение дозы удобрения выше минимально эффективной не приводило к дальнейшему пропорциональному увеличению значений морфобиологических параметров деревьев. Динамика морфобиологических показателей яблони сортов Лобо и Хоней крисп в зависимости от дозы азотных удобрений описывается логистическими уравнениями регрессии с коэффициентами детерминации не менее 0,92.

5. При внесении в почву азотных удобрений наблюдается существенное увеличение компонентов продуктивности сортов яблони Лобо и Хоней Крисп в интенсивном саду на карликовом подвое Парадизка Будаговского. У деревьев сорта Лобо увеличивались: прирост вегетативной массы – на 12,0%-17,8%; число плодов на дереве – на 13,3%-16,0%; средняя масса плодов – на 6,7%-9,6%; общая урожайность – на 28%-49%. У деревьев сорта Хоней крисп увеличивались: прирост вегетативной массы – на 10,0%-15,4%; число плодов на дереве –

на 14,3%-19,0%; средняя масса плодов – на 11,1%-13,7%; общая урожайность – на 29,9%-37,3%. Зависимость массы прироста и урожая яблони от доли азота в корнеобитаемом слое почвы описывается логистическими уравнениями регрессии с коэффициентами детерминации не менее 0,98.

6. При внесении в почву азотных удобрений нет устойчивых достоверных изменений удельной продуктивности деревьев яблони на единицу площади листьев. Удельная продуктивность на единицу сечения штамба увеличивалась под действием азотных удобрений в дозах от 225 кг/га д.в.: у сорта Лобо на 12%-13%; у сорта Хоней крисп – на 16%-18%. Влияние азотных удобрений на продуктивность зависит от сорта и опосредовано усилением развития фотосинтезирующих органов.

7. Содержание азота в листьях яблони сорта Лобо повышалось на 6%-8% при внесении аммиачной селитры в дозах от 225 кг/га д.в., в листьях яблони сорта Хоней крисп повышение содержания азота на 8%-10% было отмечено при внесении аммиачной селитры в дозах от 135 кг/га д.в. по сравнению с контролем. Содержание азота в корнях яблони сорта Лобо возрастало на 8,8%-10,6%, в корнях яблони сорта Хоней крисп – на 9,4%-10,4% при внесении высоких доз аммиачной селитры (225-270 кг/га д.в.). Значимых изменений в содержании стеблевого азота выявлено не было. Также не было выявлено влияния азотных удобрений на содержание калия. Средняя доля азота от сырого вещества (ω_N) в плодах яблони составляет $0,83 \pm 0,07\%$; в вегетативной массе яблони – $4,30 \pm 0,91\%$; средняя доля калия (ω_K) в плодах составляет $1,40 \pm 0,19\%$; в вегетативной массе яблони – $2,31 \pm 0,54\%$.

8. У деревьев яблони на карликовых подвоях установлены отрицательные корреляционные связи между урожайностью и содержанием в листьях азота – на умеренном и заметном уровне (коэффициент корреляции: $-0,48$ – $-0,78$); калия – на заметном уровне (коэффициент корреляции: $-0,70$), что объясняется использованием азота и калия из листьев для роста плодов. Вынос азота и калия деревьями яблони в интенсивном саду на карликовом подвое Парадизка Будаговского тесно связан с величиной урожая (коэффициенты корреляции выше 0,9). Прирост вегетативной биомассы также связан с выносом элементов, но связь слабее (коэффициенты корреляции составляют 0,67-0,73), что объясняется её ролью как резерва элементов питания для плодов. Зависимость выноса азота и калия деревьями яблони от дозы вносимых удобрений описывается логистическими уравнениями регрессии с коэффициентами детерминации не менее 0,82, что говорит о достаточной сильной связи с эмпирическими данными.

9. В ходе исследования доработана и усовершенствована комплексная модель элементного баланса в системе «растение-почва-атмосфера» для сортов яблони на карликовом подвое Парадизка Будаговского на основании содержания элементов в корнеобитаемом слое почвы и прогнозируемого биологического выноса элементов с урожаем и вегетативной биомассой. В модели учитываются: развитость деревьев (как функция от возраста и размеров штамба), их биологическая продуктивность (как функция от уровня развития и азотного питания), соотношение урожая и вегетативного прироста, а также сортовая специфика. Применение модели элементного баланса позволяет проводить более тонкие расчеты доз удобрений по сравнению с моделью почвенно-листовой диагностики, расходовать их более экономно и целенаправленно. В практике садоводческих хозяйств предусматривается использование автоматизированного (программного) или табличного способа расчета доз азотных и калийных удобрений на основе модели.

10. При внесении азотных удобрений наблюдается тенденция к снижению себестоимости производства плодов по сравнению с контролем. При этом выигрыш в себестоимости яблок перестает быть существенным по сравнению с ее прогнозируемым разбросом при использовании удобрений в дозах свыше 135 кг/га д.в. Уровень рентабельности производства яблок при внесении азотных удобрений составил 98,5%-132,3%, что на 4,6-43,7 процентных пунктов выше, чем в контроле. Однако различия в рентабельности производства яблок между вариантами внесения удобрений свыше 180 кг/га д.в. невелики, а увеличение дозы азотных удобрений от 225 кг/га д.в. вообще не приводило к адекватному повышению экономической эффективности производства.

11. Для оценки целесообразности при использовании методов расчёта доз удобрений основное значение имеет экологический фактор снижения химической нагрузки на почву, так как у сравниваемых методов не выявляется значимых преимуществ в плане экономической эффективности. Наиболее экологически целесообразным и эффективным для поддержания минерального питания деревьев яблони сортов Лобо и Хоней крисп на карликовом подвое в условиях интенсивного сада является диапазон вносимых доз азотных удобрений от 90 до 180 кг/га д.в. (оптимум – 140 кг/га д.в.). Рекомендуемая доза вносимого калия – от 135 до 240 кг/га д.в. (оптимум – 165 кг/га д.в.).

Дальнейшая разработка темы может быть основана на расширении диапазона сортов яблони на карликовых подвоях для разработки сортовой специфики минерального питания и удобрения яблони; на учете комплексного взаимного влияния совокупности основных элементов минерального питания; на изучении динамики минеральных элементов в системе «растение – почва – атмосфера» в интенсивном яблонево-саду на других типах почв; на продолжении исследований, направленных на оптимизацию доз азотных удобрений по фенологическим фазам развития растений и в течение онтогенеза с целью увеличения урожайности, стабилизации плодоношения и повышение товарно-потребительских качеств плодов в течение всего периода эксплуатации насаждений на фоне поддержания и увеличения почвенного плодородия в условиях средней полосы России.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты доз азотных удобрений для интенсивного яблоневого сада ЦЧР рекомендуется проводить по следующим формулам.

Общий уровень азотных удобрений ($U_{\text{сумм.}}$): $U_{\text{сумм.}} = U_{\text{баз.}} + U_{\text{доб.}}$, где:

$U_{\text{баз.}}$ – базовый уровень удобрений (восполнение дефицита элемента);

$U_{\text{доб.}}$ – добавочный уровень удобрений (компенсация выноса элемента).

Базовый уровень азотных удобрений ($U_{N_{\text{баз.}}}$) на неистощенных черноземных почвах равен 0, для бедных почв – находится по разности между фактическим и необходимым содержанием азота: $U_{N_{\text{баз.}}} \text{ (т/га)} = 15,6 \cdot (100 - N_{\text{факт.}})$.

Базовый уровень калийных удобрений ($U_{K_{\text{баз.}}}$) на почвах Липецкой области находится по разности между фактическим и минимально необходимым содержанием калия: $U_{K_{\text{баз.}}} \text{ (т/га)} = 12,3 \cdot (80 - K_{\text{факт.}})$.

Добавочный уровень удобрений ($U_{\text{доб.}}$) определяется по выносу элемента, который зависит от массы урожая и вегетативного прироста. Прогноз выноса можно производить с помощью специального «калькулятора выноса».

По диаметру штамба (мм) и целевому уровню почвенного азота (мг/кг) с использованием полученных в исследовании формул автоматически вычисляется дополнительная доза азотных и калийных удобрений (кг/га д.в.). Расчеты базируются на следующих формулах:

$$\begin{aligned}
 y_{N\text{доб.}} &= (0,834 \cdot M_{yp.} + 4,304 \cdot \Delta M_{\text{вез.}}) \cdot 2,08; \\
 y_{K\text{доб.}} &= (1,402 \cdot M_{yp.} + 2,305 \cdot \Delta M_{\text{вез.}}) \cdot 1,64; \\
 M_{yp.} &= (0,651 f_{y1} (Ш\phi) + 0,453 f_{y2} (N_{\text{почв.}}) - 3,67) \times ПП \times Q; \\
 f_{y1} (Ш\phi) &= 19,2 / (95,789 e^{-0,092 Ш\phi} + 1) + 0,35; \\
 f_{y2} (N_{\text{почв.}}) &= 12,2 / (149,755 e^{-0,044 N_{\text{почв.}}} + 1) + 3,08; \\
 \Delta M_{\text{вез.}} &= (0,341 f_{п1} (Ш\phi) + 0,742 f_{п2} (N_{\text{почв.}}) - 0,009) \times ПП; \\
 f_{п1} (Ш\phi) &= \frac{10,086}{44,7e^{-(Ш\phi / 7,5)} + 1} - \frac{7,565}{(44,7e^{-(Ш\phi / 7,5)} + 1)^2} - 1,888; \\
 f_{п2} (N_{\text{почв.}}) &= 1,1 / (2258,443 e^{-0,064 N_{\text{почв.}}} + 1) + 0,305;
 \end{aligned}$$

где: $M_{yp.}$ – прогнозируемая или планируемая урожайность (т/га); $\Delta M_{\text{вез.}}$ – прогнозируемый прирост вегетативной массы (т/га); $Ш\phi$ – диаметр штамба деревьев (мм); $N_{\text{почв.}}$ – плановый показатель почвенного азота (мг/кг); $ПП$ – плотность посадки (тыс.шт./га); Q – поправочный коэффициент (% от среднего ожидаемого урожая); $f...$ – промежуточные значения нелинейных функций.

Упрощенный способ расчета удобрений (без электронных средств) можно произвести по таблице 4, зная средний диаметр штамба яблони и уровень азота в почве, а также погодные условия в период, предшествующий завязыванию плодов.

Таблица 4. Рекомендуемые дозы азотных и калийных удобрений в интенсивных яблоневых садах на подвое Парадизка Будаговского в условиях Центрально-Черноземного региона (при плотности посадки 2500 шт./га).

Диаметр штамба, мм	Прогноз урожайности (по погодным условиям)									Удобрения
	Неблагоприятный			Нормальный (средний)			Высокий			
	Уровень почвенного азота, мг/кг			Уровень почвенного азота, мг/кг			Уровень почвенного азота, мг/кг			
	Низкий (< 100)	Средний (100-150)	Высокий (> 150)	Низкий (< 100)	Средний (100-150)	Высокий (> 150)	Низкий (< 100)	Средний (100-150)	Высокий (> 150)	
40 (± 2)	190 ± 26	136 ± 19	48 ± 7	206 ± 29	161 ± 22	81 ± 11	221 ± 31	187 ± 26	113 ± 16	N
	104 ± 14	112 ± 15	118 ± 16	125 ± 17	145 ± 20	161 ± 22	145 ± 20	179 ± 25	203 ± 28	K
44 (± 2)	188 ± 26	134 ± 19	46 ± 6	206 ± 29	162 ± 22	81 ± 11	224 ± 31	189 ± 26	115 ± 16	N
	104 ± 14	112 ± 15	118 ± 16	127 ± 18	148 ± 21	164 ± 23	151 ± 21	184 ± 26	209 ± 29	K
48 (± 2)	187 ± 26	133 ± 18	45 ± 6	207 ± 29	163 ± 23	82 ± 11	227 ± 31	192 ± 27	118 ± 16	N
	104 ± 14	112 ± 16	118 ± 16	131 ± 18	152 ± 21	167 ± 23	157 ± 22	191 ± 26	215 ± 30	K
52 (± 2)	186 ± 26	132 ± 18	44 ± 6	209 ± 29	164 ± 23	83 ± 12	231 ± 32	196 ± 27	122 ± 17	N
	105 ± 15	113 ± 16	119 ± 16	135 ± 19	156 ± 22	171 ± 24	164 ± 23	198 ± 27	222 ± 31	K
56 (± 2)	186 ± 26	132 ± 18	44 ± 6	211 ± 29	166 ± 23	86 ± 12	235 ± 33	200 ± 28	126 ± 18	N
	106 ± 15	114 ± 16	120 ± 17	139 ± 19	160 ± 22	175 ± 24	171 ± 24	204 ± 28	229 ± 32	K
60 (± 2)	186 ± 26	132 ± 18	44 ± 6	213 ± 30	169 ± 23	88 ± 12	239 ± 33	205 ± 28	131 ± 18	N
	107 ± 15	115 ± 16	121 ± 17	142 ± 20	163 ± 23	179 ± 25	177 ± 25	211 ± 29	236 ± 33	K
64 (± 2)	187 ± 26	133 ± 18	45 ± 6	215 ± 30	171 ± 24	90 ± 12	243 ± 34	208 ± 29	134 ± 19	N
	108 ± 15	116 ± 16	122 ± 17	146 ± 20	166 ± 23	182 ± 25	183 ± 25	216 ± 30	241 ± 33	K
68 (± 2)	187 ± 26	133 ± 18	45 ± 6	217 ± 30	173 ± 24	92 ± 13	246 ± 34	211 ± 29	138 ± 19	N
	109 ± 15	117 ± 16	123 ± 17	148 ± 21	169 ± 23	184 ± 26	187 ± 26	221 ± 31	245 ± 34	K

Для крупноплодных урожайных сортов (Лигол) рекомендуется применять значения ближе к верхней границе представленного диапазона, для менее урожайных (Спартан) – ближе к нижней границе. Для поправки на внешние условия величину прогнозируемого урожая предлагается умножить на безразмерную величину в пределах $\pm \frac{2}{3}$ от среднего (такой диапазон отклонений наблюдался в опытных условиях в отдельные годы).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Трунов Ю.В., Соловьев А.В., Трунов А.Ю. Экономическая эффективность производства плодов яблони в интенсивных насаждениях / Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2024. № 4 (79). С. 12-17.

2. Трунов Ю.В., Трунов А.Ю., Брюхина С.А., Медеяева А.Ю. Повышение качества саженцев яблони и эффективности их выращивания при некорневых подкормках специальными удобрениями // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т.38. №8. С. 9-12. doi: 10.53859/02352451_2024_38_8_0.

3. Трунов Ю.В., Трунов А.Ю., Загиров Н.Г. Динамика урожайности яблони в интенсивных садах средней полосы России / Субтропическое и декоративное садоводство. 2024. №90. С. 115-127 doi: 10.31360/2225-2024-90-115-127.

4. Трунов А.Ю., Трунов Ю.В., Брюхина С.А., Медеяева А.Ю. Урожайность яблони в интенсивных садах Центрально-Черноземного региона России / Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2024. № 4 (79). С. 40-43.

5. Трунов А.Ю., Кузин А.И., Трунов Ю.В. Влияние урожайности деревьев яблони на содержание в листьях азота и калия в интенсивном саду / Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2025. № 1 (80). С. 31-36.

6. Трунов А.Ю., Кузин А.И., Трунов Ю.В. Динамика агробиологических показателей вегетативного роста яблони в интенсивном саду / Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2025. № 2 (81).

7. Трунов А.Ю., Трунов Ю.В. Влияние азотных удобрений на компоненты биологической продуктивности яблони в Центрально-Чернозёмном регионе / Субтропическое и декоративное садоводство. 2025. №92.

Статьи в журналах, сборниках трудов, материалах конференций

8. Trunov Yu.V., Trunov A.Yu., Bryukhina S.A., Medelyaeva A.Yu. Improving the quality of apple tree seedlings and the efficiency of their cultivation with foliar feeding with special fertilizers // Russian Agricultural Sciences. 2024. Т. 50. № 6. С. 674-678.

9. Романюк А.Н. Оценка продуктивности яблони в саду с различными формами крон / А.Н. Романюк, А.Ю. Трунов, Ю.В. Трунов, С.А. Брюхина, А.Ю. Медеяева // Эл. журнал «Наука и образование» Мичуринского ГАУ. Т.7. №1 (2024).

10. Трунов А.Ю. и др. Зависимость биомассы деревьев яблони от диаметра ствола в интенсивном саду / А.Ю. Трунов, Ю.В. Трунов, С.А. Брюхина, А.Ю. Медеяева // Эл. журнал «Наука и образование» Мичуринского ГАУ. Т.8. №3 (2024).

11. Трунов А.Ю., Трунов Ю.В., Брюхина С.А., Медеяева А.Ю. Влияние некорневых подкормок специальными удобрениями на повышение качества

саженцев яблони в питомнике // Эл. журнал «Наука и образование» Мичуринского ГАУ. Т.8. №3 (2024).

12. **Трунов А.Ю.**, Трунов Ю.В., Брюхина С.А., Медеяева А.Ю. Влияние некорневых подкормок специальными удобрениями на эффективность выращивания саженцев яблони в питомнике // Эл. журнал «Наука и образование» Мичуринского ГАУ. Т.8. №3 (2024).

13. **Трунов А.Ю.**, Трунов Ю.В., Брюхина С.А., Медеяева А.Ю. Оценка урожайности зимних сортов яблони в интенсивных садах Центрально-Черноземного региона // Эл. журнал «Наука и образование» Мичуринского ГАУ. Т.9. №4 (2024).

14. **Трунов А.Ю.**, Трунов Ю.В., Брюхина С.А., Медеяева А.Ю. Оценка динамики продуктивности яблони в интенсивных садах // Эл. журнал «Наука и образование» Мичуринского ГАУ. Т.9. №4 (2024).

15. **Трунов А.Ю.**, Кузин А.И., Трунов Ю.В. Влияние азотных удобрений на продуктивность яблони в интенсивном саду // В сб.: Актуальные вопросы современного садоводства и питомниководства: VI Потаповские чтения. Матер. Всерос. нац. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию со дня рожд. В.А. Потапова (Мичуринск, 14 ноября 2024 г.). Мичуринск, 2024. С. 269-273.

16. Трунов Ю.В., **Трунов А.Ю.**, Брюхина С.А., Медеяева А.Ю., Медеяев Д.Б. Продуктивность яблони в интенсивных садах средней полосы России // Сб. науч. тр. науч.-практ. конф. «Новые знания и инновационные технологии – в развитие современного садоводства». Мичуринск, 2024. С. 92-98.

17. Трунов Ю.В., **Трунов А.Ю.**, Брюхина С.А., Медеяева А.Ю., Медеяев Д.Б. Применение некорневых подкормок удобрениями в питомнике для повышения качества и эффективности выращивания посадочного материала яблони // Сб. науч. тр. науч.-практ. конф. «Новые знания и инновационные технологии – в развитие современного садоводства». Мичуринск, 2024. С. 85-91.

18. **Трунов А.Ю.**, Кузин А.И., Трунов Ю.В., Брюхина С.А., Медеяева А.Ю. Влияние урожайности яблони в интенсивном саду на содержание в листьях азота // Эл. журнал «Наука и образование» Мичуринского ГАУ. Т.8. №1 (2025).

19. **Трунов А.Ю.**, Кузин А.И., Трунов Ю.В., Брюхина С.А., Медеяева А.Ю. Влияние урожайности яблони в интенсивном саду на содержание в листьях калия // Эл. журнал «Наука и образование» Мичуринского ГАУ. Т.8. №1 (2025).

20. **Трунов А.Ю.**, Кузин А.И., Трунов Ю.В., Брюхина С.А., Медеяева А.Ю. Динамика роста штамба и вегетативной биомассы яблони в интенсивном саду // Эл. журнал «Наука и образование» Мичуринского ГАУ. Т.8. №2 (2025).

21. **Трунов А.Ю.**, Кузин А.И., Трунов Ю.В., Брюхина С.А., Медеяева А.Ю. Динамика формирования листьев на деревьях яблони в интенсивном саду // Эл. журнал «Наука и образование» Мичуринского ГАУ. Т.8. №2 (2025).

22. **Трунов А.Ю.**, Кузин А.И., Трунов Ю.В., Брюхина С.А., Медеяева А.Ю. Влияние азотных удобрений на количество и среднюю массу плодов на деревьях яблони в интенсивном саду // Эл. журнал «Наука и образование» Мичуринского ГАУ. Т.8. №2 (2025).

23. **Трунов А.Ю.**, Кузин А.И., Трунов Ю.В., Брюхина С.А., Медеяева А.Ю. Влияние азотных удобрений на прирост биомассы и урожайность плодов у деревьев яблони в интенсивном саду // Эл. журнал «Наука и образование» Мичуринского ГАУ. Т.8. №2 (2025).

24. Трунов Ю.В., **Трунов А.Ю.**, Брюхина С.А. Современные технологии садоводства и питомниководства в средней полосе России / Мат. междунар. науч.-практ. конф. «Современные способы технологии выращивания плодовоовощных культур в Узбекистане, вопросы повышения качества продукции и урожайности, проблемы и решения» (Ташкентский ГАУ, 3 июня 2025 г.). Ташкент, 2025. С. 427-434.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ
Подписано в печать 27.02.2026. Формат 60×84/16,
Бумага офсетная № 1. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Ризограф
Заказ № 20940

Издательско-полиграфический центр
Мичуринского государственного аграрного университета
393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101
тел. +7 (47545) 3-88-34, доб. 211