

ФГБНУ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ СЕЛЕКЦИИ ПЛОДОВЫХ КУЛЬТУР»
ФГБОУ ВО «ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.С. ТУРГЕНЕВА»

На правах рукописи

Стыр

Столяров Максим Евгеньевич

**КАЛЬЦИЕВЫЙ РЕЖИМ ЯБЛОНЕВОГО САДА НА ФОНЕ
АЗОТНЫХ И КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ И ДИАГНОСТИКА
КАЛЬЦИЕВОГО ПИТАНИЯ ЯБЛОНИ**

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение,
защита и карантин растений

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
кандидат биологических наук,
Леоничева Елена Вячеславна

Орёл – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ПРОБЛЕМЫ В КАЛЬЦИЕВОМ ПИТАНИИ ЯБЛОНИ И СПОСОБЫ ЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ	12
1.1. Значение кальция как элемента питания растений	12
1.2. Содержание и формы Са в почвах	20
1.3. Са - дефицитные физиологические расстройства в плодах яблони и способы их предотвращения.....	26
1.4. Почвенная и растительная диагностика условий кальциевого питания яблони.....	34
ГЛАВА 2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ, ОБЪЕКТЫ, МЕТОДИКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	39
2.2. Климатические и агрометеорологические условия проведения исследования	45
2.3. Методики, используемые при проведении исследований.....	47
ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ НЕКОРНЕВЫХ ПОДКОРМОК БОР-, КАЛИЙ- И КАЛЬЦИЙСОДЕРЖАЩИМИ УДОБРЕНИЯМИ НА СОДЕРЖАНИЕ КАЛЬЦИЯ В ПЛОДАХ И ЛИСТЬЯХ ЯБЛОНИ (ОПЫТ 1).....	49
ГЛАВА 4. ИЗМЕНЕНИЕ АГРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ ЯБЛОНЕВОГО САДА ПРИ РЕГУЛЯРНОМ ПРИМЕНЕНИИ АЗОТНЫХ И КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ.....	55
4.1. Влияние азотных и калийных удобрений на показатели кислотности и содержание подвижного фосфора.....	55
4.2. Динамика минерального азота в почве сада при внесении удобрений.	61
4.3. Динамика доступных растениям соединений калия в почве сада при внесении удобрений.....	70
ГЛАВА 5. КАЛЬЦИЕВЫЙ РЕЖИМ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ ЯБЛОНЕВОГО САДА.....	82
5.1. Динамика обменных и водорастворимых соединений кальция в почве сада при внесении удобрений.....	82

5.2. Основные факторы, влияющие на уровень доступных растением форм кальция в почве сада	93
ГЛАВА 6. СОДЕРЖАНИЕ КАЛЬЦИЯ В ПЛОДАХ И ВЕГЕТАТИВНЫХ ОРГАНАХ ЯБЛОНИ (ОПЫТ 2)	96
6.1. Содержание кальция в плодах и влияние удобрений на этот показатель	96
6.2. Содержание кальция в листьях и влияние на этот показатель природных и агротехнических факторов	102
6.3. Содержание кальция в ветвях яблони и вынос кальция из агроэкосистемы сада.....	105
ГЛАВА 7. ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ СОСТОЯНИЕМ ПОЧВЕННОГО КАЛЬЦИЯ И ЕГО СОДЕРЖАНИЕМ В ПЛОДАХ И ВЕГЕТАТИВНЫХ ОРГАНАХ ЯБЛОНИ	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
ВЫВОДЫ.....	124
РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ АГРОХИМИЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ И ПРОИЗВОДСТВА	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ	127
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	152
Приложение 1.	153
Динамика минерального азота (Σ (N-NH ₄ + N-NO ₃), мг/кг) в слое 20...40 см почвы яблоневого сада при вн. возр-их доз удобрений, 2016...2020 гг.	153
Приложение 2.	154
Динамика минерального азота (Σ (N-NH ₄ + N-NO ₃), мг/кг) в слое 40...60 см почвы яблоневого сада при вн. возр-их доз удобрений, 2016...2020 гг. ...	154
Приложение 3.	155
Динамика обменного калия (мг/кг) в слое 20...40 см агросерой почвы яблоневого сада при вн. возрастающих доз удобрений, 2016...2020 гг. ...	155
Приложение 4.	156
Динамика обменного калия (мг/кг) в слое 40...60 см агросерой почвы яблоневого сада при вн. возрастающих доз удобрений, 2016...2020 гг. ...	156

Приложение 5.	157
Динамика водорастворимого калия (мг/кг) в слое 20...40 см агросерой почвы яблоневого сада при вн. возр-их доз удобрений, 2016...2020 гг. ...	157
Приложение 6.	158
Динамика водорастворимого калия (мг/кг) в слое 40...60 см агросерой почвы яблоневого сада при вн. возр-их доз удобрений, 2016...2020 гг. ...	158
Приложение 7.	159
Соотношение аммонийной и нитратной форм азота (мг/кг) в слое почвы 0...20 см при внесении N30K40, 2016...2020 гг.	159
Приложение 8.	160
Соотношение аммонийной и нитратной форм азота (мг/кг) в слое почвы 0...20 см при внесении N60K80, 2016...2020 гг.	160
Приложение 9.	161
Динамика обменного Са (ммоль/100 г) в слое почвы 20...40 см, 2016...2020 гг.	161
Приложение 10.	162
Динамика обменного Са (ммоль/100 г) в слое почвы 40...60 см, 2016...2020 гг.	162
Приложение 11.	163
Динамика водорастворимого Са (ммоль/100 г) в слое почвы 20...40 см, 2016...2020 гг.	163
Приложение 12.	164
Динамика водорастворимого Са (ммоль/100 г) в слое почвы 40...60 см, 2016...2020 гг.	164
Приложение 13.	165
Содержание гумуса в почве опытного участка в конце периода исследований (2020 г.), %	165
Приложение 14.	166
Урожай яблони сорта Синап орловский в годы проведения исследований (Опыт 1, 2011-2014 гг), кг/дереву.	166

ВВЕДЕНИЕ

Основными агрономическими проблемами, сдерживающими развитие садоводства в России, являются: низкая продуктивность насаждений, нерегулярность плодоношения, низкие товарные и потребительские качества плодов, недостаточная устойчивость насаждений. Для достижения высокой и стабильной продуктивности, высокого качества плодов растения нужно обеспечить питательными веществами в доступной форме и оптимальном количестве (Трунов, Трунова, 2013). Недостаточное внимание к проблемам минерального питания затрудняет экономичное и экологичное использование удобрений в качестве ресурса повышения продуктивности садов и повышения качества плодовой продукции.

Важную роль в обеспечении качества плодовой продукции играет кальциевое питание яблони. При недостатке кальция плоды яблони могут поражаться горькой ямчатостью – физиологическим заболеванием, существенно снижающим товарные качества плодовой продукции (Причко и др., 2015; Jemric et al., 2016; Леоничева и др., 2018). У чувствительных к этому заболеванию сортов яблони количество пораженных плодов в процессе хранения может достигать 80% (Biggs, Peck, 2015). Также от содержания кальция зависит скорость протекания процессов старения плодов – при низкой концентрации кальция процессы дыхания плодов усиливаются, что вызывает быстрое старение (И.А. Сидорова и др., 2016).

По данным И.А. Трунова и соавторов (2005), кальций поступает в плоды яблони в течение первых 4...6 недель после цветения. Очевидно, что при таких особенностях кальциевого питания существует потребность в ранней оценке уровня обеспеченности растений кальцием для возможности своевременного планирования и проведения агротехнических мероприятий, направленных на корректировку кальциевого статуса плодов.

Применение удобрений, содержащих кальций, в яблоневых садах, выращиваемых на кислых почвах, бывает достаточно эффективно (Jemric et

al., 2016). В тоже время физиологические нарушения отмечаются даже на плодах яблонь, выращенных на карбонатных почвах, богатых кальцием (Torres et al., 2015; Леоничева и др., 2018). Всё это говорит о том, что существующие методики определения обеспеченности деревьев яблони кальцием имеют ограниченную сферу применения и не всегда помогают предиктивно определить потребность растений в дополнительном кальциевом питании.

Несмотря на большой объем работы, проделанный многими исследователями по всему миру, до сих пор остаются открытыми множество вопросов, связанных с кальциевым питанием яблони. Может ли листовая диагностика заменить определение кальция в почве? Какие факторы влияют на кальциевое питание яблони и каков вклад каждого из них? Когда и как необходимо проводить отбор образцов на анализ? Возможно ли устранить дефицит кальция в год проведения анализа, тем самым увеличив продуктивность культуры и повысить качество плодов?

Отсутствие однозначных ответов на вышеперечисленные вопросы обуславливает **актуальность** темы исследования.

Цель исследований: изучить режим кальция в различных компонентах агроэкосистемы яблоневого сада, оценить влияние на него природных и агротехнических факторов и выявить диагностические показатели, наиболее полно характеризующие условия кальциевого питания яблони.

Задачи исследований:

1. Изучить кальциевый режим агросерой почвы садового агроценоза и выявить основные факторы, влияющие на уровень доступных соединений кальция в корнеобитаемом слое.

2. Изучить изменение основных агрохимических показателей агросерой почвы под садом при регулярном применении азотных и калийных удобрений.

3. Оценить влияние природных и агротехнических факторов на накопление Са в плодах и вегетативных органах яблони.

4. Получить количественные данные о составляющих баланса Са в агроэкосистеме яблоневого сада.

5. При помощи статистических методов изучить взаимосвязи между состоянием почвенного Са и его содержанием в плодах и вегетативных органах яблони.

6. Выявить диагностические показатели наиболее полно характеризующие условия кальциевого питания яблони.

Объектом исследования являлась агроэкосистема молодого яблоневого сада с яблонями сорта Синап орловский на подвое 54-118, произрастающими на агросерых почвах, **предметами исследования** – кальциевый, калийный и азотный режим яблоневого сада в системе «почва-растение» яблоневого сада.

Научная новизна. Впервые, для изучения кальциевого режима яблоневого сада был применен системный подход, когда в течение нескольких периодов вегетации проводилась сопряжённая оценка уровня кальция в различных компонентах садовой агроэкосистемы, была изучена сезонная динамика обменных и водорастворимых форм кальция в садовой почве, определён ежегодный вынос кальция из среднерослого яблоневого сада. Предложены показатели для почвенной диагностики кальциевого питания яблони, позволяющие прогнозировать дефицит кальция в плодах на более раннем сроке.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследований. Теоретическая значимость работы связана с изучением годичной и сезонной динамики комплекса агрохимических параметров агросерой почвы неорошаемого сада, что позволило выявить тренды и скорость изменения почвенных свойств под монокультурой яблони. Практическая значимость результатов исследования связана с использованием в агрохимической практике результатов почвенной и растительной диагностики для прогноза кальциевого статуса плодов. Результаты изучения азотного и калийного режима агросерой почвы под садом могут быть

использованы для корректировки программ удобрения яблони в почвенно-климатических условиях Центрально-Чернозёмной зоны и юга Нечерноземья.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Основным процессом, определяющим кальциевый режим агросерой почвы неорошаемого яблоневого сада в первое десятилетие после посадки, является постепенное снижение запасов обменного кальция в корнеобитаемом слое, сочетающееся со значительными сезонными колебаниями концентрации водорастворимых форм элемента, которые зависят от гидротермического режима почвы и усиливаются при внесении удобрений. Потребление кальция среднерослыми деревьями яблони в первые годы жизни сада не оказывает существенного влияния на кальциевый режим почвы.

2. Наиболее значимое влияние на содержание кальция в плодах, листьях и ветвях яблони оказывают природные факторы (метеоусловия), что подтверждается значительным варьированием этих показателей по годам. Внесение азотных и калийных удобрений влияет на содержание кальция в плодах ежегодно, а на кальциевый статус листьев удобрения влияют только когда его уровень близок к оптимуму (1,3% сух. в-ва).

3. Количество водорастворимого кальция в почве в значительной мере определяет условия кальциевого питания яблони. При этом содержание кальция в листьях коррелирует с количеством водорастворимого кальция в почве в середине текущего периода вегетации, а содержание кальция в плодах наиболее тесно коррелирует с уровнем водорастворимого кальция во второй половине предшествующего периода вегетации. Достоверная корреляция между водорастворимым кальцием почвы и кальциевым статусом плодов позволяет использовать почвенную диагностику для прогноза дефицита кальция в плодах на более раннем сроке.

Методология исследования. Основой методологического подхода к решению поставленных задач была сопряжённая оценка уровня кальция в различных компонентах садовой агроэкосистемы (почве, листьях, плодах и ветвях яблони), проводимая в течение пяти последовательных периодов

вегетации. При помощи статистического анализа полученных результатов были выявлены связи между годичной и сезонной динамикой соединений кальция в почве и различных частях растения яблони, применением удобрений, метеоусловиями, что дало возможность предложить новые диагностические показатели, позволяющие на ранних стадиях выявлять риск появления у плодов яблони физиологических расстройств, связанных с дефицитом кальция.

Диссертационному исследованию предшествовал анализ различных научных литературных источников, после чего были сформулированы цели и задачи исследования, проведена закладка полевых опытов, проведены необходимые учёты и наблюдения. Полученные экспериментальные данные были обработаны при помощи современных методов статистики и математического анализа.

Степень достоверности работы. Диссертационное исследование проводили на базе лаборатории агрохимии Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур» и на кафедре почвоведения и прикладной биологии института естественных наук и биотехнологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» согласно программе, утверждённой на заседании Учёного совета института и на заседании кафедры. Изучение кальциевого режима неорошаемых садов проводили в многофакторных полевых опытах с сортом яблони Синап орловский, районированным в областях Центрального, Центрально-Чернозёмного и Северо-Западного регионов РФ. Закладка в ведение полевых опытов соответствуют методическим требованиям, предъявляемым к исследованиям в многолетних плодовых насаждениях (Программа и методика..., 1999). Для анализа почвенных и растительных проб применялось современное аналитическое и лабораторное оборудование. Анализ и обобщение

результатов исследования проводились с использованием современных методов статистической обработки экспериментальных данных, в том числе дисперсионного и корреляционного анализа

Апробация работы и публикации. Полученные в ходе проведения исследования результаты ежегодно докладывались на заседаниях Учёного совета ФГБНУ ВНИИСПК в 2017 – 2020 гг., на заседаниях кафедры почвоведения и прикладной биологии Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева в 2017-2021 гг., на международной научно-практической конференции «Проблемы современного садоводства: сорта, технологии, экономика» (4 – 7 июля 2017 г., г. Орёл, ФГБНУ ВНИИСПК) международном научно-практическом форуме «Селекция – основа развития интенсивного садоводства» (3 – 6 июля 2018 г., г. Орёл, ФГБНУ ВНИИСПК), международном молодёжном научном форуме «Ломоносов-2018» (9-13 апреля 2018, г. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова), международном молодёжном научном форуме «Ломоносов-2019» (8-12 апреля 2019, г. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова), всероссийской научно-практической конференции «Природные ресурсы Центрального региона России и их рациональное использование» (2019 г., г. Орёл, ОГУ им. И.С. Тургенева), международной научной конференции «XXII Докучаевские молодежные чтения» (25 февраля – 2 марта 2019 г., г. Санкт-Петербург, СПбГУ).

По результатам диссертационного исследования автором было опубликовано 15 работ, из них 5, входящих в список RSCI и рекомендованных к защите в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова. В работах, опубликованных в соавторстве, основополагающий вклад принадлежит соискателю.

Личный вклад автора. Соискатель самостоятельно разработал программу исследований, сформулировал цели и задачи исследования. Участвовал в ведении полевых опытов и выполнении лабораторных работ, лично проводил наблюдения и учёты. Проанализировал экспериментальный материал, выполнил математическую обработку полученных в опыте данных.

Подготовил и опубликовал научные статьи в рецензируемых научных изданиях, написал диссертационную работу, участвовал в апробации результатов исследования, принимал участие в научных и практических конференциях в роли докладчика. Личный вклад соискателя составляет свыше 90%.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа изложена на 166 страницах компьютерного текста, структурно состоящего из введения, 7 глав, заключения, выводов, рекомендаций для агрохимической практики и производства, списка литературы из 218 источников, в том числе 106 источников от иностранных авторов. Диссертационная работа содержит 28 таблиц, 9 рисунков и 14 приложений.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему руководителю, к.б.н., заведующей лабораторией агрохимии ФГБНУ ВНИИСПК Леоничевой Е.В., сотрудникам лаборатории, к.с.-х.н. Роевой Т.А., к.с.-х.н. Леонтьевой Л.И., а также заведующей кафедрой почвоведения и прикладной биологии Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, к.с.-х.н. Федотовой И.Э. и всему коллективу кафедры. Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №19-316-90016 «Аспиранты», руководитель – Е.В. Леоничева).

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. ПРОБЛЕМЫ В КАЛЬЦИЕВОМ ПИТАНИИ ЯБЛОНИ И СПОСОБЫ ЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В главе проведен обзор литературных источников по теме диссертационного исследования, осуществлено теоретическое обоснование выбора темы, выявлена роль кальция в обеспечении оптимальных условий для получения качественных плодов яблони. Рассмотрен и систематизирован отечественный и зарубежный опыт в области кальциевого питания растений, обеспечения яблони оптимальным количеством доступного кальция, борьбы с развитием физиологических заболеваний плодов и диагностикой кальциевого питания яблони.

1.1. Значение кальция как элемента питания растений

Растения – сложноорганизованные организмы, состоящие из большого количества химических элементов, поступающих из окружающей среды и оказывающих существенное влияние на их жизнедеятельность. Тем не менее, наиболее существенную потребность растения испытывают в так называемых макро- и мезоэлементах. Кальций – один из наиболее важных мезоэлементов для растительного организма (Журова, Светличная, 2018).

Ещё в 19 веке немецкими агрохимиками Ю. Саксом и В. Кнопом было установлено, что выращивание здорового растения в беспочвенных условиях (используя воду вместо почвенного субстрата) невозможно без добавления в раствор кальция. При этом использование в растворе солей, содержащих лишь шесть питательных элементов – азот, фосфор, калий, кальций, магний и серу позволяло вырастить растения, способные полностью пройти период вегетации (Якушкина, 2005).

Кальций является одним из наиболее универсальных переносчиков информации в растительной клетке. Регулирование почти всех биохимических и физиологических процессов происходит при участии кальция (Campbell,

1985; Harper et al., 2004; Hetherington, Brownlee, 2004; Hirschi, 2004; Reddy, Reddy, 2004; Bothwell, Ng, 2005; Трунов, 2016).

Кальций входит в состав хромосом, играя роль связующего звена между ДНК и белком ядра. Также кальций можно обнаружить в рибосомах, митохондриях и хлоропластах. Он увеличивает вязкость цитоплазмы и снижает её оводнённость, регулирует кислотно-щелочное равновесие клетки (Трунов, 2016).

Роль кальция в процессах внутриклеточного регулирования была выявлена физиологом Ringer (1883) ещё в 1883 году, однако важная роль кальция как вторичного посредника в процессах клеточной сигнализации была установлена лишь почти 100 лет спустя. В 1980 г. американский учёный Howard Rasmussen впервые описал способность ионов кальция Ca^{2+} функционировать в качестве вторичного мессенджера (Rasmussen, 1980). С тех пор ежегодно в публикацию попадают сотни работ, посвященных вопросам регулирования содержания ионов кальция в клетках, сигнальным механизмам с участием кальция и особенностям взаимодействия ионов кальция со связывающими его белками (Маркова и др., 2003; Медведев, 2004; Скопин и др., 2021). Передача сигналов при помощи кальция происходит из-за его способности к дифференцированному взаимодействию с различными клеточными белками, в том числе с ферментами, являющимися основными инструментами в сигнальных системах растений (Johnson et al., 2014, Filinova et al, 2021).

Высока роль кальция в ауксиннезависимом транспорте водорода и калия, изменении тканевого потенциала, регулировании проницаемости мембран. Кальций входит в состав кальмодулина, являющегося регулятором работы мембран и ферментов (Рейвн, Эварт, Айкхорн, 1990).

Содержание кальция в растении, как правило, составляет от 0,05 до 0,5% сухой массы. Обнаружить кальций возможно во всех органах растений. В растительном организме кальций представлен в виде различных солей в адсорбированном и свободном состоянии. Наибольшее его содержание в

стареющих клетках, где он локализован в виде щавелекислого кальция, а также, в меньшем количестве, в форме кальциевых солей фосфорной, серной и пектиновой кислот (Минеев, 2006). При этом кальций слабо выщелачивается из листьев. Это связано с тем, что ионы кальция иммобилизуются в составе пектатов клеточных стенок и мембранах (Хораськина и др., 2009).

Первичное поглощение кальция происходит при помощи Ca^{2+} проводимых каналов плазматической мембраны с дальнейшим движением по ксилеме благодаря атрагирующей способности ауксинов (Швартау и др., 2014).

Стоит отметить, что кальций – это элемент, который не реутилизируется в растительном организме. (Медведев, 2004).

Межклеточное перемещение кальция внутри тканей происходит двумя путями: апопластно и симпластно. В случае апопластного перемещения ион кальция Ca^{2+} транспортируется к ксилеме, не изменяя при этом внутриклеточного пространства. У данного способа транспорта есть два существенных недостатка:

- 1) он оказывает сильное влияние на транспирацию, что может вызывать его чрезмерное поглощение и вызывать целый спектр отклонений, преимущественно физиологического характера, связанных с избытком кальция в тканях;

- 2) данный вид транспорта не избирателен по отношению к двухвалентным катионам, из-за чего возможно поступление иных двухвалентных катионов в растение, в том числе токсичных (White et al., 2000; Швартау, 2014). Однако, существует и обратный эффект – поскольку ионы кальция Ca^{2+} играют важную роль в процессах регулирования поглощения клетками растений других катионов, избыток токсичных для растения катионов железа, алюминия, марганца и некоторых других может нейтрализоваться путём связывания с клеточной стенкой и вытеснения из неё ионов кальция Ca^{2+} (White and Broadley, 2003; Медведев, 2004)

В свою очередь, симпластный путь является более селективным и позволяет контролировать содержание кальция в растительных тканях. Механизм можно описать так: катион кальция поступает в цитоплазму клеток эндодермы через кальциевые каналы на кортикальной стороне поясков Каспари и перераспределяется внутри стелы по симпласту с помощью Ca^{2+} -АТФаз и $\text{Ca}^{2+}/\text{H}^{+}$ -антипортов. При этом ионы кальция могут в нужном количестве селективно доставляться к ксилеме благодаря тому, что экспрессия и активность этих транспортеров являются регулируемыми (Медведев, 2005; Швартау и др., 2014). При этом перемещение кальция должно быть сбалансировано, поскольку при проявлении дисбаланса может происходить нарушение гомеостаза и даже апоптоз клеток.

При изменении концентрации кальция в клетке может смещаться в ту или иную сторону поглощение и накопление различных токсичных катионов, таких, как алюминий или медь. Считается, что оптимальный уровень поглощения кальция находится в диапазоне 1–10 мкМ.

Ионы кальция транспортируются по растению ситовидными трубками со средней скоростью перемещения около 1 м/час (Швартау и др., 2014).

Перемещение кальция в организме древесных растений происходит сравнительно медленно. Это во многом связано с латеральным просачиванием и значительной аккумуляцией элемента в коре. Показано, что у молодых деревьев яблони в коре может находиться более половины от общего количества элемента в растении (Terblanche, 1979). В результате кальций в яблоне продолжает перемещение вверх по дереву в течение ряда вегетационных периодов. Промежуточные резервы кальция в корнях и ветвях являются основным источником элемента для роста молодых органов в начале вегетации (Hanger, 1979).

Как правило, во внутриклеточных компартментах содержание кальция на 3-4 порядка выше, чем в цитоплазме клетки. Содержание кальция в цитоплазме, как правило, находится в диапазоне 100-200 нМ, в ЭПР и

митохондриях – 1 мМ, в вакуоли и клеточной стенке – 1-10 мМ (Nalefski and Falke, 1996).

Недостаток кальция существенно сказывается на развитии корневой системы растений. В частности, при дефиците этого элемента замедляется развитие корневых волосков, без которых невозможно нормальное поглощение целого спектра необходимых растению химических элементов (Минеев, 2004). Также при дефиците этого элемента значительно возрастает текучесть мембран и нарушаются процессы мембранного транспорта и биоэлектrogenеза, нарушается структура клеточных стенок, происходит набухание пектиновых веществ, снижается скорость растяжения и деления клеток (Медведев, 2004).

Недостаток кальция также способствует растрескиванию плодов яблони, горьковатости семян, некрозу и деформации листьев, водянистости плодов и целому спектру проблем, связанных с их хранением (Simon, 1978; White, Broadley, 2003).

Однако, высокие концентрации кальция в тканях могут оказывать токсичный эффект на клетки, а также приводить к их аномальному развитию (Conn et al., 2011; Cybulska et al., 2011).

Нарушение баланса кальция в растении приводит к проявлению различных физиологических заболеваний и отклонений, специфичных для большинства сельскохозяйственных культур (рис.1).

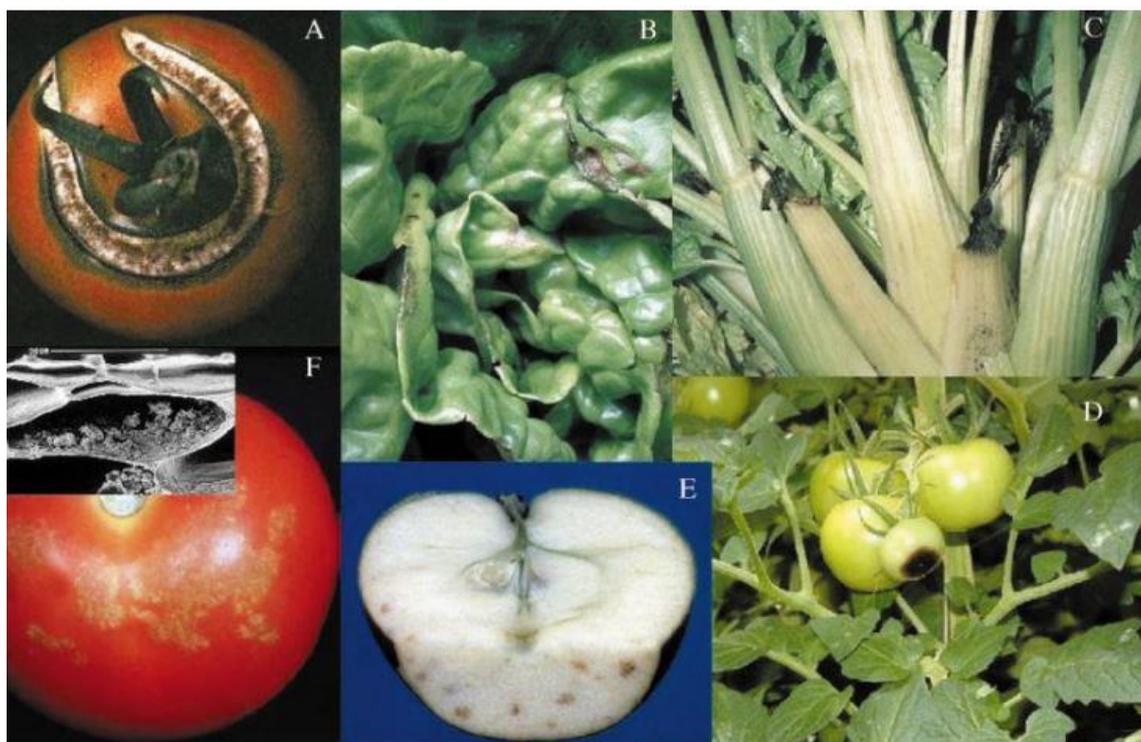


Рисунок 1 – Некоторые заболевания сельскохозяйственных культур, связанные с нарушением баланса кальция: А – Растрескиваемость томатов; В - краевой некроз на листьях салата; С – Недостаток кальция на сельдерее; D – Вершинная гниль на молодых томатах; Е – горькая ямчатость яблок; F - Золотистая пятнистость томатов (с визуализацией кристаллов оксалата кальция). *Источник: White, Broadley, 2003.*

Симптомы нарушения кальциевого баланса могут наблюдаться и проявляться по-разному в зависимости от специфики растений:

- 1) на молодых растущих листьях (например, краевой некроз на листьях салата);
- 2) в закрытых тканях (например, чёрная ножка сельдерее);
- 3) в тканях, получающих питательные вещества преимущественно по флоэме, а не через ксилему (например, вершинная гниль томатов, горькая ямчатость яблок). Они возникают из-за того, что кальций не может быть реутилизирован из старых органов растения и перераспределен через флоэму. Соответственно, единственный естественный способ восполнения дефицита кальция в молодых растущих тканях в данной ситуации – это его поступление через ксилему с восходящими токами воды, скорость которых зависит

преимущественно от эффективности транспирации. Но, поскольку эффективность транспирации молодых листьев и плодов относительно невысока, быстрая доставка кальция в ткани не происходит, что приводит к нарушению кальциевого баланса и развитию физиологических заболеваний (White, Broadley, 2003).

Ещё одна причина возникновения физиологических нарушений, таких как растрескивание томатов или ягод вишни – гипоосмотический шок при недостатке кальция в плодах в условиях повышенной влажности и избыточных осадков. Подобное явление происходит, предположительно, в результате структурных недостатков клеточных стенок определенных культур и сортов. (White, Broadley, 2003).

Хорошим примером негативных последствий избытка кальция в растении может являться развитие золотистой пятнистости на томатах (рисунок 1). Эти вкрапления представляют собой кристаллы оксалата кальция, и их количество существенно увеличивается в условиях высокой влажности и избытка кальциевых удобрений и кальциевых некорневых обработок (Bekreij et al., 1992).

Стоит отметить, что разные растения потребляют неодинаковое количество кальция. Так, например, овощные культуры на 1 тонну продукции потребляют 0,35-0,70 кг кальция, зерновые культуры – 0,75-1,25, корне- и клубнеплоды – 2,75-3,25, зернобобовые – 2,0 -3,0 т (Шеуджен и др., 2013).

Выделяют три группы растений по отношению к кальцию – кальцефилы, кальцефобы и нейтральные виды. Кальцефилы – это растения, произрастающие преимущественно на известковых почвах, либо в местах выхода известняков, мела, мергелей и других пород. Кальцефобы – наоборот, растения, не переносящие щелочных почв и хорошо растущие на почвах с кислой либо нейтральной реакцией. Однако, вопреки расхожему мнению, именно способность переносить избыток таких элементов, как алюминий, марганец и железо в значительной степени определяет флору кислых почв, а

толерантность и устойчивость к дефициту железа и фосфора определяет флору почв известковых (Lee, 1999).

Часто можно столкнуться с ситуацией, когда растения - кальцефобы хорошо растут при низком содержании Ca^{2+} в ризосфере, но при этом слабо реагируют и на увеличение его концентрации. Хотя, разумеется, избыток кальция может ингибировать рост и развитие данной группы растений. И напротив, барьерные механизмы, которые позволяют растениям-кальцефилам поддерживать сравнительно низкое содержание кальция в тканях в их естественной среде обитания, могут лимитировать рост и развитие при низком содержании кальция в почве, в первую очередь из-за кальциевого дефицита (Lee, 1999; White, Broadley, 2003).

Для определения оптимальных доз кальция, необходимых для того или иного растения, необходимо оценить естественную среду обитания данного растения. К. Hirschi (2001) в своей работе показывает, что при разработке схем минерального питания растений для гидропонных систем, как правило, концентрация кальция в растворе должна быть приближена к концентрации кальция в прикорневой зоне в естественной среде обитания данных видов.

Четкие взаимосвязи между концентрацией кальция в побегах и кальция в ризосфере были обнаружены для кальцефильных растений (Kinzel, Lechner, 1992). Считается, что одной из особенной кальцефильных растений, таких, как семейства *Crassulaceae*, *Brassicaceae* и *Fabaceae*, является высокая концентрация кальция в их тканях, а также в прикорневой зоне (Libert and Franceschi, 1987; Kinzel, Lechner, 1992).

Большинство плодово-ягодных культур, таких, как яблоня, вишня, слива и другие являются нейтральными к кальцию видами. Тем не менее, недостаток кальция у этих растений вызывает развитие различных физиологических заболеваний плодов, таких, как горькая ямчатость и стекловидность яблони, растрескивание вишни и др. (White, Broadley, 2003; Столяров и др., 2020). Подробнее этот вопрос будет рассмотрен в п.п. 1.3.

Исходя из вышесказанного, становится очевидно, что роль кальция в растении настолько существенна, что вопросы обеспечения растений оптимальным кальциевым питанием являются одними из приоритетных для гармоничного развития агрохимии как науки о минеральном питании, а также для получения высоких качественных урожаев сельскохозяйственных культур даже в неблагоприятных условиях среды.

1.2. Содержание и формы Са в почвах

Известно, что на минеральный состав плодов оказывают влияние многочисленные природные и агротехнические факторы. Как и для всех культурных растений, основным источником минеральных веществ для плодовых культур является почва. Следовательно, запасы в почве доступных растениям форм нутриентов и физико-химические свойства почвы, влияющие на протекание процессов корневого питания, являются определяющими факторами при формировании элементного состава как вегетативных органов растений, так и плодов (Леоничева и др., 2020).

Кальций – один из наиболее важных элементов-биофилов, играющих огромную роль в процессах почвообразования, вносящих вклад в плодородие почв. Также кальций – один из наиболее распространённых элементов в земной коре. По современным данным, по этому показателю он занимает пятое место среди всех химических элементов, уступая лишь кислороду, кремнию, алюминию и железу. Кальций встречается как в метаморфических породах – базальтах, так и в магматических – гранитах (Хораськина и др., 2009). Как правило, содержание кальция в почве составляет 1-2%, но в отдельных случаях, например, в почвах, образованных в результате выветривания известняков, его содержание может достигать 10% (Шеуджен и др., 2006).

Кальций обладает высокой миграционной способностью, принимает участие в обменных реакциях почвы и в существенных количествах потребляется растениями.

Большая часть почвенного кальция находится в почве в составе труднорастворимых соединений, таких, как карбонаты, фосфаты, сульфаты, силикаты и алюмосиликаты (например, пироксен, амфибол, полевые шпаты, плагиоклаз и др.). Такой кальций недоступен растениям для питания (Шеуджен и др., 2015).

Существенная часть почвенного кальция находится в обменно-поглощённой форме и лишь малая его часть – в составе различных органических соединений и в виде солей в почвенном растворе: нитратов, хлоридов, бикарбонатов и пр. Эти водорастворимые соли образуются в результате вытеснения поглощённого кальция в почвенный раствор, а также в результате разрушения различных почвенных минералов, в первую очередь силикатов и алюмосиликатов. Стоит отметить, что именно обменно-поглощённые формы кальция доступны растениям для питания (Смирнов, 1975).

В почвенном поглощающем комплексе кальций является самым распространённым катионом на большинстве типов почв. Как правило, от 55 до 85% ёмкости катионного обмена приходится именно на кальций (Шеуджен, 2010, 2013). Это связано с достаточно небольшим размером гидратированного иона кальция Ca^{2+} , при том, что он обладает двойным положительным зарядом. Благодаря большому количеству ионов кальция в почве, их заряду, а также слабой способности к гидратации они сильнее связываются гуматами и глинами, чем другие катионы. Абсорбируется кальций в первую очередь глинистыми минералами, характеризующимися высокой ёмкостью катионного обмена (ЕКО), такими, как монтмориллонит. Крайне высокая абсорбция кальция происходит гумусовыми соединениями, что связано также с высокой ЕКО, а также процессами хелатирования кальция органическими соединениями гумуса (Томпсон, 1982).

Кальций – весьма подвижный элемент в профиле почв большинства типов (Baldwin et al., 1973; Nye, Tinker, 1977). Он достаточно сильно выветривается из первичных и вторичных минералов, но на интенсивность

этих процессов оказывает существенное влияние рН раствора (Likens et al., 1998). Благодаря своему заряду потери ионов кальция не так интенсивны в почвах с большой емкостью катионного обмена, чем на кислых почвах с большим содержанием обменных форм алюминия (Хораськина и др., 2009).

Наиболее подвижны по профилю те катионы Ca^{2+} , которые слабо связаны с почвенным поглощающим комплексом (далее – ППК) и легко переходят в почвенный раствор при его разбавлении выпадающими осадками (либо при капиллярном подъеме грунтовых вод). Эти процессы приводят к существенным изменениям концентрации водорастворимого кальция в корнеобитаемом слое почвы в течение года.

Как правило, содержание обменных форм кальция в почве выше, чем водорастворимых в 10 и более раз. Также содержание обменных форм кальция в почве является более стабильным показателем, нежели водорастворимые формы кальция. Изменение концентрации обменных форм кальция происходит преимущественно в случае оказания некоторых воздействий на почву – например, проведение известкования, работа с применением оросительных систем, многолетняя практика применения повышенных доз минеральных удобрений. Однако даже в этом случае годовое изменение содержания обменного кальция редко превышает 5...10%, в то время как содержание водорастворимых форм может изменяться в разы и даже десятки раз.

Наибольшее количество обменного кальция содержится в чернозёмах и серозёмах. Существенно ниже его содержание в серых лесных и дерново-подзолистых почвах. Более того, его поступление в растение существенно затруднено из-за антагонистических взаимодействий ионов H^+ и NH_4^+ , роль которых существенно возрастает при использовании минеральных удобрений, преимущественно физиологически кислых (Шеуджен и др., 2015).

Высока роль кальция и в формировании почвенных структур, глинистых минералов, трансформации различных органических веществ и других свойств почв экологического характера. Помимо этого, кальций оказывает

влияние на рН почвы, чем косвенно влияет на доступность и подвижность различных почвенных нутриентов (Шеуджен и др., 2015; Шеуджен, 2017).

Потери кальция с растительными остатками из экосистем, как правило, не очень велики, поскольку его накопление происходит преимущественно в вегетативных, а не генеративных органах. Существенно выше потери кальция с инфильтрационными атмосферными осадками, которые могут составлять от 50 до 350 кг с гектара в зависимости от различных почвенно-климатических факторов, таких, как количество выпавших осадков, концентрации элемента в почве и её физических свойств (Смирнов, 1975).

Роль использования средств химизации, в частности, минеральных удобрений, в выносе кальция из агроэкосистем также весьма велика. Наибольшее влияние оказывают удобрения, имеющие в своём составе ион аммония. Например, по данным А.Х. Шеуджена и соавторов (2015), использование 100 кг сульфата аммония может приводить к потере кальция, схожей со 100 кг карбоната кальция.

Несколько меньшее влияние на концентрацию кальция оказывают калийные удобрения. Фосфорные удобрения практически не снижают концентрацию кальция, поскольку фосфаты химически связываются почвой (Кук, 1970; Шильников и др., 2012).

Уровень активности ионов ($a_{Ca^{2+}}$) – показатель, позволяющий оценить способность ионов кальция переходить в почвенный раствор из твёрдой фазы. Существуют данные о положительной корреляции между этим показателем и концентрацией водорастворимых форм кальция в почве, для обменных форм кальция подобной корреляции установлено не было (Шеуджен, 2015; Leonicheva et al., 2021).

Оценка плодородия почв – комплексный процесс, состоящий из многих факторов. Среди таких факторов можно отметить кальциевый потенциал почвы, который представляет собой соотношение концентрации иона водорода H^+ к квадратному корню из концентрации иона кальция Ca^{2+} и характеризует энергетический уровень перехода катионов кальция в

почвенный раствор из твёрдой фазы почвы. Чем выше данный показатель, тем доступнее почвенный кальций для растений. (Шеуджен, 2005).

Стоит отметить, что кальций может снижать доступность магния и калия для растений. Многие исследователи говорят об антагонизме этих элементов в яблоневых садах (Boyton, Compton, 1945; Smith, Wallance, 1956; Кобель, 1957; Vang-Petersen et al., 1974; Шумахер, 1979; Neilsen et al, 1982).

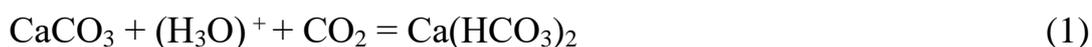
Многие исследователи говорят о том, что в результате постоянно идущих процессов миграции катионов оснований (в т.ч. кальция) с инфильтрационными водами, а также биологических процессов, происходящих в почве с выделением «кислых» продуктов, происходит подкисление почвы в корнеобитаемом слое (Шильников и др., 2016; Некрасов и др., 2021).

Один из основных способов повышения уровня кальция в почве – проведение химической мелиорации (Шеуджен, 2006; Некрасов и др., 2021).

По данным Н.И. Акановой и соавторов (2011), обобщивших большой объем информации о балансе кальция в земледелии, результаты полевых и лизиметрических опытов, практические результаты проведения известкования, для снижения кислотности почвы и поддержания положительного баланса кальция в российских почвах нужно вносить примерно 25 миллионов тонн известковых удобрений каждый год (в физическом весе при содержании 65-67% действующего вещества).

Почвы с рН солевой вытяжки (pH_{KCl}) менее 5,5 единиц в пахотном обладают избыточной кислотностью. Для её устранения и повышения уровня рН необходимо вытеснить из почвенно-поглощающего комплекса ионы водорода и алюминия. Как правило, для этого используют доломитовую или известковую муку, либо другие химические соединения, содержащие кальций и магний.

При внесении данных мелиорантов в почву происходит процесс постепенного превращения в растворимый бикарбонат кальция или бикарбонат магния под влиянием водорода и углекислоты:



Далее бикарбонат кальция разлагается на катион кальция Ca^{2+} и анионы 2HCO_3^- и частично гидролизуется:



В итоге в почвенном растворе повышается концентрация ионов Ca^{2+} и OH^- , снижается избыточная кислотность. (Овчаренко и др., 2021).

Более того, существует мнение, что проведение известкования совместно с внесением минеральных удобрений усиливает эффект последних. Ещё в начале 20 века известный советский учёный Оскар Карлович Кедров-Зихман установил, что при известковании почв, помимо изменения состава поглощённых катионов и насыщенности почвенно-поглощающего комплекса основаниями происходит повышение доступности для растений многих элементов минерального питания, в том числе кальция, магния, фосфора, калия и целого ряда микроэлементов (Кедров-Зихман, 1925, 1955).

Исходя из этого, существует мнение, что использование доломитовой муки необходимо проводить совместно с различными видами удобрений, поскольку в данном случае суммарный позитивный эффект на продуктивность растений выше, чем при внесении удобрений по отдельности (Аканова, 2001).

Исходя из всего вышесказанного становится очевидна необходимость исследования процессов трансформации и миграции кальция в почве садовых агроценозов, баланса данного элемента в агроэкосистеме сада, влияния агротехнических мероприятий на эти показатели.

1.3. Са - дефицитные физиологические расстройства в плодах яблони и способы их предотвращения

Управление кальциевым питанием – важная часть технологии возделывания яблони в промышленном садоводстве, поскольку, как уже было сказано ранее, от содержания кальция в плодах зависит их лёжкоспособность, качественные характеристики, такие, как твёрдость мякоти, выход сока, а также товарность и др. (Gudkovski, 1990; Biggs, Peck, 2015; Сидорова и др., 2016)

Многими исследователями показана важнейшая роль кальция в формировании качественных плодов яблони. Растения, обеспеченные кальцием в достаточном количестве, меньше поражаются физиологическими заболеваниями, имеют лучшие товарные качества и лёжкоспособность (Wolk et al., 1994; Гудковский, 1978; Шумахер, 1979; Воробьев, 1996).

Кальций связан с некоторыми процессами, связанными с созреванием плодов, в частности, с ингибированием их старения (Методы прогноза ..., 1990). Соответственно, его недостаток способствует преждевременному старению плодов яблони (Bramlage, 1973), а при содержании кальция менее 0,06 – 0,07% яблоки не подлежат длительному хранению (Гудковский, 1978).

В целом, плоды яблони подвержены достаточно широкому спектру физиологических расстройств, негативно сказывающихся на качественных характеристиках полученного урожая. Говоря о физиологических заболеваниях, оказывающих непосредственное влияние на коммерческую составляющую промышленного садоводства, следует отметить три из них: горькую ямчатость, внутреннее побурение и стекловидность плодов (Wolk et al., 1994; Колядич, 2012; Гольшкин, 2015). Точные механизмы протекания данных заболеваний до сих пор не ясны, но многими исследователями установлено, что данные заболевания очевидно связаны с нарушением обмена веществ и содержанием кальция в плодах (Ferguson, Watkins, 1983; Причко,

1999; Причко и др., 2015; Jarolmasjed et al., 2016; Torres et al., 2017; Falchi et al., 2017 и др.).

Горькая ямчатость – это заболевание, которое проявляется на плодах в виде округлых углублённых пятен на кожице, как правило, коричневого цвета. Мякоть под этими пятнами становится горькой на вкус (Причко и др., 2015; Jarolmasjed et al., 2016) (рисунок 2 и рисунок 3).



Рисунок 2 – Иллюстрация поражения яблок сорта Синап орловский горькой ямчатостью. *Источник: личная коллекция автора.*

Отмечаются случаи как поражения данным заболеванием в процессе хранения плодов, так и непосредственно на дереве, до съёма. В научной литературе распространено мнение, что крупные плоды более склонны к поражению горькой ямчатостью, чем мелкие. Объясняется это тем фактом, что поступление кальция в плоды происходит в течение очень короткого промежутка времени после цветения, а затем, по мере роста плода, происходит лишь «разбавление» кальция, то есть непрерывное снижение его концентрации. По этой причине относительное содержание кальция в крупных плодах, как правило, меньше, чем в мелких, что и способствует развитию заболевания (Причко, 1999, Mogollón et al., 2021).



Рисунок 3 – Плоды яблони, пораженные горькой ямчатостью.
Источник: личная коллекция автора.

Отмечается, что горькая ямчатость чаще развивается в молодых садах при наличии на деревьях единичных крупных плодов. Если количество плодов в молодом саду высокое, то риск развития горькой ямчатости существенно ниже (Причко, 1999; Parbery, 2015).

Излишняя обрезка деревьев также существенно увеличивает вероятность развития данного заболевания. По всей видимости, это связано с уменьшением количества плодовых почек на дереве, что приводит к снижению количества плодов и увеличению их средней массы (Parbery, 2015).

По данным некоторых исследователей, горькая ямчатость при хранении чаще проявляется на плодах, собранных до их полного созревания, нежели на плодах, собранных в оптимальные сроки (Parbery, 2015).

Горькая ямчатость – сортоспецифичное заболевание. Из известных сортов, предрасположенных к поражению данной болезнью, можно отметить следующие: Хани Крисп, Делишес, Ред Делишес, Глостер, Синап Орловский. Такие сорта, как Ренет Симиренко или Имрус, как правило, не поражаются горькой ямчатостью.

Критическим порогом содержания кальция в плодах, по данным различных исследователей является содержание кальция ниже 5-14 мг/кг сырой массы (Gudkovski, 1990; Причко, 2011; Jemric et al., 2016). В случае, если содержание кальция в плодах яблони ниже этого порогового значения, вероятность их поражения физиологическими заболеваниями существенно возрастает.

Кальций характеризуется крайне низкой подвижностью и неравномерным распределением в растении, что приводит к низкой его концентрации в плодах независимо от высокой концентрации в листьях (Fallahi et al., 1985).

Кальциевый статус плодов и листьев яблони в разные годы может существенно отличаться, причем в плодах это явление выражено более явно (Леоничева и др., 2018; Kuzin et al., 2020). Исходя из того факта, что растения поглощают кальций преимущественно из почвы, весьма вероятно наличие зависимостей между содержанием катионов кальция в почве и в различных частях деревьев.

Вопрос о влиянии минеральных удобрений на смещение баланса кальция в растении в сторону поглощения листьями в ущерб плодам остаётся неоднозначным. В литературе есть данные как подтверждающие влияние минеральных удобрений на содержания кальция в листьях (Gruppe, 1962; Fidler, 1970; Лесогорова и др., 1986; Тарасов и др., 1986; Дорошенко, и др.,

1994), так и не согласующиеся с этим утверждением (Whitfield, 1964; Вегера, 1978).

В некоторых работах (Wills, Trimazi, 1997) показано, что из-за низкой подвижности кальция в растении, при использовании агроприёмов, направленных на усиление вегетативного роста, в т.ч. внесении азотных удобрений, возможно перенаправление основных потоков кальция в листья, что приводит к снижению концентрации кальция в плодах.

Yu et al., (2018) отмечают, что проведение некорневых подкормок кальцийсодержащими препаратами увеличивает содержание этого элемента в плодах, при этом снижая его концентрацию в листьях.

Дефицит кальция зачастую не устраняется быстро путём внесения кальцийсодержащих препаратов в почву (Vang-Petersen, 1980), поэтому во всём мире, как правило, применяется некорневое опрыскивание растворами солей кальция до сбора урожая (Malakouti et al., 1999; Drazeta et al., 2001; Yuri et al., 2002; Kahu, 2002, Wojcik et al., 2009) либо непосредственная обработка кальцийсодержащими препаратами после уборки урожая с целью быстрого повышения концентрации элемента в тканях плодов (Fallahi et al., 1987; Conway et al., 2001). В большинстве стран мира на практике используется первый способ, поскольку имеется возможность снизить дефицит кальция в плодах на ранних стадиях, до развития негативных процессов. Количество опрыскиваний за сезон может превышать 10 раз (Schonherr, 2001).

Тем не менее, метод с послеуборочной обработкой яблок кальцийсодержащими препаратами путём окунания в раствор также является достаточно распространённым, поскольку симптомы проявления горькой ямчатости далеко не всегда проявляются до закладки на хранение (Mogollon et al., 2021).

Часто для проведения некорневых обработок яблони для снижения рисков развития физиологических отклонений рекомендуют использовать хлорид кальция (CaCl_2) и кальциевую селитру ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), при использовании которых возможны ожоги листьев и коррозия опрыскивателей. Для избежания

этого негативного эффекта можно применять кальций в хелатной форме: в виде ЭДТА комплекса (Webster, 1981) либо в соединении с другими сложными органическими молекулами (Причко и др., 2015). Нередко кальций входит в состав комплексных препаратов, содержащих наряду с минеральными компонентами различные биологически активные вещества (аминокислоты, фитогормоны, гуматы и пр.) (Трунов, 2016; Причко и др., 2011), которые должны оптимизировать обменные процессы и стрессоустойчивость растений. Такие агрохимикаты появились на рынке относительно недавно, и их действие пока недостаточно изучено.

Остаётся открытым вопрос и касаясь сроков использования кальциевых некорневых подкормок. Многие авторы считают, что проводить обработки кальциевыми препаратами необходимо начинать сразу же после цветения (Raese, Drake, 1993; Casero et al., 2004; Kadir, 2004; Neilsen et al., 2005; Fallahi et al., 2006).

Casero et al. (2017) отмечают, что в первую половину вегетационного периода происходит существенное поглощение кальция из почвы и его транспорт в плоды яблони. В свою очередь, во второй части вегетационного периода транспорт кальция в плоды существенно снижается. Транспорт же других макроэлементов в плоды, в частности, азота, калия, фосфора и магния, существенно растёт в течение всего периода вегетации. Отсюда автор делает вывод, что использование некорневых обработок кальциевыми препаратами максимально оправдано лишь во второй части вегетационного периода, когда отсутствуют другие эффективные способы доставки кальция непосредственно к плодам.

Lötze et al. (2008) проводили обработки нитратом кальция ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), карбонатом кальция (CaCO_3) и ацетатом кальция ($\text{Ca}(\text{COOCH}_3)_2$), начиная обработки с трех различных стадий развития плодов: ранней (6 дней после полного цветения), средней (40 дней после полного цветения) и поздней (80 дней после полного цветения). В результате авторы установили, что позднее внесение $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ увеличивало содержание кальция в плодах при сборе

урожая больше, чем раннее и среднее внесение. Однако, проявление горькой ямчатости было наименьшим именно при проведении ранних обработок $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ и CaCO_3 , а наибольшим при позднем начале кальциевых опрыскиваний. Применение ацетата кальция ($\text{Ca}(\text{COOCH}_3)_2$) не оказало сколько-либо значимого влияния ни на содержание кальция в плодах, ни на частоту проявления горькой ямчатости.

В работе Yu et al., (2018) ранние и поздние обработки кальцийсодержащими препаратами также оказывали положительный эффект на содержание кальция в плодах яблони, но при этом также снижали содержание в них азота.

Val et al. (2008) в своей работе показали, что опрыскивание раствором хлорида кальция CaCl_2 приводит к повышению концентрации этого элемента в коже плодов.

Blanco et al. (2010) оценили эффективность некорневых обработок хлоридом кальция (CaCl_2) и пропионатом кальция для борьбы с горькой ямчатостью и обнаружили, что добавление в раствор адьювантов может улучшить поступление кальция в плоды яблони и снизить частоту заболеваний, связанных с балансом кальция в период послеуборочного хранения.

Вопрос по влиянию содержания кальция в почве на кальциевое питание яблони остаётся открытым. По данным многих исследователей отмечено, что использование кальциевых удобрений в почву не приводит к повышению содержания этого элемента в растениях (Wander, 1947; Boynton, 1954, Neilsen et al., 1982). Однако, существуют данные, показывающие положительную взаимосвязь между содержанием кальция в почве и в растениях (Mason, 1964; Mason, McDougald, 1974; Hogue et al., 1983, Серeda и др., 2000).

Wilsdorf et al. (2012) оценили вклад корневого и некорневого питания в повышение обеспеченности кальцием плодов яблони и установили, что некорневые обработки кальцием являются более эффективными, чем почвенное внесение. К сожалению, оценить влияние разных способов

доставки кальция в растение на проявление горькой ямчатости у авторов не удалось – в годы исследования проявлений данного заболевания обнаружено не было.

Torres et al. (2017) провели сравнение трёх вариантов доставки кальция в растение – корневым, некорневым, а также комбинированным способом, при котором кальциевые удобрения вносились как в почву, так и в виде некорневых подкормок. В итоге авторы установили, что некорневая обработка кальцийсодержащими препаратами оказала более существенное влияние на снижение проявления горькой ямчатости плодов, чем внесение удобрений в почву, а комбинированный способ доставки кальция ничем не отличался от простого опрыскивания.

Есть мнение, что улучшение условий кальциевого питания яблони путём внесения в почву кальцийсодержащих удобрений даёт положительные результаты преимущественно на кислых почвах (Jemrić et al., 2016), в то время как «горькая ямчатость» нередко отмечается у плодов, выращенных на почвах, богатых карбонатами кальция (Леоничева и др., 2017).

Использование основных NPK удобрений в саду также может оказывать существенное влияние на обеспеченность яблони кальцием (Шумахер, 1979; Минеев, 2004; Столяров и др., 2020; Leonicheva et al., 2021).

В работе Lewis et al. (1977) показано, что при хорошей обеспеченности растений кальцием существенно снижается урожайность вне зависимости от доступности калийного питания. Это связано со снижением поглощения растением калия при высоком содержании кальция.

Когда плодовые деревья произрастают при залужении, их плоды, как правило, содержат меньше азота и больше кальция, что снижает риск развития физиологических отклонений после сбора урожая по сравнению с другими системами содержания почв (de Villiers, 1961).

В работе Бинеталиева (1990) показано, что применение высоких доз минеральных удобрений может приводить к значительному изменению качества плодов и снижению их лёжкоспособности.

Напротив, в работе Середы и соавторов (2000) отмечено, что минеральные удобрения увеличили выход яблок высшего и первого сортов на 12%.

Таким образом, можно отметить, что борьба с физиологическими заболеваниями плодов может быть успешной только при разработке сложной комплексной системы агроприёмов, направленных на снижение дефицита кальция и поддержание оптимального баланса всех основных элементов минерального питания. Многие из факторов, влияющие на проявление подобных заболеваний изучены крайне фрагментарно либо не изучены вообще.

1.4. Почвенная и растительная диагностика условий кальциевого питания яблони

Как было сказано ранее, наиболее широко используемый способ снижения рисков проявления физиологических отклонений, таких, как горькая ямчатость – проведение некорневых обработок яблони кальциевыми препаратами с целью быстрой «доставки» кальция непосредственно к плодам. Для этого на практике используют различные химические соединения, как простого, так и сложного состава, при этом важную роль играют сроки проведения обработок (Watkins et al., 2004; Biggs, Peck, 2015; Jemric et al., 2016). Исходя из этого, очевидно, что для выявления необходимости таких опрыскиваний и определения оптимальных сроков их проведения требуется выявить риск возникновения Са-дефицитных расстройств как можно раньше.

В научной литературе описаны несколько методов предиктивной диагностики элементного состава плодов и органов яблони, позволяющих оценить риски проявления в течение хранения физиологических заболеваний, связанных с дефицитом кальция (Способ ранней диагностики..., 2016; Причко и др., 2011; Amarante et al., 2013).

Некоторые исследователи предлагают проводить обработку яблок раствором хлорида магния ($MgCl_2$) или раствором этефона (ethephon) за 10-30

дней до съема плодов для стимулирования созревания и, соответственно, проявления симптомов заболевания (Retamales et al., 2000; Torres et al., 2015).

В научной литературе описаны попытки использования неразрушительной Vis-NIR спектроскопии (Non-destructive Vis-NIR Spectroscopy) для оценки качественных показателей овощей и фруктов.

Таким образом, Nicolaï et al. (2006) использовали гиперспектральные изображения в ближнем инфракрасном диапазоне для выявления повреждений, вызванных горькой ямчатостью при сборе урожая ещё до проявления видимых симптомов.

Между тем, Si & Sankaran (2016) использовали компьютерную томографию (КТ) для выявления закономерностей раннего развития симптомов горькой ямчатости внутри плода до того, как внешние симптомы возможно было обнаружить. Подобное исследование с использованием компьютерной томографии проводили и Jarolmasjed et al. (2016). Однако, авторы обнаружили существенные минусы данной методики, в частности, существенное усложнение идентификации горькой ямчатости на плодах, имеющих даже несущественные механические повреждения, а также невозможность массового использования данной технологии в разных категориях хозяйств.

Как правило, при разработке новых методов предиктивной диагностики плодов особое внимание уделяют определению точного минерального состава для конкретных сортов (Причко и др., 2011; Способ ранней диагностики..., 2016; Леоничева и др., 2017) и срокам отбора плодов для проведения диагностики (Способ ранней диагностики..., 2016; Uçgun et al., 2021).

Одним из критериев развития риска горькой ямчатости принято считать содержание кальция в яблоках, которое должно быть не менее 5 мг/100 г сырой массы (Гудковский, 1990; Трунов, 2016). Для южных сортов известен также оптимум содержания кальция в наружном эпидермисе плода – он находится в диапазоне от 11,4 до 13 мг/100 г сырой массы (Причко и др., 2011; Способ ранней диагностики..., 2016). Недавние исследования показали, что у сорта

Синап орловский, произрастающего на территории ФГБНУ ВНИИСПК (Орловская область) на агросерых почвах, оптимум находится достаточно близко к аналогичному показателю для южных сортов (Леоничева и др., 2017). Тем не менее, этот вопрос требует дальнейшего изучения, поскольку данные, полученные на текущий момент, весьма фрагментарны и недостаточны для разработки более эффективных предиктивных методов оценки рисков проявления физиологических нарушений.

Стоит отметить, что метод оценки вероятности проявления горькой ямчатости путём оценки содержания кальция в плодах обладает одним крайне существенным недостатком – его использование возможно лишь при отборе зрелых образцов яблок, то есть непосредственно перед сбором либо после сбора урожая. Соответственно, даже при обнаружении высоких рисков проявления физиологических отклонений существует не так много вариантов для дальнейшей работы – такие плоды можно либо сразу сдать на переработку с существенным дисконтом к стоимости, либо провести обработку кальцийсодержащими препаратами перед закладкой на хранение.

Поскольку, как уже было сказано, на риск развития горькой ямчатости может оказывать влияние не столько абсолютное содержание кальция в плодах, сколько соотношение содержания кальция к другим питательным элементам, многие исследователи предлагают использовать более сложные показатели для оценки рисков проявления заболевания (Buti et al., 2015; Si, Sankaran, 2016). В частности, достаточно много работ посвящено поиску зависимостей между степенью развития горькой ямчатости плодов и следующими соотношениями элементов минерального питания: $K+Mg/Ca$, N/Ca , K/Ca (Saure, 2005; de Freitas et al., 2010, 2015; Amarante et al., 2013; Gago et al., 2016; Torres et al., 2017; Yu et al., 2018). Многие исследователи считают, что высокой устойчивостью к болезням при хранении обладают яблоки с при соотношении $(K+Mg)/Ca < 25$, $N/Ca < 10$, $Ca/Mg > 1$ (Nielsen, Edwards, 1982; Гудковский, 1990; Причко, 2002; Watkins et al., 2004; Amarante et al., 2013; Jemric et al., 2016).

Недостатков у данного метода два: первый аналогичен определению кальция и связан с тем, что анализу подвергаются яблоки непосредственно перед съемом или закладкой на хранение, когда возможности влияния на минеральный состав плодов уже крайне ограничены. Второй же заключается в усложнении и замедлении проведения анализа, а также росте его стоимости, поскольку необходимо провести лабораторное определение не только кальция, но и других элементов минерального питания в образцах.

Предиктивное выявление проблем с балансом кальция в саду на более ранних стадиях формирования урожая может дать гораздо больше возможностей для исправления либо смягчения негативных последствий дефицита кальция, в частности, за счёт некорневых обработок. Многими исследователями в настоящее время ведется работа как по поиску новых диагностических методов, позволяющих предсказать проявление горькой ямчатости на ранних стадиях, так и по усовершенствованию уже имеющихся. В частности, существуют работы по разработке и усовершенствованию методов на основе анализа изменений химического состава плодов и листьев в течение всего периода вегетации (Способ ранней диагностики...,2016; Uçgun, Gezgin, 2017; Uçgun et al., 2021), а также определения концентрации минеральных элементов в ветвях яблони (Uçgun et al., 2018).

Отдельно стоит отметить, что прогнозирование содержания кальция в плодах на основе почвенной диагностики на данный момент практически не проводится. По всей видимости, это связано с тем фактом, что горькая ямчатость развивается на плодах яблонь, произрастающих как на бедных кальцием почвах, так и на богатых. При этом оценка обеспеченности сельскохозяйственных культур доступным кальцием, как правило, проводится согласно данным о содержании обменных форм этого элемента в почве (Методические указания..., 2003).

Вопросы возникают и при определении оптимального содержания кальция в листьях, поскольку не существует четкой градации содержания данного элемента. Многие авторы приводят свои данные по оптимальному

содержанию кальция в листьях яблони, но они существенно различаются. Вероятно, это связано с множеством факторов: сортом, подвоем, типом и составом почвы, климатическими условиями, условиями минерального питания и даже возрастом насаждений. Например, по данным А.К. Кондакова, оптимальное содержание кальция в листьях яблони находится на уровне 2,3% сухой массы, а отклонение от этого значения на 30% означает недостаток либо избыток элементов питания (Кондаков, 2006).

Существуют исследования, показывающие, что возможна ситуация, при которой высокое (по градации, разработанной для зерновых культур) содержание обменных форм кальция в почве соотносится с низкой обеспеченностью растений этим элементом согласно листовой диагностике (Леоничева и др., 2018; Leonicheva et al., 2021).

Подытоживая обзор по проблеме, можно отметить следующее:

1) Роль кальция для обеспечения нормального роста и развития любого растительного организма крайне важна и многообразна.

2) Обеспечение растений оптимальным кальциевым питанием – один из приоритетов в развитии агрохимической химии.

3) Как избыток, так и недостаток кальция приводит к существенному снижению потенциальной урожайности и качества различных сельскохозяйственных культур, в т.ч. развитию различных физиологических заболеваний плодов плодово-ягодных культур.

4) На данный момент эффективность корневых и некорневых кальциевых удобрений для повышения качества плодов яблони до конца не изучена.

5) Возможности прогнозирования кальциевого статуса плодов для предсказания рисков развития физиологических заболеваний на ранней стадии на данный момент практически отсутствуют. При этом существует острая необходимость в разработке методик подобной ранней диагностики.

ГЛАВА 2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ, ОБЪЕКТЫ, МЕТОДИКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследования были агросерая почва и деревья яблони сорта Синап орловский, произрастающие в опытно-производственных насаждениях ФГБНУ ВНИИСПК (Орловская область). Исследования проводились в садах, посаженных в 1992 и 2013 гг. и имеющих схему размещения деревьев 6×3 м. В саду 1992 г. посадки изучались деревья на полукарликовом вставочном подвое 3-4-98, в саду 2013 г. посадки деревьев были привиты на среднерослый подвой 54-118.

Синап орловский - сорт позднезимнего срока созревания, получен во Всероссийском НИИ селекции плодовых культур и Всесоюзном НИИ садоводства им. И. В. Мичурина. В средней зоне садоводства России районирован в областях Северо-Западного, Средневолжского, Центрального и Центрально-Черноземного регионов. Съемная зрелость в условиях Орла наступает в последних числах сентября, потребительский период продолжается с ноября до мая. Сорт скороплодный, со стабильными урожаями по годам. Средняя урожайность 170 ц/га. При недостатке кальция плоды могут повреждаться горькой ямчатостью (Седов, 2005, 2011).



Рисунок 4 – Общий вид изучаемого среднерослого яблоневого сада 1992 г. посадки (Опыт 1)



Рисунок 5 – Общий вид изучаемого среднерослого яблоневого сада 2013 г. посадки (Опыт 2)

Агросерые почвы на территории опытного хозяйства сформированы на лессовидных суглинках, подстилаемых доломитовыми известняками, агрохимические показатели почвы в исследуемых садах представлены в Таблице 1.

Таблица 1 - Агрохимические показатели почвы полевых опытов

Глубина, см	рН _{KCl}	Гумус, %	N _{общ} , ммоль /100 г	Содержание			
				P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺
				мг/кг		ммоль/100 г	
Сад 1992 г. посадки							
0...20	5,39	4,77	3,63	189,75	152,50	14,98	4,39
20...40	5,16	3,90	4,10	141,00	92,40	15,59	4,58
40...60	6,36	2,61	2,40	83,10	90,65	14,76	4,77
Сад 2013 г. посадки							
0...20	4,96	3,89	4,24	177,12	75,68	15,65	4,12
20...40	5,00	3,27	4,15	129,18	58,00	15,46	4,61
40...60	4,96	2,16	3,82	128,48	56,12	14,60	3,33

Опыт 1. В саду 1992 г. посадки с 2011 по 2015 гг. лабораторией агрохимии ФГБНУ ВНИИСПК проводился полевой опыт, целью которого было изучить влияние отдельных и совместных некорневых подкормок

борной кислотой, сульфатом калия и хлористым кальцием на накопление калия, кальция и магния в плодах яблони. Количество и соотношение этих элементов в значительной мере определяют устойчивость плодов к физиологическим заболеваниям в процессе хранения (Гудковский, 1990, Причко и др., 2015; Webster, 1981). Схема данного опыта была разработана с целью исследовать взаимное влияние компонентов некорневых подкормок в поликомпонентных удобрениях.

Пятикратно за период вегетации (в фазы: «розовый бутон», «полное цветение», «опадение лепестков», «грецкий орех» и за 30–40 дней до съема плодов) изучаемые деревья опрыскивали растворами удобрений по схеме: 1. Контроль (обработка водой); 2. Борная кислота (H_3BO_3) - 0,1%; 3. Сульфат калия (K_2SO_4) - 0,3%; 4. Хлористый кальций ($CaCl_2$) - 1%; 5. $H_3BO_3 + K_2SO_4$; 6. $H_3BO_3 + CaCl_2$; 7. $K_2SO_4 + CaCl_2$; 8. $H_3BO_3 + K_2SO_4 + CaCl_2$.

Повторность опыта 3-х кратная, в варианте 6 учетных деревьев. Площадь делянки 36 м², размещение делянок рендомизированное. Помимо некорневых подкормок, в саду применялась агротехника общепринятая для среднерослых неорошаемых садов яблони. Система содержания почвы в междурядьях – залужение, в рядах деревьев – гербицидный пар.

Фолиарные удобрения, их концентрация, а также сроки проведения опрыскиваний выбраны по результатам анализа литературных источников. Такие элементы минерального питания растений как калий, кальций и бор часто используются для некорневых подкормок в виде моноэлементных удобрений и не менее часто являются компонентами полиэлементных препаратов (Stiles and Reid, 1991; Трунов, 2013; Кузин и др., 2021).

Ежегодно в опыте проводилось изучение минерального состава плодов и листьев. Образцы плодов отбирали в фазу съемной зрелости. Образцы листьев отбирали в фазу затухания роста (последняя декада июля) из средней части однолетних приростов.

В образцах плодов, кожицу и мякоть анализировали отдельно, поскольку отдельный анализ минерального состава считается более

эффективным и предлагается многими исследователями при диагностировании потенциальной устойчивости плодов яблони к физиологическим расстройствам при хранении (Amarante et al., 2013; Webster, 1981).

Учёт урожая плодов в Опыте 1 проводили в 2011, 2012, 2013 и 2014 гг., весовым методом, учитывая массу плодов с каждого учётного дерева (Программа и методика..., 1999). В 2015г. после высокой нагрузки урожаем в предыдущем году, а также по причине длительной засухи урожайность была очень низкой, поэтому учёт товарного урожая не производился.

В 2011...2014 гг. плоды передавали в лабораторию биохимической и технологической оценки сортов и хранения ФГБНУ ВНИИСПК для закладки на хранение при температуре +2°C и влажности 85%.

Для выполнения целей настоящей диссертационной работы автор лично принимал участие в определении содержания кальция в образцах плодов и листьев, отобранных в 2014 и 2015 гг.. Данные о накоплении кальция в плодах и листьях, полученные в данном эксперименте лабораторией агрохимии за весь период проведения опыта (2011...2015 гг.), были самостоятельно проанализированы автором с использованием трёхфакторного дисперсионного анализа.

Опыт 2. В саду 2013 г. посадки, начиная с 2015 г., лабораторией агрохимии ФГБНУ ВНИИСПК проводится полевой опыт по изучению эффективности азотных и калийных удобрений при их корневом и некорневом применении. Схема опыта двухфакторная и включает внесение в почву удобрений в дозах: N30K40, N60K80, N90K120 (1-й фактор) и некорневые подкормки растворами мочевины (1%) и сульфата калия (0,3%) (2-й фактор).

Азотные и калийные удобрения в форме прилированной NH_4NO_3 и гранулированного KCl вносили ежегодно весной на глубину 10-15 см. Некорневые подкормки проводились три раза за период вегетации: 1) 1% раствор мочевины в фазу «розовый бутон»; 2) совместно 1% раствор

мочевины и 0,3% раствор сульфата калия в фазу «гречкий орех»; 3) 0,3% раствор сульфата калия за 30-40 дней до съёма плодов.

Фактор А – внесение удобрений в почву Фактор В – некорневые подкормки

1. Контроль (без удобрений)	}	без некорневых обработок
2. N30K40		
3. N60K80		
4. N90K120		
5. Без внесения удобрений в почву		двукратная в течение периода вегетации обработка мочевиной и сульфатом калия
6. N30K40		
7. N60K80		
8. N90K120		

Повторность опыта - четырёхкратная, на каждой учётной делянке расположено 5 деревьев. Делянки отделяются друг от друга 3 защитными деревьями. Расположение опытных делянок – систематическое со смещением (Таблица 2).

Таблица 2 - Размещение опытных делянок в саду

повторность	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>
	<i>Защитные деревья</i>			
Варианты опыта	8	7	6	5
	7	6	5	8
	6	5	8	7
	5	8	7	6
	4	3	2	1
	3	2	1	4
	2	1	4	3
	1	4	3	2
ряды	7	8	9	10

С 2013 по 2017 гг. почва сада содержалась под чёрным паром, в 2018 г. проведено залужение междурядий, тогда как в рядах деревьев почву обрабатывали гербицидами.

Этот опыт послужил наиболее удобным объектом для выполнения целей и задач диссертационной работы, поскольку он проводился с деревьями сорта Синап орловский, плоды которого подвержены Са-дефицитным физиологическим расстройствам. В контрольном варианте опыта изучалось влияние природных факторов на кальциевый режим сада, а варианты с применением удобрений позволили исследовать влияние агротехнических факторов.

Ежегодно с мая по сентябрь в подкронной зоне деревьев на расстоянии 1,0...1,5 м от штамба с глубин 0...20, 20...40 и 40...60 см отбирали почвенные пробы, в которых определяли содержание обменных и водорастворимых соединений кальция и калия, а также содержание нитратов и обменного аммония.

Образцы листьев отбирали в последней декаде июля из средней части однолетних приростов, образцы плодов - в фазу съёмной зрелости. В данном опыте анализировались смешанные пробы плодов, включающие мякоть и кожицу. Для получения таких проб с противоположных сторон каждого плода радиально вырезали 2 сегмента, включающих все внутренние и поверхностные ткани плода. Средняя проба с каждой делянки составляла не менее 20 плодов. (Программа и методика..., 1999).

Учёт урожая плодов проводили в 2017, 2018 и 2019 гг., весовым методом, учитывая массу плодов с каждого учётного дерева (Программа и методика..., 1999).

Статистическая обработка экспериментального материала проведена методами дисперсионного и корреляционного анализа с использованием компьютерных программ Microsoft excel, TVA, Statistica 10.

2.2. Климатические и агрометеорологические условия проведения исследования

Климат Орловской области умеренно-континентальный. Среднегодовая температура воздуха составляет 4...5 °С. Температура самого теплого месяца (июля) – 17,9...19,6°С, а наиболее холодного (января) – -9,0...-10°С. Абсолютный минимум температуры воздуха за многолетний период составляет по области -39°С, а абсолютный максимум +37°С. Общая продолжительность периода с положительной среднесуточной температурой воздуха равна в году 215...225 дням. Период со средними суточными температурами воздуха выше 5°С начинается в середине апреля и заканчивается в середине октября, продолжительность его - 175...185 дней.

По среднегодовым данным заморозки прекращаются в регионе во второй пятидневке мая (возможные колебания сроков заморозков – с первой декады апреля до первой декады июня). Средние даты осенних заморозков приходятся на конец сентября. Средняя продолжительность безморозного периода составляет 135...150 дней.

Осадков выпадает 490...580 мм (наименьшее количество их – в феврале и марте – 20...25 мм, в апреле – 35...45 мм, в мае – 45...55мм, в июне – 65...80 мм, наибольшее количество – в июле – 75...90 мм, в августе – 50...65, в сентябре и октябре 40...50 мм, в ноябре и декабре 30...40 мм, в январе – 25...35 мм). Максимальной высоты снежный покров достигает с середины февраля до середины марта. Средняя его высота – 20...25 см.

Метеоусловия периода исследований представлены в Таблице 3. Как видно из таблицы, период проведения исследований включал в себя годы, сходные по уровню температуры, но существенно различающиеся по количеству выпавших осадков. В 2015 году наблюдалась существенная засуха в первой половине периода вегетации, а также в августе. В июле и сентябре отмечено достаточно высокое количество выпавших осадков. 2016 и 2017 год характеризовались оптимальным уровнем увлажнения на протяжении всего

периода вегетации до сентября. В сентябре наблюдалось крайне низкое количество выпавших осадков. В 2018 году мы наблюдали 3 засушливых месяца, очень высокое количество выпавших осадков в июле и оптимальное увлажнение в сентябре. В 2019 году во все месяцы, кроме июня, выпало оптимальное количество осадков. В 2020 году мы наблюдали контрастные условия увлажнения – в частности, в мае и июле ГТК был выше 1,6, то есть мы наблюдали условия переувлажнения, в июне ГТК был в засушливом диапазоне (0,8 ед.), а конец вегетации характеризовался засушливыми условиями (ГТК 0,5 в августе и сентябре).

Таблица 3 - Метеоусловия периода проведения исследований

	2015			2016			2017		
	Т воздуха, °С	Сумма осадков, мм	ГТК*	Т воздуха, °С	Сумма осадков, мм	ГТК	Т воздуха, °С	Сумма осадков, мм	ГТК
Май	19,5	43,1	0,8	13,1	46,5	1,2	12,3	56,3	1,2
Июнь	16,8	29,2	0,5	17,4	46,5	0,9	16	59,6	1,4
Июль	18,3	71,1	1,3	20,3	66,5	1,1	18,6	75	1,3
Август	17,3	1,7	0,1	18	64,3	1,1	19,2	100,8	1,7
Сентябрь	14	45,8	1,1	11,1	14	0,2	13	13,7	0,4
	2018			2019			2020		
	Т воздуха, °С	Сумма осадков, мм	ГТК	Т воздуха, °С	Сумма осадков, мм	ГТК	Т воздуха, °С	Сумма осадков, мм	ГТК
Май	16,4	31,4	0,6	15,6	85	1,8	11,3	59,1	1,7
Июнь	17,5	18,2	0,4	20,5	20,7	0,3	19,9	46,4	0,8
Июль	19,9	119,9	2	17,4	49,8	0,9	19,6	111,6	1,8
Август	18,4	11,2	0,2	17,1	54,7	1	18,2	26	0,5
Сентябрь	14,9	42,5	0,9	12,5	50,2	0,9	15,2	23,5	0,5

*Гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова

В течение трёх лет исследования (2016, 2017 и 2020 годы) мы наблюдали холодную весну, что приводило к достаточно позднему весеннему возобновлению вегетации растений и смещение сроков прохождения растениями фаз вегетации. 2018 и 2019 годы, напротив, отличались достаточно тёплым маем и раннем весенним возобновлением вегетации.

Таким образом, проведённое нами исследование охватывает периоды вегетации с различными гидротермическими условиями и позволяет более точно оценить вклад этих факторов в изменение кальциевого статуса системы «почва-растение» вступающего в плодоношение яблоневого сада.

2.3 Методики, используемые при проведении исследований

Анализ образцов почвы и растений проводился в лаборатории агрохимии ФГБНУ ВНИИСПК.

Отбор проб почвы производился в соответствии с ГОСТом 17.4.4.02 – 84. «Почвы. Методы отбора и подготовки почв для химического, биологического и гельминтологического анализа» и «Программой и методикой сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур» (1999). Пробы в Опыте 2 отбирали ежегодно с мая по сентябрь в подкронной зоне деревьев на расстоянии 1,0...1,5 м от штамба с глубин 0...20, 20...40 и 40...60 см. В пробах определяли содержание обменных и водорастворимых соединений кальция и калия, а также содержание нитратов и обменного аммония.

Отбор образцов листьев проводился ежегодно в последней декаде июля со средней части ростовых побегов текущего года по 10-12 листьев с дерева, в утренние часы. Плоды отбирались в фазу полной зрелости. Образцы ветвей отбирались ранней весной в ходе проведения ранневесенней обрезки.

Агрохимические и физико-химические показатели определялись по общепринятым методикам:

- обменная кислотность (pH_{KCl}) в 0,1 н. растворе хлористого калия, потенциметрически на рН – метре (ГОСТ 26483 – 85);

- гидролитическая (общая) кислотность по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212 - 91);

- содержание обменных форм кальция – комплексометрическим методом с использованием комплексона – III (EDTA-Na₂) (ГОСТ 26487-85);

- определение гумуса по методу Тюрина титриметрически (ГОСТ 26213-91);

- определение содержания подвижного фосфора и обменного калия в почвенных вытяжках по Кирсанову (ГОСТ 26207 - 91);

- определение содержания водорастворимого калия - в водной вытяжке при соотношении почвы и воды 1: 5 (Практикум по агрохимии, 2001);

- определение содержания кальция в водной вытяжке - комплексонометрическим методом с использованием комплексона – III (EDTA-Na₂) (ГОСТ 26428—85);

- определение обменного аммония по методу ЦИНАО (ГОСТ 26489-85);

- определение содержания нитратов в почве ионометрически (ГОСТ 26951-86);

- определение влажности почвы – высушиванием почвенного образца до постоянного веса на анализаторе влажности ЭВЛАС-2М;

Анализ растительных образцов (плодов, листьев, побегов) проводился по следующим методикам:

- сухое озоление в муфельной печи при температуре 450°С и растворение золы в 20% HCl (Практикум по агрохимии, 2001);

- содержание кальция в растворе золы методом комплексонометрического титрования с использованием комплексона – III (EDTA-Na₂) (Практикум по агрохимии, 1989);

Учёт урожая проводили весовым методом (Программа и методика..., 1999).

Отдельные методики и уточнения к ним изложены в соответствующих экспериментальных главах диссертации.

ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ НЕКОРНЕВЫХ ПОДКОРМОК БОР-, КАЛИЙ- И КАЛЬЦИЙСОДЕРЖАЩИМИ УДОБРЕНИЯМИ НА СОДЕРЖАНИЕ КАЛЬЦИЯ В ПЛОДАХ И ЛИСТЬЯХ ЯБЛОНИ (ОПЫТ 1)¹

Исследования, проведённые с 20-летними деревьями яблони в течение пяти периодов вегетации показали, что наиболее значимыми факторами, влияющими на накопление кальция в плодах и листьях, были метеоусловия и плодовая нагрузка деревьев, а эффект фолиарных удобрений проявлялся слабее. Данные об уровне кальция в листьях и тканях плодов, представленные в Таблице 4, показывают, что содержание кальция в плодах и листьях в разные годы различалось в 2...2,5 раза, тогда как применение удобрений изменяло значения показателя не более, чем на 30...60%.

О значительных колебаниях уровня кальция в плодах в разные годы сообщают многие авторы (Neilsen and Edwards, 1982; Сидорова и др., 2016). Torres et al. (2017), изучавшие в течение четырёх последовательных сезонов влияние различных агротехнических приёмов на содержание кальция и проявления горькой ямчатости у плодов яблони, отмечают, что влияние условий конкретного года на изучаемые показатели было сильнее, чем эффект от применявшихся кальцийсодержащих удобрений. Поскольку исследование Torres et al. проводилось в орошаемом саду, различия по годам были связаны преимущественно с характерной для яблони периодичностью плодоношения.

Изучаемый в нашем опыте триплоидный сорт Синап орловский отличается достаточно регулярным плодоношением, однако за период 2011...2015 гг. колебания урожайности имели место (Приложение 14). Так в

¹ В данной главе обсуждаются результаты диссертационной работы, опубликованные в статьях по теме диссертации:

1. **Столяров, М. Е.** Влияние некорневых подкормок на накопление калия и кальция в плодах яблони / М. Е. Столяров // Плодоводство и виноградарство Юга России. – 2017. – № 48(6). – С. 126-134.
2. Леоничева, Е.В. Влияние некорневых подкормок на содержание калия, кальция и магния в плодах двух сортов яблони / Е. В. Леоничева, Т. А. Роева, Л. И. Леонтьева, О.А. Ветрова, **М.Е. Столяров**// Агрохимия. – 2018. – № 8. – С. 22-33.
3. Леоничева, Е.В. Содержание кальция в плодах и листьях яблони в зависимости от некорневых подкормок / Е. В. Леоничева, Т. А. Роева, Л. И. Леонтьева, **М.Е. Столяров**, М.А. Макаркина // Садоводство и виноградарство. – 2018. – № 5. – С. 49-57.

среднем по всем вариантам *Опыта 1* продуктивность деревьев была 17, 40, 12 и 52 кг/дерево соответственно в 2011, 2012, 2013 и 2014 гг..

Таблица 4 – Содержание кальция в плодах и листьях яблони сорта Синап орловский, 2011...2015 гг. (Опыт 1)

Фактор С (обработки CaCl ₂)	Фактор А (обработки Н ₃ ВО ₃ и К ₂ SO ₄)	Фактор В (год)					Сред- ние АС	Сред- ние С
		2011	2012	2013	2014	2015		
Са в мякоти плодов, мг/100 г сырой массы								
Без обработок	Контроль (вода)	8,63	7,68	4,96	6,34	6,66	6,85	7,19
	Н ₃ ВО ₃ - 0,1%	10,88	7,46	4,37	7,57	6,77	7,47	
	К ₂ SO ₄ - 0,3%	12,58*	8,21	3,84	6,33	7,68	7,76	
	Н ₃ ВО ₃ + К ₂ SO ₄	9,69	6,02	3,46	6,77	7,57	6,70	
CaCl ₂ - 1%	CaCl ₂ - 1%	7,83	7,89	3,36	7,20	7,14	6,60	7,37
	Н ₃ ВО ₃ + CaCl ₂	9,92	6,28	3,41	7,89	6,93	6,88	
	К ₂ SO ₄ + CaCl ₂	9,05	10,66*	3,36	8,40	6,77	7,65	
	Н ₃ ВО ₃ + К ₂ SO ₄ + CaCl ₂	11,52*	8,85	3,94	10,29*	7,14	8,35*	
Средние В		10,01	7,88	3,84	7,60	7,08		
НСР _{0,05} А=0,70 НСР _{0,05} В=0,79 НСР _{0,05} С = 0,50 НСР _{0,05} АВ =1,58 НСР _{0,05} АС=1,00 НСР _{0,05} АВС= 2,23								
Са в кожце плодов, мг/100 г сырой массы								
Без обработок	Контроль (вода)	22,36	15,79	8,59	14,33	13,38	14,89	14,24
	Н ₃ ВО ₃ - 0,1%	18,52*	14,72	7,30	16,21	15,46	14,44	
	К ₂ SO ₄ - 0,3%	18,16*	15,15	6,66	14,98	16,21	14,23	
	Н ₃ ВО ₃ + К ₂ SO ₄	14,90*	12,16*	7,41	14,66	17,82*	13,39	
CaCl ₂ - 1%	CaCl ₂ - 1%	16,86*	15,04	7,52	15,52	13,22	13,63	13,73
	Н ₃ ВО ₃ + CaCl ₂	15,25*	13,87	6,88	13,76	17,49*	13,45	
	К ₂ SO ₄ + CaCl ₂	15,23*	17,76	6,88	16,13	12,72	13,75	
	Н ₃ ВО ₃ + К ₂ SO ₄ + CaCl ₂	15,55*	13,97	8,05	17,65	15,36	14,11	
Средние В		17,10	14,81	7,43	15,40	15,21		
НСР _{0,05} А =1,14 НСР _{0,05} В=1,28 НСР _{0,05} С = 0,81 НСР _{0,05} АВ =2,55 НСР _{0,05} АС=1,61 НСР _{0,05} АВС= 3,61								
Са в листьях, % сух. в-ва								
Без обработок	Контроль (вода)	0,50	0,39	0,82	1,07	0,85	0,72	0,72
	Н ₃ ВО ₃ - 0,1%	0,53	0,43	0,80	0,94	0,85	0,71	
	К ₂ SO ₄ - 0,3%	0,48	0,38	0,98*	1,08	0,89	0,76	
	Н ₃ ВО ₃ + К ₂ SO ₄	0,50	0,41	0,93	1,00	0,76	0,72	
CaCl ₂ - 1%	CaCl ₂ - 1%	0,50	0,40	1,03*	1,11	0,81	0,77	0,77
	Н ₃ ВО ₃ + CaCl ₂	0,48	0,42	0,94	1,20	0,87	0,78	
	К ₂ SO ₄ + CaCl ₂	0,44	0,45	0,95	1,05	0,84	0,75	
	Н ₃ ВО ₃ + К ₂ SO ₄ + CaCl ₂	0,50	0,39	0,82	1,07	0,85	0,72	
Средние В		0,50	0,41	0,92	1,07	0,84		
НСР _{0,05} А =0,05 НСР _{0,05} В=0,06 НСР _{0,05} С = 0,04 НСР _{0,05} АВ =0,12 НСР _{0,05} АС=0,07 НСР _{0,05} АВС= 0,16								

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

В 2015 г. после высокой плодовой нагрузки в предыдущем году, а также по причине длительной засухи, урожайность была очень низкой, поэтому учёт товарного урожая не производился. Некорневые подкормки не оказывали

статистически значимого влияния на продуктивность Синапа орловского за время проведения исследований.

Поскольку процессы поступления кальция в корни и транспорта его в надземную часть растения тесно связаны с водным режимом, метеоусловия вегетационного периода являются значимым фактором, влияющим на накопление элемента в плодах и листьях. Особенности метеоусловий в период проведения исследований в *Опыте 1* показаны в Таблице 5.

Таблица 5 – Особенности метеоусловий периодов вегетации 2011...2015 гг.

Годы	Май	Июнь	Июль	Август
Среднемесячная температура, °С				
2011	13,8	18,4	21,4	17,0
2012	15,3	16,8	19,9	17,6
2013	16,5	18,7	17,6	16,8
2014	15,0	14,6	18,9	17,6
2015	15,3	16,8	18,3	17,3
Средненоголетняя	13,0	16,9	18,5	17,1
Сумма осадков, мм				
2011	17,2	12,2	37,0	100,6
2012	12,2	44,1	23,7	63,0
2013	37,0	40,0	37,1	33,2
2014	100,6	55,7	20,0	23,4
2015	24,8	29,2	71,3	1,7
Средненоголетняя	36,3	65,1	88,0	65,7

2011 и 2012 годы характеризовались повышенной температурой воздуха, а также недостаточным количеством осадков в период с мая по июль. В 2013 г. наблюдались: значительное количество снега в зимний период, холодная весна и равномерное распределение осадков в течение лета, что обеспечило благоприятную влажность почвы в саду в течение всего периода вегетации. Весенне-летний период 2014 г. был контрастным по условиям увлажнения: после обильных осадков в мае и июне в июле началась засуха. При этом недостаточное выпадение осадков продолжалось вплоть до июля 2015 г. В этом месяце выпало 71,3 мм осадков, что близко к средненоголетнему уровню, но в августе 2015 г. засуха продолжилась.

Наиболее известным критерием риска развития горькой ямчатости яблок является содержание в них кальция, которое, по мнению многих исследователей, должно быть не менее 5 мг/100 г сырой массы (Гудковский,

1990; Amarante et al., 2013). Для сортов Юга России установлен оптимум содержания элемента в наружном эпидермисе яблок – 11,4...13 мг/100 г сырой массы (Причко, 2015). Исследования, проведённые в ФГБНУ ВНИИСПК в 2015 и 2016 гг., показали, что параметры оптимального элементного состава плодов, предлагаемые для южных сортов яблони, близки к показателям плодов сорта Синап орловский, проявившим хорошую лёжкоспособность в условиях Орловской области (Леоничева и др., 2017).

За пять лет исследований самая низкая концентрация кальция в яблоках (как в мякоти, так и в кожице) наблюдалась в малоурожайном, умеренно влажном 2013 г. (в 2...2,6 раза меньше, чем в другие годы) (Таблица 4). В этот год в среднем по всем вариантам опыта содержание элемента в кожице плодов было на 35% ниже оптимума. По данным, предоставленным лабораторией биохимической и технологической оценки сортов и хранения ФГБНУ ВНИИСПК, доля плодов урожая 2013 г., поражённых в ходе хранения горькой ямчатостью, была наибольшей за период исследований и составила в среднем по опыту 16,7%. Уменьшение уровня кальция в плодах 12 сортов яблони в 2013 г., по сравнению с предшествующим годом, наблюдали в садах Орловской области и другие исследователи (Сидорова и др., 2016).

Поскольку опрыскивания яблони кальцийсодержащими соединениями являются наиболее распространённым приёмом оптимизации содержания кальция в плодах, для статистической обработки результатов эксперимента был использован трёхфакторный дисперсионный анализ, где «обработки CaCl_2 » рассматривались как отдельный фактор (Таблица 4, фактор С).

Независимо от наличия кальция в составе удобрений, все обработки оказывали значимое влияние на уровень кальция в мякоти, либо кожице хотя бы в один год исследований. Влияние фолиарных удобрений, не содержащих кальция, на поступление этого элемента в ткани плодов может быть связано с их воздействием на процессы водного обмена. Т.А.Роева и соавторы (2016), изучавшие в *Опыте 1* влияние некорневых подкормок на водный режим деревьев, наблюдали в 2014...2015 гг. у обработанных растений изменения таких физиологических показателей, как оводнённость листьев и фракционный состав воды.

Несмотря на популярность у садоводов обработок кальцийсодержащими соединениями, наши исследования показали, что наличие кальция в составе удобрений не гарантирует более высокую его концентрацию в плодах. В среднем за пять лет эксперимента содержание кальция в мякоти и кожице плодов, получавших и не получавших CaCl_2 при опрыскиваниях достоверно не различалось (Таблица 4, средние по фактору С). В то же время присутствие хлористого кальция в составе листовых удобрений способствовало более высокой концентрации элемента в листьях, в среднем за пять лет.

Влияние некорневых подкормок на накопление кальция в тканях плодов и листьях было нестабильным. Ни один из вариантов опыта не давал одинакового эффекта на протяжении всех пяти лет проведения исследований. Например, обработки смесями $\text{H}_3\text{BO}_3+\text{K}_2\text{SO}_4$ и $\text{H}_3\text{BO}_3+\text{CaCl}_2$ в 2011 г. способствовали достоверному уменьшению содержания кальция в кожице яблок, тогда как в 2015 г. наблюдался противоположный эффект. Важно отметить, что в 2013 г., когда в среднем по опыту плоды имели самый низкий кальциевый статус, положительного эффекта от опрыскиваний мы не наблюдали – во всех вариантах содержание кальция в тканях плодов было ниже контроля. Результаты наших исследований показали, что опрыскивание растений растворами отдельных веществ либо многокомпонентными смесями усложняет естественные процессы формирования минерального состава плодов и может приводить к их «разбалансировке».

При хранении плодов Синапа орловского урожая 2011...2014 гг. была установлена достоверная отрицательная корреляция между содержанием кальция в кожице и долей плодов, поражённых горькой ямчатостью в конце периода хранения (величина коэффициента корреляции $r = -0,53$ при уровне значимости 1%).

Оптимальная концентрация кальция в листьях яблони, свидетельствующая о достаточной обеспеченности растений этим элементом, находится в пределах 1,3...2,0 % сух. массы (Кондаков, 2007; Кузин и др., 2021; Церлинг, 1980; Stiles, Reid, 1991; Watkins et al., 2004). Хотя содержание обменного кальция в почве сада, показанное в Таблице 1, находится между повышенным и высоким уровнем (Методические указания..., 2003) на

протяжении пяти лет исследований содержание кальция в листьях учётных деревьев не достигало оптимальных значений (Таблица 4).

Неудовлетворительные условия кальциевого питания яблони, выявленные по результатам листовой диагностики, могут быть связаны с дисбалансом катионов в почвенном растворе, поскольку почва опытного участка имеет очень высокое содержание обменного магния, а содержание обменного калия варьирует от среднего до высокого уровня (по градации для плодовых культур).

Концентрация кальция в листьях сильно различалась по годам, в то время как влияние вариантов опыта на этот показатель было слабым. Только в 2013 г. некорневые подкормки K_2SO_4 либо $CaCl_2$ повышали уровень кальция в листьях (Таблица 4).

Сопоставляя данные о варьировании уровня кальция в плодах и листьях в разные годы, следует отметить, что эти показатели изменялись не синхронно. 2011 и 2012 г. отличались наиболее низким содержанием кальция в листьях ($0,049 \pm 0,02$ и $0,41 \pm 0,02$ % сух. в-ва соответственно), а в последующие годы значения показателя были в 2 раза выше и варьировали в пределах $0,80 \dots 1,20\%$. В плодах самое высокое содержание кальция отмечено в 2011 г., а наименьшее – в 2013 г. (Таблица 4). Такое несоответствие показывает недостаточную эффективность листовой диагностики при прогнозе накопления кальция в плодах.

Таким образом, исследования особенностей накопления кальция в плодах и листьях 20-летних деревьев яблони сорта Синап орловский показали, что в изучаемом саду влияние природных факторов (метеоусловия, периодичность плодоношения) на изучаемые показатели было более значимым, чем влияние такого элемента агротехники, как некорневые подкормки. Недостаточное содержание кальция в листьях при высоком уровне обменного кальция в почве, а также резкие колебания кальциевого статуса плодов в разные годы, показывают необходимость более детального изучения процессов кальциевого питания яблони с учётом условий почвенного питания кальцием в каждом конкретном периоде вегетации.

ГЛАВА 4. ИЗМЕНЕНИЕ АГРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ ЯБЛОНЕВОГО САДА ПРИ РЕГУЛЯРНОМ ПРИМЕНЕНИИ АЗОТНЫХ И КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ²

4.1. Влияние азотных и калийных удобрений на показатели кислотности и содержание подвижного фосфора

Влияние систематического применения минеральных удобрений на почвенную кислотность хорошо известно и многократно показано как в опытах с однолетними растениями, так и с многолетними древесными культурами (Стюхин и др., 2007; Окорков и др., 2010; Аканова и др., 2011). Используемые в нашем эксперименте удобрения – хлористый калий и аммиачная селитра – являются физиологически кислыми, поэтому увеличение кислотности в результате их ежегодного применения было ожидаемым, а практический интерес представляли скорость протекания этого процесса и его влияние на кальциевый статус почвы.

Благодаря высокой степени насыщенности почвенно-поглощающего комплекса основаниями агросерым почвам Русской равнины свойственна

² В данной главе обсуждаются результаты диссертационной работы автора, опубликованные в статьях по теме диссертации:

1. **Столяров М.Е.** Динамика обменных форм калия в серых лесных почвах молодого яблоневого сада при внесении минеральных удобрений / М. Е. Столяров // Плодоводство и ягодоводство России. – 2017. – Т. 48. – № 2. – С. 286-289.
2. **Столяров М. Е.** Содержание обменных форм калия в почве садового агроценоза яблони при почвенном и фолиарном внесении минеральных удобрений / М. Е. Столяров // Агрохимия в XXI веке : Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной памяти академика РАН В.Г. Минеева, Москва, 27–28 сентября 2018 года / Под редакцией В.А. Романенкова. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, 2018. – С. 123-127.
3. **Столяров М. Е.** Динамика доступных форм азота в серых лесных почвах молодого яблоневого сада / М. Е. Столяров // Селекция и сорторазведение садовых культур. – 2018. – Т. 5. – № 1. – С. 127-131.
4. Леоничева Е.В. Сезонная динамика минерального азота в агросерой почве яблоневого сада / Е. В. Леоничева, Т. А. Роева, Л. И. Леонтьева, **М. Е. Столяров** // Вестник КрасГАУ. – 2020. – № 11(164). – С. 87-97.
5. Leonicheva E.V. Nitrogen regime at Naplic Luvisol in orchards at fertilization/ E.V. Leonicheva, T.A. Roeva, L.I. Leonteva, **M.E. Stolyarov**// BIO Web of Conferences. – 2021. – V.(36). – art. 03013.
6. Леоничева Е.В. Оценка динамики минерального азота в агросерой почве под семечковыми и косточковыми садами / Е. В. Леоничева, Т. А. Роева, Л. И. Леонтьева, **М. Е. Столяров** // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2022. – № 5. – С. 16-20.

достаточно сильная кислотно-основная буферность. Показатели почвенной кислотности имеют сравнительно низкое пространственное и временное варьирование. Поэтому в изучаемом полевом опыте оценка влияния удобрений на показатели кислотности проводилась не ежегодно, а с промежутком в 5 лет. Результаты исследования представлены в Таблице 6.

Н.Н. Сергеева и соавторы (2018), изучавшие динамику показателей плодородия чернозёмных почв под яблоневыми садами в Краснодарском крае и Центрально-чернозёмном регионе, сообщают об увеличении кислотности водной вытяжки из почвы во время вступления садов в период регулярных устойчивых урожаев. Этот эффект исследователи объясняют подкисляющим действием корневых выделений деревьев в зоне активной корневой деятельности.

Подкисление агросерой почвы в результате однократного применения мочевины и сульфата калия в дозе N120K160 наблюдали в вишнёвом саду Roeva et al. (2022). В дальнейшем в этом саду произошло уменьшение уровня pH_{KCl} после 5 лет применения удобрений в более низких дозах N30K40 ... N90K120.

В нашем опыте в первый год применения удобрений (2015) существенных различий по показателям pH_{KCl} и гидролитической (общей) кислотности не наблюдалось (Таблица 6).

После 5 лет применения азотных и калийных удобрений ситуация существенно поменялась – в слое 0...20 см на всех вариантах с использованием удобрений показатель pH_{KCl} стал существенно ниже, чем на контроле. В слоях 20...40 см и 40...60 см тенденция к снижению pH солевой вытяжки сохранилась, но эффект был выражен несколько слабее на уровне тенденции.

Оценка уровня общей кислотности $H_{общ.}$ в вариантах с использованием минеральных удобрений подтвердила подкисление верхнего слоя почвы. Так в слое 0...20 см при использовании доз удобрений N30K40, N60K80 и N90K120 показатель $H_{общ.}$ в 2020 г. увеличился соответственно на 18%, 88% и

136% по сравнению с уровнем 2015 г. (Таблица 6). Как и для показателя, характеризующего обменную кислотность, статистически значимое изменение $H_{\text{общ}}$ в результате 6 лет применения удобрений установлено только в слое 0...20 см.

Следует отметить, что двух- и трёхкратное увеличение доз удобрений не способствовало пропорциональному увеличению показателей кислотности. В 2020 г. уровень pH_{KCl} и $H_{\text{общ}}$ в почве удобренных делянок существенно отличался от показателей на контроле, но при этом статистически достоверных различий между вариантами по указанным характеристикам не установлено.

Таблица 6 – Показатели кислотности почвы в полевом опыте.

Варианты опыта	2015 г. (1 год внесения удобрений)		2020 г. (6 лет внесения удобрений)	
	pH_{KCl}	$H_{\text{общ}}$, ммоль/100г	pH_{KCl}	$H_{\text{общ}}$ ммоль/100г
0...20 см				
Контроль (без удобрений)	4,96	4,24	5,01	4,58
N30K40	4,73	5,81	4,60	6,83
N60K80	4,96	3,56	4,59	6,68
N90K120	5,12	2,80	4,58	6,63
НСР ₀₅	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	0,38	1,80
20...40 см				
Контроль (без удобрений)	5,00	4,15	4,93	4,83
N30K40	4,78	5,48	4,68	6,05
N60K80	5,03	4,19	4,85	5,27
N90K120	5,14	3,09	4,96	4,63
НСР ₀₅	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$
40...60 см				
Контроль (без удобрений)	4,96	3,82	5,05	3,72
N30K40	4,86	4,71	4,82	6,40
N60K80	5,06	3,39	5,00	5,03
N90K120	5,19	2,55	4,99	4,31
НСР ₀₅	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$

Хорошо известно, что кислотность почвы оказывает непосредственное влияние на доступность растениям элементов минерального питания (Минеев,

2004; Аканова и др., 2011). В частности, увеличение кислотности почвы может приводить к снижению доступности подвижных форм фосфора и их переводу в недоступные для растений соединения (Минеев, 2004; Комаров и др., 2012).

В нашем опыте не применялись фосфорные удобрения, что обусловлено исходно высоким содержанием подвижных соединений фосфора в почве опытного участка. Высокий уровень фосфора в агросерых почвах на территории опытного хозяйства ФГБНУ ВНИИСПК был достигнут благодаря систематическому внесению органических удобрений и фосфоритованию, проводившимся в 70-е...80-е годы прошлого века. Согласно градации почв по обеспеченности элементами минерального питания, разработанной для плодовых культур (Кондаков, 2007), почва опытного участка имеет высокое содержание подвижного фосфора. Для среднерослых садов яблони, выращиваемых в Центрально-Чернозёмной зоне (к которой относится и Орловская область), установлены высокая эффективность азотных и калийных удобрений и низкая – фосфорных, при условии высокого содержания в почве подвижных фосфатов (Трунов, 2016). Поэтому в нашем эксперименте не производилось внесение фосфорных удобрений, но ежегодно контролировалось содержание подвижных фосфатов в слое почвы 0...60 см. Результаты этого контроля представлены в Таблице 7.

Как видно из данных, представленных в Таблице 7, содержание подвижных форм фосфора в слое 0...60 см агросерой почвы экспериментального сада в течение всего периода исследований находилось на высоком уровне (более 100 мг/кг). Дисперсионный анализ результатов оценки уровня фосфора показал, что несмотря на произошедшее подкисление почвы, внесение удобрений не оказало статистически значимого влияния на её фосфорный статус. При этом различия между уровнем фосфора в разные годы были статистически достоверными во всех изучаемых слоях почвы (Таблица 7, средние по фактору В).

Таблица 7 – Содержание подвижного фосфора (мг/кг) в почве полевого опыта, 2016...2020 гг.

Фактор А (дозы удобрений)	Фактор В (годы исследований)					Средние А
	2016	2017	2018	2019	2020	
0...20 см						
Контроль (без удобрений)	195,95	193,25	163,65	170,40	162,36	177,12
N30K40	202,85	188,90	159,00	176,05	156,40	176,64
N60K80	231,90	199,90	173,85	171,60	184,70	192,39
N90K120	219,30	180,15	205,30	159,75	173,12	187,52
Средние В	212,50	190,55	175,45	169,45	169,14	
По $A_{05} F_{\phi} < F_T$ $HCP_{05}B = 27,18$ по $AB_{05} F_{\phi} < F_T$						
20...40 см						
Контроль (без удобрений)	140,50	146,00	114,10	122,10	123,20	129,18
N30K40	142,85	136,75	142,70	113,10	108,34	128,75
N60K80	166,30	159,45	125,20	126,50	127,99	141,09
N90K120	170,25	134,90	144,70	118,90	137,81	141,31
Средние В	154,98	144,28	131,68	120,15	124,33	
По $A_{05} F_{\phi} < F_T$ $HCP_{05}B = 28,56$ по $AB_{05} F_{\phi} < F_T$						
40...60 см						
Контроль (без удобрений)	147,50	133,35	127,30	127,65	106,59	128,48
N30K40	126,95	135,70	113,85	90,00	100,28	113,36
N60K80	129,40	135,45	128,90	104,95	116,76	123,09
N90K120	152,95	116,05	122,25	113,85	94,90	120,00
Средние В	139,20	130,14	123,08	109,11	104,63	
По $A_{05} F_{\phi} < F_T$ $HCP_{05}B = 23,52$ по $AB_{05} F_{\phi} < F_T$						

В плодоносящих яблоневых садах, выращиваемых на выщелоченном чернозёме в Тамбовской области (Центрально-Чернозёмный регион), выявлена тенденция постепенного снижения количества подвижных фосфатов в пахотном слое почвы на фоне наращивания и стабилизации урожаев яблони (Сергеева и др., 2018). В нашем эксперименте статистически значимое снижение уровня фосфора в слое почвы 0...20 см произошло в 2018 г. на четвёртый год внесения удобрений. В более глубоких слоях почвы достоверное уменьшение содержания подвижных фосфатов произошло в 2019 г. (Таблица 7).

Наблюдавшееся снижение фосфорного фона отчасти может быть связано с возрастающим потреблением фосфора деревьями в процессе роста и плодоношения. Так в среднем по опыту урожайность была 2,7 и 11,0 кг/дерева в 2017 и 2018 гг. соответственно. Однако вынос фосфора с плодами в 2018 г. варьировал от 2 до 4 кг/га в зависимости от варианта опыта, а вынос элемента с обрезаемыми ветвями был в 1,5 раза меньше (Столяров, 2019). Такие параметры выноса недостаточны для наблюдаемого снижения уровня подвижного фосфора, которое только в слое почвы 0...20 см составляет более 50 кг/га.

Также маловероятно, что уменьшение количества подвижного фосфора в нашем эксперименте связано с применением удобрений, поскольку в почве контрольных и удобренных делянок годовая динамика показателя была аналогичной.

Третьей причиной снижения уровня фосфора может быть изменение системы содержания почвы в изучаемом саду. С 2013 г. (посадка сада) до 2017г. почва сада содержалась под чёрным паром, а в 2018 г. было начато залужение междурядий. Таким образом, начиная с 2018 г., почвенный фосфор потребляли не только деревья, но и растущие в междурядьях травы. Е.В. Леоничева и соавторы (2015) установили, что в условиях Орловской области содержание подвижных фосфатов в метровой толще агротёмносерой почвы под 30-летним садом яблони, содержавшейся под чёрным паром, было достоверно выше, чем количество фосфатов в почве сада, содержавшейся под залужением.

Поскольку средний по опыту уровень фосфора в 2019 и 2020 гг. достоверно не отличался, возможно он соответствовал новым условиям равновесия для фосфоросодержащих компонентов почвы, установившимся после формирования травянистого покрова в междурядьях. Для подтверждения этого предположения требуется дальнейший мониторинг фосфорного фона в изучаемом саду.

Следует также отметить, что несмотря на постепенное уменьшение запасов подвижного фосфора в почве сада, в 2020 г. содержание доступных растениям форм элемента во всех изученных слоях почвы оставалось высоким (более 100 мг/кг).

Таким образом, в результате ежегодного в течение шести лет применения азотных и калийных удобрений во вступающем в плодоношение яблонево́м саду отмечается существенное повышение уровня кислотности поверхностного слоя почвы. Кроме того, было установлено, что в почве сада независимо от вариантов опыта происходит постепенное снижение количества подвижных форм фосфора. Эти наблюдения представляют интерес для понимания изменений состояния почвенного кальция, поскольку в агросерых почвах, сформировавшихся на карбонатных лессовидных суглинках, кальций является одним из основных катионов в почвенном растворе и почвенном поглощающем комплексе, и его активность во многом определяет кислотно-основные характеристики почвы. Также следует принимать во внимание, что наиболее подвижной формой фосфора в агросерых почвах является однозамещённый фосфат кальция, поэтому фосфорный и кальциевый режимы почвы – взаимосвязаны.

4.2. Динамика минерального азота в почве сада при внесении удобрений

Эксперимент, проводимый в изучаемом саду с целью совершенствования системы удобрения яблони в конкретных почвенно-климатических условиях, предусматривает внесение в почву возрастающих доз азотных и калийных удобрений. Эти удобрения оказывают комплексное воздействие на плодородие и свойства почвы, в том числе изменяют её поглощательную способность, реакцию почвенного раствора и воздействуют на циклы других биогенных элементов в агроэкосистеме.

Азот является одним из жизненно важных элементов минерального питания. Его дефицит существенно ограничивает рост и продуктивность плодовых деревьев, следовательно, и потребление ими других питательных

элементов. Оптимизация азотного питания деревьев имеет своей главной целью увеличение и стабилизацию продуктивности сада. Соответственно, при возрастании продуктивности можно ожидать, что потребление минеральных элементов, не входящих в состав удобрений, также возрастёт. Следствием этого могут быть изменения в катионно-анионном балансе почвенного раствора. Использование в нашем эксперименте аммиачной селитры в качестве азотного удобрения способствует увеличению концентрации в почве как катионов аммония, так и нитрат ионов. Оценка динамики минеральных соединений азота в почве сада при внесении удобрений важна не только для оценки условий азотного питания растений, но и для понимания процессов, происходящих в почвенном поглощающем комплексе и почвенном растворе.

В данной главе обсуждаются результаты изучения годичной и сезонной динамики минерального азота в 60-сантиметровом слое почвы под яблоневым садом в период с 2016 г. (четвёртый год после посадки деревьев, второй год применения удобрений) по 2020 г. (восьмой год после посадки, шестой год применения удобрений). Динамика минерального азота в слое почвы 0...20 см представлена в Таблице 8, а данные о сезонной динамике показателя в более глубоких слоях почвы показаны в Таблицах в Приложениях 1 и 2.

В.П. Поповой и соавторами (2016) для интенсивных яблоневых садов Краснодарского края предложена следующая группировка почв по степени обеспеченности минеральными формами азота: очень низкий уровень обеспеченности – менее 10 мг/кг, низкий – 10...20 мг/кг, средний - 20...30 мг/кг, повышенный – 30...40 мг/кг, высокий – 40...60 мг/кг, очень высокий – 60...80 мг/кг. Эта группировка хорошо соответствует экспериментальным данным, полученным в садах на агросерых почвах Среднерусской возвышенности (Леоничева и др., 2020, 2021), поэтому используется в настоящей работе для оценки уровня азотного питания яблони.

Таблица 8 - Динамика минерального азота ($\Sigma (N-NH_4 + N-NO_3)$, мг/кг) в слое 0...20 см агросерой почвы яблоневого сада при внесении возрастающих доз удобрений, 2016...2020 гг.

Сроки отбора проб (фактор А)	Дозы удобрений (фактор В)				Средние А
	Контроль	N30K40	N60K80	N90K120	
2016 г.					
Май	22,59	29,98	33,33*	54,58*	35,12
Июнь	30,60	43,73*	52,93*	67,24*	48,63
Июль	28,49	27,68	37,44	37,00	32,65
Август	10,23	12,12	17,07	17,20	14,15
Сентябрь	16,84	20,10	19,78	18,26	18,74
Средние В	21,75	26,72*	32,11*	38,86*	
НСР ₀₅ A=5,12 НСР ₀₅ B=4,58 НСР ₀₅ A×B=10,23					
2017 г.					
Май	22,03	31,58	30,72	62,98	36,83
Июнь	17,48	17,43	65,17	63,56	40,91
Июль	10,44	12,05	10,48	34,45	16,85
Август	9,86	14,38	14,47	41,56	20,06
Сентябрь	14,65	15,19	19,31	22,47	17,90
Средние В	14,89	18,12	28,03*	45,00*	
НСР ₀₅ A=23,32 НСР ₀₅ B=20,86 по АВ ₀₅ F _φ < F _T					
2018 г.					
Май	13,22	29,05	29,44	54,02*	31,43
Июнь	5,86	10,43	9,68	20,90	11,77
Июль	8,62	15,00	16,26	78,53*	29,60
Август	15,06	11,11	16,94	9,39	13,13
Сентябрь	14,39	8,91	10,72	12,71	11,69
Средние В	11,43	14,90	16,61	35,11*	
НСР ₀₅ A=19,18 НСР ₀₅ B=17,15 НСР ₀₅ A×B=38,35					
2019 г.					
Май	12,88	13,77	54,50*	22,98	26,13
Июнь	30,47	33,77	57,92*	42,79	41,24
Июль	32,16	35,64	44,28	54,80	41,72
Август	14,99	16,87	18,12	23,65	18,41
Сентябрь	26,49	32,53	45,57	39,44	36,01
Средние В	23,40	26,52	44,16*	36,73*	
НСР ₀₅ A=11,72 НСР ₀₅ B=10,49 НСР ₀₅ A×B=23,45					
2020 г.					
Май	26,63	45,08	53,99	55,11	45,20
Июнь	16,97	25,16	36,09	108,64*	46,71
Июль	5,03	9,70	17,01	19,92	12,91
Август	18,05	28,35	36,93	50,80	33,53
Сентябрь	15,49	23,39	29,23	46,74	28,71
Средние В	16,43	26,34	34,65*	56,24*	
НСР ₀₅ A=27,13 НСР ₀₅ B=24,27 НСР ₀₅ A×B=54,26					

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

Следует обратить внимание, что в годы проведения исследований в неудобренной почве сада содержание минерального азота в первые месяцы периода вегетации достигало среднего уровня обеспеченности (20...30 мг/кг) практически ежегодно, кроме засушливого 2018 г. (Таблица 8).

Внесение азотных удобрений в дозе 30 кг/га д.в. способствовало статистически значимому увеличению количества минерального азота в почве только в 2016 г., когда почва сада содержалась под чёрным паром, а деревья ещё не давали товарный урожай, следовательно, потребление азота растениями было ниже, чем в последующие годы. В период 2017...2020 гг. количество минерального азота в почве этого варианта было на уровне контроля.

При двукратном увеличении дозы азота (до N60) показатели обеспеченности почвы этим элементом превышали контроль ежегодно, за исключением 2018 г., отличавшегося контрастными условиями увлажнения и повышенной урожайностью. Средний за период вегетации уровень N_{\min} (средние по фактору В) в этом варианте соответствовал среднему, либо – повышенному уровню обеспеченности (Таблица 8).

Внесение азота в дозе 90 кг/га д.в. соответствует средней зональной дозе азота в сильно- и среднерослых яблоневых садах, рекомендуемой для Центрально-чернозёмного региона РФ (Кондаков, 2007; Трунов, 2016). В нашем эксперименте внесение такого количества азотных удобрений ежегодно обеспечивало высокую (более 40 мг/кг) концентрацию минеральных форм азота в первой половине периода вегетации (май...июль). Однако, хотя содержание азота в этом варианте ежегодно превышало контроль, различия между значениями показателя при внесении N90 и N60 были недостоверны (Таблица 8).

Рассматривая годичную и сезонную динамику N_{\min} в более глубоких слоях почвы, следует отметить, что в варианте N90K120 показатель ежегодно был существенно выше контроля как на глубине 20...40 см, так и на глубине

40...60 см (Приложения 1 и 2). Таким образом, часть азота, внесённого с удобрениями, перемещалась в более глубокие слои почвы.

Вымывание азота на глубину было отмечено также и в варианте с внесением N60K80, но только в 2019 и 2020 гг.. Эти два года нельзя считать засушливыми, поскольку сумма осадков с апреля по сентябрь была на 30...40 мм выше, чем в предшествующем 2018 г.. Но в 2016 и 2017 гг. осадков за аналогичный период выпало ещё больше, однако вымывание азота наблюдалось только при внесении наибольшей его дозы - 90 кг/га. Вероятно, при регулярном внесении азотных удобрений в сочетании с калийными происходило постепенное насыщение почвенно-поглощающего комплекса ионами аммония и калия. Со временем ёмкость необменной и обменной фиксации заполняется тем быстрее, чем выше вносимые дозы. Дополнительные количества катионов, поступающие с удобрениями в последующие годы, удерживаются почвой слабее и легче переносятся с гравитационной влагой в периоды обильных осадков.

Изучение сезонной динамики минерального азота показало, что концентрация изучаемых соединений в течение одного периода вегетации может измениться в 2...8 раз, и подобные колебания показателя могут произойти несколько раз за сезон. Независимо от вносимых доз удобрений наибольшие различия в азотном режиме почвы наблюдались с мая по июль. В периоды вегетации 2016...2019 гг. во всех вариантах опыта и во всех изучаемых слоях почвы наблюдалось уменьшение содержания N_{\min} в августе, вероятно связанное с наиболее интенсивным потреблением элемента деревьями в период роста и созревания плодов (таблица 8).

В 2020 г. деревья изучаемого сорта Синап орловский не дали товарного урожая в связи с неблагоприятными метеоусловиями в период цветения, и в этом году, независимо от количества внесённых удобрений содержание минерального азота резко (в 2...5 раз) снизилось в июле после выпадения обильных осадков (более 100 мм).

В нашем эксперименте в качестве азотного удобрения была использована аммиачная селитра, изначально содержащая равное количество азота в аммонийной и нитратной форме. Этот азот не только потребляется растениями, но и участвует в разнообразных процессах ионного обмена, фиксации и микробиологической трансформации. В результате этих процессов соотношение аммония и нитратов в почве непрерывно изменяется. Поскольку катионы аммония активно конкурируют с катионами щелочных и щелочноземельных металлов за позиции в почвенном поглощающем комплексе, интерес представляет не только общее количество минерального азота, но и фракционный состав его соединений. Соотношение аммония и нитратов в изучаемой почве без внесения удобрений показано на Рисунке 6. Также в данном разделе диссертации показана динамика фракционного состава минеральных соединений азота в варианте с внесением удобрений в дозе N90K120 (Рисунок 7). Динамика этих показателей при внесении более низких доз удобрений (N30K40 и N60K80) представлена в Приложениях 7 и 8.

Результаты этого исследования показали, что в течение пяти периодов вегетации минеральный азот находился преимущественно в аммонийной форме. На контроле содержание нитратного азота в почве в 2016, 2019 и 2020 гг. не превышало 10% от общего количества N_{\min} . В 2017 и 2018 гг. в отдельные месяцы доля нитратной формы в общем количестве N_{\min} достигала 25...45% (Рисунок 6).

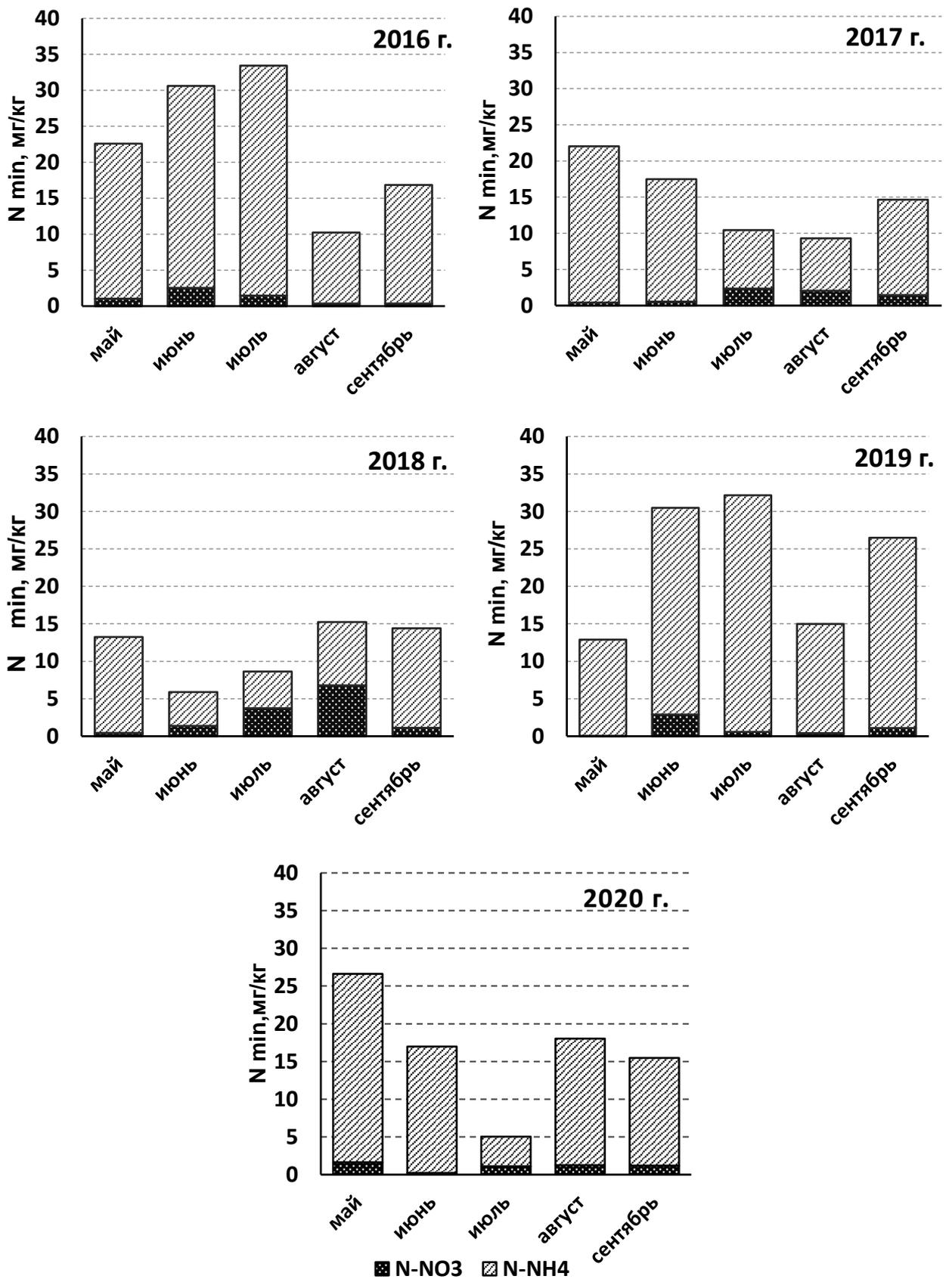


Рисунок 6 – Соотношение аммонийной и нитратной форм азота (мг/кг) в слое почвы 0...20 см без внесения удобрений, 2016...2020 гг.

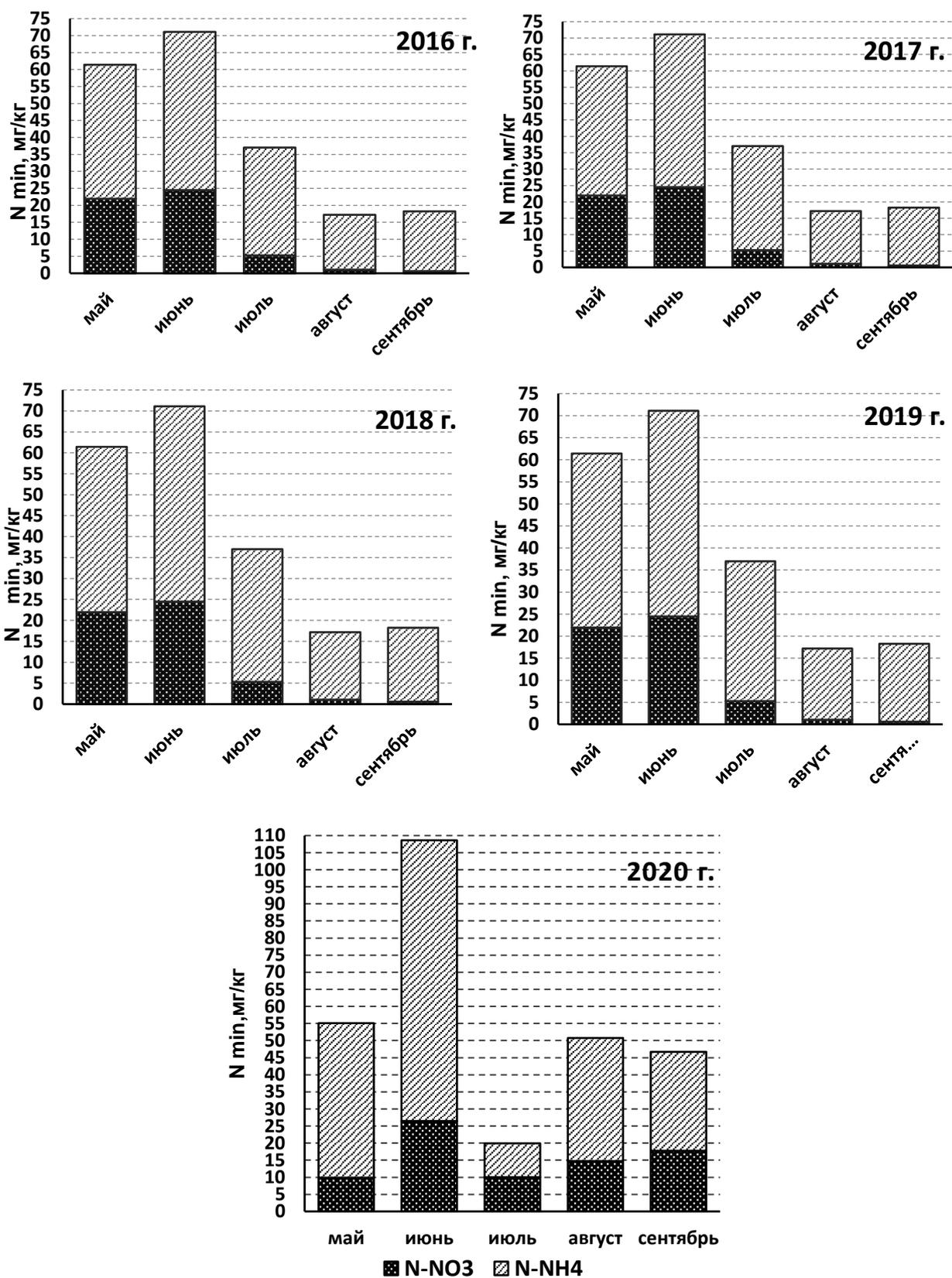


Рисунок 7 – Соотношение аммонийной и нитратной форм азота (мг/кг) в слое почвы 0...20 см при внесении N90K120, 2016...2020 гг.

В почве удобренных делянок, благодаря внесению аммиачной селитры, доля нитратного азота была выше, чем на контроле, особенно в первые месяцы после внесения удобрений – май и июнь (Рисунок 7). Однако, оценивая динамику фракционного состава N_{\min} в почве сада в течение 5 лет, следует отметить, что аммонийная форма азота является преобладающей. При этом, если рассматривать молярное соотношение катионов, концентрация обменного аммония в удобренной почве сопоставима с концентрацией обменного кальция, а при внесении удобрений в первые месяцы вегетационного периода количество катионов аммония может значительно превосходить количество катионов щелочноземельных элементов.

Таким образом, изучение азотного режима агросерой почвы под вступающим в плодоношение яблоневым садом показало совокупное влияние на него метеоусловий, продуктивности деревьев и особенностей потребления ими азота в разные фазы вегетации. Внесение азотных удобрений в дозах 30...90 кг/га д.в. способствовало увеличению содержания N_{\min} в 1,5...5 раз в зависимости от дозы азота. При этом динамика N_{\min} в почве удобренных и удобренных участков была аналогичной. Практически ежегодно во всех вариантах опыта и во всех изучаемых слоях почвы наблюдалось уменьшение содержания N_{\min} в августе, вероятно связанное с наиболее интенсивным потреблением элемента деревьями в период роста и созревания плодов.

При внесении аммиачной селитры в дозе N_{90} кг/га д.в., уровень N_{\min} в почве под садом может быть экстремально высоким, что способствует непродуктивным потерям азота за счёт вымывания и образования газообразных соединений.

Наши исследования показали, что аммонийный азот был преобладающим азотистым минеральным соединением в корнеобитаемом слое агросерой почвы под садом. Периодическое увеличение концентрации обменного аммония в первые месяцы после внесения удобрений может быть причиной ослабления связей катионов калия, кальция и магния с

компонентами почвенного поглощающего комплекса, и увеличения их подвижности в почвенном профиле.

4.3. Динамика доступных растениям соединений калия в почве сада при внесении удобрений

Для яблони, как и для всех культур, накапливающих большое количество сахаров в своей продукции, необходимо хорошее обеспечение растений калием. Катион K^+ является наиболее важным неорганическим осмотическим компонентом растительных клеток (Минеев, 2006). Его достаточный запас в растении необходим для регуляции тургорных процессов, активации многочисленных ферментов, диффузии CO_2 из атмосферы в хлоропласты, а также для флоэмного транспорта сахарозы и распределения фотоассимилятов внутри растения (Медведев, 2005).

Исследования, проведённые в яблоневых садах ЦЧЗ, показывают существенное положительное влияние калийных удобрений на продуктивность яблони как в среднерослых (Трунов, 2016), так и в слаборослых насаждениях, выращиваемых по интенсивным технологиям (Кузин, Трунов, 2016; Кузин и др., 2018). Наряду с увеличением продуктивности, оптимизация калийного питания яблони способствует повышению содержания сахаров в плодах, улучшает их аромат и окраску (Трунов, 2010).

Для суглинистых некарбонатных почв Русской равнины предложена следующая градация уровней обменного калия в почвах плодовых насаждений: низкая обеспеченность деревьев – содержание калия менее 100 мг/кг, средняя обеспеченность – 100...200 мг/кг, высокая – более 200 мг/кг (Кондаков, 2007). Согласно этой группировке, запасы обменного калия в почве экспериментального сада изначально были низкими. Применение калийных удобрений в данном полевом опыте имело целью выявить оптимальные дозы и способы внесения калия, способствующие продуктивности деревьев и улучшению качества плодов.

Известно, что интенсивное систематическое применение калийных удобрений в значительной мере изменяет состав обменных катионов в почве (Якименко, 2018, 2019). Поэтому в результате применения калийных удобрений в нашем саду следует ожидать изменения условий корневого питания яблони кальцием и магнием, которые входят в число наиболее распространённых обменных катионов в почвах лесостепной зоны и конкурируют с катионами калия за позиции в почвенном поглощающем комплексе.

В данной главе представлены результаты изучения годичной и сезонной динамики обменных и водорастворимых соединений калия в почве сада. Считается, что для объективной диагностики калийного состояния пахотных почв целесообразно использовать несколько взаимодополняющих показателей (Якименко, 2019). В нашем эксперименте калийное состояние почвы сада оценивалось на основе определения обменного калия (запасы доступных растениям форм элемента) и калия, переходящего в водную вытяжку (характеризует содержание в почве наиболее доступных соединений элемента в текущий момент времени).

В неудобренной почве под садом в течение периодов вегетации 2016...2020 гг. содержание обменного калия в слое почвы 0...20 см варьировало в пределах $75,68 \pm 3,52$ мг/кг, в слое 20...40 см – $58,00 \pm 6,89$ мг/кг, в слое 40...60 см – $56,12 \pm 6,47$ мг/кг. Для водорастворимого калия аналогичные показатели были соответственно $9,71 \pm 3,70$ мг/кг, $5,37 \pm 0,87$ мг/кг и $6,09 \pm 0,86$ мг/кг.

Несмотря на разницу гидротермических условий, различия между средними уровнями как обменного, так и водорастворимого калия в слоях 0...20, 20...40 и 40...60 см неудобренной почвы в разные годы не были статистически значимыми (Таблицы 9 и 11). Следовательно, потребление калия растущими и вступающими в плодоношение среднерослыми деревьями яблони в первые 8 лет после посадки сада ещё не стало значимым фактором, влияющим на калийное состояние почвы.

Таблица 9 – Средние за период вегетации уровни содержания обменного калия (мг/кг) в почве полевого опыта при внесении азотных и калийных удобрений, 2016...2020 гг.

Фактор А (дозы удобрений)	Фактор В (годы исследований)					Средние А
	2016	2017	2018	2019	2020	
0...20 см						
Контроль (без удобрений)	68,37	75,30	80,83	74,91	79,20	75,72
N30K40	83,95	108,71	114,16	92,83	141,32**	108,19**
N60K80	107,95	125,31*	128,01*	149,72**	196,14**	141,42**
N90K120	142,78**	196,90**	179,27**	159,23**	265,61**	188,76**
Средние В	100,50	126,55	125,57	119,17	170,57	
$HCP_{05A} = 18,27$ $HCP_{05B} = 20,43$ $HCP_{05AB} = 40,85$ $HCP_{01A} = 24,05$ $HCP_{01B} = 26,89$ $HCP_{01AB} = 53,77$						
20...40 см						
Контроль (без удобрений)	37,40	51,98	48,27	45,41	55,98	47,81
N30K40	46,75	54,43	62,16	54,83	60,98	55,83
N60K80	53,10	61,90	60,78	96,43	94,15	73,27**
N90K120	56,70	71,55	71,19	70,88	76,53	69,37**
Средние В	48,49	59,96	60,60	66,89	71,91	
$HCP_{05A} = 9,07$ $HCP_{05B} = 10,14$ по $AB_{05} F_{\phi} < F_T$ $HCP_{01A} = 11,94$ $HCP_{01B} = 13,34$ по $AB_{01} F_{\phi} < F_T$						
40...60 см						
Контроль (без удобрений)	38,48	54,55	49,62	46,82	58,87	49,67
N30K40	41,10	54,55	57,94	51,32	65,24	54,03
N60K80	46,63	61,85	68,57*	87,81*	89,20*	70,81**
N90K120	50,15	66,20	74,02*	66,35*	72,25	65,79**
Средние В	44,09	59,29	62,54	63,08	71,39	
$HCP_{05A} = 7,93$ $HCP_{05B} = 8,87$ $HCP_{05AB} = 17,73$ $HCP_{01A} = 10,44$ $HCP_{01B} = 11,67$ по $AB_{01} F_{\phi} < F_T$						

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

** различия с контролем достоверны при уровне значимости 1%

Ежегодное внесение возрастающих доз калийных удобрений (в сочетании с пропорционально возрастающими дозами азота способствовало

постепенному насыщению почвенного поглощающего комплекса калием, в результате чего на удобряемых делянках к 2020 г. существенно увеличились запасы обменного калия в слое почвы 0...20 см – в 2...3,5 раза в зависимости от вносимой дозы калия.

Скорость накопления обменного калия в разных вариантах опыта также зависела от доз удобрений (Таблица 9). В 2016 г. (на второй год внесения удобрений) только в варианте с внесением максимальной дозы N90K120 запасы обменного калия в почве достоверно превысили контроль. На следующий год достоверное увеличение этого показателя отмечено и в варианте N60K80. Статистически значимое увеличение запасов обменного калия при внесении самой малой дозы удобрений N30K40 произошло только на 6-й год внесения удобрений.

Считается, что потери калия из-за миграции незначительны, поскольку калий адсорбируется в верхнем слое почвы и слабо мигрирует в глубину. Но при длительном применении удобрений и промачивании почвы может происходить вымывание калия за пределы корнеобитаемого слоя (Минеев, 2006). В нашем эксперименте наблюдалось накопление обменного калия при внесении удобрений не только в верхнем слое почвы, но и в нижележащих горизонтах 20...40 и 40...60 см. В среднем за 5 лет проведения исследований содержание обменного калия в этих слоях почвы достоверно превышало контроль, когда удобрения применялись в дозах N60K80 и N90K120 (Таблица 9).

Яблоня, как и другие плодовые деревья, отличается от однолетних растений большой длительностью периода поглощения корнями питательных веществ из почвы, продолжающегося большую часть года (Спиваковский, 1984). Для совершенствования приёмов диагностики условий почвенного питания плодовых растений калием представляет интерес оценка изменения параметров калийного питания на протяжении периода вегетации. Такие исследования дают возможность выявить периоды наиболее интенсивного

потребления элемента и могут быть полезны для корректировки сроков применения удобрений.

Сезонная динамика обменного калия в слое почвы 0...20 см представлена в Таблице 10, а данные о сезонной динамике показателя в более глубоких слоях почвы показаны в Приложениях 3 и 4.

Результаты наших исследований показали, что содержание обменного калия в почве удобренных участков в течение периода вегетации находилось на достаточно стабильном уровне, тогда как при внесении удобрений наблюдались значительные сезонные колебания показателя (Таблица 10).

Отсутствие статистически значимых сезонных различий в уровне обменного калия в удобренной почве подтверждает высказанное выше предположение о том, что в данный период жизни сада, даже при невысоких запасах доступного растениям калия, его потребление деревьями яблони слабо влияло на динамическое равновесие между разными формами калия в почвенном поглощающем комплексе.

Весьма значимым фактором, оказывавшим влияние на динамику обменного калия в агросерой почве яблоневого сада при отсутствии удобрений, была влажность почвы. На контроле была установлена достоверная положительная корреляция между содержанием обменных форм элемента и влажностью почвы в слое почвы 0...20 см за весь период проведения исследований (величина коэффициента корреляции $r = 0,61$ при уровне значимости 1%).

В почве удобренных участков такая отчётливая связь между уровнем обменного калия и влажностью уже не прослеживалась, а количество обменного калия в разные месяцы вегетационного периода в значительной мере определялось количеством внесённых удобрений. Особенно это заметно в первые годы проведения эксперимента – 2016 и 2017, когда осадки выпадали в течение лета достаточно равномерно, а потребление калия для формирования урожая было незначительным. В последующие годы влияние погодных условий на изучаемый показатель было более заметным.

Таблица 10 - Динамика обменного калия (мг/кг) в слое 0...20 см агросерой почвы яблоневого сада при внесении возрастающих доз удобрений, 2016...2020 гг.

Сроки отбора проб (фактор А)	Дозы удобрений (фактор В)				Средние А
	Контроль	N30K40	N60K80	N90K120	
2016 г.					
Май	72,75	74,50	74,12	174,25*	99,15
Июнь	81,25	91,12	173,50*	216,80*	140,67
Июль	71,75	95,40	101,62	117,15	96,48
Август	60,37	75,62	100,00*	96,37	83,09
Сентябрь	54,75	83,12	90,50	109,37*	84,43
Средние В	68,37	83,95	107,95*	142,79*	
НСР ₀₅ A=19,96 НСР ₀₅ B=17,86 НСР ₀₅ A×B=39,93					
2017 г.					
Май	83,87	132,88	117,75	238,25	143,19
Июнь	70,50	107,53	200,03	214,15	148,05
Июль	72,38	93,75	78,25	228,75	118,28
Август	73,88	110,78	123,03	189,40	124,27
Сентябрь	75,88	98,63	107,50	109,90	97,98
Средние В	75,30	108,71	125,31	196,90*	
По А ₀₅ F _φ < F _T НСР ₀₅ B=54,90 по АВ ₀₅ F _φ < F _T					
2018 г.					
Май	78,84	133,27	182,18*	222,10*	154,10
Июнь	77,40	90,71	90,42	131,25	97,45
Июль	87,98	106,82	110,84	269,05*	143,68
Август	74,85	117,62	111,73	122,30	106,62
Сентябрь	85,07	122,38	144,87	151,65	125,99
Средние В	80,83	114,16	128,01*	179,27*	
НСР ₀₅ A=40,29 НСР ₀₅ B=36,04 НСР ₀₅ AB=80,89					
2019 г.					
Май	75,69	67,18	168,31	183,94	123,78
Июнь	67,02	84,04	160,20	156,05	116,83
Июль	86,40	103,72	163,85	163,85	129,45
Август	62,52	77,52	99,50	138,65	94,54
Сентябрь	82,92	131,70	156,75	153,65	131,25
Средние В	74,91	92,83	149,72*	159,23*	
НСР ₀₅ A=23,73 НСР ₀₅ B=21,22 по АВ ₀₅ F _φ < F _T					
2020 г.					
Май	86,11	109,48	217,50*	214,47*	156,89
Июнь	62,94	157,46*	136,86*	212,14*	142,40
Июль	87,04	141,19*	235,68*	338,84*	200,69
Август	79,82	150,21*	151,42*	258,39*	159,96
Сентябрь	80,09	148,24*	239,61*	304,20*	193,04
Средние В	79,20	141,32*	196,14*	265,61*	
НСР ₀₅ A=26,51 НСР ₀₅ B=23,74 НСР ₀₅ A×B=53,00					

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

В 2018 г., отличавшемся наиболее контрастными метеоусловиями (два засушливых периода, а между ними интенсивные ливни) в среднем для всех вариантов опыта (средние по фактору А) наблюдалось достоверное уменьшение уровня обменного калия в почве во время июньской и августовской засухи (Таблица 10), что может быть связано с повышенной интенсивностью процессов необменной фиксации калия при переменном смачивании и просушивании почвы.

При более благоприятных погодных условиях 2019 г., когда недостаток осадков наблюдался лишь в июне, а в остальные месяцы их количество было оптимальным, существенно более низкий уровень почвенного калия отмечен в августе, что можно связать с повышенным его поглощением для формирования плодов (урожайность в этот год была наивысшей за весь период проведения исследований).

В 2020 году мы наблюдали оптимальные условия увлажнения в мае, июне и июле, что способствовало накоплению обменных форм калия в почве, с некоторым снижением в августе. Стоит отметить, что в период вегетации 2020 г. содержание обменного калия в почве было максимальным за всё время исследований, что может быть связано с накопительным эффектом от внесения удобрений, а также с низким поглощением калия растениями в связи с крайне низкой урожайностью яблони в этот год.

Водорастворимый калий (калий почвенного раствора) является наиболее подвижной фракцией обменного калия (Якименко, 2018). Этот показатель популярен в качестве способа оценки актуальных условий калийного питания различных сельскохозяйственных культур. Также анализ водных вытяжек из почвы применяется в почвенно-генетических исследованиях при изучении процессов миграции различных веществ в почвенном профиле (Богатырёв и др., 2020).

Данные о годичной и сезонной динамике содержания водорастворимых форм калия в почве сада представлены в Таблицах 11 и 12 данного раздела, а также в Приложениях 5 и 6.

Таблица 11 – Средние за период вегетации уровни содержания водорастворимого калия (мг/кг) в почве полевого опыта при внесении азотных и калийных удобрений, 2016...2020 гг.

Фактор А (дозы удобрений)	Фактор В (годы исследований)					Средние А
	2016	2017	2018	2019	2020	
0...20 см						
Контроль (без удобрений)	6,32	7,17	9,05	10,82	5,65	7,80
N30K40	10,22	12,64	17,32	11,67	11,31	12,63
N60K80	12,75	20,02	17,40	15,42	21,30	17,37*
N90K120	22,00	41,73	30,45	11,63	38,61	28,88**
Средние В	12,82	20,39	18,56	12,39	19,22	
$HCP_{05}A = 5,48$ $HCP_{05}B = 6,12$ по $AB_{05} F_{\phi} < F_T$ $HCP_{01}A = 7,21$ по $B_{01} F_{\phi} < F_T$ по $AB_{01} F_{\phi} < F_T$						
20...40 см						
Контроль (без удобрений)	4,73	5,43	7,18	4,00	4,77	5,22
N30K40	4,88	6,40	7,29	5,00	5,49	5,81
N60K80	4,58	6,25	5,87	8,41*	9,34*	6,89*
N90K120	5,30	8,25	8,23	5,38	6,58	6,75*
Средние В	4,87	6,58	7,14	5,70	6,54	
$HCP_{05}A = 1,30$ $HCP_{05}B = 1,45$ $HCP_{05}AB = 2,90$ по $A_{01} F_{\phi} < F_T$ по $B_{01} F_{\phi} < F_T$ по $AB_{01} F_{\phi} < F_T$						
40...60 см						
Контроль (без удобрений)	5,05	6,15	7,29	4,38	5,33	5,64
N30K40	4,60	6,65	6,50	5,21	5,75	5,74
N60K80	4,43	6,93	7,48	9,55	7,89	7,25*
N90K120	5,20	7,25	8,28	5,59	5,97	6,46
Средние В	4,82	6,74	7,39	6,18	6,24	
$HCP_{05}A = 1,26$ $HCP_{05}B = 1,41$ по $AB_{05} F_{\phi} < F_T$ по $A_{01} F_{\phi} < F_T$ по $B_{01} F_{\phi} < F_T$ по $AB_{01} F_{\phi} < F_T$						

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

** различия с контролем достоверны при уровне значимости 1%

В среднем за годы проведения исследований содержание водорастворимых форм калия ожидаемо было выше в вариантах с использованием достаточно высоких доз минеральных удобрений (N60K80 и N90K120). Однако, в отличие от содержания обменных форм калия, концентрация которых при использовании удобрений существенно выросла во всех изучаемых нами почвенных слоях, статистически значимое влияние

удобрений на водорастворимый калий наблюдалось преимущественно в слое почвы 0...40 см (Таблица 11).

Концентрация калия в водной вытяжке отличалась бóльшим пространственным и временным варьированием по сравнению с количеством обменных форм, из-за чего не во все годы проведения исследований удавалось выявить статистически значимые различия между значениями показателя в разных вариантах опыта.

Хотя внесение удобрений способствовало увеличению количества водорастворимого калия, для этой группы соединений не наблюдался «накопительный эффект», и доля калия, переходящего в водную вытяжку в каждом конкретном периоде вегетации определялась прежде всего общим количеством осадков в данном периоде. Так в среднем по всем вариантам опыта наибольшее (более 19 мг/кг) содержание водорастворимого калия в слое 0...20 см отмечено в 2017 и 2020 годах, когда сумма осадков с мая по сентябрь тоже была высокой – 305,4 и 266,6 мм соответственно (Таблица 11).

При изучении динамики водорастворимых форм калия во влажные годы наблюдалось сезонное увеличение их концентрации в слоях почвы 20...40 и 40...60 см, преимущественно в вариантах с внесением N60K80 и N90K120, особенно после периодов обильных дождей (Таблица 12; Приложения 5 и 6). Следовательно, в агросерой среднесуглинистой почве сада уже в первые годы после посадки деревьев происходила вертикальная миграция калия в корнеобитаемом слое, которая усиливалась при внесении удобрений.

Сезонная вариация уровня водорастворимых соединений в меньшей степени коррелировала с влажностью почвы, чем вариация обменного калия - коэффициенты корреляции не превышали 0,27 и были статистически недостоверны.

В 2016 и 2017 годах содержание водорастворимого калия в слое 0...20 см резко возрастало в мае-июне после внесения удобрений, а затем постепенно уменьшалось к сентябрю (Таблица 12).

Таблица 12 - Динамика водорастворимого калия (мг/кг) в слое 0...20см агросерой почвы яблоневого сада при внесении возрастающих доз удобрений, 2016...2020 гг.

Сроки отбора проб (фактор А)	Дозы удобрений (фактор В)				Средние А
	Контроль	N30K40	N60K80	N90K120	
2016 г.					
Май	6,62	9,75	12,25	33,62*	15,56
Июнь	7,00	17,50	20,75*	48,12*	23,34
Июль	8,12	10,87	12,37	12,37	10,94
Август	4,62	6,00	7,75	7,62	6,50
Сентябрь	5,25	7,00	7,75	8,25	7,06
Средние В	6,32	10,22	12,75*	22,00*	
НСР ₀₅ A=6,76 НСР ₀₅ B=6,05 НСР ₀₅ AB=13,25					
2017 г.					
Май	6,88	23,12	15,12	61,37*	26,62
Июнь	5,75	12,00	51,00*	51,60*	30,09
Июль	6,60	6,75	5,37	41,25*	14,99
Август	10,00	13,00	17,62	40,87*	20,37
Сентябрь	6,62	8,25	10,97	13,62	9,86
Средние В	7,17	12,64	20,02*	41,73*	
НСР ₀₅ A=13,68 НСР ₀₅ B=12,30 НСР ₀₅ AB=27,49					
2018 г.					
Май	10,25	21,00	29,62	49,25*	27,53
Июнь	7,50	9,87	10,87	15,00	10,81
Июль	8,75	13,62	15,75	53,12*	22,81
Август	11,37	27,87	14,50	18,25	18,00
Сентябрь	7,37	14,25	16,25	16,62	13,62
Средние В	9,05	17,32	17,40	30,45*	
НСР ₀₅ A=13,38 НСР ₀₅ B=11,97 НСР ₀₅ AB=26,77					
2019 г.					
Май	3,25	4,09	10,15	8,11	6,40
Июнь	7,28	4,14	6,33	8,41	6,54
Июль	11,43	14,86	14,04	16,29	14,15
Август	20,91	16,41	21,31	8,52	16,79
Сентябрь	11,27	18,86	25,30	16,80	18,05
Средние В	10,82	11,67	15,42	11,63	
НСР ₀₅ A=4,82 по В F _φ < F _т по АВ ₀₅ F _φ < F _т					
2020 г.					
Май	4,38	7,12	22,28	22,00	13,95
Июнь	2,92	10,36	10,84	20,21	11,08
Июль	6,32	11,47	28,32	49,50	23,90
Август	7,92	13,80	19,29	42,61	20,91
Сентябрь	6,70	13,82	25,79	58,72	26,26
Средние В	5,65	11,31	21,30*	38,61*	
НСР ₀₅ A=7,71 НСР ₀₅ B=10,32 по АВ ₀₅ F _φ < F _т					

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

В 2018 г. наиболее заметной особенностью динамики водорастворимого калия было резкое снижение показателя при июньской засухе и увеличение после обильных осадков во второй половине июля (Таблица 12). 2019 и 2020 годы отличались постепенным увеличением уровня водорастворимых форм в течение периода вегетации.

Таким образом, в течение 6 лет внесения калийных удобрений в дозах 40...120 кг/га д.в. в агросерой почве яблоневого сада, изначально имевшей низкие запасы обменного калия, происходило постепенное насыщение почвенно-поглощающего комплекса калием. Высокий уровень обеспеченности растений обменным калием (более 200 мг/кг, согласно градации для плодовых деревьев) был достигнут в варианте с внесением N90K120 на 6-й год применения удобрений.

Исследование годичной и сезонной динамики обменных и водорастворимых соединений калия в почве среднерослого яблоневого сада показало, что в первые годы плодоношения деревьев потребление калия на формирование плодов незначительно отражается на калийном статусе почвы. Это можно объяснить тем, что вынос калия с урожаем плодов в этот период находился в пределах 3...5 кг/га, а калий, потребляемый для роста и развития вегетативных органов дерева в значительной мере реутилизируется. Однако при вступлении деревьев в период максимального плодоношения баланс калия в агроэкосистеме сада может измениться, что нуждается в дальнейшем изучении.

Вертикальная миграция калия в профиле почвы способствовала повышению уровня доступных растениям соединений этого элемента на глубине до 60 см при внесении калийных удобрений в дозах 80 кг/га д.в. и выше. Даже разовое внесение таких количеств калия в сочетании с аммиачной селитрой, пополняющей почвенный поглощающий комплекс ионом аммония, приводит к возрастанию доли наиболее подвижных форм элемента, что подтверждает ежегодное сезонное увеличение уровня калия в водной вытяжке.

Поскольку обменная ёмкость почвы ограничена, повышение доли калия в общем количестве обменных катионов должно повлечь за собой снижение относительной доли обменных катионов других элементов. Известно, что в серых и агросерых почвах лесостепи кальций является основным обменным катионом, занимающим 70...80% обменной ёмкости почвенного поглощающего комплекса (Орлов и др., 2005). Новые равновесные соотношения ионов в почвенном растворе и почвенном поглощающем комплексе обуславливают изменения в условиях почвенного питания яблони кальцием.

ГЛАВА 5. КАЛЬЦИЕВЫЙ РЕЖИМ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ ЯБЛОНЕВОГО САДА³

5.1. Динамика обменных и водорастворимых соединений кальция в почве сада при внесении удобрений

Как было показано в обзоре литературы (Глава 1.3), кальций является весьма важным элементом минерального питания яблони, поскольку от его концентрации в плодах зависят их технологические характеристики и лёжкоспособность. Основным источником кальция для плодовых деревьев является почва. В яблоневых садах, выращиваемых на кислых почвах, внесение кальцийсодержащих удобрений (известь, гипс) даёт хорошие результаты (Watkins et al., 2004; Пугачёв, 2011). Однако, у плодов, выращенных на карбонатных почвах, также встречаются физиологические Са-дефицитные расстройства (Torres et al., 2017; Леоничева и др., 2017). Возможно, по этой причине в научных публикациях, посвящённых совершенствованию кальциевого питания яблони, условиям почвенного питания деревьев этим элементом уделяется недостаточно внимания.

Оценка обеспеченности сельскохозяйственных культур кальцием в России традиционно производится на основании содержания в почве его обменных форм. При проведении агрохимического обследования сельхозугодий используется следующая группировка почв по содержанию обменного кальция (Методические указания..., 2003): очень низкое содержание обменного Са – менее 2,5 ммоль/100 г, низкое – 2,6...5 ммоль/100г; среднее – 5,1...10 ммоль/100 г, повышенное – 10,1...15,0

³ В данной главе обсуждаются результаты диссертационной работы автора, опубликованные в статьях по теме диссертации:

1. **Столяров, М. Е.** Влияние минеральных удобрений на кальциевый режим серой лесной почвы в яблоневом саду / М. Е. Столяров // Ломоносов-2018: Тезисы докладов XXV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 09–13 апреля 2018 года / Составитель Л.А. Поздняков. – Москва: ООО "МАКС Пресс", 2018. – С. 231-232.

2. Leonicheva, E.V. Calcium in the soil-plant system of apple orchard when using nitrogen and potash fertilizers / E.V. Leonicheva, T.A. Roeva, L.I. Leonteva, **М.Е. Stolyarov** // E3S Web of Conferences – 2021. – V.254. – art. 05010.

ммоль/100 г, высокое – 15,1...20,0 ммоль/100 г, очень высокое содержание – более 20,0 ммоль/100 г почвы.

Поскольку кальциевый режим садовых почв практически не изучен и специальная градация почв по этому показателю для плодовых деревьев пока не предложена, в данной работе мы будем использовать приведенную выше группировку. Однако, имеются данные, что при повышенном (по указанной градации) уровне обменного Са в почве сада результаты листовой диагностики яблони свидетельствовали о недостаточной обеспеченности деревьев этим элементом (Леоничева и др., 2018; Столяров и др., 2020).

Кальций достаточно подвижен в профиле большинства зональных типов почв. При этом вертикальному переносу подвержены прежде всего катионы Са наименее прочно связанные с почвенным поглощающим комплексом (ППК), то есть легко переходящие в почвенный раствор при его разбавлении, происходящем в результате выпадения осадков (Орлов и др., 2005). Эти же формы почвенного калия наиболее доступны корням растений. Перемещение легкоподвижных катионов при стекании гравитационной влаги, либо при капиллярном подъёме грунтовых вод приводит к сезонным колебаниям уровня мобильных соединений Са в корнеобитаемом слое почвы.

Содержание в почве обменных форм Са превышает количество водорастворимых в 10 и более раз, и этот показатель значительно стабильнее. Для его существенного изменения требуется интенсивное воздействие на почву: орошение, известкование или длительное систематическое внесение высоких доз минеральных удобрений. В ходе нашего исследования в течение 5 периодов вегетации (с мая по сентябрь) ежемесячно определялось количество обменных и водорастворимых соединений Са на глубине 0...20, 20...40 и 40...60 см, как в неудобренной почве, та и при внесении возрастающих доз азотных и калийных удобрений. В результате был получен многолетний массив данных, описывающий динамику обменных и водорастворимых соединений кальция в корнеобитаемом слое агросерой почвы среднерослого яблоневого сада.

Годичная динамика обменного кальция представлена в Таблице 13, сезонная динамика в слое 0...20 см – на рисунке 8. Сезонная динамика в более глубоких слоях почвы показана на рисунках в Приложениях 9 и 10.

Таблица 13 – Средние за период вегетации уровни содержания обменного кальция (ммоль/100 г) в почве полевого опыта при внесении азотных и калийных удобрений, 2016...2020 гг.

Фактор А (дозы удобрений)	Фактор В (годы исследований)					Средние А
	2016	2017	2018	2019	2020	
0...20 см						
Контроль (без удобрений)	15,65	15,87	15,12	15,50	14,36	15,30
N30K40	15,58	14,99*	14,88	14,95*	13,73*	14,82**
N60K80	15,67	15,70	14,99	15,09	13,76*	15,04**
N90K120	15,88	15,87	14,84	14,81*	13,75*	15,03**
Средние В	15,69	15,61	14,96	15,08	13,90	
$HCP_{05A} = 0,20$ $HCP_{05B} = 0,22$ $HCP_{05AB} = 0,44$ $HCP_{01A} = 0,26$ $HCP_{01B} = 0,29$ по $AB_{01} F_{\phi} < F_T$						
20...40 см						
Контроль (без удобрений)	15,46	15,60	14,61	15,44	14,42	15,10
N30K40	15,62	15,24	14,67	15,27	14,22	15,00
N60K80	15,82	15,82	15,13*	15,38	13,97	15,22
N90K120	15,86	16,06	14,59	15,12	13,83*	15,09
Средние В	15,69	15,68	14,75	15,30	14,11	
по $A_{05} F_{\phi} < F_T$ $HCP_{05B} = 0,26$ $HCP_{05AB} = 0,52$ по $A_{01} F_{\phi} < F_T$ $HCP_{01B} = 0,34$ по $AB_{01} F_{\phi} < F_T$						
40...60 см						
Контроль (без удобрений)	14,60	14,76	13,82	14,72	13,65	14,31
N30K40	15,03	14,22	13,99	14,39	13,61	14,25
N60K80	15,16	14,77	14,01	14,46	13,55	14,39
N90K120	15,19	15,40	14,18	14,52	13,35	14,53
Средние В	14,99	14,79	14,00	14,52	13,54	
по $A_{05} F_{\phi} < F_T$ $HCP_{05B} = 0,28$ по $AB_{05} F_{\phi} < F_T$ по $A_{01} F_{\phi} < F_T$ $HCP_{01B} = 0,37$ по $AB_{01} F_{\phi} < F_T$						

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

** различия с контролем достоверны при уровне значимости 1%

Содержание обменного кальция, показанное в Таблице 13, в течение 5 лет исследования находилось между повышенным и высоким уровнем, но при

этом с увеличением возраста сада наблюдалось статистически значимое уменьшение показателя во всех вариантах опыта. На контроле эти изменения происходили менее интенсивно, чем при внесении удобрений. К концу периода вегетации 2020 г. уровень обменного кальция во всех слоях почвы снизился на 7...14% в зависимости от варианта опыта.

Оценивая показатели, характеризующие состояние обменного кальция, следует отметить, что метеоусловия оказали весьма существенное влияние на его годичную и сезонную динамику. Известно, что количество атмосферных осадков является одним из главных факторов, определяющих потери кальция из почвы за счёт вымывания (Шильников и др., 2015). Для суглинистых почв показано, что $\frac{3}{4}$ ежегодных потерь кальция приходится на период с октября по март (Аканова и др., 2017). Во всех изучаемых слоях почвы статистически достоверное снижение уровня обменного кальция произошло независимо от вариантов опыта в 2018 г., при наибольшей сумме осадков в предшествующий осенне-зимний период вегетации (Таблицы 13 и 14). Снижение уровня обменного кальция в неудобренной почве может быть связано не только с метеоусловиями, но и с возрастающим воздействием растущих и плодоносящих деревьев, а также с изменением системы содержания почвы (2013...2017 гг. – чёрный пар, 2018...2020 гг. – залужение), поскольку потребление кальция травами могло повлиять на равновесное соотношение катионов в почвенном поглощающем комплексе.

Таблица 14 – Распределение осадков (мм) в период проведения исследований

Месяцы	Годы				
	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020
октябрь-март	242,4	181,1	294,7	207,1	152,8
	2016	2017	2018	2019	2020
апрель-сентябрь	283,1	361,0	243,4	287,7	276,6
Σ	525,5	542,1	538,1	494,8	430,4

Внесение азотных и калийных удобрений в дозах N30K40, N60K80 и N90K120 способствовало уменьшению уровня обменного Ca

преимущественно в слое почвы 0...20 см, причём эффект от удобрений имел накопительный характер и усиливался с годами (Таблица 13). В среднем за 5 лет снижение содержания обменного кальция в верхнем слое почвы составило 3% относительно контроля на варианте с использованием N30K40, 2% в вариантах N60K80 и N90K120.

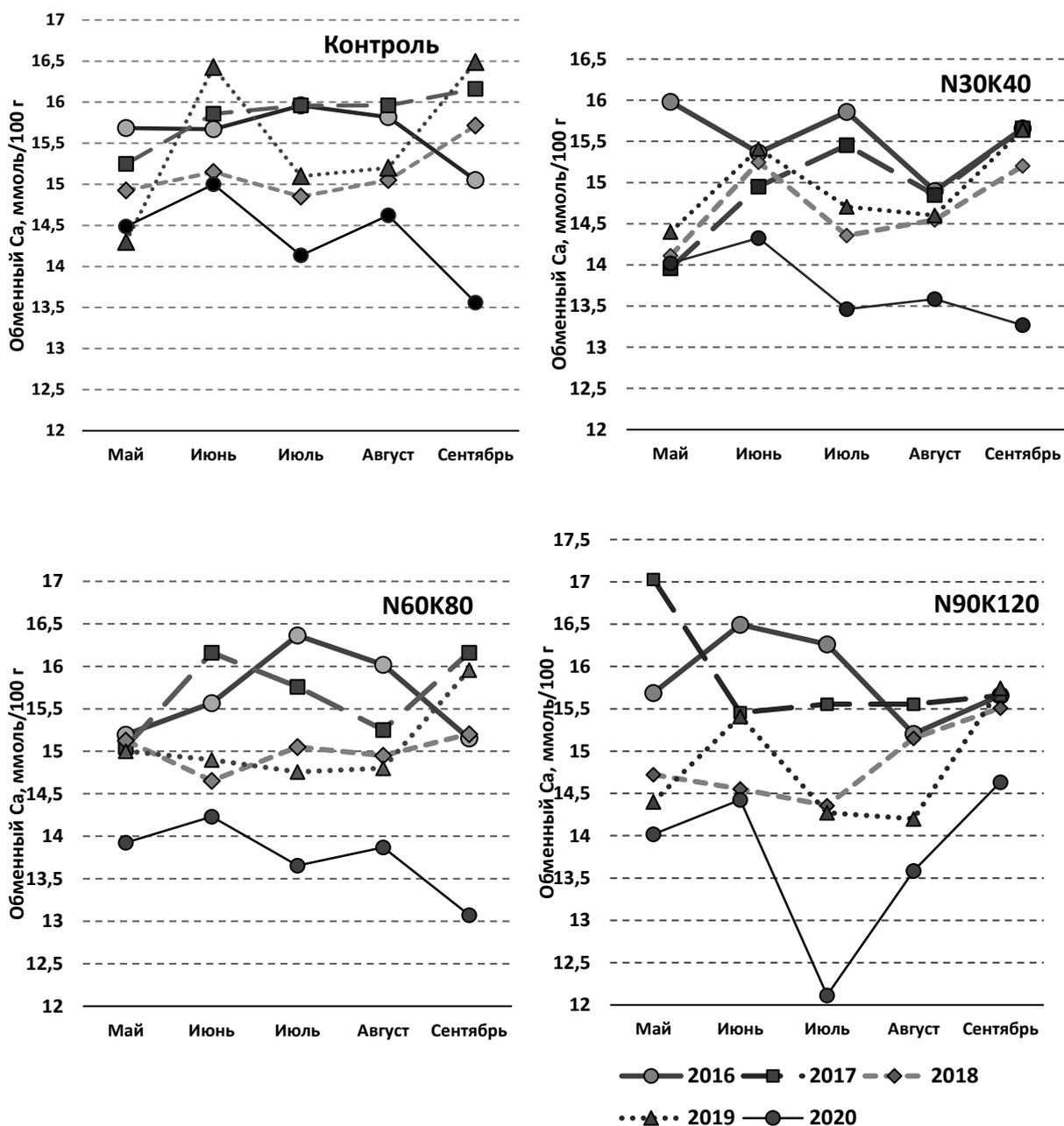


Рисунок 8. Динамика обменного Ca (ммоль/100 г) в слое почвы 0...20 см, 2016...2020 гг.

В неудобренной почве сезонная динамика обменного кальция в 2016...2018 гг. отличалась незначительным варьированием показателя, тогда как в 2019 и 2020 гг. амплитуда сезонных изменений увеличилась, но всё же различия между минимальной и максимальной концентрацией обменного кальция в течение одного периода вегетации были в пределах 1,5...2 ммоль/100 г (Рисунок 8).

При внесении небольшой дозы удобрений N30K40 сезонная динамика обменных форм кальция практически не отличалась от контрольного варианта. Удвоение дозы удобрений незначительно увеличило амплитуду колебаний показателя – максимальный уровень обменного кальция превышал минимальное его содержание на 3,5 ммоль/100 г (Рисунок 8).

Внесение удобрений в рекомендуемой для садов ЦЧЗ дозе N90K120 намного заметнее повлияло на динамику показателя, особенно в конце пятилетнего периода наблюдений. На рисунке 6 можно видеть, что в 2020 г. в почве этого варианта содержание обменного кальция с в июле уменьшилось на 2,5 ммоль/100 г по сравнению с июньским уровнем, а в течение двух последующих месяцев вернулось к исходному значению. Разница между максимальным и минимальным уровнем кальция за весь период наблюдений в варианте с внесением N90K120 была более 5 ммоль/100г, что подтверждает снижение буферности почвы по отношению к кальцию в этом варианте опыта.

Уровень водорастворимого кальция был показателем более отзывчивым на внесение удобрений. В среднем за 5 лет исследований во всех вариантах с удобрениями содержание водорастворимых форм элемента в слоях почвы 0...20, 20...40 и 40...60 см было существенно выше контроля (Таблица 15).

Во второй год от начала внесения в почву азотных и калийных удобрений (2016 г.) в почве удобренных участков установлено существенное увеличение концентрации водорастворимых соединений кальция (Таблица 15), причём этот эффект был статистически значимым во всех изучаемых слоях почвы.

В 2017 и 2018 гг. концентрация водорастворимого кальция в почве сада уменьшилась в 4...8 раз по сравнению с уровнем 2016 г. Это снижение можно объяснить вымыванием водорастворимых соединений кальция в переувлажнённый летний период 2017 г., за которым последовала снежная зима 2017...2018 гг. В вариантах с удобрениями снижение уровня водорастворимого кальция в эти годы было более выраженным, чем на контроле (Таблица 15).

Таблица 15 – Средние за период вегетации уровни содержания водорастворимого кальция (ммоль/100 г) в почве полевого опыта при внесении азотных и калийных удобрений, 2016 – 2020 гг.

Фактор А (дозы удобрений)	Фактор В (годы исследований)					Средние А
	2016	2017	2018	2019	2020	
0...20 см						
Контроль (без удобрений)	0,78	0,42	0,17	0,49	0,22	0,42
N30K40	1,57**	0,30	0,20	0,59	0,28	0,59*
N60K80	1,53**	0,38	0,20	0,78	0,41	0,66**
N90K120	2,54**	0,61	0,26	0,68	0,68*	0,95**
Средние В	1,61	0,43	0,21	0,64	0,39	
$HCP_{05A} = 0,15$ $HCP_{05B} = 0,17$ $HCP_{05AB} = 0,33$ $HCP_{01A} = 0,20$ $HCP_{01B} = 0,22$ $HCP_{01AB} = 0,44$						
20...40 см						
Контроль (без удобрений)	0,80	0,18	0,14	0,51	0,19	0,36
N30K40	1,30**	0,21	0,20	0,55	0,25	0,50**
N60K80	1,27**	0,22	0,18	0,63	0,34	0,53**
N90K120	1,73**	0,34	0,24	0,55	0,40*	0,65**
Средние В	1,27	0,24	0,19	0,56	0,29	
$HCP_{05A} = 0,09$ $HCP_{05B} = 0,10$ $HCP_{05AB} = 0,20$ $HCP_{01A} = 0,12$ $HCP_{01B} = 0,13$ $HCP_{01AB} = 0,27$						
40...60 см						
Контроль (без удобрений)	0,88	0,16	0,14	0,50	0,15	0,37
N30K40	1,26**	0,18	0,13	0,52	0,23	0,47*
N60K80	1,54**	0,17	0,17	0,63	0,33	0,57**
N90K120	1,45**	0,21	0,21	0,53	0,30	0,54**
Средние В	1,28	0,18	0,16	0,54	0,25	
$HCP_{05A} = 0,08$ $HCP_{05B} = 0,09$ $HCP_{05AB} = 0,19$ $HCP_{01A} = 0,11$ $HCP_{01B} = 0,12$ $HCP_{01AB} = 0,25$						

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

** различия с контролем достоверны при уровне значимости 1%

В 2019 г. в слое почвы 0...20 см удобренных делянок наблюдалось статистически значимое возрастание концентрации водорастворимого кальция по сравнению с уровнем 2018 г., тогда как на контроле значения показателя в эти годы достоверно не различались. В более глубоких слоях почвы возрастание количества водорастворимых форм Са в 2019 г. было статистически значимым во всех вариантах опыта, включая контроль.

В 2020 г. уровень водорастворимого кальция снова уменьшился во всех вариантах, за исключением самой большой дозы удобрений N90K120, где среднее за период вегетации содержание водорастворимых форм кальция оставалось на уровне предыдущего года.

В среднем за 5 лет исследований во всех вариантах с удобрениями содержание водорастворимых форм элемента было существенно выше контроля во всех изучаемых слоях почвы (Таблица 15, средние по фактору А). При этом значения показателя в слое почвы 0...40 см в варианте с наибольшей дозой удобрений (N90K120) были достоверно выше, чем при внесении более низких доз.

Особенности сезонной динамики водорастворимых форм кальция в слое 0...20 см представлены на Рисунке 9, а динамику показателя в более глубоких слоях почвы можно увидеть на в Приложениях 11 и 12.

Главным фактором, повлиявшим на концентрацию водорастворимых форм кальция в почве изучаемого сада, несомненно, были условия увлажнения. Вегетационный период 2016 г. отличался наиболее равномерным выпадением осадков в период с мая по сентябрь. В результате влажность почвы в этом сезоне варьировала в благоприятных пределах $17,80 \pm 0,61\%$. Такого количества влаги было достаточно для перехода большого количества кальция в водорастворимую форму, но поскольку в этом сезоне осадки выпадали равномерно, стекание гравитационной влаги на большую глубину не происходило и все вертикальные перемещения водорастворимого кальция не выходили за пределы изучаемого слоя почвы 0...60 см (Рисунок 9, Рисунки в приложениях 11 и 12).

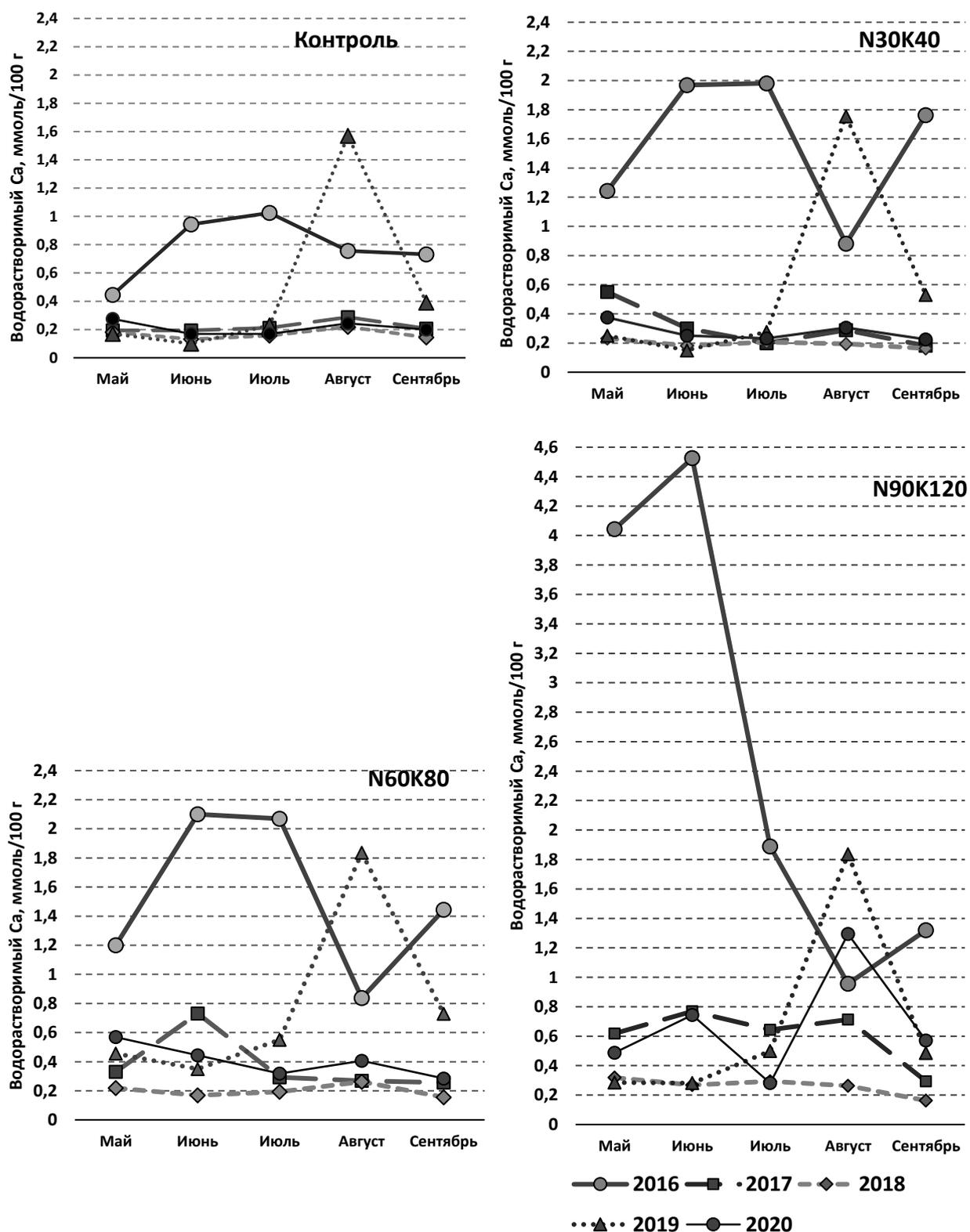


Рисунок 9 – Динамика водорастворимого Са (ммоль/100 г) в слое почвы 0...20 см, 2016...2020 гг.

В последующем 2017 г. при наибольшей сумме осадков с апреля по сентябрь (361 мм) произошло вымывание водорастворимого кальция из слоя

0...60 см, хотя количество обменных форм элемента в этот период практически не изменилось.

Далее последовала снежная зима 2017...2018 гг., после которой низкий уровень водорастворимого кальция (0,13...0,26 ммоль/100 г) сохранялся с мая по сентябрь 2018 г. во всех вариантах опыта.

В первые месяцы летнего периода 2019 г. содержание водорастворимого кальция в почве сада было на уровне двух предшествующих лет, но в тёплом и влажном августе 2019 г. сложились благоприятные условия для капиллярного подъёма почвенной влаги из глубоких горизонтов. Благодаря этому в августе уровень водорастворимого кальция в изучаемых слоях почвы увеличился в 4...7 раз, по сравнению с июлем и варьировал в пределах 1,60...1,93 ммоль/100 г во всех вариантах опыта (Рисунок 9 и рисунки в Приложениях 11 и 12). Это увеличение было кратковременным, и далее в сентябре 2019 на фоне продолжающихся осадков и снижения температуры воздуха значения показателя снова уменьшились в 3...4 раза.

В период вегетации 2020 г в неудобренной почве и при внесении N30K40 и N60K80 динамика водорастворимого кальция была аналогичной с 2017 и 2018 гг. Но в варианте с внесением самой большой дозы удобрений наблюдались «скачки» показателя в слое 0...20 см, особенно в августе, когда содержание водорастворимых форм элемента выросло в 2...4 раза по сравнению с июльским уровнем (Рисунок 9).

Известно, что внесение удобрений оказывает влияние на состояние кальция в почве. Например, внесение аммонийных форм азотных удобрений, к которым относятся и аммиачная селитра, приводит к вытеснению ионов кальция из почвенно-поглощающего комплекса и стимулирует дальнейшее его вымывание (Минеев, 2006). Калийные удобрения также способствуют снижению концентрации кальция в почве, хоть и в меньшей степени (Шеуджен и др., 2015).

В нашем опыте влияние азотных и калийных удобрений на концентрацию и динамику водорастворимых форм кальция в почве сада

зависело от вносимой дозы. Увеличение и снижение показателя происходило практически синхронно на контроле и в вариантах с внесением N30K40 и N60K80. Влияние удобрений проявилось в том, что количество водорастворимых форм кальция в почве удобренных делянок в одни и те же сроки отбора проб было больше в 1,5...2 раза (Рисунок 9).

При внесении максимальной дозы - N90K120 – сезонная динамика водорастворимого кальция существенно отличалась от остальных вариантов опыта, особенно в 2016 и 2020 гг. В мае и июне 2016 г. содержание водорастворимого Са во всех изучаемых слоях почвы превышало аналогичные показатели в других вариантах в 2...4 раза. В 2020 г. были отмечены резкие сезонные колебания уровня водорастворимых соединений, но только в слое 0...20 см. По-видимому, ежегодное поступление в почву такого количества катионов калия и аммония привело к снижению буферности изучаемой почвы по отношению к кальцию. В результате количество и соотношение катионов в ППК существенно изменились, о чём свидетельствует стабильно высокое содержание в почве этого варианта водорастворимых форм как кальция, так и калия, и регулярно наблюдавшееся их перемещение между изучаемыми слоями почвы.

Таким образом, пятилетнее изучение годичной и сезонной динамики обменного и водорастворимого кальция в агросерой почве под яблоневым садом показало, что уже в первые годы после посадки деревьев в почве сада начинается постепенное снижение уровня обменного кальция, которое усиливается при ежегодном внесении азотных и калийных удобрений. На фоне снижения количества обменных соединений концентрация водорастворимых форм кальция подвержена значительным сезонным колебаниям, которые зависят от гидротермического режима почвы и также усиливаются при внесении удобрений.

Наиболее заметно оба описываемых явления проявились в варианте с внесением аммиачной селитры и хлористого калия в количестве N90K120,

соответствующем средней зональной дозе азота и калия, рекомендуемой для сильно- и среднерослых садов ЦЧЗ.

5.2. Основные факторы, влияющие на уровень доступных растениям форм кальция в почве сада

Изучение динамики основных агрохимических показателей почвы изучаемого сада дало возможность оценить влияние природных и агротехнических факторов на условия почвенного питания яблони кальцием.

В предшествующем разделе было показано, что основные особенности годичной и сезонной динамики различных форм кальция в корнеобитаемом слое почвы под садом хорошо интерпретируются в связи с особенностями метеоусловий в период проведения исследований.

Чтобы оценить влияние удобрений на кальциевый режим изучаемой почвы была проведена оценка взаимосвязей между уровнем обменных и водорастворимых соединений кальция в разных слоях почвы и показателями, характеризующими уровень основных макроэлементов минерального питания. Статистические показатели рассчитывали, используя весь массив данных за 5 лет проведения исследований. Результаты корреляционного анализа представлены в Таблице 16.

Оценка взаимосвязи показателей при помощи корреляционного анализа показала наличие достоверной отрицательной корреляции между обменными формами калия и кальция в слоях почвы 0...20 и 40...60 см. Также имела место отрицательная корреляция между содержанием водорастворимых форм калия и кальция в слое 40...60 см. Отрицательная корреляция между показателями, характеризующими состояние калия и кальция в изучаемой почве, согласуется с известными литературными данными о конкуренции между катионами щелочных и щелочноземельных элементов за обменные позиции в почвенном поглощающем комплексе. Отсутствие статистически значимой взаимосвязи между этими показателями в слое почвы 20...40 см может быть связано с тем,

что этот горизонт почвы является зоной наиболее интенсивного потребления корнями деревьев элементов минерального питания.

Таблица 16 – Коэффициенты корреляции между агрохимическими показателями и содержанием в почве различных форм кальция

	Обменный Са, ммоль/100 г			Водорастворимый Са, ммоль/100 г		
	0...20 см	20...40 см	40...60 см	0...20 см	20...40 см	40...60 см
Обменный К, мг/кг	-0,49*	-0,36	-0,45*	0,01	-0,20	-0,43
Водорастворимый К, мг/кг	-0,12	-0,33	-0,28	0,05	-0,38	-0,51*
N-NO ₃ , мг/кг	-0,25	-0,37	-0,36	0,23	-0,11	0,12
Обменный N-NH ₄ , мг/кг	0,06	0,09	-0,04	0,70**	0,57**	0,40
Подвижный фосфор, мг/кг	0,55*	0,49*	0,51*	0,66**	0,54*	0,37

* корреляция достоверна при уровне значимости 5%

** корреляция достоверна при уровне значимости 1%

Известно, что аммоний удобрений вытесняет из ППК кальций, который затем теряется с просачивающимися водами (Минеев, 2006). В нашем эксперименте установлена достоверная (при уровне значимости 1%) положительная корреляция между содержанием водорастворимого кальция и обменного аммония в слоях почвы 0...20 и 20...40 см (Таблица 16). Катионы аммония, входившие в состав аммиачной селитры, занимали обменные позиции и вытесняли кальций в почвенный раствор, благодаря чему происходило одновременное увеличение этих показателей, тогда как обменный кальций с содержанием обменной формы аммонийного азота не коррелировал.

Статистически значимой взаимосвязи между содержанием в почве нитратной формы азота и различных форм кальция в нашем эксперименте не наблюдалось.

В то же время выявлена стабильная связь показателей кальциевого состояния почвы с содержанием подвижного фосфора. Наличие такой

корреляции подтверждает значимость однозамещённых фосфатов кальция как наиболее подвижных соединений фосфора в агросерых почвах.

В целом изучение динамики мобильных соединений кальция в корнеобитаемом слое почвы яблоневого сада при внесении удобрений показало, что:

- в агросерой почве под молодым садом яблони уже в первые годы после посадки деревьев начинается постепенное снижение запасов обменного кальция, которое усиливается при ежегодном внесении в агросерую почву под садом азотных и калийных удобрений в виде NH_4NO_3 и KCl ;

- основным фактором, влияющим на кальциевый режим агросерой почвы в первые годы жизни сада, являются метеоусловия, в первую очередь – количество осадков;

- изменения условий кальциевого питания яблони под действием удобрений заключаются в увеличении подвижности кальция и последующем снижении концентрации элемента в корнеобитаемом слое;

- на фоне снижения количества обменных соединений концентрация водорастворимых форм кальция подвержена значительным сезонным колебаниям, которые зависят от гидротермического режима почвы и также усиливаются при внесении удобрений;

- потребление кальция молодыми и вступающими в плодоношение деревьями яблони не оказывает существенного влияния на кальциевый режим почвы в первые 7 лет жизни сада;

- ежегодное внесение аммиачной селитры и хлористого калия в количестве N90K120 , соответствующем средней зональной дозе азота и калия, рекомендуемой для сильно- и среднерослых садов ЦЧЗ, оказывало наиболее сильное дестабилизирующее воздействие на буферность изучаемой почвы по отношению к кальцию.

ГЛАВА 6. СОДЕРЖАНИЕ КАЛЬЦИЯ В ПЛОДАХ И ВЕГЕТАТИВНЫХ ОРГАНАХ ЯБЛОНИ (ОПЫТ 2)⁴

6.1. Содержание кальция в плодах и влияние удобрений на этот показатель

Известно, что органы растения, получающие элементы минерального питания преимущественно из ксилемы и имеющие высокие показатели транспирации, накапливают кальций сильнее, чем органы, обеспечиваемые за счёт флоэмы и характеризующиеся более низким уровнем транспирации (Kalcsits et al., 2020). Поэтому, несмотря на важную роль кальция в обеспечении качества плодов яблони, концентрация его в яблоках на порядок ниже, чем в вегетативных органах. При этом, кальциевый статус плодов яблони является показателем более мобильным и отзывчивым на изменение условий минерального питания, чем кальциевый статус листьев (Леоничева и др., 2018; Kuzin et al., 2020)

Требования к минеральному составу плодов яблони в настоящее время разработаны фрагментарно. При этом содержанию кальция в яблоках уделяют внимание многие исследователи, преимущественно - в связи с оценкой их потенциальной лёжкоспособности. Считается, чтобы риск развития горькой ямчатости был минимальным, яблоки должны содержать не менее 5 мг кальция на 100 г сырой массы (Гудковский, 1990; Причко и др., 2011; Трунов, 2016; Jemrić et al., 2016). Для сортов, выращиваемых на юге России, установлен оптимальный уровень кальция в пределах 8...14 мг/100 г сырой массы

⁴ В данной главе обсуждаются результаты диссертационной работы автора, опубликованные в статьях по теме диссертации:

1. **Столяров М.Е.** Количественная оценка выноса биогенных элементов из молодого яблоневого сада / М. Е. Столяров // Селекция и сорторазведение садовых культур. – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 93-96.
2. **Столяров, М.Е.** Влияние корневого и некорневого удобрения на качество плодов яблони двух сортов / М. Е. Столяров, Е. В. Леоничева, Т. А. Роева, Л. И. Леонтьева // Агрехимический вестник. – 2020. – № 6. – С. 59-67.
3. Leonicheva, E.V. Calcium in the soil-plant system of apple orchard when using nitrogen and potash fertilizers / E.V. Leonicheva, T.A. Roeva, L.I. Leonteva, **M.E. Stolyarov** // E3S Web of Conferences – 2021. – V.254. – art. 05010.

(Попова, 2011; Причко и др., 2015). Оптимальные параметры минерального состава плодов, выращиваемых в средней зоне садоводства России, в настоящее время не установлены, но исследования, проведённые в 2011...2016 гг. в садах ФГБНУ ВНИИСПК, показали применимость для Синапа орловского критериев элементного состава, разработанных для сортов Юга России (Леоничева и др., 2017). На основании результатов этих исследований, в данной работе мы приняли, что содержание кальция в плодах изучаемого сорта менее 9 мг/100 г сырой массы свидетельствует о высоком риске возникновения физиологических расстройств при их хранении.

Известно, что на уровень кальция в плодах яблони значимое влияние оказывают не только условия почвенного питания и агротехника, но и нагрузка деревьев урожаем (Watkins et al., 2004; Torres et al., 2017; Кузин, 2018). Наши исследования проводились во вступающем в плодоношение яблонево́м саду. В 2016 г. молодые деревья ещё не давали товарного урожая, (первые немногочисленные плоды, полученные в 2016 г., были использованы для определения их минерального состава). В последующие годы в среднем по опыту урожайность сорта Синап орловский составила – $2,72 \pm 0,62$, $10,96 \pm 1,51$ и $8,51 \pm 0,88$ кг/дерево в 2017, 2018 и 2019 гг. соответственно. В 2020 г. из-за неблагоприятных для опыления метеоусловий (холодный май) урожайность деревьев сорта Синап орловский была на уровне 2016 г. Влияние корневого и некорневого применения азотных и калийных удобрений на продуктивность деревьев показано в Таблице 17.

В первые годы плодоношения деревьев внесение в почву азотных и калийных удобрений не способствовало достоверному увеличению продуктивности деревьев, а в вариантах с некорневыми подкормками в 2017 и 2018 гг. отмечено достоверное снижение урожайности по сравнению с контролем. В 2019 г. положительный эффект от применения удобрений отмечен на уровне тенденции.

Таблица 17 – Продуктивность яблони сорта Синап орловский, кг/дерево, 2017...2019 гг.

Варианты опыта	2017	2018	2019
Контроль (без удобрений)	4,05	13,60	7,45
N30K40	4,48	13,34	8,30
N60K80	2,88	9,96	8,12
N90K120	3,15	11,09	7,80
Подкормки ^x	1,32	7,77	9,02
N30K40+подкормки ^x	1,80	11,04	8,51
N60K80+ подкормки ^x	1,52	7,95	8,98
N90K120+подкормки ^x	2,64	10,70	9,92
НСР ₀₅	2,12	5,24	F _φ < F _T

Содержание Са в плодах яблони зависело как от условий почвенного и некорневого питания, так и от урожайности деревьев. В течение первых четырёх лет проведения исследований при увеличении продуктивности деревьев наблюдалось ежегодное достоверное уменьшение концентрации кальция в яблоках, а в неурожайном 2020 г. показатель в среднем по опыту увеличился на 35% по сравнению с уровнем предшествующего года (Таблица 17).

На содержание кальция в плодах Синапа орловского азотные и калийные удобрения оказывали значимое влияние в 2016, 2018, 2019 и 2020 гг. Первые плоды Синапа орловского, полученные в 2016 г. на третий год после посадки сада при наиболее высоком уровне почвенного кальция, содержали кальций в количестве 10,30 мг/100 г (в среднем по опыту). В этих условиях в трёх вариантах опыта отмечено существенное увеличение уровня кальция. При постепенном ежегодном снижении концентрации кальция в плодах применение почвенных и foliarных удобрений способствовало дополнительному снижению кальциевого статуса плодов. Однако в 2020 г., когда Са в плодах в среднем по опыту вырос на 35%, снова был отмечен положительный эффект применения удобрений (Таблица 18).

Таблица 18 – Содержание кальция в плодах яблони сорта Синап орловский, 2016...2020 гг., мг/100 г сырой массы

Фактор А (вариант опыта)	Фактор В (годы исследований)					Средние А
	2016	2017	2018	2019	2020	
Контроль (без удобрений)	9,64	8,92	8,36	8,16	9,40	8,90
N30K40	9,44	9,72	8,32	7,88	10,16	9,10
N60K80	11,52**	9,60	7,08**	6,36**	10,56*	9,02
N90K120	10,28	9,00	7,08**	7,16*	9,88	8,68
Подкормки ^x	10,88*	9,12	8,36	5,12**	10,36*	8,77
N30K40+подкормки ^x	11,80**	9,04	7,96	5,76**	10,04	8,92
N60K80+ подкормки ^x	9,16	8,24	7,52	4,80**	9,17	7,78**
N90K120+подкормки ^x	9,64	8,44	7,76	6,08**	10,13	8,41*
Средние В	10,30	9,01	7,81	6,42	9,96	
$HCP_{05A} = 0,39$ $HCP_{05B} = 0,31$ $HCP_{05AB} = 0,87$ $HCP_{01A} = 0,51$ $HCP_{01B} = 0,40$ $HCP_{01AB} = 1,14$						

^x - некорневые обработки $CO(NH_2)_2$ и K_2SO_4

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

** различия с контролем достоверны при уровне значимости 1%

Результаты, представленные в Таблице 18, согласуются с данными, полученными ранее в эксперименте по изучению влияния некорневых подкормок на минеральный состав плодов яблони (*Опыт 1*). Как было показано в Главе 3, применение листовых удобрений, независимо от их состава, в год с наиболее низким за 5 лет эксперимента уровнем кальция в плодах Синапа орловского (4 и 7,5 мг/100 г соответственно в мякоти и кожице плодов) способствовало дополнительному снижению этих показателей (Таблица 3).

Поскольку изучение кальциевого режима яблоневого сада проводилось в полевом опыте, имеющем двухфакторную схему, позволяющую рассматривать воздействие почвенных и листовых удобрений как отдельных факторов, мы проанализировали вклад дополнительного почвенного и некорневого питания азотными и калийными удобрениями в формирование кальциевого статуса плодов в разные годы исследований при помощи двухфакторного дисперсионного анализа (Таблица 19). Воздействие разных

способов применения удобрений на содержание кальция в плодах было преимущественно негативным и существенно различалось в разные годы:

- в 2016 г. различия в способах применения удобрений существенно не повлияли на изучаемый показатель;
- в 2017 г. установлено существенно более низкое содержание кальция в плодах, получавших некорневые подкормки;
- в 2018 г. внесение в почву удобрений в дозах N60K80 и N90K120 способствовало снижению уровня кальция в яблоках;
- в 2019 г. негативное влияние на концентрацию кальция в яблоках оказали оба способа применения удобрений;
- в 2020 г. несмотря на отдельные положительные результаты, воздействие почвенных и листовых подкормок, как самостоятельных факторов было недостоверным.

Негативное влияние почвенных удобрений на поступление кальция в плоды можно связать с ухудшением условий кальциевого питания растений как за счёт снижения концентрации доступных форм кальция в почве (показанного в Таблицах 13 и 15), так и за счёт антагонизма между катионами калия и кальция в процессах корневого поступления в растение.

Негативное влияние листовых удобрений может быть связано с физиологическими особенностями транспорта кальция в растениях. Известно, что кальций поступает в растения через корни пассивным путём вместе с водой и далее транспортируется по сосудам ксилемы (White, Broadley, 2003). У молодых деревьев в период вступления в плодоношение суммарная листовая поверхность, как правило, превышает суммарную поверхность плодов, соответственно транспирация с поверхности листьев также происходит намного интенсивнее. В результате кальций, передвигающийся в растении по ксилеме, из корней в листья будет поступать интенсивнее, чем в плоды.

Таблица 19 – Влияние почвенного и некорневого питания на содержание кальция в плодах яблони сорта Синап орловский, мг/100 г сырой массы.

Дозы удобрений (фактор А)	Некорневые подкормки (фактор В)		Средние А
	Без подкормок	Некорневые обработки CO(NH ₂) ₂ и K ₂ SO ₄	
2016 г.			
Контроль	9,64	10,88	10,26
N30K40	9,44	11,80	10,62
N60K80	11,52	9,16	10,34
N90K120	10,60	9,64	10,12
Средние В	10,30	10,37	
по А F _φ < F _Т по В F _φ < F _Т по АВ F _φ < F _Т			
2017 г.			
Контроль	8,92	9,12	9,02
N30K40	9,72	9,04	9,38
N60K80	9,60	8,24	8,92
N90K120	9,00	8,44	8,32
Средние В	9,31	8,71*	
по А ₀₅ F _φ < F _Т НСР _{05В} =0,51 по АВ ₀₅ F _φ < F _Т по А ₀₁ F _φ < F _Т НСР _{01В} =0,70 по АВ ₀₁ F _φ < F _Т			
2018 г.			
Контроль	8,36	8,36	8,36
N30K40	8,32	7,96	8,14
N60K80	7,08	7,52	7,30**
N90K120	7,08	7,76	7,42**
Средние В	7,71	7,90	
НСР _{05А} =0,53 по В ₀₅ F _φ < F _Т по АВ ₀₅ F _φ < F _Т НСР _{01А} =0,72 по В ₀₁ F _φ < F _Т по АВ ₀₁ F _φ < F _Т			
2019 г.			
Контроль	8,16	5,12**	6,64
N30K40	7,88	5,76**	6,82
N60K80	6,36**	4,80**	5,58**
N90K120	7,16**	6,08**	6,62
Средние В	7,39	5,44**	
НСР _{05А} =0,48 НСР _{05В} =0,34 НСР _{05АВ} =0,67 НСР _{01А} =0,65 НСР _{01В} =0,46 НСР _{01АВ} =0,92			
2020 г.			
Контроль	9,40	10,36*	9,88
N30K40	10,16	10,04	10,10
N60K80	10,56*	9,17	9,87
N90K120	9,88	10,13	10,00
Средние В	10,00	9,92	
по А ₀₅ F _φ < F _Т по В ₀₅ F _φ < F _Т НСР _{05АВ} =0,95 по А ₀₁ F _φ < F _Т по В ₀₁ F _φ < F _Т НСР _{01АВ} =1,29			

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

** различия с контролем достоверны при уровне значимости 1%

По литературным данным некорневые подкормки часто способствуют усилению транспирации (Veberič et al., 2005; Naeem et al., 2017), а также изменению других показателей водного режима яблони (Роева и др., 2014; 2015). Такой эффект фолиарных удобрений может дополнительно усиливать поступление кальция в листья в ущерб поступлению элемента в плоды. Взаимосвязь кальциевого питания яблони с показателями водного режима в условиях Центрально-Чернозёмной зоны показана в работах Г.Н.Пугачёва (2004, 2006). О «конкуренции» между плодами и листьями яблони за доступный кальций сообщают Watkins et al. (2004).

Таким образом, в ходе пятилетних наблюдений в *Опыте 2* были собраны данные, подтверждающие значительные колебания содержания кальция в плодах в разные годы, при этом было установлено существенное влияние на этот показатель (преимущественно – негативное), использования калийных и азотных удобрений, как при их внесении в почву, так и при некорневом применении.

Связь между показателями продуктивности и содержания кальция в плодах была неоднозначной. С одной стороны, при минимальной продуктивности в 2016 и 2020 гг. содержание кальция в плодах было стабильно высоким. С другой стороны, самая большая продуктивность деревьев отмечена в 2018 г., но в последующем 2019 г. при снижении продуктивности на 22 %, содержание кальция в плодах было самым низким за период проведения эксперимента.

6.2. Содержание кальция в листьях и влияние на этот показатель природных и агротехнических факторов

Листовая диагностика является широко используемым методом оценки условий минерального питания плодовых культур. Оптимальный уровень содержания кальция в листьях яблони, по литературным данным, составляет

1,3...2% сух. массы (Церлинг, 1980; Stiles, Reid, 1991; Watkins et al., 2004; Кондаков, 2007; Кузин и др., 2021).

Анализ концентрации кальция в листьях Синапа орловского на 4...7 годы после посадки сада показал, что в течение первых трёх лет (2016...2018 гг.) листья содержали недостаточно этого элемента, и только в 2019 г. уровень кальция в листьях был выше 1,3% (Таблица 20). Самые низкие значения показателя были в 2017 г. при наименьшем уровне водорастворимого кальция в почве. Неудовлетворительные условия кальциевого питания яблони, выявленные по результатам листовой диагностики, могут быть связаны с дисбалансом катионов в почвенном растворе, поскольку почва опытного участка имеет очень высокое содержание обменного магния, а концентрация обменного калия в период проведения исследований варьировала от среднего до высокого уровня в зависимости от вариантов опыта. Кроме того, уровень наиболее подвижных и доступных растениям водорастворимых соединений кальция подвержен весьма заметным сезонным и годичным колебаниям, как было показано в Главе 4.1. Сопоставляя данные Таблиц 13 и 18, можно увидеть, что динамика кальция в листьях соответствует данным о средних за вегетационный период уровнях водорастворимого Са в почве.

Концентрация кальция в листьях сильно (на 20...30 %) различалась по годам, в то время как влияние вариантов опыта на этот показатель было слабым и нестабильным. Почвенные удобрения в дозах N60K80 и N90K120 в среднем за 5 лет способствовали достоверному снижению кальциевого статуса листьев (Таблица 20), что может быть связано с постепенным возрастанием потерь кальция из корнеобитаемого слоя почвы, наблюдавшемся в этих вариантах опыта.

Фолиарные подкормки оказывали существенное влияние на кальций в листьях преимущественно в 2019 и 2020 гг., причём эффект одних и тех же вариантов опыта разные годы был противоположным (Таблица 20). Ещё более слабое влияние некорневых подкормок на концентрацию кальция в листьях

Синапа орловского наблюдалось и ранее в *Опыте 1*, проводившемся с 20-летними деревьями этого же сорта.

Таблица 20 – Содержание кальция в листьях яблони сорта Синап орловский, 2016...2020 гг., % сух.в-ва

Фактор А (вариант опыта)	Фактор В (годы исследований)					Средние А
	2016	2017	2018	2019	2020	
Контроль (без удобрений)	1,21	1,01	1,04	1,44	1,19	1,18
N30K40	1,22	1,00	1,04	1,46	1,26	1,20
N60K80	1,17	0,94	1,00	1,36	1,04*	1,10**
N90K120	1,14	0,92	1,01	1,35	1,08*	1,10**
Подкормки ^x	1,19	0,92	1,11	1,34*	1,37**	1,18
N30K40+ подкормки ^x	1,16	0,95	1,07	1,43	1,30*	1,18
N60K80+ подкормки ^x	1,14	0,93	1,03	1,41	1,37**	1,17
N90K120+ подкормки ^x	1,19	0,95	1,08	1,34*	1,26	1,16
Средние В	1,18	0,95	1,05	1,39	1,23	
$HCP_{05A} = 0,03$ $HCP_{05B} = 0,04$ $HCP_{05AB} = 0,09$ $HCP_{01A} = 0,04$ $HCP_{01B} = 0,05$ $HCP_{01AB} = 0,12$						

^x - некорневые обработки $CO(NH_2)_2$ и K_2SO_4

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

** различия с контролем достоверны при уровне значимости 1%

По результатам исследований Ю.В.Трунова (2016), проводившихся в почвенно-климатических условиях Центрально-Чернозёмной зоны, при среднем уровне обеспеченности почвы доступными формами макроэлементов их концентрация в листьях яблони зависит преимущественно от метеоусловий и величины урожая, а количество внесённых удобрений не оказывает существенного влияния на этот показатель. В нашем эксперименте уровень кальция в листьях яблони в разные годы различался на 20...30 %, тогда как под воздействием удобрений этот показатель изменялся на 5...13% причём только в те годы, когда кальциевый статус листьев был близок к оптимальному уровню.

Эти результаты хорошо согласуются с известной точкой зрения о поддержании постоянства химического состава листьев при помощи процессов обменного гомеостаза. На протяжении периода вегетации лист

является основным синтетическим органом растения, работа которого обеспечивает рост и плодоношение. Поэтому растениям жизненно необходимо поддержание химического состава листьев на уровне, обеспечивающем стабильное выполнение ими важнейших физиологических функций. Стихийному, нерегулярному поступлению питательных веществ в растение, зависящему от меняющихся условий окружающей среды, противостоит система регулируемых связей, обуславливающих обменный гомеостаз. Основная концепция гомеостаза – максимальная стабильность внутренней среды в широком диапазоне внешних условий (Новосельцев, 1991; Трунов, 2010).

Таким образом, за пять лет проведения исследований в *Опыте 2* было установлено, что кальциевый статус листьев 4...7-летних деревьев изучаемого сорта Синап орловский достаточно сильно изменяется по годам, что может быть связано с колебаниями концентрации мобильных форм кальция в корнеобитаемом слое почвы. При этом потери кальция из почвы при внесении удобрений постепенно способствуют снижению уровня кальция в листьях, а некорневые подкормки азотом и калием оказывают нестабильное воздействие.

6.3. Содержание кальция в ветвях яблони и вынос кальция из агроэкосистемы сада

Концентрация кальция в яблоках на порядок ниже, чем в вегетативных органах, что связано с особенностями транспорта этого элемента в многолетних древесных растениях. Передвижение кальция вверх по дереву от корней к надземным органам происходит вместе с водой через ксилему. При этом катионы элемента передвигаются не в массовом потоке, а в ходе серии обменных реакций вдоль отрицательно заряженных участков клеточных стенок сосудов (Hanger, 1979). Перемещение кальция в верхнюю часть древесных растений происходит медленно, что связано с его латеральным просачиванием и значительной аккумуляцией элемента в коре. Показано, что

у молодых деревьев яблони в коре может находиться более половины от общего количества элемента в растении (Terblanchea, 1979). Таким образом, кальций в яблоне продолжает перемещение вверх по дереву в течение ряда вегетационных периодов, а его промежуточные резервы в корнях и ветвях являются основным источником элемента для роста молодых органов в начале вегетации (Hangera, 1979).

Поскольку в ветвях яблони создаются промежуточные резервы кальция, которые могут быть в дальнейшем использованы при формировании плодов, определение кальциевого статуса побегов также представляет интерес как способ прогноза возникновения Са-дефицитных расстройств в плодах. Для оценки информативности этого показателя в феврале...марте 2018, 2019 и 2020 гг. в *Опыте 2* проведены учёт общей массы ветвей, удаляемых при обрезке, и определение содержания Са в ветвях разного возраста (Таблица 21).

Таблица 21 - Содержание кальция в ветвях яблони сорта Синап орловский, 2018...2020 гг., % сух.в-ва.

Год (фактор А)	Дозы удобрений (фактор В)	Возраст древесины (фактор С)			Средние АВ	Средние В	Средние А
		1- летняя	2- летняя	3- летняя			
2018	Контроль	1,04	1,17	1,06	1,09	Контроль 1,26	1,06
	N30K40	1,02	1,19	0,92	1,04		
	N60K80	1,10	1,13	0,89	1,04		
	N90K120	1,01	1,03	1,17	1,07		
	Средние АС	1,04	1,13	1,01			
2019	Контроль	1,04	0,96	0,96	0,99	N30K40 1,13	1,06
	N30K40	1,03	0,99	1,06	1,03		
	N60K80	1,04	0,93	1,19	1,05	N60K80 1,07	
	N90K120	1,16	0,76	1,54	1,15		
	Средние АС	1,07	0,91	1,19			
2020	Контроль	1,54	2,01	1,52	1,69	N90K120 1,16	1,34
	N30K40	1,46	1,29	1,17	1,31		
	N60K80	1,15	1,29	0,91	1,12		
	N90K120	1,53	1,15	1,07	1,25		
	Средние АС	1,42	1,44	1,17			
Средние С		1,18	1,16	1,12			
$\text{HCP}_{05A}=0,15 \quad \text{по } B_{05} F_{\phi} < F_T \quad \text{по } C_{05} F_{\phi} < F_T$ $\text{по } AB_{05} F_{\phi} < F_T \quad \text{по } AC_{05} F_{\phi} < F_T \quad \text{HCP}_{05BC}=0,30 \quad \text{по } ABC_{05} F_{\phi} < F_T$							

В течение трёх зимних периодов содержание кальция в ветвях варьировало в пределах 0,76...2,01% сух. в-ва, при этом не было выявлено статистически значимых различий по содержанию элемента между ветвями разного возраста. Достоверный эффект от применения удобрений наблюдался только в 2-летней древесине, где уровень кальция на контроле в среднем за три года был существенно выше, чем в варианте с внесением наибольшей дозы удобрений.

Хотя содержание кальция в ветвях не зависело от их возраста и применения удобрений, средний по опыту уровень кальция в древесине в зимний период 2020 г. был достоверно больше, чем в 2019 и 2018. Сопоставляя данные Таблиц 20 и 21, можно заметить, что возрастание уровня Са в листьях летом 2019 г. сопровождалось достоверным увеличением концентрации элемента в ветвях в последующий зимний период. Таким образом даже трёхлетнее изучение накопления кальция в ветвях яблони показало статистически значимое варьирование показателя в разные годы, сходное с динамикой уровня кальция в листьях.

Потребность растений в почвенном питании определяется балансом минеральных элементов в системе «почва-растение» с учётом формирования вегетативной и генеративной биомассы и их возврата в почву (Трунов, 2016). Определение доз минеральных удобрений на основе балансовых расчётов широко используется для полевых и овощных культур (Минеев, 2006). Однако, использование этого метода при работе с многолетними древесными растениями в настоящее время затруднительно, поскольку необходимо не только определить количество элементов минерального питания, отчуждаемых в результате различных хозяйственных операций, но также знать их количество, накопленное в многолетних органах деревьев (корнях, ветвях, стволе) и подверженное многократному использованию (реутилизации). Решение последней задачи является методически весьма сложным в связи с большой массой изучаемых растений и их многолетним жизненным циклом.

В то же время оценка количества биогенных элементов, отчуждаемых из агроэкосистемы сада, либо временно иммобилизуемых в отмирающих частях растений, представляет теоретический и практический интерес для определения режима питания плодовых растений и корректировки программ применения удобрений.

В нашем исследовании изучение накопления кальция в ветвях, листьях и плодах яблони дало возможность определить некоторые составляющие биологического круговорота этого элемента. Для этого наряду со сбором и взвешиванием ветвей, удаляемых при обрезке, во время листопада проводили учёт общего количества листьев и определение их кальциевого статуса. Полученные данные о хозяйственном выносе кальция с урожаем и обрезаемыми ветвями, а также об его количестве, иммобилизуемом в опадающей листве, представлены в Таблице 22. В таблице количества кальция, вынесенные с плодами и листьями летом каждого года, суммируются с количеством кальция, вынесенным с ветвями в последующем зимнем периоде.

Установлено, что деревья сорта Синап орловский на подвое 54-118, растущие по схеме 6×3м, на пятый год после посадки вынесли около 23 кг/га кальция, на шестой год – 26 кг/га, на седьмой год – 38 кг/га. При этом увеличение выноса кальция произошло преимущественно за счёт увеличения массы вегетативных органов. Также, в вегетационном периоде 2019...2020 гг. увеличение иммобилизации кальция в листовом аппарате было связано с возрастанием концентрации кальция в листьях на 40% по сравнению с уровнем предыдущих лет (Таблица 22).

Следует отметить, что иммобилизация кальция с листовым опадом является временной: как правило, листья практически не покидают пределы сада, но иммобилизируют кальций до полного своего разложения. Этот процесс может иметь существенное значение в плодовых агроценозах, произрастающих на бедных кальцием почвах, где иммобилизация биогенных элементов может существенно повлиять на жизнедеятельность плодовых

деревьев. В нашем саду даже приблизительные расчёты показывают, что содержание только обменного кальция в слое 0...20 см находится на уровне 180 ц/га. Поэтому количество кальция, отчуждаемого из сада в результате хозяйственной деятельности, не должно оказывать значимого влияния на кальциевый баланс экосистемы.

Таблица 22 - Вынос кальция с различными частями растений яблони сорта Синап орловский, кг/га, 2017-2020 гг.

Варианты опыта	Вынос с плодами	Вынос с листьями	Вынос с ветвями	Сумма
2017...2018				
Контроль	0,09±0,05	13,16±0,05	4,76±0,70	22,32±0,40
N30K40	0,13±0,06	18,58±0,76	7,71±1,49	27,05±2,23
N60K80	0,13±0,07	17,07±0,19	4,75±0,57	22,53±0,21
N90K120	0,13±0,09	16,81±0,42	5,01±0,47	21,38±0,92
\bar{x}	0,12±0,02	16,40±2,25	5,56±1,41	
2018...2019				
Контроль	0,63±0,05	19,03±2,14	6,24±0,61	25,90±2,80
N30K40	0,62±0,06	17,75±1,81	10,30±2,44	28,67±4,31
N60K80	0,39±0,02	13,82±0,53	8,58±0,72	22,79±1,27
N90K120	0,44±0,03	19,25±2,69	5,89±1,01	25,58±3,73
\bar{x}	0,52±0,04	17,46±1,79	7,75±1,20	
2019...2020				
Контроль	0,62±0,04	28,58±2,13	6,07±0,98	34,77±1,46
N30K40	0,58±0,01	32,13±3,31	6,05±1,36	40,11±2,27
N60K80	0,35±0,01	32,08±4,77	9,45±1,05	42,02±2,10
N90K120	0,44±0,05	29,48±11,22	4,18±1,19	34,81±7,86
\bar{x}	0,50±0,04	30,57±1,72	6,44±0,78	

Таким образом, изучение кальциевого статуса плодов и вегетативных органов яблони на протяжении ряда последовательных периодов вегетации (4...8 лет после посадки сада) показало, что концентрация элемента во всех изучаемых органах растения значительно варьирует по годам, то есть под

влиянием природных факторов. Агротехнические факторы (внесение удобрений) ежегодно влияли на содержание кальция в плодах, а содержание элемента в листьях изменялось под действием удобрений только когда этот показатель был близок к оптимальному уровню. Трёхлетнее изучение накопления кальция в ветвях яблони показало сходство динамики кальция в ветвях и листьях.

ГЛАВА 7. ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ СОСТОЯНИЕМ ПОЧВЕННОГО КАЛЬЦИЯ И ЕГО СОДЕРЖАНИЕМ В ПЛОДАХ И ВЕГЕТАТИВНЫХ ОРГАНАХ ЯБЛОНИ⁵

Анализ научных публикаций, посвящённых проблемам питания яблони кальцием, показывает значительный недостаток системных исследований, учитывающих одновременно как состояние кальция в растении, так и связи растительного организма с окружающей средой. Авторы, оценивающие эффективность агротехнических мероприятий, направленных на снижение Са-дефицитных физиологических расстройств в плодах, зачастую даже не определяют уровень кальция в почве и не объясняют различия кальциевого статуса растений, наблюдавшиеся в разные годы проведения исследований.

Выявление проблем в кальциевом питании яблони на более ранних стадиях формирования плодов даёт дополнительные возможности повысить содержание элемента в плодах в течение периода вегетации за счёт некорневых подкормок кальцийсодержащими удобрениями. Поэтому в настоящее время продолжается поиск и усовершенствование диагностических методов на основе анализа изменений элементного состава плодов и вегетативных органов в течение всего периода вегетации (Причко и др., 2015;

⁵ В данной главе обсуждаются результаты диссертационной работы автора, опубликованные в статьях по теме диссертации:

1. **Столяров М.Е.** Влияние некорневых подкормок на накопление калия и кальция в плодах яблони / М.Е. Столяров // Плодоводство и виноградарство Юга России.- 2017.- № 48(06).- С. 126-134.
2. **Столяров М. Е.** Влияние минеральных удобрений на кальциевый режим серой лесной почвы в яблоневоом саду / М. Е. Столяров // Ломоносов-2018: Тезисы докладов XXV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 09–13 апреля 2018 года / Составитель Л.А. Поздняков. – Москва: ООО "МАКС Пресс", 2018. – С. 231-232.
3. **Столяров М.Е.** Количественная оценка выноса биогенных элементов из молодого яблоневого сада / М. Е. Столяров // Селекция и сорторазведение садовых культур. – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 93-96.
4. **Столяров, М.Е.** Влияние корневого и некорневого удобрения на качество плодов яблони двух сортов / М. Е. Столяров, Е. В. Леоничева, Т. А. Роева, Л. И. Леонтьева // Агротехнический вестник. – 2020. – № 6. – С. 59-67.
5. Leonicheva, E.V. Calcium in the soil-plant system of apple orchard when using nitrogen and potash fertilizers / E.V. Leonicheva, T.A. Roeva, L.I. Leonteva, **M.E. Stolyarov** // E3S Web of Conferences – 2021. – V.254. – art. 05010.

Uçgun et al., 2018, 2021). Прогнозу кальциевого статуса плодов на основе результатов почвенной диагностики внимание практически не уделяется. Причиной этого может быть тот факт, что Са-дефицитные физиологические расстройства встречаются у плодов яблони, выращенных в разных почвенно-климатических условиях, в том числе и на почвах, богатых карбонатами кальция.

В результате наших пятилетних исследований был получен большой массив экспериментальных данных, позволивший провести сопряжённую оценку уровня кальция в разных компонентах системы «почва-растение» садового агроценоза. Поиск зависимостей между уровнем обменных и водорастворимых форм кальция в почве и концентрацией элемента в плодах и вегетативных органах яблони был проведён при помощи корреляционного анализа.

Данные предыдущих разделов диссертации, характеризующие состояние кальция в различных компонентах системы «почва-растение» обобщены в Таблице 23. Сопоставляя данные о концентрации кальция в почве с данными об уровне элемента в листьях, можно увидеть, что кальциевый статус листьев соответствует данным о средних за вегетационный период уровнях водорастворимого Са в почве.

Таблица 23 – Показатели состояния Са в системе «почва-растение»
среднерослого яблоневого сада.

Годы	Формы Са в почве*						Са в растении	
	Обменный Са, ммоль/100 г			Водорастворимый Са, ммоль/100 г			Са в листьях, % сух. в-ва**	Са в плодах, мг/100 г сырой массы***
	0...20 см	20...40 см	40...60 см	0...20 см	20...40 см	40...60 см		
2016	15,69	15,69	14,99	1,61	1,27	1,28	1,18	10,30
2017	15,61	15,68	14,79	0,43	0,24	0,18	0,95	9,01
2018	14,96	14,75	14,00	0,21	0,19	0,16	1,05	7,81
2019	15,08	15,30	14,52	0,64	0,56	0,54	1,39	6,42
2020	13,9	14,11	13,45	0,39	0,29	0,25	1,23	9,96

*средние по всем вариантам опыта уровни содержания Са в почве за период май...сентябрь каждого года

**среднее по всем вариантам опыта содержание Са в листьях, отобранных в последнюю декаду июля каждого года

*** среднее по всем вариантам опыта содержание Са в плодах съёмной зрелости

Поскольку передвижение кальция в растении является достаточно медленным процессом, мы оценивали корреляцию уровня кальция в июльских листьях, с количеством доступных растению форм элемента, содержащихся в корнеобитаемом слое не только в июле, но и в предшествующие и последующие месяцы вегетационного периода. Косвенным образом такая оценка может дать представление о скорости поступления элемента из почвы в листья. Оценка взаимосвязи показателей кальциевого статуса листьев и почвы показала, что статистически значимой взаимосвязи между обменным кальцием в почве и содержанием кальция в листьях яблони практически не наблюдалось. При этом коэффициенты корреляции между водорастворимым кальцием в почве в августе и концентрацией кальция в листьях были высокими - в пределах 0,837...0,893 (Таблица 24). Таким образом было выявлено, что

содержание Са в листьях однолетних приростов, отобранных в сроки, рекомендуемые для проведения листовой диагностики (последняя декада июля – фаза затухания роста побегов), преимущественно определяется уровнем водорастворимого Са в почве в середине периода вегетации.

Таблица 24 – Коэффициенты корреляции между содержанием Са в листьях яблони (% сух. в-ва) и содержанием обменных и водорастворимых форм Са в почве в различные месяцы текущего периода вегетации.

Месяц	Обменный Са, ммоль/100 г			Водорастворимый Са, ммоль/100 г		
	0...20 см	20...40 см	40...60 см	0...20 см	20...40 см	40...60 см
Май	-0,170	0,019	0,142	-0,058	0,014	0,016
Июнь	0,222	0,183	0,280	-0,060	0,060	0,149
Июль	-0,220	-0,008	-0,184	0,115	0,133	0,141
Август	-0,215	-0,023	-0,033	0,893**	0,896**	0,837**
Сентябрь	0,232	0,062	0,376*	0,333	0,187	0,210

* корреляция достоверна при уровне значимости 5%

** корреляция достоверна при уровне значимости 1%

Как было показано в предшествующих разделах диссертации, содержание кальция в плодах изучаемого сорта яблони являлось намного более изменчивым показателем, по сравнению с содержанием его в листьях (Таблицы 19 и 20). На кальциевый статус плодов влияли метеоусловия периода вегетации, урожайность деревьев и применение удобрений (как почвенных, так и листовых).

Как видно из данных Таблиц 20 и 23, в течение первых четырёх лет проведения исследований наблюдалось ежегодное достоверное уменьшение концентрации кальция в яблоках, а в неурожайном 2020 г. показатель увеличился на 35% по сравнению с уровнем предшествующего года.

Анализируя данные Таблицы 23, можно заметить, что изменения кальциевого статуса плодов, в отличие от показателя для листьев, происходят не синхронно с изменением уровня водорастворимого Са в почве, а

«запаздывают» на 1 год. Это может быть связано с тем, что кальций в яблоне перемещается вверх по дереву в течение ряда вегетационных периодов, и при этом создаются его промежуточные резервы кальция в корнях и ветвях, которые в дальнейшем становятся источником элемента для формирования плодов в последующих периодах вегетации (Hangera, 1979; Terblanchea, 1979). Также известно, что плоды яблони накапливают кальций, поступающий по ксилеме, менее интенсивно, чем листья, поскольку имеют более низкий уровень транспирации (Kalcsits et al., 2020). О «конкуренции» между плодами и листьями яблони за доступный кальций упоминают Watkins et al. (2004), Леоничева и соавторы (2018). Таким образом, поступление кальция в плоды является более медленным процессом, по сравнению с его поступлением в листья.

На основании таких наблюдений, мы провели оценку корреляций между содержанием кальция в плодах съёмной зрелости (отобранных в первую декаду сентября) и уровнем обменных и водорастворимых соединений кальция в корнеобитаемом слое почвы в разные месяцы текущего вегетационного периода, а также уровнем почвенного кальция в конце предшествующего периода вегетации.

Хотя содержание в почве обменных форм кальция является показателем, традиционно применяемым в России для оценки обеспеченности сельскохозяйственных культур этим элементом, в условиях нашего эксперимента уровень обменного кальция в верхнем слое почвы под садом незначительно коррелировал с кальциевым статусом плодов (таблица 23). В то же время были установлены достоверные (при уровне значимости 1%) положительные корреляции между концентрацией Са в яблоках и содержанием в почве его водорастворимых форм в мае, июне, июле и сентябре текущего периода вегетации (Таблица 25).

Таблица 25 – Коэффициенты корреляции между содержанием Са в плодах яблони и содержанием различных форм Са в почве (слой 0...20 см) в текущий период вегетации.

Формы Са в почве	Месяц	Са в плодах съёмной зрелости	
		% сух. в-ва	мг/100 г сырой массы
Обменный Са, ммоль/100 г	Май	0,173	0,021
	Июнь	0,270	0,118
	Июль	0,310	0,045
	Август	0,219	0,007
	Сентябрь	-0,236	-0,453**
Водорастворимый Са, ммоль/100 г	Май	0,481**	0,399*
	Июнь	0,579**	0,451**
	Июль	0,565**	0,356*
	Август	-0,187	-0,170
	Сентябрь	0,493**	0,336

* корреляция достоверна при уровне значимости 5%

** корреляция достоверна при уровне значимости 1%

Оценка зависимостей между концентрацией Са в плодах и содержанием его обменных и водорастворимых соединений в почве в предшествующем периоде вегетации подтвердила «отсроченное» влияние изменения условий почвенного питания на кальциевый статус плодов. Концентрация кальция в яблоках достоверно коррелировала с уровнем почвенного водорастворимого кальция в августе и сентябре предшествующего периода вегетации (Таблица 26), причём коэффициенты корреляции были выше, чем при сопоставлении показателей текущего года. Таким образом, количество кальция, содержащееся в плодах яблони на момент уборки урожая, в значительной мере определяется почвенными условиями кальциевого питания деревьев в предшествующем периоде вегетации.

Таблица 26 – Коэффициенты корреляции между содержанием Са в плодах яблони и содержанием различных форм Са в почве (слой 0...20 см) во второй половине предшествующего периода вегетации

Формы Са в почве	Месяц	Са в плодах съёмной зрелости	
		% сух. в-ва	мг/100 г сырой массы
Обменный Са, ммоль/100 г	Август	-0,166	-0,335
	Сентябрь	0,081	0,560**
Водорастворимый Са, ммоль/100 г	Август	0,621**	0,689**
	Сентябрь	0,606**	0,402*

* корреляция достоверна при уровне значимости 5%

** корреляция достоверна при уровне значимости 1%

Анализ взаимосвязей между состоянием почвенного кальция и концентрацией этого элемента в плодах показал, что содержание в почве водорастворимых форм кальция может быть перспективным диагностическим показателем для оценки обеспеченности этим элементом сортов яблони, подверженных физиологическим расстройствам, связанным с недостатком элемента. Определение уровня водорастворимого кальция в конце периода вегетации можно использовать для прогноза кальциевого статуса плодов следующего года и соответствующим образом планировать корректирующие агротехнические мероприятия.

Обобщая данные, представленные в таблице 26, а также в Главах 5.1 и 6.1, можно сделать вывод: если в корнеобитаемом слое агросерых почв Среднерусской возвышенности содержание водорастворимого Са на протяжении периода вегетации не превышает 1 ммоль/100 г, то в следующем году для плодов яблони существует высокий риск появления Са-дефицитных физиологических расстройств.

В то же время наши результаты подтверждают сделанное ранее предположение о «конкуренции» между плодами и листьями за кальций, поступающий по ксилеме в течение периода вегетации. Поэтому, хотя листовая диагностика является популярным способом оценки качества минерального питания плодовых культур, использование этого приёма для

характеристики условий питания яблони кальцием может быть неинформативным для прогноза потенциальной лёжкоспособности плодов.

Поскольку в ветвях яблони создаются промежуточные резервы Са, которые могут быть в дальнейшем использованы при формировании плодов, определение кальциевого статуса побегов также представляет интерес как способ выявления риска возникновения Са-дефицитных расстройств в плодах. Сопоставляя данные Таблиц 15 и 21, представленные в предыдущих разделах диссертации, можно заметить, что возрастание уровня водорастворимого Са летом 2019 г. способствовало достоверному увеличению концентрации элемента в ветвях в последующий зимний период.

Статистический анализ взаимосвязей в системе «почва-ветви яблони» показал, что содержание элемента в 1-летних и 2-летних ветвях достоверно коррелировало с уровнем почвенного водорастворимого кальция в августе и сентябре предшествующего периода вегетации (Таблица 27).

Статистически значимые корреляции с содержанием в почве обменных форм кальция установлены только для 2-летних ветвей. Содержание кальция в 3-летних ветвях достоверно не коррелировало с уровнем почвенного кальция в предшествующий период вегетации, что можно объяснить эффектом «разбавления», поскольку у ветвей этого возраста большая часть массы приходится на древесину, тогда как кальций накапливается преимущественно в коре. У более тонких однолетних приростов доля коры в общей массе ветвей значительно больше, поэтому их кальциевый статус лучше коррелировал с уровнем наиболее подвижного кальция в почве.

Таблица 27 – Коэффициенты корреляции между содержанием Са в ветвях яблони и в почве в различные месяцы предшествующего периода вегетации

Возраст ветвей	Месяц	Обменный Са, ммоль/100 г		Водорастворимый Са, ммоль/100 г	
		0...20 см	20...40 см	0...20 см	20...40 см
1-летние	Май	-0,317	-0,070	-0,267	-0,131
	Июнь	0,119	-0,059	-0,187	-0,263
	Июль	-0,380	-0,145	0,014	0,004
	Август	-0,245	-0,123	0,663**	0,670**
	Сентябрь	0,276	-0,170	0,432*	0,515**
2-летние	Май	-0,171	-0,103	-0,283	-0,018
	Июнь	0,595**	0,226	-0,254	-0,202
	Июль	0,041	0,189	-0,042	0,130
	Август	0,162	0,229	0,504*	0,565**
	Сентябрь	0,613**	0,314	0,337	0,260
3-летние	Май	-0,174	-0,024	-0,182	0,135
	Июнь	0,141	0,039	-0,096	-0,153
	Июль	0,221	0,276	0,042	0,079
	Август	0,179	0,210	0,267	0,275
	Сентябрь	0,233	-0,053	0,194	0,281

* корреляция достоверна при уровне значимости 5%

** корреляция достоверна при уровне значимости 1%

Таким образом, показатели корреляции между содержанием кальция в однолетних приростах яблони зимой (февраль...март) и водорастворимым кальцием в почве во второй половине предшествующего периода вегетации близки к аналогичным показателям, установленным для плодов яблони. Следовательно, содержание кальция в однолетних приростах можно использовать для прогноза кальциевого статуса плодов в качестве показателя, дополняющего почвенную диагностику. Чтобы оценить возможности такого прогноза, были изучены корреляции между содержанием кальция в ветвях в зимний период и его содержанием в плодах и листьях в последующем периоде вегетации (Таблица 28).

Изучение взаимосвязей между концентрацией Са в плодах и вегетативных органах показало, что содержание элемента в плодах положительно коррелировало с уровнем кальция в 1-летних и 2-летних ветвях,

наблюдаемым в предшествующий зимний период (Таблица 28). Таким образом, содержание Са в ветвях можно рассматривать как прогностический показатель, дополняющий почвенную диагностику. Сопоставляя данные Таблиц 21 и 28, можно сделать вывод, что содержание Са в однолетних приростах яблони в зимний период менее 1,5% сух. массы также свидетельствует о высоком риске дефицита Са в плодах.

Таблица 28 – Коэффициенты корреляции между содержанием Са в плодах и вегетативных органах яблони.

	Са в ветвях, % сух.в-ва			Са в листьях, % сух.в-ва
	1-летние	2-летние	3-летние	
Са в плодах, % сух.в-ва	0,445*	0,419*	0,051	-0,156
Са в плодах, мг/100 г сырой массы	0,471*	0,324	0,022	-0,143
Са в листьях, % сух.в-ва	0,277	-0,448*	-0,070	

* корреляция достоверна при уровне значимости 5%

Получение многолетнего массива данных о динамике кальция во всех компонентах системы «почва-растение» яблоневого сада и анализ взаимосвязей между состоянием почвенного кальция и концентрацией этого элемента в вегетативных органах и плодах дают основание считать, что уровень водорастворимого кальция в почве является показателем, наиболее объективно отражающим условия кальциевого питания яблони. Важно учитывать, что почвенная диагностика кальциевого питания, проводимая на основе этого показателя предназначена для планирования подкормок кальцием в следующем периоде вегетации. **Критическим уровнем** для агросерых почв Среднерусской возвышенности является **концентрация водорастворимых форм кальция 1 ммоль/100 г почвы**. Если содержание водорастворимого кальция в корнеобитаемом слое почвы неорошаемого яблоневого сада во второй половине периода вегетации ниже этого критического уровня, производителям яблок следует планировать проведение

систематических обработок деревьев кальцийсодержащими препаратами в следующем году.

В качестве показателя, дополняющего почвенную диагностику, можно использовать содержание кальция в однолетних побегах в зимний период. Если в однолетних приростах **содержание кальция в менее 1,5% сух. в-ва**, это свидетельствует о **высоком риске Са-дефицитных расстройств в плодах последующего периода вегетации.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы впервые было проведено достаточно длительное (5 последовательных периодов вегетации) систематическое исследование кальциевого режима яблоневого сада, в результате которого был получен многолетний массив данных о динамике элемента в системе «почва-растение». Анализ полученных результатов позволил выявить взаимосвязи между состоянием почвенного кальция и концентрацией этого элемента в вегетативных органах и плодах с учётом метеорологических и агротехнических факторов, а также специфических особенностей агроэкосистемы сада (многолетней монокультуры, периодичности плодоношения, более длинного периода питания растений).

Впервые было показано, что для 4...8-летних деревьев яблони сорта Синап орловский значимыми факторами, влияющими на процессы накопления кальция в плодах и вегетативных органах, были:

- содержание в почве наиболее доступных соединений кальция (водорастворимых);
- метеорологические особенности периода вегетации;
- плодовая нагрузка деревьев;
- применение азотных и калийных удобрений (как почвенных, так и листовых).

Первый из этих факторов оказывал наиболее сильное влияние на уровень кальция в плодах и вегетативных органах, однако его связь с содержанием Са в плодах была «отсроченной» на один год. Благодаря этому предлагается использовать уровень водорастворимых соединений Са в почве сада в конце периода вегетации для прогноза кальциевого статуса плодов следующего года и планирования агротехнических мероприятий, корректирующих поступление элемента в плоды.

Установлено, что дополнительное азотное и калийное питание оказывает значимое влияние на уровень Са в плодах, но воздействие

удобрений только усиливает эффект от воздействия природных факторов. Корневое и некорневое применение удобрений способствовало достоверному увеличению содержания кальция в плодах, если значения показателя на контроле превышали 9,4 мг/100 г сырой массы, при более низком уровне кальция использование удобрений приводило к дополнительному снижению показателя.

При оценке корреляций между уровнем Са в вегетативных органах и плодах яблони выявлено, что содержание Са в 1-летних ветвях можно рассматривать как прогностический показатель, дополняющий почвенную диагностику, тогда как содержание Са в листьях не коррелирует с его содержанием в плодах.

ВЫВОДЫ

Изучение кальциевого режима различных компонентов агроэкосистемы неорошаемого яблоневого сада на фоне корневого и некорневого применения азотных и калийных удобрений в течение 5 периодов вегетации позволило установить следующее.

1. В агросерой почве вступающего в плодоношение среднерослого яблоневого сада, имеющей повышенное содержание обменного кальция, уже в первые годы после посадки деревьев начинается постепенное снижение запасов доступных растениям форм элемента: за пять лет наблюдений уровень обменного кальция снизился на 8% (потери из 60 сантиметрового слоя почвы составили 317,6 кг/га). Концентрация водорастворимых форм кальция подвержена значительным сезонным колебаниям, которые зависят от гидротермического режима почвы и усиливаются при внесении удобрений. Потребление кальция молодыми среднерослыми деревьями яблони не оказывает существенного влияния на кальциевый режим почвы в первые 7 лет жизни сада.

2. При ежегодном внесении в агросерую почву под садом азотных и калийных удобрений в дозах N30K40... N90K120 уже в первые годы их применения происходят изменения условий кальциевого питания яблони, которые заключаются в увеличении концентрации водорастворимых форм кальция, в то время как потери обменных форм из корнеобитаемого слоя, дополнительно увеличиваются. Ежегодное внесение удобрений в дозе N90K120, рекомендуемой для сильно- и среднерослых садов ЦЧЗ, оказывало наиболее сильное воздействие на буферность почвы по отношению к кальцию: за пять лет проведения исследований уровень обменного кальция в этом варианте достоверно снизился в слое почвы 0...40 см, а колебания уровня водорастворимого кальция во влажные годы были в 2...4 раза выше, чем в других вариантах опыта.

3. Содержание кальция в плодах яблони сорта Синап орловский зависело от условий минерального питания и от урожайности деревьев. Концентрация кальция в плодах съёмной зрелости коррелировала ($r=0,45\dots0,58$; $P>0,01$) с уровнем водорастворимого кальция в почве в первой половине периода вегетации, а также с содержанием водорастворимого кальция во второй половине предшествующего периода вегетации ($r=0,61\dots0,69$; $P>0,01$). Корневое и некорневое применение удобрений способствовало достоверному увеличению содержания кальция в плодах, если значения показателя на контроле превышали 9,4 мг/100 г сырой массы, при более низком уровне кальция использование удобрений приводило к дополнительному снижению показателя.
4. Для агросерых почв Среднерусской возвышенности уровень водорастворимого кальция в конце периода вегетации можно использовать для прогноза кальциевого статуса плодов следующего года. Содержание Са в 1-летних и 2-летних ветвях в зимний период можно рассматривать как прогностический показатель, дополняющий почвенную диагностику.
5. Содержание кальция в листьях яблони в разные годы различалось в 1,1...1,5 раза и при этом коррелировало ($r=0,89\dots0,84$; $P>0,01$) с уровнем водорастворимого кальция в почве, наблюдавшимся ежегодно в августе.
6. Ежегодное в течение 6 лет внесение азотных и калийных удобрений оказало существенное воздействие на показатели кислотности и запасы элементов питания в агросерой почве под садом. Во всех вариантах опыта выявлено снижение $pH_{КС}$ и количества подвижного фосфора. При этом происходило постепенное насыщение почвы обменными формами калия, содержание которых выросло в 2-3 раза в зависимости от дозы удобрений. Внесение азотных удобрений способствовало увеличению количества N_{min} в почве в 1,5 – 5 раз, которое наблюдалось в 1-й половине периода вегетации, причём преобладающей формой N_{min} был аммоний.

РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ АГРОХИМИЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ И ПРОИЗВОДСТВА

1. При эксплуатации неорошаемых садов яблони на агросерых почвах Центрально-Чернозёмного региона РФ ежегодно во второй половине периода вегетации (август...сентябрь) определять содержание водорастворимого кальция в слое почвы 0...40 см. При концентрации водорастворимых форм кальция менее 1 ммоль/100 г необходимо планировать подкормки деревьев кальцием в следующем периоде вегетации.
2. В качестве показателя, дополняющего почвенную диагностику, рекомендуется использовать содержание кальция в однолетних побегах яблони в зимний период. При содержании Са в побегах менее 1,5% сух. в-ва следует планировать подкормки деревьев кальцием, чтобы снизить риск Са-дефицитных физиологических расстройств в плодах последующего периода вегетации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аканова, Н.И. Агроэкологическая и энергетическая эффективность сочетания известкования с минимальными удобрениями: автореф. дис. ... д-ра биол. наук / Н.И. Аканова. – М., 2001. – 36с.
2. Аканова, Н.И. Вопросы оптимизации кислотности почв и баланса кальция/Н.И. Аканова, Г.Е. Гришин, Н.А. Комарова, и др. // Нива Поволжья. – 2011. – №1 (18). – С. 1–6.
3. Аринушкина, Е.В. Руководство по химическому анализу почв. 2–е изд. / Е.В. Аринушкина. – М.: изд-во МГУ, 1970. – 488 с.
4. Бинеталиев, Ш.А. Качество и сохраняемость спуровых сортов яблок интенсивных садов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.15 / Ш.А. Бинеталиев. – М., 1990. – 25 с.
5. Вегера, А. А. Влияние минеральных удобрений на рост и плодоношение яблони / А.А. Вегера // Науч. тр. Ставроп. с.–х. ин – т. – 1978. – вып. 41. – т. 2. С. 19–23.
6. Воеводина, Л.А. Кальциевый режим чернозема обыкновенного при капельном орошении минерализованной водой/ Л.А. Воеводина // Мелиорация и гидротехника. – 2011. – №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kaltsievyy-rezhim-chernozema-obyknovennogo-pri-kaпельном-oroshenii-mineralizovannoy-vodoy> (дата обращения: 03.12.2021).
7. Воробьев, В. Ф. Влияние различных доз минеральных удобрений на лежкость и качество плодов яблони Антоновка обыкновенная / В.Ф. Воробьев // Сборник научных трудов "Плодоводство и ягодоводство в России". М. – 1996. – Т. III. – С. 174–178.
8. Габбасова, И.М. Влияние основной обработки и удобрений в семипольном севообороте на физико–химические свойства серой лесной почвы / И.М. Габбасова, Ф.И. Назырова, Г.А. Хакимова // Агрохимия. – 2007. – № 10. – С.24–31.

9. Гамзиков, Г.П. Прогноз обеспеченности почв азотом и потребности полевых культур в азотных удобрениях / Г.П. Гамзиков // Инновационное развитие АПК. – 2015. – №3(9). – С. 11-20.
10. Гедройц, К. К. Учение о поглотительной способности почв / К.К. Гедройц. – Гос. изд-во с/х и колх. кооперативной литературы. – М., Л.,1932. – 203 с.
11. Голышкин, Л.В. Изучение особенностей внешней и внутренней архитектоники плодов яблони при поражаемости горькой ямчатостью / Л.В. Голышкин // Современное садоводство. – 2015. – № 4. – С. 71–76.
12. Гудковский, В. А. Длительное хранение плодов: прогрессивные способы / В. А. Гудковский. – Алма-Ата: Кайнар, 1978. – 151 с.
13. Гудковский, В.А. Система сокращения потерь и сохранения качества плодов яблони, груши и винограда при хранении: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук/ В.А. Гудковский. – Мичуринск, 1990. – 55 с.
14. Дмитриев, Н.Н. Изменение плодородия серых лесных почв и продуктивности яровой пшеницы в севообороте в условиях длительного применения минеральных удобрений в Приангарье / Н.Н. Дмитриев // Вестник Бурятского государственного университета. – 2007. – № 3. – С.157–159.
15. Дорошенко, Т.Н. Биологические особенности сорто-подвойных комбинаций яблони с различной отзывчивостью на минеральное питание / Т.Н. Дорошенко, Э.В. Макарова, И.В. Дубравина // Тр. Кубанского ГАУ. – 1994. – №342. – С. 42–50.
16. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта / Б.А. Доспехов. – 5-е изд. доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
17. Журова, В.Г. Изучение влияния ионов калия, кальция и магния на рост и развитие растений/ В.Г. Журова, М.С. Светличная // Достижения науки и образования. – 2018. – Т. 14. – № 36. – С. 13–15.
18. Кедров-Зихман, О.К. Известкование дерново-подзолистых почв в нечерноземной полосе / О.К. Кедров-Зихман. – М.: Сельхозгиз, 1955. – 78 с.

19. Кедров–Зихман, О.К. О влиянии извести на физические, химические и биологические свойства почвы / О.К. Кедров–Зихман // Записки Горьковского сельскохозяйственного института. – 1925. – Т. 3. – С. 149–172.
20. Кобель, Ф. Плодоводство на физиологической основе / Ф. Кобель. – М.: Сельхозгиз, 1957. – 375 с.
21. Ковда, В.А. Почвоведение. Учеб. для ун–тов / В.А. Ковда, Б.Г. Розанов. – М.: Эксмо, 2011. – 540 с.
22. Колядич, М. А. Оценка сортов яблони по устойчивости к болезням и вредителям в РУП 'Учхоз БГСХА' / М. А. Колядич. – Минск: Изд–во БГСХА, 2012. – 71 с.
23. Комаров, В.И. Фосфатный режим дерново–подзолистых и серых лесных почв Владимирской области / В.И. Комаров, Н.А. Комарова, А.В. Гришина // Агрохимический вестник. – 2012. – №2.
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fosfatnyy-rezhim-derново-podzolistyh-i-seryh-lesnyh-pochv-vladimirskoy-oblasti> (дата обращения: 11.02.2022).
24. Комиссарова В.С. Влияние длительного последействия известкования и систематического применения удобрений на кислотность светло–серой лесной почвы / В.С. Комиссарова, Ю.А. Богомолова, А.О. Сюбаева // Плодородие. – 2018. – №2 (101). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-dlitelnogo-posledeystviya-izvestkovaniya-i-sistematicallyeskogo-primeneniya-udobreniy-na-kislotnost-svetlo-seroy-lesnoy> (дата обращения: 11.02.2022).
25. Кондаков, А. К. Удобрение плодовых деревьев, ягодников, питомников и цветочных культур / А.К. Кондаков. – Мичуринск, 2006. – 254 с.
26. Красова, Н.Г. Устойчивость сортов яблони к неблагоприятным условиям в период цветения / Н.Г. Красова, А.М. Галашева, З.Е. Ожерельева // Селекция, генетика и сортовая агротехника плодовых культур. – Орел: ВНИИСПК. – 2011. – С. 12–18.
27. Кузин, А.И. Недеструктивная диагностика калийного питания яблони с помощью отражательной спектрофотометрии / А.И. Кузин, Ю.В. Трунов, А.В.

- Соловьёв, Б.И. Смагин // Плодоводство и ягодоводство России. – 2018. – Т.53. – С. 147–156. DOI: 10.31676/2073–4948–2018–53–147–156.
28. Кузин, А. И. Системы листового питания яблони специальными удобрениями : Рекомендации для Центрально-Черноземной зоны России / А. И. Кузин, А. Д. Денисов, А. С. Петровский. – Щелково : АО "Щелково Агрохим", 2021. – 84 с.
29. Кузин, А.И. Особенности почвенно–листовой диагностики калийного питания яблони/ А.И. Кузин, Ю.В. Трунов // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2016. – №1. – С.16–17.
30. Кук, Дж. У. Регулирование плодородия почвы / Дж. У. Кук. – М.: Колос, 1970. – 520 с.
31. Леоничева, Е. В. Элементный состав плодов яблони при разных режимах минерального питания / Е. В. Леоничева, Т. А. Роева, Л. И. Леонтьева. – Орел: Всероссийский научно–исследовательский институт селекции плодовых культур. – 2020. – 112 с. – ISBN 978–5–6044445–4–2.
32. Леоничева, Е.В. Влияние некорневых подкормок бор–, калий– и кальцийсодержащими соединениями на фосфорный статус деревьев яблони / Е.В. Леоничева, Т.А. Роева, Л.И. Леонтьева // Современное садоводство – Contemporary horticulture. – 2021. – №4. DOI: https://www.doi.org/10.24411/23126701_2021_0403
33. Леоничева, Е.В. Оценка динамики минерального азота в агросерой почве под семечковыми и косточковыми садами / Е. В. Леоничева, Т. А. Роева, Л. И. Леонтьева, М. Е. Столяров // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2022. – № 5. – С. 16-20.
34. Леоничева, Е.В. Влияние некорневых подкормок на содержание калия, кальция и магния в плодах двух сортов яблони / Е.В. Леоничева, Т.А. Роева, Л.И. Леонтьева, О.А. Ветрова, М.Е. Столяров// Агрохимия. – 2018. – № 8. – С. 22–33. DOI: 10.1134/S0002188118080094
35. Леоничева, Е.В. Изучение минерального состава плодов / Е. В. Леоничева, Т. А. Роева, М. Е. Столяров, Л. И. Леонтьева. – Орёл:

Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур, 2018. – 28 с.

36. Леоничева, Е.В. Диагностика минерального питания яблони: Методические рекомендации / Е. В. Леоничева, Т. А. Роева, Л. И. Леонтьева, М. Е. Столяров. – Орел: Всероссийский научно–исследовательский институт селекции плодовых культур, 2021. – 36 с. – ISBN 978–5–6044445–8–0.

37. Леоничева, Е.В. Содержание кальция в плодах и листьях яблони в зависимости от некорневых подкормок / Е.В. Леоничева, Т.А. Роева, Л.И. Леонтьева, М.Е. Столяров, М.А. Макаркина // Садоводство и виноградарство. – 2018. – № 5. – С. 49–57. DOI: 10.31676/0235–2591–2018–5–49–57.

38. Леоничева, Е.В. Элементный состав плодов яблони сорта Синап орловский при некорневых обработках соединениями кальция и биологически активными веществами / Е.В. Леоничева, Т.А. Роева, Л.И. Леонтьева, М.Е. Столяров, М.А. Макаркина, П.С. Прудников // Современное садоводство. – 2017. – №4(24). – С.84–96. DOI: [10.24411/2218–5275–2017–5–00037](https://doi.org/10.24411/2218-5275-2017-5-00037)

39. Лесогорова, А.И. Влияние минеральных удобрений на интенсивность фотосинтеза и урожайность различных сортов яблони / А.И. Лесогорова, А.Ф. Ковалёва, П.С. Когут // Физиологические основы продуктивности плодовых и ягодных культур. – Мичуринск. – 1986. – С. 30 – 34.

40. Лукин, С.В. Мониторинг кислотности почв ЦЧО России / С. В. Лукин, Е. А. Празина // Достижения науки и техники АПК. – 2019. – №4. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring–kislotnosti–pochv–tscho–rossii](https://cyberleninka.ru/article/n/monitoring-kislotnosti-pochv-tscho-rossii) (дата обращения: 11.02.2022).

41. Макарова, И.В. Исследование сигнальной роли ионов кальция в цитокинин–зависимых реакциях *Amaranthus caudatus* L / И.В. Макарова, Е.А. Румянцева, И.А. Гетман, Г.А. Романов, С.С. Медведев // Biological Communications. – 2003. – №3. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie–signalnoy–roli–ionov–kaltsiya–v–tsitokinin–zavisimyh–reaktsiyah–amaranthus–caudatus–l](https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-signalnoy-rol-i-ionov-kaltsiya-v-tsitokinin-zavisimyh-reaktsiyah-amaranthus-caudatus-l) (дата обращения: 07.12.2021).

42. Медведев, С.С. Физиология растений. Учебник для университетов / С.С. Медведев. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. – 335 с.
43. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. — М.: ФГНУ «Росинформагротех», – 2003. — 240 с.
44. Минеев В. Г. Практикум по агрохимии / Минеев В.Г., Дурынина Е.П., Кочетавкин А.В., Гомонова Н.Ф., Грачева Н.К., Соловьев Г.А., Большеева Т.Н., Савельев И.Б. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 304 с. **ISBN** 5–211–00398–5.
45. Минеев В. Г. Практикум по агрохимии / Минеев В.Г., Сычёв В.Г., Амелянчик О.А., Большеева Т.Н., Гомонова Н.Ф., Дурынина Е.П., Егоров В.С., Егорова Е.В., Едемская Н.Л., Карпова Е.А., Прижукова В.Г. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 689 с. **ISBN** 5–211–04265–4.
46. Минеев, В.Г. Агрохимия: учеб. для вузов / В. Г. Минеев. – Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ: КолосС, 2004. – 718 с. **ISBN** 5–211–04795–8 (Изд-во МГУ). – **ISBN** 5–9532–0253–9 (Колос)
47. Минеев, В.Г. Агрохимия: учебник / В.Г. Минеев. – 3-е изд. – М.:МГУ: Наука, 2006. – 410с.
48. Некрасов, Р.В. Агроэкологическая и социально-экономическая перспектива химической мелиорации почв / Р.В. Некрасов, Н.И. Аканова, С.И. Шкуркин // Плодородие. – 2021. – №3. – С. 52–55. DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.09.
49. Овчаренко, М.М. Приемы повышения плодородия почв (известкование, фосфоритование, гипсование): науч.-метод. реком./ Р.В. Некрасов, Н.И. Аканова, П.В. Прудников, А.И. Осипов. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. – 116 с.
50. Окорков, В.В. Влияние удобрений на кислотность серых лесных почв ополья / В.В. Окорков, Л.А. Окоркова, О.А. Фенова // Владимирский земледелец. – 2010. – №1–2. – С. 16-20.

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-udobreniy-na-kislotnost-seryh-lesnyh-pochv-opolya> (дата обращения: 16.07.2022).

51. Способ ранней диагностики и определения предрасположенности плодов яблони к горькой ямчатости при хранении: патент 2593347, Российская Федерация : МПК7 G01N 33/02 A01F 25/00, 08.10.2016 г.
52. Попова, В.П. Высокоточная технология производства плодов яблони в условиях юга России / В.П. Попова // Садоводство и виноградарство. – 2011. – № 4. – С. 43–48.
53. Попова, В.П. Совершенствование методов оценки плодородия почв садовых ценозов / В.П. Попова, Н.Н. Сергеева, Т.Г. Фоменко, Н.Г. Пестова // Научные труды Государственного научного учреждения Северо–Кавказского зонального научно–исследовательского института садоводства и виноградарства Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2016. – Т. 9. – С. 122–130.
54. Причко, Т. Г. Влияние особенностей анатомического строения яблок на устойчивость к развитию заболевания горькой ямчатости / Т. Г. Причко, Л. Д. Чалая, Т. Л. Смелик // Новые технологии. – 2015. – №1. – С.129–136.
55. Причко, Т. Г. Сорты яблок с высокой биологически обусловленной лежкостью / Т. Г. Причко // Научные основы устойчивого садоводства в России. – 1999. – С. 219–221.
56. Причко, Т. Г. Эффективность новых кальций содержащих препаратов в борьбе с горькой ямчатостью плодов яблони / Т. Г. Причко, Т. Л. Смелик // Научн. тр. СКЗНИИСиВ. – 2015. – Т. 7. – С.143–146.
57. Причко, Т.Г. Биохимические и технологические аспекты хранения и переработки плодов яблони / Т.Г. Причко. – Краснодар, 2002. – 172с.
58. Причко, Т.Г. Биохимические и технологические основы интенсификации производства, хранения и переработки плодов и ягод: Автореф. дисс. докт. с.–х. наук / Т. Г. Причко. – Краснодар, 2002. – 53с.

59. Причко, Т.Г. Оптимизация режимов и способов послеуборочной обработки и хранения яблок Кубани с учетом биохимических особенностей: Автореф. дис. канд.техн. наук / Т. Г. Причко. – Краснодар, 1990. – 24с.
60. Причко, Т.Г. Снижение развития горькой ямчатости на основе оптимизации минерального состава яблок / Т.Г. Причко, Л.Д. Чалая, М.В. Карпушина, Т.Л. Смелик// Фундаментальные и прикладные разработки, формирующие современный облик садоводства и виноградарства: Сб. – Краснодар: ГНУ СКЗНИИСиВ. – 2011. – С. 321–327.
61. Пугачев, Г. Н. Водный режим - фактор активности кальция в насаждениях яблони / Г. Н. Пугачев, И. А. Трунов // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2006. – № 1. – С. 44-49.
62. Пугачев, Г. Н. Содержание и активность кальция в садах на слаборослых клоновых подвоях яблони на чернозёмных почвах : специальность 06.01.04 "Агрохимия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Пугачев Григорий Николаевич. – Воронеж, 2004. – 20 с.
63. Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур / под ред. Е.Н. Седова и Т.П. Огольцовой. – Орёл: ВНИИСПК, 1999. – 608 с.
64. Рейвн, П. Современная ботаника. Том 1. В 2-х т. Пер. с англ. / П. Рейвн, Р. Эверт, С. Айкхорн. — М.: Мир, 1990. — 348 с. ISBN: 5-03-000297-9.
65. Роева, Т.А. Изменение содержания различных форм воды в побегах яблони под влиянием некорневых подкормок / Т. А. Роева, О. В. Панфилова, Е. В. Леоничева, Л.И. Леонтьева, О.А. Ветрова // Плодоводство и ягодоводство России. – 2014. – Т. 40. – № 2. – С. 189-192.
66. Седов, Е.Н. Помология. В 5 т. Т. I: Яблоня / под ред. Седова Е. Н. – Орел: ВНИИСПК, 2005. – 576 с.
67. Седов, Е.Н. Селекция и новые сорта яблони/ Е.Н. Седов. – Орел: ВНИИСПК, 2011. – 624 с.

68. Сергеева, Н.Н. Многолетняя динамика агрохимических свойств черноземов под яблоневыми садами / Н. Н. Сергеева, И. Ю. Савин, Ю. В. Трунов, И.А. Драгавцева, А.С. Моренец // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2018. – № 93. – С. 21–39. DOI: 10.19047/0136–1694–2018–93–21–39
69. Сидорова, И.А. Содержание кальция в плодах различных сортов яблони как технологический показатель сырья для переработки / И. А. Сидорова, Е.С. Салина, Н.С. Левгерова // Современное садоводство. – 2016. – №3. – С.27–32. URL: journal.vniispk.ru/pdf/2016/3/34.pdf.
70. Скопин, А.Ю. Новый модулятор активности *stim2*–зависимых депонированных кальциевых каналов / А.Ю. Скопин, А.Д. Григорьев, Л.Н. Глушанкова, А.В. Шалыгин, Г. Ванг, В.Г. Карцев, Е.В. Казначеева // Acta Naturae (русскаяязычная версия). – 2021. – №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novyy-modulyator-aktivnosti-stim2-zavisimyh-depo-upravlyaemyh-kaltsievyyh-kanalov> (дата обращения: 07.12.2021).
71. Смирнов, П.М. Методы химической мелиорации почв. Известкование и гипсование / П.М. Смирнов // Агрохимия. – М.: Колос, 1975. – С. 114–152.
72. Спиваковский, Н.Д. Удобрение плодовых и ягодных культур / Н.Д. Спиваковский. – М.: Россельхозиздат, 1984. – 270 с.
73. Столяров М.Е. Влияние некорневых подкормок на накопление калия и кальция в плодах яблони / М.Е. Столяров // Плодоводство и виноградарство Юга России. - 2017.- № 48(06). - С. 126-134.
74. Столяров, М.Е. Динамика обменных форм калия в серых лесных почвах молодого яблоневого сада при внесении минеральных удобрений / М. Е. Столяров // Плодоводство и ягодоводство России. – 2017. – Т. 48. – № 2. – С. 286-289.
75. Столяров, М. Е. Влияние минеральных удобрений на кальциевый режим серой лесной почвы в яблоневом саду / М. Е. Столяров // Ломоносов–2018: Тезисы докладов XXV Международной научной конференции студентов,

аспирантов и молодых ученых, Москва, 09–13 апреля 2018 года. – Москва: ООО "МАКС Пресс". – 2018. – С. 231–232.

76. Столяров М. Е. Динамика доступных форм азота в серых лесных почвах молодого яблоневого сада / М. Е. Столяров // Селекция и сорторазведение садовых культур. – 2018. – Т. 5. – № 1. – С. 127–131.

77. Столяров, М. Е. Количественная оценка выноса биогенных элементов из молодого яблоневого сада / М. Е. Столяров // Селекция и сорторазведение садовых культур. – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 93–96.

78. Столяров, М.Е. Влияние корневого и некорневого удобрения на качество плодов яблони двух сортов / М. Е. Столяров, Е. В. Леоничева, Т. А. Роева, Л. И. Леонтьева // Агрехимический вестник. – 2020. – № 6. – С. 59–67. – DOI 10.24411/1029–2551–2020–10087.

79. Стюхин А.Ю. Влияние удобрений и извести на кислотность дерново–подзолистой почвы / А.Ю. Стюхин, А.В. Захаренко, Л.М. Поддымкина // Плодородие. – 2007. – №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-udobreniy-i-izvesti-na-kislotnost-derново-podzolistoy-pochvy> (дата обращения: 16.07.2022).

80. Тарасов, В.М. Рост и продуктивность молодых яблонь в зависимости от способа, норм внесения минеральных удобрений и предпосадочной подготовки почвы / В.М. Тарасов, Л.В. Маймусова, В.Ф. Коваленко // Известия Тимирязевской с.х. академии. – 1986. – Вып. 6. – С. 129–138.

81. Титова, В.И. Изменение продуктивности культур и агрохимических показателей почвы в 9–й ротации севооборота в многолетнем полевом опыте при применении удобрений / В.И.Титова, Л.Д.Варламова, Е.Г.Тюрникова, В.В.Нефедьева // Агрехимия. – 2013. – № 7. – С.25–32.

82. Томпсон, Л.М. Почвы и их плодородие / Л.М. Томпсон, Ф.Р. Трой. – М.: Колос, 1982. – 462 с.

83. Трунов И.А. Влияние погодных условий на содержание кальция в листьях и плодах яблони / И.А. Трунов, Г.Н. Пугачев, В.Л. Захаров // Вопросы

современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2005. – № 1. – С. 31-34.

84. Трунов Ю. В. Биологические основы минерального питания яблони: научное издание. – 2-е изд., перераб. и доп. / Ю.В. Трунов. – Воронеж: Изд-во Кварта, 2016. – 418 с.

85. Трунов, Ю.В. Минеральное питание и удобрение яблони / Ю.В. Трунов. – Мичуринск, 2010. – 400 с.

86. Трунов, Ю.В. Достижения и проблемы российской науки в области минерального питания садовых растений / Ю.В. Трунов, Л.Б. Трунова // Плодоводство и виноградарство Юга России. – 2013. – № 23(5). – С.121-130.

87. Хораськина, Ю.С. Модель динамики кальция в северотаежных лесных почвах / Ю.С. Хораськина, А.С. Комаров, М.Г. Безрукова, Н.В. Лукина, М.А. Орлова // Известия Самарского научного центра РАН. –2009. – №1–7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-dinamiki-kaltsiya-v-severotaezhnyh-lesnyh-pochvah> (дата обращения: 13.12.2021).

88. Церлинг В.В. Методические указания по диагностике минерального питания яблони и других садовых культур / В.В. Церлинг, Л.А. Егорова. – М.: Колос. – 1980. – 47 с.

89. Швартау, В.В. Кальций в растительных клетках/В.В. Швартау, П.А. Вирыч, Т.И. Маковейчук, А.Ю. Артеменко // Вестник Днепропетровского университета. Серия: Биология. Экология. – 2014. – Т. 22. – №1. – С. 19–32. DOI: <https://doi.org/10.15421/011403>

90. Шеуджен, А. Х. Содержание и формы соединений кальция в черноземе выщелоченном Западного Предкавказья в условиях агрогенеза / А.Х. Шеуджен, Т.Ф. Бочко, Л.М. Онищенко, Т.Н. Бондарева, М.А. Осипов, С.В. Есипенко // КубГАУ. – 2015. – №105. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/soderzhanie-i-formy-soedineniy-kaltsiya-v-chnozeme-vyschelochennom-zapadnogo-predkavkazyav-usloviyah-agrogeneza> (дата обращения: 03.12.2021).

91. Шеуджен, А.Х. Агробιοгеохимия / А.Х. Шеуджен. – Краснодар: КубГАУ, 2010. – 877 с.
92. Шеуджен, А.Х. Агрoхимические основы применения удобрений / А.Х. Шеуджен, Т.Н. Бондарева, С.В. Кизинек. – Майкоп: Полиграф–ЮГ, 2013. – 572 с.
93. Шеуджен, А.Х. Агрoхимия. Ч. 5. Прикладная агрoхимия: учеб. пособие / А.Х. Шеуджен. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – 860 с.
94. Шеуджен, А.Х. Агрoхимия: Учебное пособие / А.Х. Шеуджен, В.Т. Куркаев, Н.С. Котляров // Под ред. А.Х. Шеуджена. 2–е изд., перераб. и доп. – Май–коп: Изд–во «Афиша», 2006. – 1075 с.
95. Шеуджен, А.Х. Влияние длительного применения удобрений на физико–химические свойства чернозема выщелоченного / А.Х. Шеуджен, М.А. Осипов, И.А. Лебедевский, С.В. Есипенко // Агрoхимический вестник. – 2013. – № 6. – С. 2–3.
96. Шеуджен, А.Х. Кальций – дефицитный элемент питания растений на почвах рисовых полей/ А.Х. Шеуджен // Энтузиасты аграрной науки. Тр. КубГАУ. – 2005. – № 4. – С. 136–141.
97. Шильников, И.А. Потери элементов питания растений в агробιοгеохимическом круговороте веществ и способы их минимизации / И.А. Шильников, В.Г. Сычев, А.Х. Шеуджен, Н.И. Аканова, Т.Н. Бондарева, С.В. Кизинек. – М.: ВНИИА, 2012. –351 с.
98. Шильников, И.А. Потребность в известковании и удобрениях магнием и кальцием в зависимости от свойств почв / И.А. Шильников, М.Н. Мельников // Варшава, 1984. – С. 39–54.
99. Шильников, И.А. Прогнозирование состояния почвенного плодородия под влиянием химической мелиорации / И.А. Шильников, Н.И. Аканова, С.Ю. Ефремова // Научно–методический журнал «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего». – 2016. – №02(30). – С. 128–138.

100. Шильников И.А. Потери элементов питания растений / И.А. Шильников, В.Г. Сычёв, А.К. Шеуджен, Н.И. Аканова, Т.Н. Бондарева, С.В. Кизинёк. – М.: LAP LAMBERT, 2015 – 602 с.
101. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
102. Шумахер, Р. Продуктивность плодовых растений / Р. Шумахер. – М.: Колос, 1979. – 268 с.
103. Ягодин, Б.Я. Агрохимия / Б.Я Ягодин. – М: Колос, 2001. – 455с.
104. Якименко, В. Н. Формы калия в почве и методы их определения / В.Н. Якименко // Почвы и окружающая среда. – 2018. – №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formy-kaliya-v-pochve-i-metody-ih-opredeleniya> (дата обращения: 16.07.2022).
105. Якименко, В.Н. Баланс калия, урожайность культур и калийное состояние почвы в длительном полевом опыте в лесостепи Западной Сибири / В.Н. Якименко // Агрохимия. – 2019. – № 10. – С.16–24.
106. Якименко, В.Н. Влияние длительного применения калийных удобрений на агрохимические свойства почвы / В.Н. Якименко // Агрохимия. – 2012. – №12. – С.41–46.
107. Якименко, В.Н. Действие и последствие калийных удобрений в полевом опыте на серой лесной почве / В.Н. Якименко // Агрохимия. – 2015. – №4. – С. 3–12.
108. Якименко, В.Н. Изменение содержания калия и магния в профиле почвы длительного полевого опыта / В.Н. Якименко // Агрохимия. – 2019. – № 3. – С. 19-29.
109. Якименко, В.Н. Накопление компонентов калийных удобрений в почве длительного полевого опыта / В.Н. Якименко // Плодородие. – 2019. – № 3. – С.36-39.

110. Якименко, В.Н. Плодородие серой лесной почвы при длительном использовании минеральных удобрений / В.Н. Якименко // Плодородие. – 2012. – Т. 6. – С. 21–23.
111. Якименко, В.Н. Потребление калия и магния картофелем и изменение их содержания в почве полевого опыта / В.Н. Якименко // Плодородие. – 2018. – № 5. – С. 19-22.
112. Якушкина, Н.И. Физиология растений / Н.И. Якушкина. – М.: Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 2005. - 303 с.
113. Amarante C.V.T. Fruit sampling methods to quantify calcium and magnesium contents to predict bitter pit development in ‘Fuji’ apple: a multivariate approach / C.V.T. Amarante, A. Miqueloto, S.T. de Freitas, C.A. Steffens, J.P.G. Silveira, T.R. Corrêa // *Sci. Hortic.* – 2013. – V. 157. – P. 19-23
114. Amarante, C.V.T. Tissue sampling method and mineral attributes to predict bitter pit occurrence in apple fruit: a multivariate approach / C.V.T. Amarante, J.P.G. Silveira, C.A. Steffens, F.N. Paes, L.C. Argenta // *Acta Hort. (ISHS)*. – 2013. – V.1012. – P.1133-1139.
115. Baldwin, J.P. Uptake of solutes by multiple root systems from soil. III. A model for calculating the solute uptake by a randomly dispersed root system developing in a finite volume of soil / J.P. Baldwin, P.H. Nye, P.B. Tinker // *Plant and Soil*. – 1973. – V.38. – P.621–635
116. Bekreij, C. The incidence of calcium-oxalate crystals in fruit walls of tomato *Lycopersicon esculentum* Mill. as affected by humidity, phosphate and calcium supply / C. Bekreij, J. Janse, B.J. Vangoor, J.D.J. Vandoesburg // *Journal of Horticultural Science*. –1992. – V.67. – P. 45-50.
117. Biggs, A.R. Managing Bitter Pit in ‘Honeycrisp’ Apples Grown in the Mid-Atlantic United States with Foliar-applied Calcium Chloride and Some Alternatives / A.R. Biggs, G.M. Peck // *Hort. Technology*. –2015. – V. 25(3). –P. 385–391.
118. Blanco, A. Improving the performance of calcium-containing spray formulations to limit the incidence of bitter pit in apple (*Malus x domestica* Borkh.) / A. Blanco, V. Fernandez, J. Val // *Sci. Hortic.* – 2010. – V.127. – P. 23-28.

119. Bothwell, J.H.F. The evolution of Ca²⁺ signaling in photosynthetic eukaryotes / J.H.F. Bothwell, C.K.-Y. Ng // *New Phytol.* – 2005. – V.166(1). – P. 21-38. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2004.01312.x.
120. Boynton, D. Leaf Analysis in Estimating the Potassium, Magnesium and Nitrogen Needs of Fruit Trees / D. Boynton, O.C. Compton // *Soil. Sci.* – 1945. – V.59. –P. 339-351.
121. Boynton, D. The influence of differential fertilization with ammonium sulfate on the chemical composition of McIntosh apple leaves / D. Boynton, O.C. Compton // *Amer. Soc. Hort. Sci. Proc.*– 1945.– P. 9-17.
122. Boynton, D. Nutrition by foliar application / D. Boynton // *Ann. Rev. plant physiol.* – 1954. – P. 5-31.
123. Bramlage W.G. Interactions of orchard factors and mineral nutrition on quality of pome fruit / W.G. Bramlage // *Acta Horticulturae.* – 1993.– V.326.– P.15-28.
124. Buti, M. Identification and validation of a QTL influencing bitter pit symptoms in apple (*Malus x domestica*) / M. Buti, L. Poles, D. Caset, P. Magnago, F.F. Fernandez, R.J. Colgan, R. Velasco, D.J. Sargent // *Mol. Breeding.* – 2015.– V. 35(1). – P. 29-39.
125. Leonicheva, E.V. Calcium in the soil-plant system of apple orchard when using nitrogen and potash fertilizers / E.V. Leonicheva, T.A. Roeva, L.I. Leonteva, M.E. Stolyarov // *E3S Web of Conferences* – 2021. – V.254. – art. 05010. DOI: 10.1051/e3sconf/202125405010.
126. Leonicheva, E.V. Nitrogen regime at Haplic Luvisol in orchards at fertilization / E.V. Leonicheva, T.A. Roeva, L.I. Leonteva, M.E. Stolyarov // *BIO Web of Conferences.* – 2021. – V.(36). – art. 03013.
127. Campbell, R.E. Plant microbiology / R.E. Campbell. – London: Baltimore (MD.), Arnold. – 1985. – P. 91.
128. Casero, T. Relationships between leaf and fruit nutrients and fruit quality attributes in ‘Golden Smoothee’ apples using multivariate regression techniques / T.

- Casero, A. Benavides, J. Puy, I. Recasens // *Journal of Plant Nutrition*. – 2004. – V.27. – P.313–324.
129. Casero, T. Macronutrient accumulation dynamics in apple fruits / T. Casero, E. Torres, S. Alegre, I. Recasens // *Journal of Plant Nutrition*. – 2017. – V.40(17). – P. 2468–2476. DOI:10.1080/01904167.2017.1380819
130. Conn, S.J. Cell-specific vacuolar calcium storage mediated by CAX1 regulates apoplastic calcium concentration, gas exchange, and plant productivity in *Arabidopsis* / S.J. Conn, M. Gilliham, A. Athman, A.W. Schreiber, U. Baumann, I. Moller // *Plant Cell*. – 2011. – V. 23. – P.240–257.
131. Conway, W.S. Pre- and postharvest calcium treatment of apple fruit and its effect on quality / W.S. Conway, C.E. Sams, K.D. Hickey // *Acta. Hort.* – 2001. – V.594. – P. 413–420.
132. Cybulska, J. Calcium effect on mechanical properties of model cell walls and apple tissue / J. Cybulska, A. Zdunek, K. Konstankiewicz // *J. Food Eng.* – 2011. – V.102. – P. 217–223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.08.019>.
133. de Freitas, S.T. Cellular approach to understand bitter pit development in apple fruit / S.T. de Freitas, C.V.T. Amarante, J.M. Labavitch, E.J. Mitcham // *Postharvest Biol. Technol.* – 2010. – V.57. – P. 6-13.
134. de Freitas, S.T. Mechanisms regulating apple cultivar susceptibility to bitter pit // S.T. de Freitas, C.V.T. Amarante, E.J. Mitcham // *Sci. Hortic.* – 2015. – V.186. – P. 54-60.
135. de Villiers, G.D.B. The effect of weather and climate upon the keeping quality of fruit / G.D.B. de Villiers // Working Group Report, Commission for Agricultural Meteorology, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. – 1961.
136. Drazeta, L. Bitter pit and calcium function in apples / L. Drazeta, A. Lang, L. Morgan, R. Volz, P.E. Jameson // *Acta Hort.* – 2001. – V.564. – P. 387–393.
137. Falchi, R. ABA regulation of calcium-related genes and bitter pit in apple / R. Falchi, E. D'Agostin, A. Mattiello, L. Coronica, F. Spinelli, G. Costa, G. Vizzotto // *Postharvest Biol. Technol.* – 2017. – V. 132. – P. 1–6.

138. Fallahi, E. Quality of apple fruit from a high-density orchard as influenced by rootstocks. Fertilizers, maturity, and storage / E. Fallahi, D.G. Richardson, M.N. Westwood // *J. Am. Soc. Hort. Sci.* – 1985.– V.110 (1). – P. 71-74.
139. Fallahi, E. Prediction of apple fruit quality using preharvest mineral nutrients / E. Fallahi, B. Fallahi, J.B. Retamales, C. Valdes, S. J. Tabatabaei // *Acta Horticulturae.* – 2006. – V.721. – P.259–264.
140. Fallahi, E. The role of calcium and nitrogen in postharvest quality and disease resistance of apples / E. Fallahi, W.S. Conway, K.D. Hickey, C.E. Sams // *Hort.Science.* – 1997. – V.32. – P. 831–835.
141. Fallahi, E. Prediction of quality by preharvest fruit and leaf mineral analyses in “Starkspur Golden Delicious” apple / E. Fallahi, T.L. Righetti, D.G. Richardson // *J. Am. Soc. Hort. Sci.* – 1985. – V.110. – P. 524–527.
142. Ferguson I.B. Cation distribution and balance in apple fruit in relation to calcium treatments for bitter pit / I.B. Ferguson, C.B. Watkins // *Sci. Hortic.* – 1983. – V. 19. – № 3–4. – P. 301–310.
143. Fidler, J.C. Recommended conditions for the storage of apples / J.C. Fidler // *Report of the East Malling Research Station for 1969. – 1970. – P.189-190.*
144. Filinova, N.V. Exogenous calcium modulates the activity of adenylate cyclases in potato plants under biotic stress / N.V. Filinova, L.A. Lomovatskaya, A.S. Romanenko // *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology.* –2021. – V.11(3). – P.403–412 DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-403-412>
145. Gago, C.M.L. Effect of calcium chloride and 1-MCP (Smartfresh™) postharvest treatment on ‘Golden Delicious’ apple cold storage physiological disorders / C.M.L. Gago, A.C. Guerreiro, G. Miguel, T. Panagopoulos, M.M. da Silva, M.D.C. Autunes // *Sci. Hortic.* – 2016. – V.211. – P. 440-448.
146. Gruppe, W. Potassium, magnesium and calcium nutrition of apple trees / W. Gruppe // *International Hort. Cong. Proc.* – 1962. – 15(1). – 181-193.

147. Gudkovski, V.A. Prognosis of storage quality of apples based on their chemical composition / V.A. Gudkovski, L. V. Kuznetsova, N.P. Ponomariova // *Acta Horticulture*. – 1990. – V. 274. – P. 175-177.
DOI: 10.17660/ActaHortic.1990.274.18.
148. Hanger B.C. The movement of calcium in plants / B.C. Hanger // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. – 1979. – V.10.– №1-2. – P.171-193. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103627909366887>
149. Harper, L. A bouquet of chromosomes / L. Harper, I. Golubovskaya, W.Z. Cande // *J. Cell. Sci*. – 2004. – V. 117(18). – P.4025-4032.
150. Hetherington, A.M. The generation of Ca²⁺ signals in plants / A.M. Hetherington, C. Brownlee // *Annu. Rev. Plant. Biol.* – 2004. –55. – P. 401-427.
DOI: 10.1146/annurev.arplant.55.031903.141624.
151. Hirschi, K. D. Expression of Arabidopsis CAX2 in tobacco. Altered metal accumulation and increased manganese tolerance / K.D. Hirschi, K. Korenkov, N. Wilganowski, G. Wagner // *Plant Physiol.* – 2000. – 124. – P. 125–133.
152. Hirschi, K.D. The calcium conundrum. Both versatile nutrient and specific signal / K.D. Hirschi // *Plant Physiol.* – 2004. – V.136. – P. 2438-2442.
153. Hogue, E. J. The effect of different calcium levels on cation concentration in leaves and fruit of apple trees / E.J. Hogue, G.H. Neilsen, J.L. Mason, B.G. Drought // *Can. J. Plant Sci.* – 1983. – V.63. – P. 473-479.
154. Jarolmasjed, S. Postharvest bitter pit detection and progression evaluation in «Honeycrisp» apples using computed tomography images / S. Jarolmasjed, C.Z. Espinoza, S. Sankaran, L.R. Khot // *Postharvest Biol. Technol.* – 2016. – V. 118(1). – P.35-42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.03.014>
155. Jemrić, T. Bitter pit: pre- and postharvest factors: A review / T. Jemrić, I. Fruk, M. Fruk, S. Radman, L. Sinković, G. Fruk // *Spanish Journal of Agricultural Research*. – 2016. – V. 14(4). – P. 1-12.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2016144-8491>.
156. Johnson J.M. An Arabidopsis mutant impaired in intracellular calcium elevation is sensitive

to biotic and abiotic stress / J.M. Johnson, M. Reichelt, J. Vadassery, J. Gershenzon, R. Oelmüller // BMC Plant Biology. –2014. – 14(1). – № 162.

DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2229-14-162>

157. Kadir, S. A. Fruit quality at harvest of ‘Jonathan’ apple treated with foliarly-applied calcium chloride / S.A. Kadir // Journal of Plant Nutrition. – 2004. – V. 27. – P.1991–2006.

158. Kahu, K. Effect of preharvest foliar applied calcium on postharvest quality and storability of apples in Estonia / K. Kahu // Acta Hort. – 2002. – V.594. – P. 495-499. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.594.64>

159. Kalcsits L. Recent Achievements and New Research Opportunities for Optimizing Macronutrient Availability, Acquisition, and Distribution for Perennial Fruit Crops / L. Kalcsits, E. Lotze, M. Tagliavini, K. D. Hannam, T. Mimmo, D. Neilsen, G. Neilsen, D. Atkinson, E. C. Biasuz, L. Borruso, S. Cesco, E. Fallahi, Y. Pii, N. A. Valverdi // Agronomy. – 2020. – V.10(11). –P. 1738. DOI: 10.3390/agronomy10111738

160. Kinzel, H. The specific mineral metabolism of selected plant species and its ecological implications / H. Kinzel, I. Lechner // Botanica Acta. – V.105. – P. 355-361.

161. Kolyadich, M. A. Apple variety evaluation for resistance to diseases and pests in the work-study unit of Belarusian State Academy of Agriculture / M.A. Kolyadich. – Minsk: BGSHA. – 2012. – P. 71.

162. Kuzin A.I. Correction of Potassium Fertigation Rate of Apple Tree (*Malus domestica* Borkh.) in Central Russia during the Growing Season / A.I. Kuzin, N.Y. Kashirskaya, A.M. Kochkina, A.V Kushner // Plants. – 2020. – V.9(10). – P.1366. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9101366>

163. Lee, J.A. The calcicole-calcifuge problem revisited / J.A. Lee // Advances in Botanical Research. – 1999. –V.29. – P. 1-30.

164. Lewis, T. L. The effects of increasing the supply of nitrogen, phosphorus, calcium and potassium to the roots of Merton Worcester apple trees on leaf and fruit composition and on the incidence of bitter pit at harvest / T.L. Lewis, D. Martin, J.

- Cerny, D.A. Ratkowsky // *Journal of Horticultural Science*. – 1977. – V.52. –P. 409-419.
165. Libert, B. Oxalate in crop plants / B. Libert, V.R. Franceschi // *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. – 1987. –V.35. – P.926-938.
166. Likens, G.E. The biogeochemistry of calcium at Hubbard Brook / G.E. Likens, C.T. Driscoll, D.C. Buso, T.G. Siccama, C.E. Johnson, G.M. Lovett, T.J. Fahey, W.A. Reiners, D.F. Ryan, C.W. Martin, S.W. Bailey // *Biogeochemistry*. – 1998. – V. 41. – P. 89-173.
167. Lötze, E. Evaluating pre-harvest foliar calcium applications to increase fruit calcium and reduce bitter pit in ‘Golden Delicious’ apples / E. Lötze, J. Joubert, K.I. Theron // *Sci. Hortic.* – 2008. – V.116. – P. 299-304.
168. Malakouti, M.J. Foliar application of calcium chloride for improving apple quality and reducing residual pesticides / M.J. Malakouti, M. Afkhami // *Acta Hort.* –2001. – V.564. – P. 349–353.
169. Mason, J.L. Effect of exchangeable magnesium, potassium and calcium in the soil on magnesium content of apple seedlings / J.L. Mason // *Proc. Am. Sot. Hortic. Sci.* – 1964. – V.84. – P. 32-38.
170. Mason, J.L. Influence of Ca concentration in nutrient solutions on breakdown and nutrient uptake in ‘Spartan’ apples / J.L. Mason, J.M. McDougald // *J. Am. Soc. Hort. Sci.* – 1974. – V. 99. – P. 318-321.
171. Mogollón, M.R. NIR spectral models for early detection of bitter pit in asymptomatic ‘Fuji’ apples / M.R. Mogollón, C. Contreras, S.T. de Freitas, J.P. Zoffoli // *Scientia Horticulturae*. – 2021. – V.280. – art. №109945. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109945>.
172. Mogollón, J.M. More efficient phosphorus use can avoid cropland expansion / J. M. Mogollón, A. F. Bouwman, A. H. W. Beusen, L. Lassaletta, H. J. M. van Grinsven, H. Westhoek // *Nat. Food* – 2021. – V.2. – P. 509–518. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00303-y>
173. Naeem, M. Foliar calcium spray confers draught stress in maize via modulation of plant growth, water relations, proline content and hydrogen peroxide

- activity / M. Naeem, MS. Naeem, R. Ahmad, M.Z. Ihsan, M.Y. Ashraf, Y. Hussain, S. Fahad // Arch. Agron. Soil Sci. – 2017. – V.64. – I.1. – P. 116-131.
174. Neilsen G.H. Relationships between Ca, Mg and K in soil, leaf and fruits of Okagan orchards / G.H. Nielsen, T. Edwards // Can. J. Soil Sci. – 1982. – V.62. – P. 365-374.
175. Neilsen, G. Application of CaCl₂ sprays earlier in the season may reduce bitter pit incidence in 'Braeburn' apple / G. Nielsen, D. Nielsen, S. Dong, P. Toivonen, F. Peryea // Hort.Science. – 2005. –V.40. – P.1850–1853.
176. Neilsen, G.H. Effects of surface soil pH on Soil Cation content, leaf nutrient levels and quality of apples in British Columbia / G.H. Neilsen, P.B. Hoyt, O.L. Lay // Can. J. Plant. Sci. – 1982. – V. 62. –P. 695-702.
177. Nicolaï B.M. Non-destructive measurement of bitter pit in apple fruit using NIR hyperspectral imaging / B.M. Nicolaï, E. Lotze, A. Peirs, N. Scheerlinck, K.I. Theron // Postharvest Biol. Technol. – 2006. –V.40. – P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.12.006>
178. Nye, P.H. Solute Movement in the Soil-Root System / P.H. Nye, P.B. Tinker. – Berkeley: University of California Press, 1977. – P. 342.
179. Douglas, G.P. Daniel McAlpine and the Bitter Pit / G.P. Douglas. – London: Springer International Publishing, 2015. – P. 353. DOI: 10.1007/978-3-319-09552-3_7.
180. Perring, M.A. The mineral composition of apples. Calcium concentration and bitter pit in relation to mean mass per apple / M.A. Perring, C.H. Jackson // J. Sci. Food Agric. – 1975. – V. 26.– P. 1493-1502.
181. Pooviah, B.W. Calcium and fruit softening: physiology and biochemistry / B.W. Pooviah, G.M. Glenn, A.S.N. Reddy // Hort. Rev. – 1988. – V.10. –P.107–152.
182. Raese, J.T. Effects of preharvest calcium sprays on apple and pear quality / J.T. Raese, S.R. Drake // Journal of Plant Nutrition. –1993. – V.16. – P. 1807–1819.

183. Rasmussen H. Calcium and cAMP in stimulus-response coupling / H. Rasmussen // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* –1980. – V.356. – P. 346-353. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1980.tb29622.x.
184. Reddy, V.S. Proteomics of calcium-signaling components in plants / V.S. Reddy, A.S.N. Reddy // *Phytochemistry.* –2004. – V.65. – P.1745-1776.
185. Retamales, J.B. Bitter pit prediction in apples through Mg infiltration / J.B. Retamales, C. Valdes, D.R. Dilley, L. Le'on, V.P. Lepe // *Acta Hortic.* – 2000. – V.512. – P. 169-179.
186. Ringer, S. A Further Contribution Regarding the Influence of the Different Constituents of the Blood on the Contraction of the Heart / S. Ringer // *J. Physiol.* – 1883. – V. 4. – P. 29–42.
187. Saure, M.C. Calcium translocation to fleshy fruit: its mechanism and endogenous control / M.C. Saure // *Sci.Hortic.* – 2005. – V.105. – P. 65-89.
188. Schonherr, J. Cuticular penetration of calcium salts: effects of humidity, anions, and adjuvants / J. Schonherr // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* – 2001. – V.164. – P. 225–231.
189. Shear, C.B. Calcium transport in apple trees / C.B. Shear, M. Faust // *Plant Physiol.* – 1970. – V.45. – P. 670-674.
190. Si, Y. Computed tomography imaging-based bitter pit evaluation in apples / Y. Si, S. Sankaran // *Biosyst. Eng.* – 2016. – V.151. – P. 9-16.
191. Simon, E.W. The symptoms of calcium deficiency in plants / E.W. Simon // *New Phytol.* –1978. – V.80. – P. 1-15.
192. Smith, R.L. Influence of cation ratio, temperature, and the time on adsorbtion and absorbtion of calcium and potassium by citrus and other plant species / R.L. Smith, A. Wallance // *Soil Sci.* – 1956. – V.82. – P. 9-19.
193. Stiles, W.C. Orchard Nutrition Management / W.C. Stiles, S. Reid // *Cornell Cooperative Extension Information Bulletin.* – 1991. –V.210. – P. 23.
194. Roeva, T. Potassium dynamics in orchard soil and potassium status of sour cherry trees affected by soil nutritional conditions / T. Roeva, E. Leonicheva, L.

Leonteva, M. Stolyarov // Journal of Central European Agriculture. – 2022. – Vol. 23. – №1. – P. 103-113. DOI: 10.5513/JCEA01/23.1.3313.

195. Terblanchea, J. H. The redistribution and immobilisation of calcium in apple trees with special reference to bitter pit/ J. H. Terblanchea, L. G. Wooldridge, I. Hesebecka, M. Jouberta // Communications in Soil Science and Plant Analysis. – 1979. – V.10. – №1-2. – P.195-215.DOI:

<https://doi.org/10.1080/00103627909366888>

196. Torres, E. Combination of strategies to supply calcium and reduce bitter pit in ‘Golden Delicious’ apples / E. Torres, I. Recasens, J. Lordan, S. Alegre // Sci. Hortic. –2017. – V.217. – P. 179-188.

197. Torres, E. Early stage fruit analysis to detect a high risk of bitter pit in ‘Golden Smoothie’ / E. Torres, I. Recasens, G. Avila, J. Lordan, S. Alegre // Sci. Hortic. – 2017. – V.219. – P. 98–106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.03.003>.

198. Torres, E. Induction of symptoms pre-harvest using the “passive method”: an easy way to predict bitter pit / E. Torres, I. Recasens, J.M. Peris, S. Alegre // Postharvest Biol. Technol. – 2015. – V. 101. – P. 66–72.

<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.11.002>.

199. Uçgun, K. Usage of Shoot Analysis to Assess Early Season Nutritional Status of Apple Trees / K. Uçgun, M. Altindal, M. Cansu // Erwerbs-Obstbau. – 2018. – V. 60. – № 2. – P.113-117. doi: [10.1007/s10341-017-0342-x](https://doi.org/10.1007/s10341-017-0342-x)

200. Uçgun, K. Interpretation of Leaf Analysis Performed in Early Vegetation in Apple Orchards / K. Uçgun, S. Gezgin // Communications in Soil Science and Plant Analysis. – 2017. – V. 48. – №14. – P.1719-172.

<https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1383415>

201. Uçgun, K. Can Early-Period Fruit Analysis be Performed for Timely Interventions Against Physiological Disorders In Apple Trees? / K. Uçgun, S. Gezgin, H. Akgül, A. Atasay, M. Harmankaya, M. Altindal, M. Cansu, T. Seymen, B. İlban // Erwerbs-Obstbau. – 2021. – P. 381-385 DOI:

<https://doi.org/10.1007/s10341-021-00595-1>

202. Val, J. Effect of pre-harvest calcium sprays on calcium concentrations in the

- skin and flesh of apples / J. Val, E. Monge, D. Risco, A. Blanco // *J. Plant. Nutr.* – 2008. – V. 31. – P. 1889-1905.
203. Vang-Petersen, O. Calcium, potassium and magnesium nutrition and their interactions in “Cox’s orange” apple trees / O. Vang-Petersen // *Scientia Horticulturae.* – 1980. – V.12. – P. 153-161
204. Vang-Petersen, O. Magnesium till amble / O. Vang-Petersen // *I. Tidsskr. Planteavl.* – 1974. – V. 78. – P.627-634.
205. Vang-Petersen, O. Calcium nutrition of apple trees: a review / O. Vang-Petersen // *Scientia Hortic.* – 1979. – V.12. – P.1-9.
206. Veberič, R. Influence of foliar-applied phosphorus and potassium on photosynthesis and transpiration of “Golden Delicious” apple leaves (*Malus domestica* Borkh.) / R. Veberič, D. Vodnik, F. Štampar // *Acta agriculturae Slovenica.* – 2005. – V.85(1). – P. 143-155.
207. Wander, I. W. Calcium and phosphorus penetration in an apple orchard / I.W. Wander // *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* – 1947. – V. 49. – P.1-6.
208. Watkins, C. Calcium nutrition and control of calcium-related disorders / C. Watkins, J. Schupp, D. Rosenberger // *New York Fruit Quarterly.* – 2004. – V.12(2). – P.15-21.
209. Webster, D.H. Mineral composition of apple fruits. Relationships between and within peel, cortex and whole fruit samples / D.H. Webster // *Can. J. Plant Sci.* – 1981. – V.61. – P. 73-80.
210. White, P.J. Calcium in plants / P.J. White, M.R. Broadley // *Ann. Bot.* – 2003. – V. 92(4). – P. 487–511.
211. Whitfield, A. The effects of stock and scion on the mineral composition of apple leaves / A. Whitfield // *The Jubilee Ann. Report.* – 1963. – P. 107-109.
212. Wills, R.B. Use of calcium to delay ripening of tomatoes / R.B. Wills, S.I. Trimazi // *Hort.Science.* – 1977.– V.12.– P.551-552.
213. Wilsdorf, R.E. Evaluating the effectiveness of different strategies for calcium application on the accumulation of calcium in apple (*Malus x domestica* Borkh. ‘Braeburn’) fruit / R.E. Wilsdorf, K.I. Theron, E. Lotze // *J. Hortic. Sci.*

Biotechnol. – 2012.– V.87. – P. 565-570.

214. Wójcik P. Nawozy i nawożenie drzew owocowych / P. Wójcik. – HORTPRESS: Warszawa. – P. 257.

215. Wojcik, P. The efficiency of different foliar-applied calcium materials in improving apple quality / P. Wojcik, E. Zwonek // Acta Hort. – 2001. – V. 594. – P. 563–567.

216. Wolk, C.P. Heterocyst metabolism and development / C.P. Wolk, A. Ernst, J. Elhai // In The Molecular Biology of Cyanobacteria. – 1994. – P. 769– 823.

217. Yu, X.M. Control efficacy of Ca-containing foliar fertilizers on bitter pit in bagged ‘Fuji’ apple and effects on the Ca and N contents of apple fruits and leaves / X.M. Yu, J.Z., P.X. Nie, X.M., G.P. Wang, A. Miao // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2018. – doi:10.1002/jsfa.9087

218. Yuri, J.A. Bitter pit control in apples cv. Braeburn through foliar sprays of different calcium sources / J.A. Yuri, J.B. Retamales, C. Moggia, J.L. Vasquez // Acta horticulturae. –2002. – V.594. – P. 453-460.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1.

Динамика минерального азота ($\Sigma (N-NH_4 + N-NO_3)$, мг/кг) в слое 20...40 см почвы яблоневого сада при вн. возр-их доз удобрений, 2016...2020 гг.

Сроки отбора проб (фактор А)	Дозы удобрений (фактор В)				Средние А
	Контроль	N30K40	N60K80	N90K120	
2016 г.					
Май	20,42	30,90	36,32	47,35	33,75
Июнь	24,08	26,84	27,74	34,28	28,24
Июль	21,24	26,92	32,72	31,95	28,21
Август	11,75	12,64	18,31	15,73	14,61
Сентябрь	19,91	23,93	18,90	17,57	20,08
Средние В	19,48	24,25	26,08	29,38	
HCP ₀₅ A=7,91 HCP ₀₅ B=7,07 HCP ₀₅ A×B=15,81					
2017 г.					
Май	22,98	23,12	21,63	23,89	22,90
Июнь	14,78	15,28	15,56	24,93	17,64
Июль	9,65	10,20	10,88	18,85	12,39
Август	8,25	10,70	11,43	20,54	12,73
Сентябрь	16,92	15,35	19,61	19,76	17,91
Средние В	14,52	14,93	15,82	21,59	
HCP ₀₅ A=4,11 HCP ₀₅ B=3,67 по АВ ₀₅ F _φ < F _г					
2018 г.					
Май	16,15	16,23	19,68	31,36	20,86
Июнь	5,47	8,11	15,36	14,18	10,78
Июль	7,08	11,19	11,42	35,31*	16,25
Август	5,25	10,82	11,64	5,60	8,33
Сентябрь	12,61	9,98	10,58	9,69	10,71
Средние В	9,31	11,27	13,74	19,23*	
HCP ₀₅ A=9,46 HCP ₀₅ B=8,46 HCP ₀₅ A×B=18,92					
2019 г.					
Май	10,86	17,13	30,60*	15,70	18,57
Июнь	38,18	37,72	57,73*	38,58	43,05
Июль	31,44	33,04	34,69	49,94*	37,28
Август	11,83	16,60	14,54	16,04	14,75
Сентябрь	25,37	31,43	36,56	39,96	33,33
Средние В	23,54	27,19	34,82*	32,04*	
HCP ₀₅ A=8,07 HCP ₀₅ B=7,21 HCP ₀₅ A×B=16,13					
2020 г.					
Май	26,96	29,78	38,38	43,34	34,61
Июнь	13,91	49,74	30,25	51,52	36,35
Июль	3,72	9,80	21,36	18,19	13,26
Август	16,84	20,12	29,76	48,47	28,80
Сентябрь	18,96	19,64	29,33	27,69	23,90
Средние В	16,07	25,81	29,81	37,84	
HCP ₀₅ A=12,00 HCP ₀₅ B=10,74 по АВ ₀₅ F _φ < F _г					

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

Приложение 2.

Динамика минерального азота ($\Sigma (N-NH_4 + N-NO_3)$, мг/кг) в слое 40...60 см почвы яблоневого сада при вн. возр-их доз удобрений, 2016...2020 гг.

Сроки отбора проб (фактор А)	Дозы удобрений (фактор В)				Средние А
	Контроль	N30K40	N60K80	N90K120	
2016 г.					
Май	29,15	32,93	34,17	41,83	34,52
Июнь	20,86	29,93	27,85	37,97	29,15
Июль	25,64	20,62	28,92	29,65	26,21
Август	12,56	13,93	16,88	22,16	16,38
Сентябрь	18,55	21,66	18,37	21,53	20,03
Средние В	21,35	23,82	25,24	30,63	
HCP ₀₅ A=7,16 HCP ₀₅ B=6,41 HCP ₀₅ A×B=14,33					
2017 г.					
Май	19,81	21,98	23,28	23,60	22,17
Июнь	11,63	14,17	7,48	22,75	14,01
Июль	11,79	10,66	11,41	12,86	11,68
Август	7,63	9,85	9,92	13,75	10,28
Сентябрь	17,21	17,76	17,76	16,64	18,16
Средние В	13,61	13,97	13,97	17,92	
HCP ₀₅ A=4,12 HCP ₀₅ B=3,69 по AB ₀₅ F _φ < F _Г					
2018 г.					
Май	13,18	13,96	13,21	25,95	16,58
Июнь	5,51	8,19	10,11	20,48	11,07
Июль	5,13	10,17	9,01	36,71*	15,25
Август	7,31	9,49	12,49	4,83	8,33
Сентябрь	23,71	21,19	18,84	27,16	22,72
Средние В	10,97	12,60	12,73	23,03*	
HCP ₀₅ A=6,96 HCP ₀₅ B=6,23 HCP ₀₅ A×B=13,92					
2019 г.					
Май	16,95	12,57	28,15	31,75	22,36
Июнь	30,73	37,58	56,75*	35,47	40,13
Июль	27,92	31,81	35,76	37,61	33,28
Август	15,63	14,41	14,41	20,36	16,20
Сентябрь	24,87	28,93	34,44	47,68	33,98
Средние В	23,22	25,06	33,90*	34,57*	
HCP ₀₅ A=7,43 HCP ₀₅ B=6,64 HCP ₀₅ A×B=14,86					
2020 г.					
Май	18,07	34,81	62,63	36,10	37,90
Июнь	15,83	25,70	35,75	69,15	36,61
Июль	5,38	8,71	19,91	11,40	11,35
Август	18,74	25,27	69,20	54,46	41,92
Сентябрь	31,34	21,34	34,53	27,21	28,60
Средние В	17,87	23,16	44,40	39,66	
HCP ₀₅ A=21,67 HCP ₀₅ B=19,38 по AB ₀₅ F _φ < F _Г					

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

Приложение 3.

Динамика обменного калия (мг/кг) в слое 20...40 см агросерой почвы яблоневого сада при вн. возрастающих доз удобрений, 2016...2020 гг.

Сроки отбора проб (фактор А)	Дозы удобрений (фактор В)				Средние А
	Контроль	N30K40	N60K80	N90K120	
2016 г.					
Май	30,25	43,00	37,13	59,63	42,50
Июнь	34,63	49,63	57,25	78,25	54,94
Июль	50,00	58,13	65,13	54,10	56,84
Август	36,38	42,38	63,88	41,38	46,00
Сентябрь	35,75	40,63	42,13	50,25	42,19
Средние В	37,40	46,75	53,10	56,72	
HCP ₀₅ A=8,13 HCP ₀₅ B=7,28 HCP ₀₅ A×B=16,27					
2017 г.					
Май	47,50	46,50	48,63	53,25	48,97
Июнь	43,13	39,25	48,88	75,75	51,75
Июль	52,38	59,63	67,63	102,25	70,47
Август	51,13	60,63	67,75	70,38	62,47
Сентябрь	65,75	66,13	76,63	56,13	66,16
Средние В	51,98	54,43	61,90	71,55	
HCP ₀₅ A=11,68 HCP ₀₅ B=10,45 HCP ₀₅ A×B=23,36					
2018 г.					
Май	52,32	65,16	69,86	91,92	69,81
Июнь	51,48	53,37	72,05	75,81	63,18
Июль	52,10	55,98	58,06	85,49	62,91
Август	52,13	61,22	62,03	46,52	55,47
Сентябрь	33,31	75,04	41,93	56,31	51,65
Средние В	48,27	62,15	60,79	71,21	
По A ₀₅ F _φ < F _т по B ₀₅ F _φ < F _т по AB ₀₅ F _φ < F _т					
2019 г.					
Май	50,58	49,03	122,64	77,96	75,05
Июнь	45,72	49,30	133,20	85,17	78,35
Июль	51,88	81,32	101,10	69,77	76,02
Август	44,16	48,64	62,94	61,82	54,39
Сентябрь	34,74	45,87	62,35	59,67	50,66
Средние В	45,41	54,83	96,44	70,88	
По A ₀₅ F _φ < F _т HCP ₀₅ B=27,59 по AB ₀₅ F _φ < F _т					
2020 г.					
Май	50,91	51,22	64,88	92,89	64,98
Июнь	57,00	89,04	70,23	64,60	70,22
Июль	44,00	70,17	196,84	59,46	92,63
Август	51,86	64,62	59,52	91,60	66,90
Сентябрь	76,26	70,20	88,17	74,12	77,19
Средние В	56,01	69,04	95,92	76,53	
По A ₀₅ F _φ < F _т HCP ₀₅ B=15,12 HCP ₀₅ A×B=33,71					

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

**Динамика обменного калия (мг/кг) в слое 40...60 см агросерой почвы
яблоневого сада при вн. возрастающих доз удобрений, 2016...2020 гг.**

Сроки отбора проб (фактор А)	Дозы удобрений (фактор В)				Средние А
	Контроль	N30K40	N60K80	N90K120	
2016 г.					
Май	21,88	30,88	36,63	51,38	35,19
Июнь	39,13	58,00	58,50	60,50	54,03
Июль	56,38	46,50	64,38	51,75	54,75
Август	37,75	31,25	43,00	32,25	36,06
Сентябрь	37,25	38,88	30,63	52,38	39,78
Средние В	38,48	41,10	46,63	49,65	
НСР ₀₅ A=10,59 по В ₀₅ ff НСР ₀₅ A×B=23,68					
2017 г.					
Май	46,63	45,88	56,00	58,00	51,63
Июнь	53,50	46,00	37,50	68,50	51,38
Июль	52,25	40,75	54,50	77,38	56,22
Август	56,75	58,38	60,00	66,63	60,44
Сентябрь	63,88	81,75	66,63	60,50	68,19
Средние В	54,60	54,55	54,93	66,20	
По А ₀₅ F _φ < F _т по В ₀₅ F _φ < F _т по АВ ₀₅ F _φ < F _т					
2018 г.					
Май	46,38	66,69	66,13	103,16	70,59
Июнь	54,53	50,18	69,00	62,49	59,05
Июль	55,01	50,85	64,71	62,49	67,48
Август	54,27	73,79	82,36	99,33	64,91
Сентябрь	37,93	48,18	60,68	49,22	50,68
Средние В	49,62	57,94	68,58	55,93	
По А ₀₅ F _φ < F _т НСР ₀₅ B=13,86 по АВ ₀₅ F _φ < F _т					
2019 г.					
Май	49,02	55,83	74,98	60,52	60,09
Июнь	54,44	63,44	153,61	77,74	87,31
Июль	53,85	67,10	100,23	73,15	73,58
Август	37,71	50,18	50,88	66,16	51,23
Сентябрь	39,11	43,76	59,39	54,18	49,11
Средние В	46,82	56,06	87,82	66,35	
НСР ₀₅ A=25,36 НСР ₀₅ B=22,69 по АВ ₀₅ F _φ < F _т					
2020 г.					
Май	56,92	60,71	82,82	58,92	64,84
Июнь	52,77	94,61	74,32	93,28	78,75
Июль	51,42	45,28	132,64	58,06	71,85
Август	59,58	65,53	71,52	83,30	69,98
Сентябрь	73,66	60,10	84,84	67,27	71,47
Средние В	58,87	65,25	89,23	72,17	
НСР ₀₅ A=14,08 НСР ₀₅ B=12,62 НСР ₀₅ A×B=28,34					

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

Динамика водорастворимого калия (мг/кг) в слое 20...40 см агросерой почвы яблоневого сада при вн. возр-их доз удобрений, 2016...2020 гг.

Сроки отбора проб (фактор А)	Дозы удобрений (фактор В)				Средние А
	Контроль	N30K40	N60K80	N90K120	
2016 г.					
Май	5,75	5,75	5,25	7,88	6,16
Июнь	4,63	5,88	5,00	7,38	5,72
Июль	6,00	6,00	5,63	5,25	5,72
Август	4,00	3,13	4,00	2,50	3,41
Сентябрь	3,25	3,63	3,00	3,50	3,34
Средние В	4,73	4,88	4,58	5,30	
HCP ₀₅ A=0,97 по B ₀₅ F _φ < F _T по AB ₀₅ F _φ < F _T					
2017 г.					
Май	5,50	6,38	6,13	6,00	6,00
Июнь	4,38	4,75	5,75	9,50	6,09
Июль	4,00	4,63	4,25	10,50	5,84
Август	7,75	10,25	8,75	9,88	9,16
Сентябрь	5,50	6,00	6,38	5,38	5,81
Средние В	5,43	6,40	6,25	8,25	
HCP ₀₅ A=1,94 HCP ₀₅ B=1,74 по AB ₀₅ F _φ < F _T					
2018 г.					
Май	10,13	8,63	7,38	13,63	9,94
Июнь	5,23	5,54	5,94	6,46	5,79
Июль	4,73	5,54	5,45	8,75	6,12
Август	11,61	7,74	6,75	7,84	8,48
Сентябрь	4,20	9,02	3,84	4,47	5,38
Средние В	7,18	7,29	5,87	8,23	
HCP ₀₅ A =3,38 по B ₀₅ F _φ < F _T по AB ₀₅ F _φ < F _T					
2019 г.					
Май	2,85	3,01	6,58	3,74	4,04
Июнь	3,78	3,78	11,89	4,02	5,87
Июль	3,79	5,95	7,69	4,92	5,59
Август	5,67	6,84	9,96	8,60	7,76
Сентябрь	3,90	5,43	5,94	5,64	5,23
Средние В	4,00	5,00	8,41	5,38	
По A ₀₅ F _φ < F _T HCP ₀₅ B=2,57 по AB ₀₅ F _φ < F _T					
2020 г.					
Май	2,52	2,52	3,20	6,94	3,80
Июнь	2,83	5,57	4,36	4,32	4,27
Июль	5,55	5,72	25,33	5,74	10,59
Август	6,32	8,06	6,92	10,00	7,83
Сентябрь	6,66	5,63	6,94	5,87	6,28
Средние В	4,78	5,50	9,35	6,57	
HCP ₀₅ A=2,24 HCP ₀₅ B=2,00 HCP ₀₅ A×B=4,52					

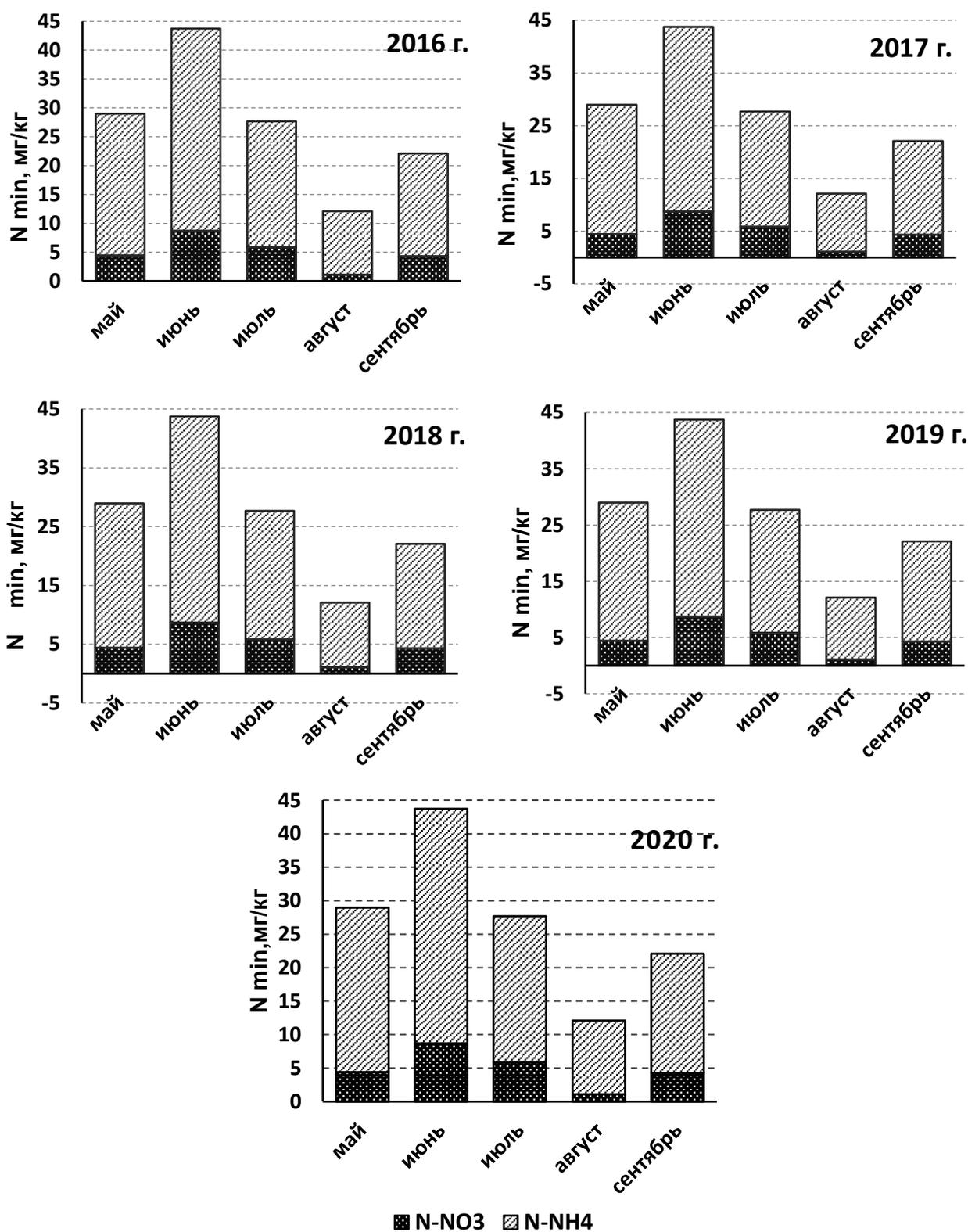
* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

Динамика водорастворимого калия (мг/кг) в слое 40...60 см агросерой почвы яблоневого сада при вн. возр-их доз удобрений, 2016...2020 гг.

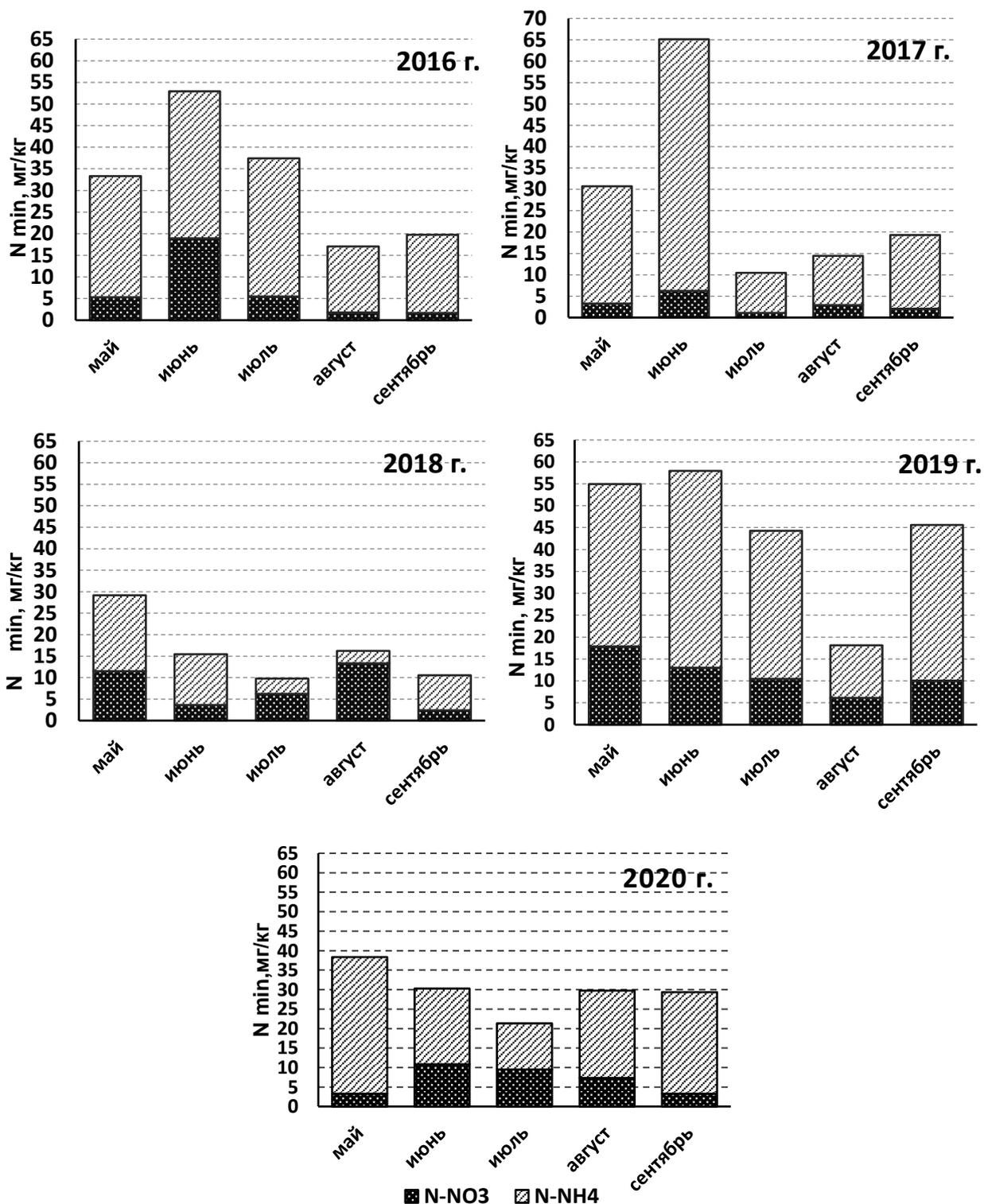
Сроки отбора проб (фактор А)	Дозы удобрений (фактор В)				Средние А
	Контроль	N30K40	N60K80	N90K120	
2016 г.					
Май	6,50	5,50	4,88	7,50	6,09
Июнь	5,00	6,38	4,75	4,75	5,22
Июль	5,50	5,50	7,00	5,50	5,88
Август	3,63	2,75	2,88	3,00	3,06
Сентябрь	4,63	2,88	2,63	5,25	3,84
Средние В	5,05	4,60	4,43	5,20	
НСР ₀₅ A=1,32 по В ₀₅ F _φ < F _τ по АВ ₀₅ F _φ < F _τ					
2017 г.					
Май	5,63	5,25	6,00	6,50	5,84
Июнь	4,75	7,13	8,50	7,63	7,00
Июль	4,50	4,00	3,38	5,13	4,25
Август	8,88	9,50	11,63	11,63	10,41
Сентябрь	7,00	7,38	5,13	5,38	6,22
Средние В	6,15	6,65	6,93	7,25	
НСР ₀₅ A=2,62 по В ₀₅ F _φ < F _τ НСР ₀₅ A×B=5,24					
2018 г.					
Май	11,25	8,63	7,13	12,50	9,88
Июнь	7,79	5,54	7,07	5,84	6,56
Июль	5,45	4,82	6,52	8,48	6,32
Август	7,24	9,43	11,61	9,92	9,55
Сентябрь	4,73	4,11	5,09	4,65	4,64
Средние В	7,29	6,50	7,48	8,28	
НСР ₀₅ A =2,19 по В ₀₅ F _φ < F _τ по АВ ₀₅ F _φ < F _τ					
2019 г.					
Май	4,22	3,41	4,95	2,36	3,73
Июнь	5,02	4,48	22,22	5,33	9,26
Июль	4,10	6,25	7,89	6,66	6,22
Август	4,69	7,72	6,94	8,99	7,08
Сентябрь	3,90	4,20	5,74	4,61	4,61
Средние В	4,38	5,21	9,55	5,59	
По А ₀₅ F _φ < F _τ по В ₀₅ F _φ < F _τ по АВ ₀₅ F _φ < F _τ					
2020 г.					
Май	2,75	3,52	6,51	3,64	4,11
Июнь	3,62	5,81	5,13	6,27	5,21
Июль	5,76	5,45	12,94	5,74	7,47
Август	8,06	8,43	7,82	8,74	8,26
Сентябрь	6,58	5,67	7,21	5,66	6,28
Средние В	5,35	5,78	7,92	6,01	
НСР ₀₅ A=1,41 по В ₀₅ F _φ < F _τ НСР ₀₅ A×B=2,76					

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

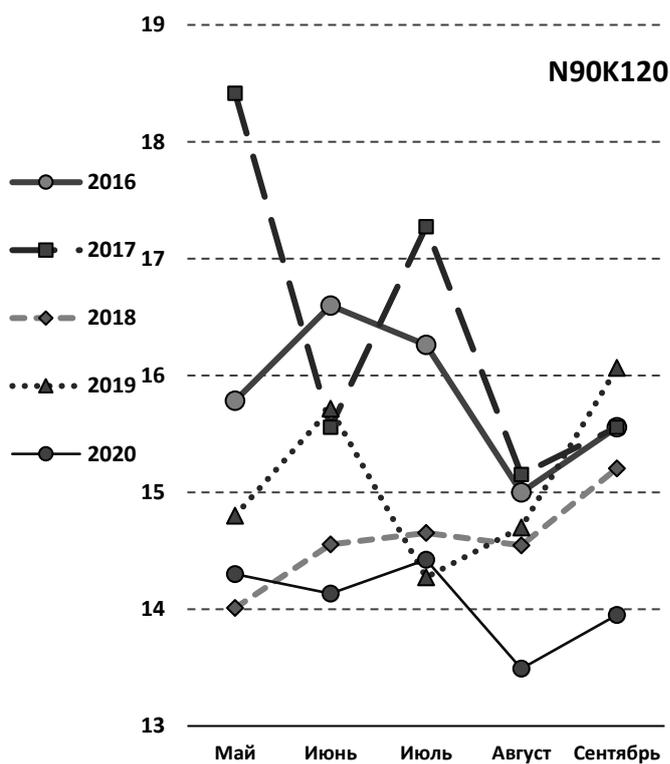
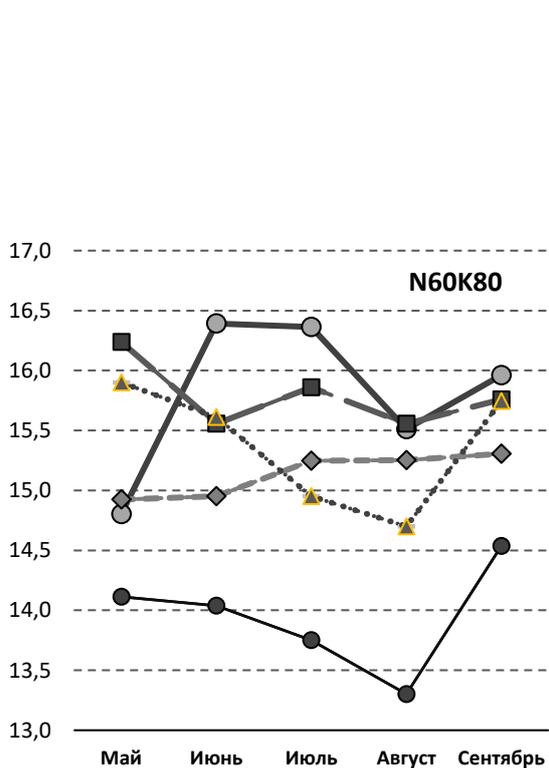
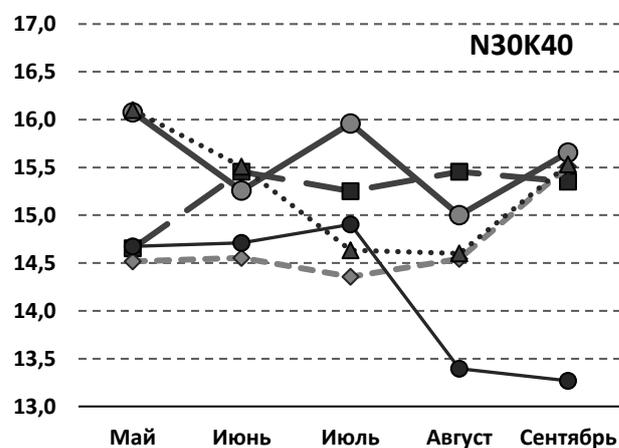
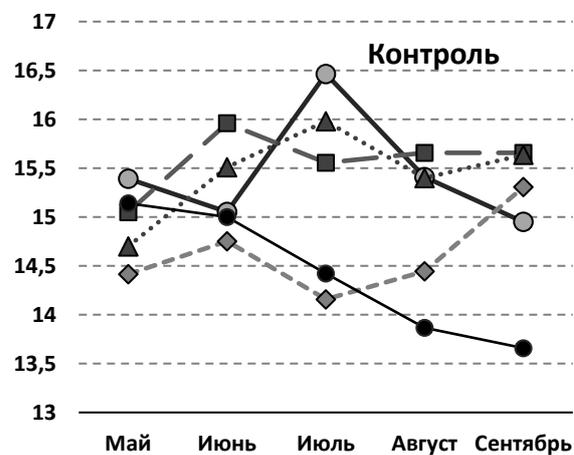
Соотношение аммонийной и нитратной форм азота (мг/кг) в слое почвы 0...20 см при внесении N30K40, 2016...2020 гг.



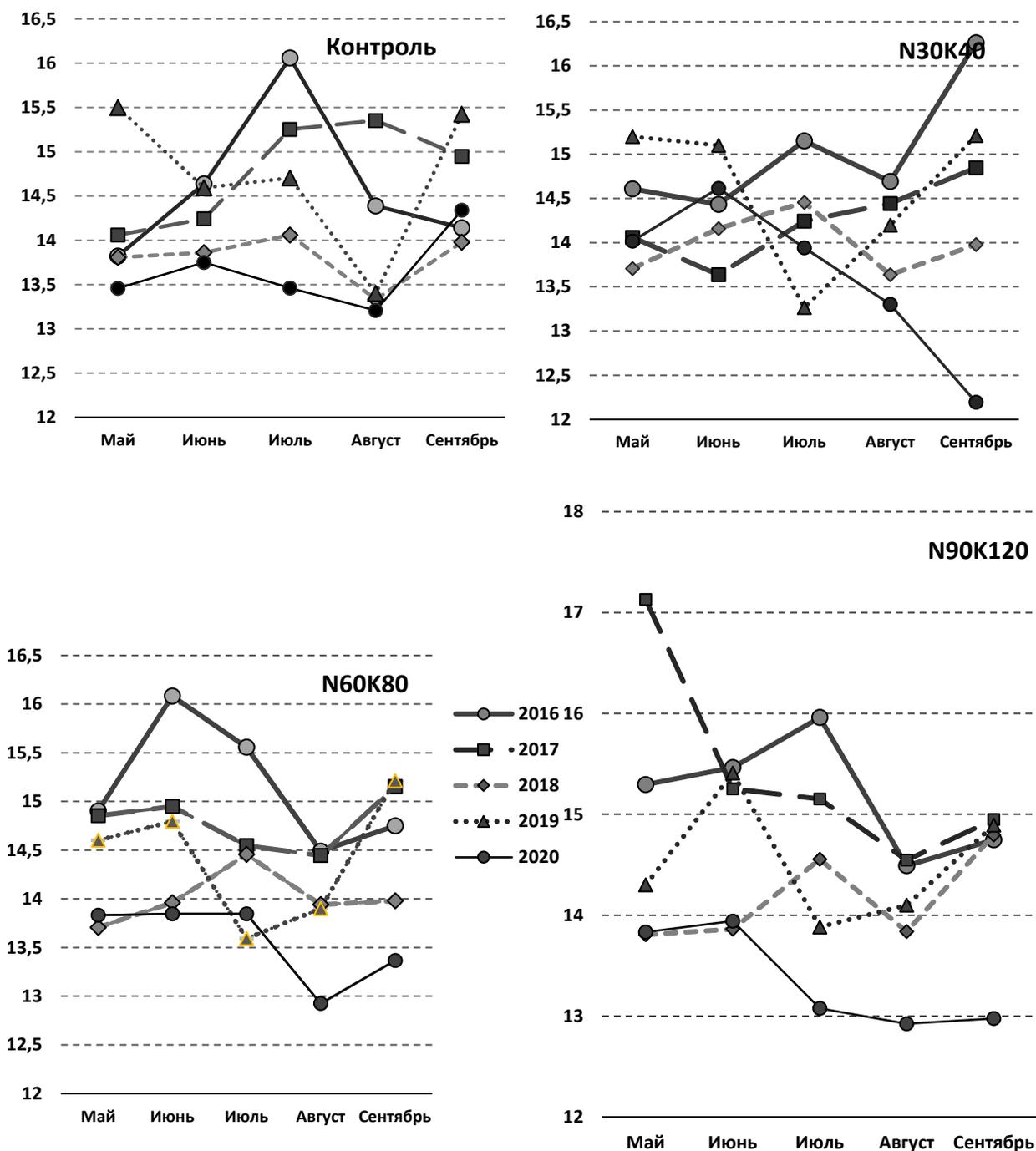
Соотношение аммонийной и нитратной форм азота (мг/кг) в слое почвы 0...20 см при внесении N60K80, 2016...2020 гг.



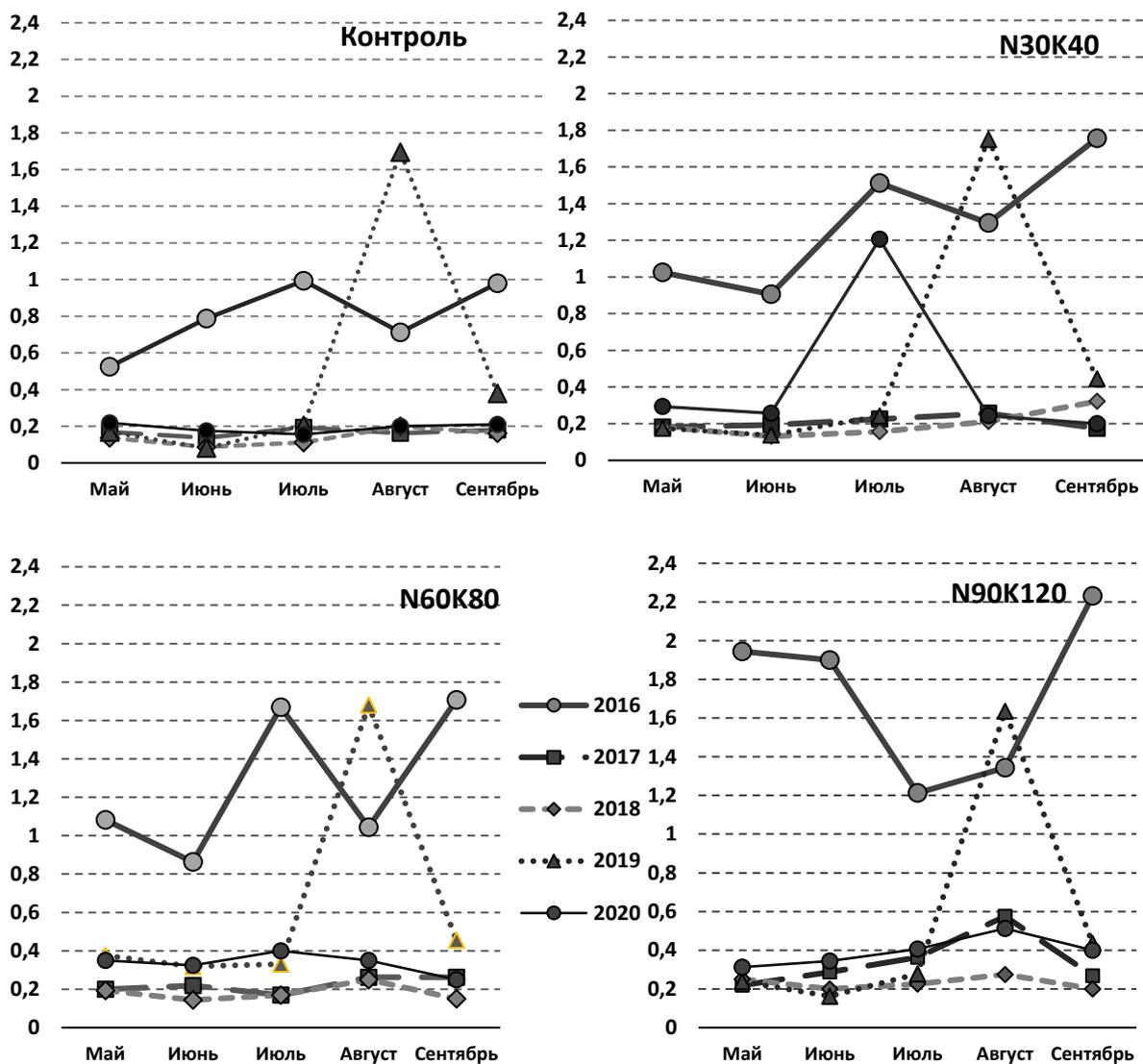
Динамика обменного Са (ммоль/100 г) в слое почвы 20...40 см,
2016...2020 гг.



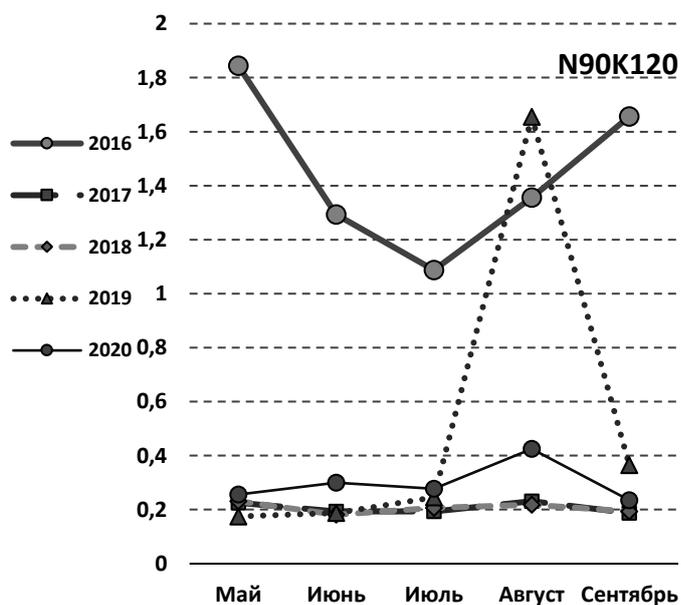
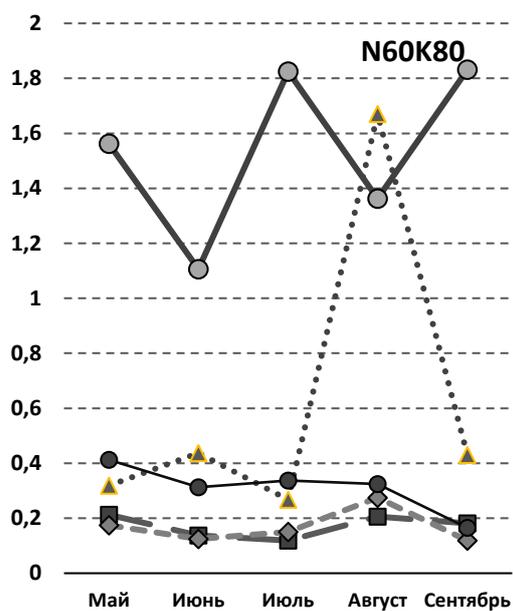
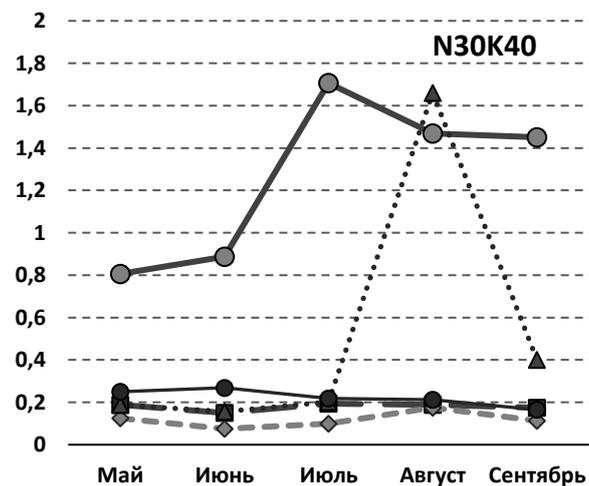
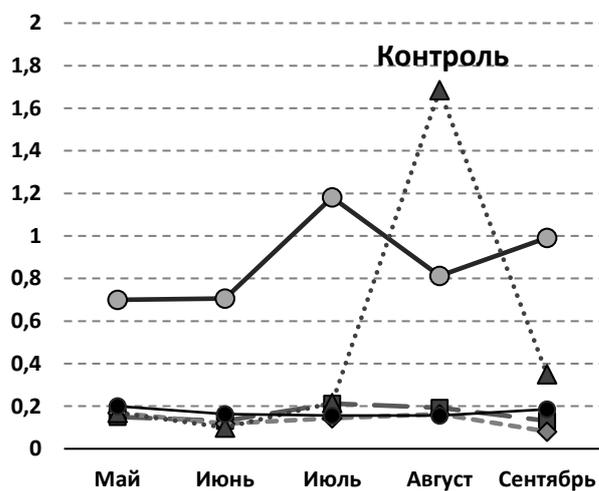
Динамика обменного Са (ммоль/100 г) в слое почвы 40...60 см,
2016...2020 гг.



Динамика водорастворимого Са (ммоль/100 г) в слое почвы 20...40 см,
2016...2020 гг.



Динамика водорастворимого Са (ммоль/100 г) в слое почвы 40...60 см,
2016...2020 гг.



Содержание гумуса в почве опытного участка в конце периода исследований (2020 г.), %

Фактор А (глубина отбора проб)	Фактор В (дозы удобрений)				Средние А
	Контроль	N30K40	N60K80	N90K120	
0-20 см	4,27	4,30	4,35	4,25	4,29
20-40 см	4,02	4,26	4,04	3,95	4,07*
40-60 см	2,74	3,49	2,77	3,09	3,02*
Средние В	3,67	4,02	3,72	3,76	
HCP ₀₅ A = 0,15 HCP ₀₅ B = 0,18 По АВ ₀₅ F _φ < F _Г					

* различия с контролем достоверны при уровне значимости 5%

Урожай яблони сорта Синап орловский в годы проведения исследований (Опыт 1, 2011-2014 гг), кг/дереву.

Вариант опыта	Годы исследований			
	2011	2012	2013	2014
Контроль (вода)	15	46	9	46
H₃BO₃ - 0,1%	19	44	20	53
K₂SO₄ - 0,3%	20	43	16	52
H₃BO₃ + K₂SO₄	13	42	8	49
CaCl₂ - 1%	21	43	10	45
H₃BO₃ + CaCl₂	15	29	12	63
K₂SO₄ + CaCl₂	17	34	17	63
H₃BO₃ + CaCl₂ + K₂SO₄	17	42	9	50