На правах рукописи

Матыченков Иван Владимирович

ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЕВЫХ, ФОСФОРНЫХ И АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ В СИСТЕМЕ ПОЧВА-РАСТЕНИЕ

Специальность 06.01.04 - агрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва 2014

Работа выполнена на кафедре агроинформатики факультета почвоведения Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель:
доктор биологических наук, профессор Пахненко Екатерина Петровна

Официальные оппоненты:
Приходько Валентина Евгеньевна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник группы генезиса и эволюции почв, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН.
Осипов Анатолий Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заместитель заведующего отдела физико-химической мелиорации почв и опытного дела, Государственное научной учреждение Агрофизический научно-исследовательский институт РАСХН.

Ведущая организация:
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт информатизации, агрономии и экологии»

Защита состоится «___» _____ 2014 года в ___ час. ___ мин. в аудитории М-2 на заседании Диссертационного совета Д 501.002.13 при МГУ имени М.В. Ломоносова на факультете почвоведения по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы д.1 стр. 12, МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Автореферат разослан «__» _____ 2014 года

Ученый секретарь
Диссертационного совета Зенова Галина Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Деградация почвенного покрова, загрязнение окружающей среды, снижение качества сельскохозяйственных продуктов, глобальные изменения климата, дефицит энергоресурсов требуют широкого внедрения новых, экологически безопасных и вместе с тем высокоэффективных методов ведения сельского хозяйства. Во многом деградация сельскохозяйственных угодий и снижение качества сельскохозяйственной продукции связаны с несбалансированным питанием растений (Курганова, 2002, Минеев, 1990). Высокая распространенность кремния в почве (от 200 до 350 г Si $кг^{-1}$ в глинистых почвах и от 450 до 480 г Si $кг^{-1}$ в песчаных) обеспечивает значимую роль элемента в процессах почвообразования и формировании плодородия почв (Ковда, 1985). Кроме твердых форм кремния, представленных различными минералами, в почве и почвенных водах содержатся растворимые формы Si: мономеры и полимеры кремниевой кислоты (Матыченков, 2007). Растений, в том числе и культурные, поглощают только мономеры кремниевой кислоты и ее анионы (Yoshida, 1975; Ma & Takahashi, 2003). Ежегодно сельскохозяйственными растениями безвозвратно выносится от 20 до 700 кг/га Si (Базилевич и др.,1975; Реймерс, 1990; Bocharnikova, Matichenkov, 2012). Эта величина сопоставима с вынос таких макроэлементов как фосфор, азот и калий.

Поскольку кремний является структурообразующим почвенным элементом, влияющим на уровень почвенного плодородия, постоянный его вынос приводит к ускорению деградации почв (Матыченков, 2008). Возникающий в результате дефицит кремния как питательного элемента резко снижает природные защитные свойства сельскохозяйственных растений, что приводит как к снижению урожайности, так и необходимости увеличивать дозы средств химической защиты растений, что отрицательно влияет на качество продукции (Куликова, 2012).

Использование кремниевых удобрений и кремний-содержащих мелиорантов важно с точки зрения восстановления природного баланса питательных элементов в системе почва-растений, снижения скорости деградационных процессов и получения стабильных урожаев высокого качества. Однако разобщенность сведений по данному виду удобрений, отсутствие единого подхода и методологии в изучении и внедрении кремниевых удобрений в практику, а также отсутствие обобщенного теоретического материала о взаимодействии кремниевых удобрений с традиционными минеральными удобрениями существенно замедляют процесс широкого применения этих удобрений. Без понимания этих процессов широкое практическое использование нового класса удобрений и почвенных мелиорантов может быть малоэффективным.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы являлось изучение особенностей и механизмов взаимовлияния кремниевых удобрений с фосфорными и азотными удобрениями и их влияние на рост и развитие сельскохозяйственных растений.

Для достижения поставленной цели решали следующие **задачи.**

1. Определить основные механизмы взаимодействия активных соединений кремния с соединениями фосфора в системе почва-растение.
2. Изучить влияние соединений кремния на эффективность азотных удобрений.

3. Исследовать влияние традиционных минеральных удобрений на содержание активных форм кремния в растениях и совместное влияние этих удобрений на рост и развитие растений на примере кукурузы.
4. Определить основные прямые и опосредованные механизмы влияния кремниевых удобрений и кремнийсодержащих мелиорантов на рост и развитие ряда сельскохозяйственных растений, их урожай и качество получаемой продукции в условиях оптимального минерального питания.
5. Выявить механизмы действия активных соединений кремния на солеустойчивость растений на примере травянистых и древесных культур в условиях минерального питания.

Положения, выносимые на защиту

1. Применение кремниевых удобрений совместно с традиционными минеральными удобрениями позволяет существенно повысить качественные и количественные показатели выращиваемой сельскохозяйственной продукции в условиях устойчивого земледелия.
2. Выявлены основные механизмы взаимодействия активных соединений кремния с фосфорными удобрениями и соединениями фосфора в почвах: реакция замещения силикат-анионом фосфат-аниона в фосфатах кальция и магния и физическая адсорбция подвижных фосфатов на поверхности вносимых силикатов.
3. Показано, что совместное внесение азотных и кремниевых удобрений повышает усвояемость азотных удобрений и снижает их негативное влияние на качество сельскохозяйственной продукции.
4. Одним из основных механизмов повышения солеустойчивости растений при использовании кремниевых удобрений является снижение скорости движения натрия по проводящей системе растения.

Место проведения работы. Исследования проводили на базе Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, факультета почвоведения и Института фундаментальных проблем биологии РАН, г Пущино Московской области.

Научная новизна. Определены основные механизмы влияния активных форм кремния на поведение фосфатов в почве. Доказано, что повышение концентрации монокремниевой кислоты в почвенном растворе приводит к реакции замещения фосфат-аниона на силикат-анион при pH> 2 для фосфатов кальция и при pH> 4 для фосфатов магния.

Показана возможность адсорбции подвижных фосфатов на поверхности внесенных кремниевых удобрений, что снижает вынос фосфатов из верхних горизонтов легких почв. Данные механизмы позволяют повысить эффективность фосфорных удобрений. Впервые проведено сравнение развития растений при различных условиях минерального питания и различных уровнях солевой токсикации. Показано наличие механизма повышения солеустойчивости растений посредством снижения интенсивности транспорта натрия по апопласту. Действие данного механизма усиливается от корней к стеблю и затем к листьям. Наличие дополнительного источника активных форм кремния может также привести к блокировке натрия в самих корнях. Впервые показано, что кремниевые удобрения повышают солеустойчивость древесных культур. Установлена способность

клеточных стенок корней растений ячменя препятствовать поступлению натрия из апопласта в симпласт, тогда как клеточные стенки стеблей и листьев такой способностью не обладают.

Практическая значимость. Показана целесообразность использования кремниевых удобрений совместно с традиционными минеральными удобрениями, что позволяет повысить эффективность последних и получать большие урожаи лучшего качества. Полученные результаты свидетельствуют о возможности повышения солеустойчивости травянистых и древесных культур при комплексном использовании кремниевых удобрений совместно с традиционными минеральными удобрениями. Апробирована технология активации природных фосфатов, позволяющая повысить в них долю доступного для растений фосфора и снизить подвижность тяжелых металлов. Получаемые в результате фосфорно-кремниевые удобрения могут быть использованы для выращивания экологически чистой продукции.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на международных и всероссийских конференциях, в том числе: на 5-й международной конференции «Si в сельском хозяйстве» (Китай, Пекин, 2011); международной конференции «Биология – наука XXI века» (Москва, 2012); XIX международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2012). XX международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2013).

Личный вклад диссертанта в получение научных результатов, выносимых на защиту. Автором проведены лабораторные, вегетационные и микрополевые эксперименты, подготовка растительных и почвенных образцов к анализу, анализ содержания моно- и поликремниевых кислот, фосфора, нитратов. Выполнены термодинамические вычисления по определению растворимости фосфатов в системах фосфат-вода-монокремниевая кислота для различных значений pH. Проведена статистическая обработка полученных данных.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, описания объектов и методов исследований, результатов и их обсуждения, выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 136 страницах, содержит 39 рисунков, 30 таблиц. Список публикаций из 274 наименования, в том числе 160 на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю Е.П. Пахненко за внимание к работе, ценные советы и консультации, заведующему кафедрой агроинформатики факультета почвоведения Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова Д.М. Хомякову, а также глубокую признательность коллективам

Института фундаментальных проблем биологии РАН и Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, ставятся цель и задачи работы, обсуждается их новизна, теоретическая и практическая значимость.

Глава 1. Обзор литературы. Кремний является самым распространенным после кислорода элементом земной коры. Его кларковое содержание по А.П. Виноградову (1935) равно 29.5; 87% всей литосферы Земли составляют кварц и силикаты. Растворимые формы кремния - моно- и поликремниевые кислоты - обладают высокой химической и биологической активностью (Айлер, 1979; Куликова, 2012; Матыченков, 2008). Биологический круговорот кремния на нашей планете наиболее интенсивен в наземных экосистемах, где кремний поглощается в количествах от 20 до 7000 кг/га/год (Matichenkov, Bocharnikova, 2012). Была предложена схема цикла кремния в системе почва-растение-микроорганизмы (рис. 1). Данный круговорот является базовым в процессах миграции и трансформации кремния как биогеохимического элемента. Цикл состоит из нескольких звеньев. Растения и почвенные микроорганизмы способны поглощать только мономеры кремниевой кислоты и ее анионы (Yoshida, 1975; Ma, Takahashi, 2003). У высших растений процесс поглощения происходит через корни и листья. Это первоначальное звено биогеохимического цикла кремния в системе почва-растение. Поглощенный кремний распределяется по растению неравномерно, в соответствии с внутренними потребностями организма. Поглощенная монокремниевая кислота может полимеризоваться и участвовать в формировании кремний-органических соединений. В свою очередь, поликремниевые кислоты в растениях способны дегидратировать с образованием фитолитов – аморфного диоксида кремния сложной конфигурации. Эти новообразования локализованы внутри растительных клеток и в межклеточном пространстве (Добровольский и др., 1988; Гольева, 2001, 2004).

Рис.1. Схема кремниевого цикла в системе почва-растение-микроорганизмы (Матыченков, 2008).

Предполагают, что миграция кремния внутри растения осуществляется в основном в форме поликремниевой кислоты с помощью специальных транспортных ферментов (Ma et al., 2006). По-видимому, растения и микроорганизмы способны запасать часть поглощенного кремния также в форме высокомолекулярных поликремниевых кислот (Biel et al., 2008).

После отмирания растений биогенный кремний (поликремниевые кислоты, фитолиты, кремний-органические соединения и т.д.) переходит в почву, где подвергается процессу растворения и/или разложения. Продуктом растворения становится монокремниевая кислота. Монокремниевая кислота в почве контролирует многие химические, физико-химические и биологические процессы (Куликова, 2012; Matichenkov, Bocharnikova, 2001). Завершает цикл поглощение монокремниевой кислоты живыми организмами.

Сельскохозяйственные растения активно поглощают доступные формы кремния в количествах, близких к поглощению азота, фосфора и калия (Базилевич и др., 1975). В результате отчуждения биомассы с урожаем безвозвратно выносится от 30 до 700 кг/га Si в год (Базилевич и др., 1975; Базилевич, 1993; Пахненко, 2001 Anderson, 1991; Ma, Takahashi, 2002; Savant et al., 1999). Концентрация в почве активных форм кремния (мономеров кремниевой кислоты) составляет от 5 до 40 мг/л Si. Их вынос приводит к нарушению биогеохимичесчкого цикла кремния, что, в свою очередь, вызывает ускорение деградации почв: разрушение почвенной структуры, ускорение деградации органического вещества, снижение адсорбционных свойств почвы, снижение доступности питательных элементов (Куликова, 2012; Матыченков, 2007, 2008; Biel et al., 2008). Для восполнения недостатка активных форм кремния в почве необходимо внесение кремниевых удобрений.

Кремниевые удобрения известны в мире с середины 18 века. История применения кремниевых удобрений тесным образом связана с такими именами, как А. Гумбольдт, Ю. Либих, Д. И. Менделеев, В.И. Вернадский. Современные тенденции развития сельского хозяйства, повышение требований к качеству сельскохозяйственной продукции, необходимость восстановления плодородия деградированных почв, поиск альтернативы химическим средствам защиты растений привели к повышению интереса к данному типу удобрений и почвенных мелиорантов. Начиная с 2000 года, производство кремниевых удобрений ежегодно увеличивается на 20-30% в США, Китае, Индии, Бразилии и других странах. Многие страны, до того не применявшие кремниевые удобрения, сегодня успешно их внедряют. Так, в настоящее время кремниевые удобрения используют в Японии, Южной Корее, Китае, Индии, Колумбии, Мексике, США, Австралии, Бразилии. Международные конференции, посвященные применению кремния в сельском хозяйстве были организованы в США, Японии, Бразилии, России, Китае, ЮАР.

Научная литература по кремниевым удобрениям или кремниевым почвенным мелиорантам насчитывает несколько тысяч единиц (Воронков и др., 1975; Куликова, 2012; Матыченков, 2008; Пашкевич, Кирюшин, 2008). Однако кремниевые удобрения остаются мало распространенными агрохимикатами и знания о роли активных форм кремния в системе почва-растение по-прежнему известны весьма узкому кругу специалистов.

В настоящее время можно выделить несколько типов кремниевых удобрений: синтетические, удобрения на основе растительных остатков, некоторые высококремнистые горные породы, отходы промышленности (Gascho, 2001). Традиционно кремниевые удобрения наиболее активно применяли на культуре риса (Ma, Takahashi, 2002). Многочисленные исследования показали положительное влияние

кремниевых удобрений и на другие сельскохозяйственные культуры (Куликова, 2012; Snyder et al., 2006). Известно, что активные формы кремния положительно влияют на поведение и распределение фосфора, азота и других питательных элементов в системе почва-растение (Matichenkov, Bocharnikova, 2001). Исследования, направленные на изучение этих воздействий, проводят в России, США, Китае, Индии и других странах (Ma, Takahashi, 2002, Snyder et al., 2006). Мы считаем, что для решения таких задач, как экологически чистое земледелие, устойчивое сельское хозяйство и обеспечение продовольственной независимости необходимо широкое применение кремниевых удобрений и почвенных мелиорантов совместно с другими удобрениями и мелиорантами (Matichenkov, 2011; Guntzer et al., 2012).

Глава 2. Объекты и методы исследования. В главе перечислены использованные в работе кремниевые удобрения, традиционные удобрения, культурные растения, почвы. Даны базовые характеристики кремниевых удобрений и почв. Детально описаны методы исследования активных соединений кремния в почвах и растениях. Даны описания проведенных лабораторных, вегетационных и микрополевых экспериментов. Анализ почв, растений, удобрений проводили по стандартным методикам (Минеев и др., 2001; Соколов, 1975). Все эксперименты выполняли минимум в 3-кратной и максимум в 12-кратной проворностях. Основные агрохимические характеристики почв, использованных при выполнении диссертации, представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Почва, место отбора	**$pH_{вод}$**	**Сорг, %**	**Подвижные формы мг/100 г почвы**		**Si вод**	**Si кисл**
			P_2O_5	**K_2O**	**----- мг/кг Si-----**	
Дерново-подзолистая почва, север Московской области	5,2	0,92	12,4	37,4	9,8	245,4
Серая лесная почва, юг Московской области	6,2	1,56	17,3	25,9	13,5	287,5
Чернозем карбонатный целинный, юг Ульяновской области	8,6	6,66	17,0	30,5	35,6	456,7
Чернозем карбонатный пахотный, юг Ульяновской области	8,1	6,12	12,8	24,7	15,8	387,8
Тропическая железистая почва, республика Того, Восточная Африка	5,8	0,75	1,8	10,8	8,4	132,4

Глава 3. Результаты и их обсуждение

3.1. Взаимовлияние кремниевых и фосфорных удобрений

С целью изучения механизмов взаимодействия кремниевых соединений с почвенными фосфатами были последовательно проведены следующие этапы исследований: теоретические вычисления, модельные эксперименты с использованием простых соединений, лабораторные исследования с использованием почвенных образцов и полевые испытания.

Расчеты изменения концентрации фосфатов в насыщенных растворах при добавлении в них монокремниевой кислоты при различных pH проводили с использованием литературных источников (Наумов и др., 1972; Рудакова и др., 1986; Lindsay, 1979). Расчеты были выполнены для монокальцийфосфата, дикальцийфосфата, $Mg_3(PO_4)_2$ – как наиболее вероятных форм аккумуляции подвижных соединений фосфора в почвах (Гинсбург, 1981; Никитишен, Курганова, 2007). Результаты, полученные для монокальцийфосфата, показали, что в случае $\beta CaSiO_3$ повышение концентрации фосфат-аниона как результат действия конкурирующей реакции происходит только при pH выше 6, а в случае образования Ca_2SiO_4 - при pH начиная с 3 и выше. При высоких значениях pH конкурирующие реакции могут резко повышать концентрацию фосфатов в насыщенном растворе (рис. 2).

В модельных экспериментах была изучена динамика растворения двухзамещенного фосфата кальция при различных концентрациях монокремниевой кислоты. Для создания определенной концентрации монокремниевой кислоты использовали коммерческий препарат, содержащий 20% Si в форме монокремниевой кислоты, стабилизированной натрием. В первые часы эксперимента (1-5 часов) максимальное количество фосфатов в растворе наблюдалось в контрольном варианте. По-видимому, это связано с адсорбцией силикат-анионов на твердом фосфате. Однако через 5 часов после начала эксперимента добавление монокремниевой кислоты в систему приводило к повышению содержания фосфат-анионов в растворе (рис. 3).

Равновесие между осадком и раствором в контрольном варианте устанавливалось в течение первых суток (рис. 3). Присутствие монокремниевой кислоты замедляло достижение равновесия в растворе.

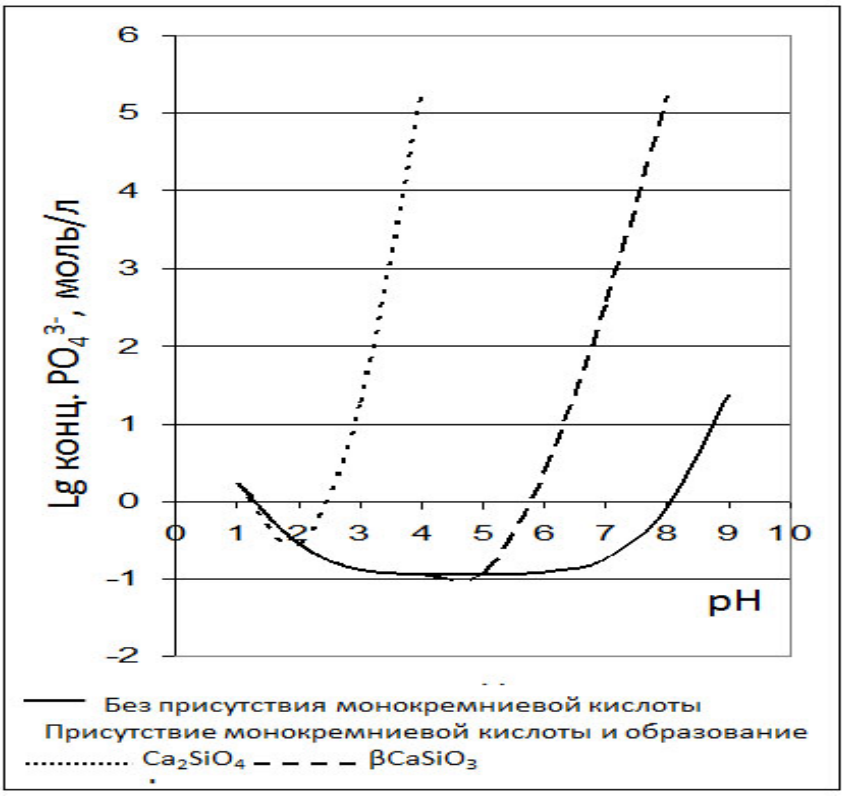

Рис. 2. Влияние конкурирующих реакций образования $\beta CaSiO_3$ и Ca_2SiO_4 на содержание фосфат-аниона в насыщенном растворе при растворении монокальцийфосфата $Ca(H_2PO_4)_2$.

Необходимо отметить, что чем выше была концентрация монокремниевой кислоты в растворе, тем медленнее устанавливалось равновесие – 4-5 дней. Таким образом, проведенные модельные эксперименты доказали возможность реакции замещения фосфора на кремний в фосфатах кальция и магния.

Следующим этапом исследования были модельные эксперименты по инкубации почв, в которые были внесены монокремниевая кислота или диатомит в дозах 250 и 500 кг/га по кремнию. В качестве изучаемых почв были взяты верхние горизонты чернозема карбонатного на тяжелых суглинках, целинного и пахотного, отобранные в Ульяновской области. Инкубацию проводили в течение месяца при температуре 24-26°C и влажности почвы 15-20% в закрытых полиэтиленовых пакетах. После инкубации образцы высушивали до влажности 8-12% и затем определяли содержание монокремниевой кислоты, кислоторастворимого кремния, доступного для растений фосфора и делали фракционный анализ фосфора по методике Ротамстедской опытной станции, разработанной для щелочных почв (Rothamsted exterimental station report, 1975). В почвенных образцах также определяли $pH_{вод}$.

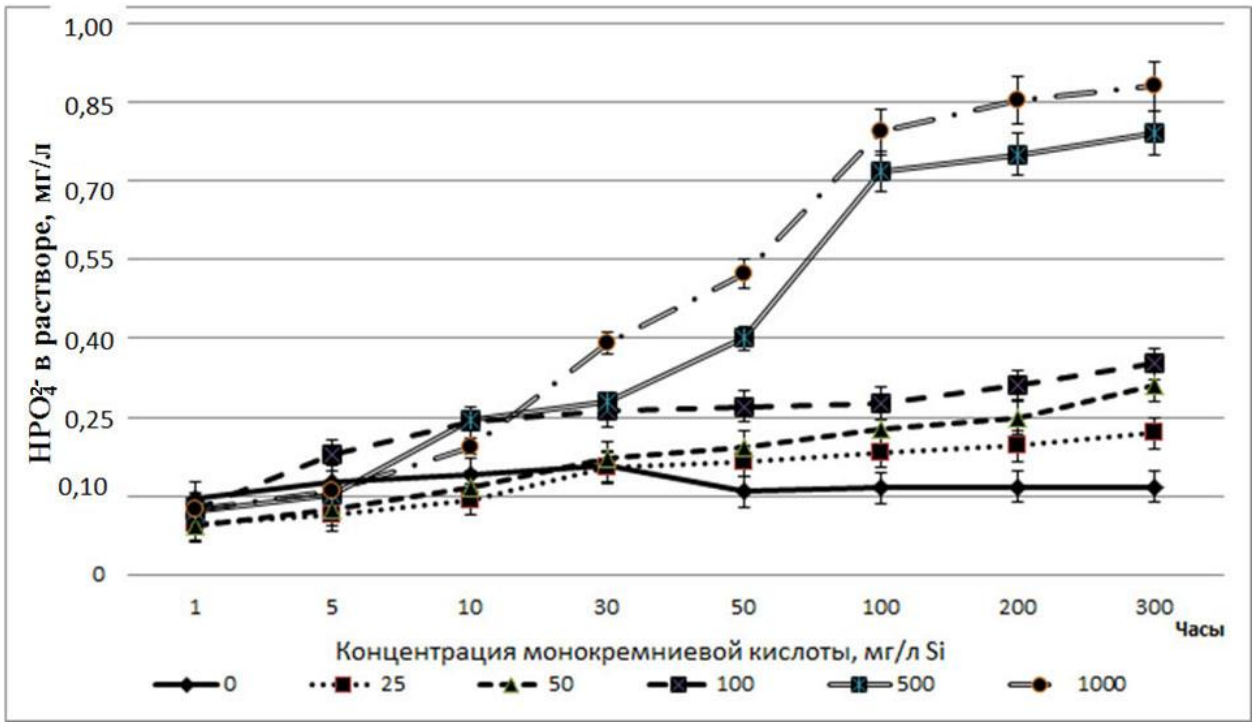

Рис. 3. Динамика концентрации фосфора в системе $CaH(PO_4)$- водный раствор монокремниевой кислоты.

Все изучаемые почвы характеризовались высоким содержанием монокремниевой кислоты (табл. 2). Добавление активных форм кремния приводило к увеличению содержания доступных форм фосфора, причем это увеличение составляло от 50 до 100% по сравнению с контролем. Присутствие монокремниевой кислоты в системе привело к заметному снижению pH почвы. При этом одновременно наблюдалось и повышение растворимости фосфатов. Наибольший эффект зафиксирован при совместном внесении монокремниевой кислоты и диатомита.

Таблица 2.

Подвижные формы фосфора и кремния в почвах после инкубации (мг/кг)

Вариант опыта	Водорастворимый		Кислоторастворимый		$pH_{вод}$
	Si	P	Si	P	
Чернозем карбонатный аллювиальный на тяжелосуглинистой породе, целинный					
Контроль	42,4	10,7	245	70,4	8,60
Si к-та, 0,25 г/кг по Si	74,5	29,4	325	154,2	8,54
Si к-та, 0,50 г/кг по Si	104,6	34,6	379	172,2	8,34
ДТ, 0,25 г/кг по Si	62,2	17,3	388	112,3	8,58
ДТ, 0,50 г/кг по Si	85,5	24,2	408	122,2	8,17
Чернозем карбонатный аллювиальный на тяжелосуглинистой породе, с.-х.					
Контроль	14,8	6,8	206	56,4	8,10
Si к-та, 0,25 г/кг по Si	55,8	19,4	307	89,5	8,00
Si к-та, 0,50 г/кг по Si	89,3	22,7	354	103,5	7,85
ДТ, 0,25 г/кг по Si	53,2	12,3	352	72,4	7,45
ДТ, 0,50 г/кг по Si	74,3	15,8	394	88,3	7,21
$НСР_{05}$	1,5	0,7	20	1,5	0,05

Данные фракционного анализа показали, что при повышении концентрации монокремниевой кислоты в почве идет перераспределение фосфатов по фракциям: содержание прочносвязанного фосфора (фракции 4 и 5) снижается, а доля более растворимых форм фосфора (фракции 1,2 и 3) увеличивается (табл. 3). При этом суммарное количество фосфора в пяти фракциях оставалось постоянным. Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность реакции замещения фосфат-анионов на силикат-анионы в почвах при добавлении активных форм кремния, в результате которой труднорастворимые фосфаты, прочно связанные с кальцием и магнием, переходят в подвижные формы.

Таблица 3.

Фракционный анализ фосфора в почвах при внесении кремнезёма

Вариант опыта	Фракции фосфора					Сумма фракций
	1 (H_2O)	2 (0.5 *M* $NaHCO_3$)	3 (0.1 *M* NaOH)	4 (1M HCl)	5 (конц HCl+5M H_2SO_4)	
	----------P, мг/кг почвы----------					
Чернозем карбонатный аллювиальный на тяжелосуглинистой породе, целинный						
Контроль	42,4	83,2	123,4	822,4	234,5	1305,9
Si к-та, 0,25 г/кг по Si	55,6	98,3	134,2	797,2	223,5	1308,8
Si к-та, 0,50 г/кг по Si	78,2	123,4	143,2	734,5	227,4	1306,7
ДТ, 0,25 г/кг по Si	49,3	90,3	126,5	788,3	253,2	1307,6
ДТ, 0,50 г/кг по Si	58,3	97,3	127,3	773,4	252,5	1308,8
Чернозем карбонатный аллювиальный на тяжелосуглинистой породе, с.-х.						
Контроль	30,5	64,5	105,3	854,4	234,5	1289,2
Si к-та, 0,25 г/кг по Si	41,6	78,9	114,5	812,5	240,3	1287,8
Si к-та, 0,50 г/кг по Si	62,4	85,5	125,6	804,5	208,4	1286,4
ДТ, 0,25 г/кг по Si	36,8	72,4	107,5	822,6	249,5	1288,8
ДТ, 0,50 г/кг по Si	45,8	80,5	107,8	812,2	243,8	1290,1
$НСР_{05}$	1,5	3,5	3,5	5,0	7,0	

В следующей части модельных исследований изучали влияние активных форм кремния (диатомита и аморфного диоксида кремния) на миграцию фосфора в легких грунтах. Было сделано предположение о возможности снижения подвижности растворимых фосфатов в результате сорбции твердыми кремниевыми удобрениями и мелиорантами. Модельные исследования проводили на примере дерново-подзолистой песчаной почвы, отобранной в Солнечногорском районе Московской области.

Внесение кремниевых соединений в исследуемую почву обусловило заметное увеличение ее адсорбционной способности по отношению к фосфору (рис. 4). Диатомит обладал существенно лучшей способностью к адсорбции водорастворимого фосфора по сравнению с аморфным диоксидом кремния. Как показали результаты электронной микроскопии, по-видимому, это обусловлено наличием у диатомита более сложно организованной и тонкой структуры, что и обеспечивает большую поверхность для адсорбции аниона. На графике видно, что для диатомитов характерны два уровня насыщения фосфат-анионами. Скорее всего, это связано с наличием механизма вторичной адсорбции.

Анализ полученных результатов показывает, что в природе возможно наличие двух механизмов взаимодействия активных форм кремния и фосфатов. В первом случае внесенная в виде мелиоранта или образованная в процессе растворения кремниевых соединений монокремниевая кислота может вступать в реакцию с фосфатами кальция или магния. Результатом этой реакции может быть повышение доступности фосфора для растений. Во втором случае внесенные соединения кремния являются центрами физической адсорбции фосфат-анионов. Это приводит к снижению выноса фосфора из легких почв при их избыточном увлажнении.

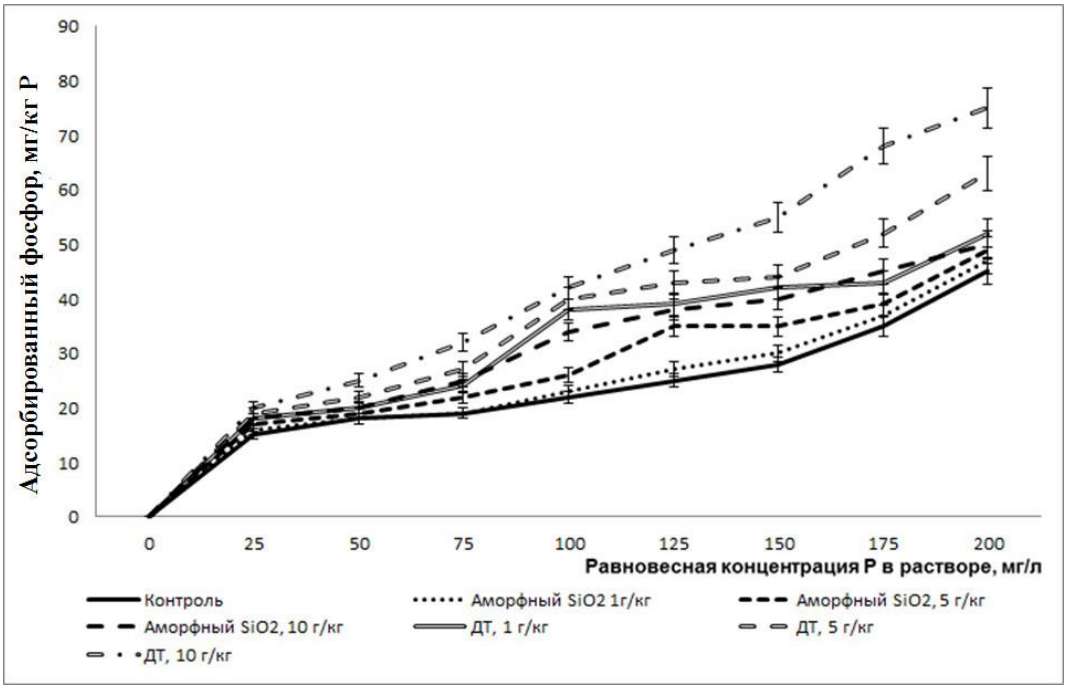

Рис. 4. Адсорбционные-десорбционные свойства дерново-подзолистой песчаной почвы, не обработанной и обработанной кремниевыми соединениями.

3.2. Активация природных фосфоритов

Активация фосфора из фосфатов кальция или магния путем их обработки концентрированной серной кислотой лежит в основе производства суперфосфатов. Однако при обработке фосфоритов концентрированной кислотой идет повышение растворимости тяжелых металлов, обычно содержащихся в этих осадочных породах. В результате фосфорные удобрения являются одним из источников загрязнения сельскохозяйственных угодий тяжелыми металлами (Глуховский и др, 1994; Минеев, 1994). Современное сельское хозяйство не может отказаться от фосфорных удобрений. Применение не переработанных фосфоритов неэффективно в связи с их низкой растворимостью. Очевидно, что для решения данной проблемы необходимо повысить доступность (растворимость) фосфатов с одновременным снижением подвижности присутствующих в фосфоритах тяжелых металлов.

Как свидетельствуют проведенные нами исследования и данные литературы, монокремниевая кислота может вытеснять фосфат-анион из фосфатов кальция и магния. В то же время известно, что высокие концентрации монокремниевой кислоты приводят к заметному снижению подвижности и активности тяжелых металлов (Matichenkov et al., 1999; Song et al., 2009). Можно предположить, что обработка фосфоритов концентрированной монокремниевой кислотой будет способствовать повышению содержания доступного для растений фосфора и одновременному снижению активности тяжелых металлов.

В качестве объекта исследований были использованы необогащённые фосфориты месторождения Hahatoe (юг Республики Того, Африка). Данные фосфаты характеризуются высоким содержанием тяжелых металлов (Gnandi et all, 2009). В образцах определяли содержание подвижных форм свинца и ртути в водной вытяжке, кобальта, кадмия, хрома и свинца в 0,1н HC1- вытяжке, а также кадмия, хрома, меди, свинца и никеля в 2н HNO_3 - вытяжке. Полученные данные показали, что тоголезские фосфориты имеют опасно-высокие содержания свинца, кадмия и ртути (таб. 4).

Таблица 4.

Содержание тяжелых металлов в исходных и обработанных монокремниевой кислотой фосфоритах (мг/кг)

Вытяжка	**Элемент**	**Необработанный фосфорит**	**Обработанный фосфорит**
H_2O	**Pb**	0,015± 0,004	0
	Hg	1,428±0,067	0,564±0,067
0.1н HCl	**Co**	0,038±0,005	0
	Cd	0,338±0,005	0,017±0,005
	Cr	0,632±0,004	0,078±0,004
	Pb	1,744±0,010	0,041±0,010
2н HNO_3	**Cd**	2,432±0,008	2,210±0,008
	Cr	0,956±0,014	0,690±0,014
	Pb	18,12±0,025	17,67±0,025
	Cu	3,234±0,015	3,120±0,015
	Ni	0,128±0,010	0,111±0,010

Отобранные фосфориты обрабатывали концентрированным раствором монокремниевой кислоты, что позволило заметно снизить подвижность тяжелых металлов, при этом содержание доступного для растений фосфора увеличилось. Так, содержание фосфора в 2% лимоннокислой вытяжке в исходном фосфорите составляло 4,8%, а после обработки монокремниевой кислотой - 9,4%.

Исходные и обработанные фосфориты исследовали в вегетационных опытах на культуре кормовых трав (*Paspalum notatum*). Опыты проводили на кислой песчаной почве в пластиковых сосудах объемом 1 литр в течение 1 месяца. Фосфорные удобрения вносили в дозах из расчета 0,1 и 0,2 г P_2O_5 на сосуд. Результаты показали более высокую эффективность обработанного кремнием фосфорита: наземная биомасса растений увеличилась на 7-12% в вариантах с исходным фосфоритом и на 38-49 % с обработанным фосфоритом. При внесении суперфосфата наземная биомасса растений увеличилась на 44-56%. Таким образом, эффективность модифицированного фосфорита оказалась близка к эффективности суперфосфата.

3.3. Взаимовлияние кремниевых и азотных удобрений

Для изучения влияния активных форм кремния на эффективность азотных удобрений (нитрата аммония) были проведены мелкоделяночные опыты с белокочанной капустой (Слава 1305), цветной капустой (Яко) и томатами (Волгоградский скороспелый 323) в условиях закрытого грунта, площадь опытной делянки была 2 $м^2$, повторность четырехкратной. Кроме монокремниевой кислоты и диатомита Инзенского месторождения (в дозах 100 г и 200 г на $м^2$), были использованы кремниевые удобрения, выпускаемые компанией Аккор (г. Орехово-Зуево, Московская обл.). Удобрения представляют собой активированный по отношению к кремнию минерал. Содержание водорастворимого кремния в них составило 430-630 мг/кг Si, что в 10 раз выше, чем в диатомите (45,4 мг/кг Si). Поэтому в вегетационных экспериментах препараты Аккор применяли в дозе 10 г на квадратный метр, что соответствует 100 кг/га.

Белокочанную капусту выращивали без пикировки и с пикировкой рассады. Пикировку проводили через 13 дней после посева семян в тепличный грунт. Биомассу растений определяли через 30 дней после всходов семян. Кремниевые и азотное удобрения обеспечили увеличение биомассы корней и наземной биомассы капусты на 5 - 61 % (табл. 5). Одностороннее применение селитры обеспечило прибавку наземной биомассы на 25,1%, корней на 47,4%; внесение кремниевых удобрений повышало биомассу рассады в интервале величин от 5 до 20%, а корней от 10 до 52%. Лучший результат по опыту был получен при внесении Si-актив. Это, возможно, связано со способностью кремния повышать устойчивость растений к стрессам, в том числе к стрессу, обусловленному пикировкой растения. Прибавка к контролю составила для зеленой массы 34% и 96%, а для корней 89% и 160% соответственно для вариантов с пикировкой и без пикировки. Сравнительный анализ по полученным значениям биомассы рассады с пикировкой и без пикировки показал устойчивое позитивное воздействие кремниевых удобрений при всех режимах минерального питания, что позволяет рассматривать их как надежный антидепрессант.

Таблица 5.

Влияние аммиачной селитры и кремниевых удобрений при раздельном и совместном внесении на вес белокочанной капусты.

Вариант опыта	Без пикировки				С пикировкой			
	Вес корней 10-ти растений		Вес наземной биомассы 10-ти растений		Вес корней 10-ти растений		Вес наземной биомассы 10-ти растений	
	г	%	г	%	г	%	г	%
Контроль без удобрений	1,9	100	55,1	100	1,3	100	31,3	100
Нитрат аммония (НА) 50 г/м^2	2,8	147,37	68,9	125,1	2,1	161,5	31,8	101,6
Диатомит 100 г/м^2	2,1	110,53	57,8	104,9	1,8	138,5	32,5	103,8
Диатомит 200 г/м^2	2,3	121,05	59,0	107,1	2,0	153,8	33,2	106,1
Моно-Si 100 мг/л Si	2,4	126,32	59,1	107,3	1,9	146,2	34,5	110,2
Моно-Si 150 мг/л Si	2,4	126,32	61,2	111,1	1,9	146,2	35,0	111,8
Si-актив.	2,9	152,00	66,0	119,8	2,0	153,9	40,6	129,7
НА+диатомит 100 г/м^2	3,0	157,89	69,5	126,1	2,8	215,4	41,2	131,6
НА+диатомит 200 г/м^2	3,1	163,16	71,2	129,2	3,2	246,2	42,3	135,1
НА+моно-Si 100 мг/л Si	3,9	152,63	70,2	127,4	3,0	230,8	52,1	166,5
НА+моно-Si 150 мг/л Si	3,0	157,89	72,5	131,6	3,2	246,2	53,5	170,9
НА+ Si-актив.	3,6	189,47	73,6	133,6	3,4	261,5	61,2	195,5
$НСР_{05}$	0,2	-	1,0		0,2		1,0	

Выращивание цветной капусты проводили по сходной схеме и техническому регламенту. Пикировку рассады проводили на 14 день вегетации, длительность опыта 90 дней до полного созревания соцветий. Учитывали общую продуктивность наземной биомассы и товарный вес соцветий. Как и в эксперименте с белокочанной капустой, совместное внесение азотных и кремниевых удобрений положительно влияло как на средний вес соцветия цветной капусты, так и на общую биомассу. В вариантах, куда вносили только азотные удобрения, продуктивность цветной капусты увеличилась на 65 и 194%, соответственно для вариантов без пикировки и с пикировкой (табл. 6). При использовании кремниевого удобрения максимальный прирост биомассы по сравнению с контролем составил 16,7% без пикирования и 137% с пикированием. Совместное применение азотных и кремниевых удобрений позволило увеличить продуктивность цветной капусты на 98 и 226%, соответственно для вариантов без пикировки и с пикировкой.

Таблица 6.

Влияние аммиачной селитры и кремниевых удобрений при раздельном и совместном внесении на вес соцветий цветной капусты.

Вариант опыта	**Без пикировки**		**С пикировкой**	
	Вес соцветия, г	**%**	**Вес соцветия, г**	**%**
Контроль без удобрений	36,5	100,0	25,6	100
Нитрат аммония (НА)	58,6	160,5	75,3	294,1
Диатомит 100 г/м^2	40,2	110,1	42,3	165,2
Диатомит 200 г/м^2	42,6	116,7	45,8	178,9
Моно-Si 100 мг/л Si	38	104,1	31	121,1
Моно-Si 150 мг/л Si	38,9	106,6	32,1	125,4
Si-актив.	40,9	112,1	60,9	237,9
НА+диатомит 100 г/м^2	62,3	170,7	78,4	306,3
НА+диатомит 200 г/м^2	66,7	182,7	80,5	314,5
НА+моно-Si 100 мг/л Si	68,3	187,1	72,4	282,8
НА+моно-Si 150 мг/л Si	68,9	188,8	75,6	295,3
НА+ Si-актив.	72,4	198,4	83,5	326,2
$НСР_{05}$	3,5		4,5	

Влияние кремниевых удобрений на продуктивность томатов изучали при тех же фазах и формах внесения агрохимикатов и выращивали в аналогичных агротехнических условиях, как предыдущие культуры. Посев томатов в грунт проводили сухими семенами без предварительной обработки. Пикировка рассады была проведена на 20 день вегетации, активность ростовых процессов, энергию фотосинтеза и другие параметры измеряли на 45 день вегетации.

Нитрат аммония и кремниевые препараты, особенно при их совместном применении, положительно влияли на рост и развитие томатов (табл. 7). Так, увеличение веса растений достигало 146%, а площади листовой пластины - 133% по сравнению с контролем. Также наблюдалось усиление фотосинтеза.

С наступлением фазы плодоношения томаты собирали по вариантам опыта в течение 40 дней с интервалом 5 дней и взвешивали. Динамика созревания томатов представлена на рис. 5.

Совместное внесение кремниевых и азотных удобрений способствовало ускоренному созреванию томатов и обеспечило увеличение урожая на 16 - 70% для спелых плодов и на 5 - 35% для суммарного количества плодов, включая зеленые (табл. 8).

В созревших томатах определяли содержание нитратов с помощью ионометра “Horiba B-343, twin$NO3^-$“. Следует отметить, что кремниевые удобрения в вариантах с нитратом аммония обеспечили снижение избыточного содержания нитратов в плодах.

Таблица 7.

Продуктивность и интенсивность фотосинтеза томатов под влиянием аммиачной селитры и кремниевых удобрений при раздельном и совместном внесении

Вариант опыта	Наземная биомасса 10 растений, г	Отношение массы листьев к массе растения	Площадь листовой пластины, дм^2	Активность фотосинтеза, CO_2	
				Мкмоль* растение$^{-1}$*см$^{-1}$	Мкмоль* г$^{-1}$*см$^{-1}$
Контроль	12,9	0,78	0,45	1,00	0,98
Нитрат аммония (НА)	27,8	0,65	0,54	1,69	0,84
Диатомит 100 г/м^2	17,8	0,75	0,69	1,32	0,84
Моно-Si 100 мг/л Si	18,2	0,78	0,79	1,43	0,91
Si-актив.	26,1	0,74	1,01	1,67	0,85
НА+ диатомит 100 г/м^2	28,7	0,76	0,85	1,72	0,92
НА+моно-Si 100 мг/л Si	29,5	0,79	0,95	1,84	0,91
НА+ Si-актив.	31,8	0,75	1,05	1,88	0,87
НСР$_{05}$	2,5	0,05	0,15	0,05	0,06

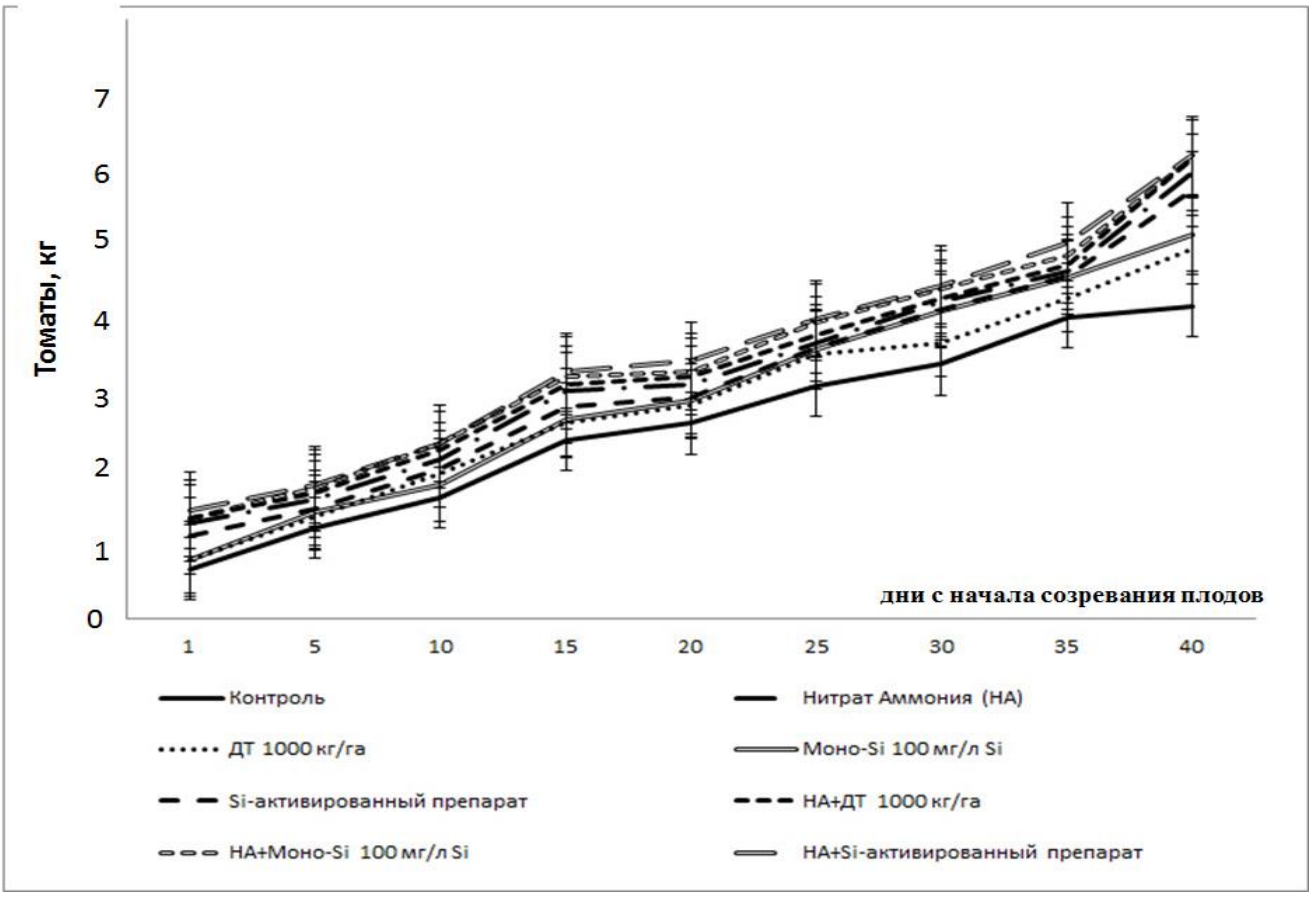

Рис. 5. Динамика созревания томатов в мелкоделяночном опыте (кг/м^2).

Таблица 8.

Влияние аммиачной селитры и кремниевых удобрений при раздельном и совместном внесении на продуктивность томатов и содержание в спелых плодах нитратов

Вариант опыта	Общий вес томатов		Вес спелых томатов		Содержание нитратов, NO_3^- мг/кг
	кг/м^2	% от контроля	кг/м^2	% от контроля	
Контроль	4,48	100	3,45	100	25
Нитрат аммония (НА)	5,45	143,6	4,96	121,5	75
Диатомит 100 г/м^2	4,74	116,1	4,01	105,8	38
Моно-Si 100 мг/л Si	5,25	124,1	4,28	117,0	40
Si-актив. 1	5,24	124,8	4,31	116,8	40
НА+ДТ 1000 кг/га	5,68	152,6	5,27	126,8	56
НА+моно-Si 100 мг/л Si	5,78	155,6	5,37	129,0	54
НА+ Si-актив. 1	6,05	170,7	5,89	135,0	52
$НСР_{05}$	0,06		0,06		2

3.4. Взаимовлияние кремниевых и комплексных удобрений

Одной из задач наших исследований было изучение динамики активных форм кремния в листьях кукурузы под воздействием традиционных удобрений. В течение 4-х месяцев кукурузу выращивали в тепличном грунте с внесением: 1. NPK (аммофоска)-1:1:1 (из расчета 0,1 г на кг почвы); 2. диатомит (в дозе 1г на кг почвы); 3. монокремниевая кислота (раз в месяц в концентрации 200 ppm Si из расчета 100 мл/кг); 4. NPK + диатомит; 5) NPK + монокремниевая кислота. Ежемесячно отбирали образцы растительных тканей (листья и стебли), анализировали их на содержание мономеров и полимеров кремниевой кислоты и общее содержание кремния, а также проводили биометрию растений.

Внесение удобрений существенно повысило биомассу кукурузы (табл. 9). Кремниевые препараты были менее эффективны по сравнению с комплексным удобрением. Наибольший эффект, свыше 100% по сравнению с контролем, был получен при совместном внесении кремния и комплексных минеральных удобрений.

Содержание монокремниевой кислоты в листьях кукурузы снизилось при внесении NPK. Вынесение диатомита или раствора монокремниевой кислоты значительно повысили содержание монокремниевой кислоты в протопласте листьев кукурузы: с 84 мг/кг Si в контроле до 128 и 153 мг/кг Si, соответственно. Со временем эта величина достигла 190 - 192 мг/кг Si. При совместном внесении кремниевых препаратов и аммофоски содержание монокремниевой кислоты в листьях незначительно снизилось.

Для всех вариантов опыта наблюдалось повышение концентрации поликремниевых кислот в протопласте листьев кукурузы в процесс вегетации. Использование только аммофоски привело к существенному снижению накопления поликремниевых кислот по сравнению с контролем. Внесение соединений кремния увеличило содержание поликремниевых кислот в протопласте листьев кукурузы с 125 мг/кг Si в контроле до 250 и 190 мг/кг Si, соответственно для диатомита и

монокремниевой кислоты. В процессе вегетации эти величины достигли 467 и 404 мг/кг Si.

При совместном внесении кремния и NPK содержание поликремниевых кислот в листьях кукурузы значительно снизилось по сравнению с вариантами, куда вносили только кремний-содержащие препараты. Это можно объяснить как эффектом «ростового разбавления” в результате увеличения биомассы растений, так и активацией почвенных микроорганизмов, являющихся конкурентами с растениями за поглощение доступного кремния (Epstein, 1994).

Таблица 9.

Динамика наземной биомассы кукурузы (в г.), содержания монокремниевой и поликремниевой кислот в протопласте листьев (мг/кг Si)

Вариант опыта	**Срок вегетации, месяцы**											
	1			**2**			**3**			**4**		
	I	**II**	**III**	**I**	**II**	**III**	**I**	**II**	**III**	**I**	**II**	**III**
Контроль	28,4	84	125	69,3	88	138	110,2	95	159	112,4	92	185
NPK (аммофоска)	50,3	74	108	97,3	77	123	145,2	79	139	158,7	83	167
Диатомит	45,8	128	250	88,4	167	315	138,7	189	345	145,6	192	467
Моно-Si к-та	42,4	153	190	83,2	178	256	122,4	182	318	125,6	190	404
NPK + диатомит	60,7	126	280	103,5	158	342	155,8	195	398	166,8	211	489
NPK+моно-Si к-та	60,2	158	218	100,2	174	278	148,9	197	402	159,3	209	456
$НСР_{05}$	4,5	7	7	8,3	7	7	10,2	8	8	10,3	8	8

Примечание:

I – наземная биомасса кукурузы, г

II – содержание монокремниевой кислоты в протопласте листьев кукурузы, мг/кг Si

III – содержание поликремниевых кислот в протопласте листьев кукурузы, мг/кг Si

3.5. Влияние активных форм кремния на начальные стадии развития сельскохозяйственных растений.

С целью изучения возможности прямого влияния активных форм кремния на ряд физиологических параметров растений в начальной стадии их развития было исследовано прорастание семян в нормальных условиях, при внесении традиционных удобрений (0,1% раствор аммофоски) и в присутствии соли (1% раствор NaCl) как стрессового фактора. Результаты (табл. 10) показали, что как твердые (диатомит), так и жидкие формы активного кремния (монокремниевая кислота, концентрация 50 мг/л Si) в отсутствие NPK существенно повысили процент проросших семян. Наибольший эффект был получен при совместном использовании жидкой и твердой форм кремния. Наличие соли в растворе резко снижало всхожесть семян в контроле – на 30-70%. Присутствие активных форм кремния способствовало повышению устойчивости к токсическому действию соли всех изученных сортов культурных растений. Наибольший эффект был получен для семян риса.

Азот, фосфор и калий в отсутствие кремния несущественно повышали процент проросших семян по сравнению с контролем. При совместном использовании традиционных макроэлементов и активных форм кремния всхожесть семян была заметно выше, чем при введении в раствор только кремния. При введении в питательный раствор

соли произошла гибель ростков томатов на 29%, сладкой кукурузы на 37,5%, арбузов на 44,7%, риса на 49,7%, сладкого перца на 55,4%, огурцов на 68% и цветной капусты на 68,1%. Внесение азота, фосфора и калия на фоне солевой токсикации приводило к существенному снижению процента проросших семян, т. е. наблюдалось усиление токсического воздействия соли. Этот эффект наблюдали и другие исследователи (Munns, 2011).

Таблица 10.

Влияние активных форм кремния на прорастание семян сельскохозяйственных культур при различных системах питания и в условии солевого стресса

Растение	**Контроль**	**NPK**	**Монокремниевая кислота,**		**Диатомит**		**Диатомит + монокремниевая кислота,**	
			без NPK	**с NPK**	**без NPK**	**с NPK**	**без NPK**	**с NPK**
	----------% проросших семян----------							
Рис-вода	90,3	92,1	97,4	98,3	97,8	98,5	97,8	98,9
Рис-стерресс	50,3	40,4	67,4	64,5	76,2	70,2	82,4	72,0
Цветная капуста-вода	91,9	92,3	92,4	93,4	93,6	96,6	96,9	98,9
Цветная капуста-стресс	31,9	25,6	52,2	50,2	65,2	58,7	66,2	61,2
Томаты-вода	91,9	91,0	92,4	95,4	93,6	98,6	96,9	98,9
Томаты-стресс	71,9	55,4	78,8	72,3	82,4	74,1	81,4	76,1
Арбуз-вода	88,1	90,4	92,4	89,9	90,5	90,9	94,6	95,2
Арбуз-стресс	55,3	40,1	64,5	60,2	70,2	60,7	74,2	71,0
Сладкий перец-вода	91,9	92,4	86,8	94,9	96,4	98,4	98,2	99,4
Сладкий перец-стресс	44,6	40,2	56,7	50,3	66,8	63,4	76,5	75,0
Огурцы-вода	90,4	91,2	96,3	93,5	92,1	95,1	93,9	65,3
Огурцы-стресс	32,4	30,8	48,3	45,8	62,6	50,6	97,2	60,0
Сладкая кукуруза-вода	92,4	93,3	90,4	96,7	97,2	98,1	98,23	98,8
Сладкая кукуруза-стресс	62,5	50,3	75,7	68,7	78,8	70,1	79,3	74,5
$НСР_{05}$-вода	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$НСР_{05}$-стресс	0,7	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

Введение в систему активных форм кремния повышало солеустойчивость семян на стадии прорастания. Наибольший эффект наблюдался при совместном использовании диатомита и раствора монокремниевой кислоты. Наиболее заметно индукция прорастания семян под действием кремния проявлялась при обработке риса, сладкого перца и кукурузы.

Определение биомассы корешков и колеоптилей на 7-й день эксперимента показало, что в присутствии активных форм кремния биомасса корешков и колеоптилей существенно возрастала. Наибольший эффект был получен для риса - растения, характеризующегося высоким накоплением кремния. Для других растений

закономерность усиления действия с увеличением поглощения кремния не выявлена. При сравнении действия жидкой и твердой форм активного кремния было показано, что диатомит несколько более эффективен, чем монокремниевая кислота. Вероятно, это связано с тем, что растворение диатомита происходит постепенно с нарастающей концентрацией, тогда как концентрация монокремниевой кислоты в растворе снижается по мере поглощения ее растениями. Совместное применение жидкой и твердой форм активного кремния было наиболее эффективным.

Присутствие питательных элементов (азота, фосфора и калия) в системе фактически не влияло на биомассу недельных колеоптилей и корешков. Добавление активных форм кремния резко повышало биомассу растений. Сравнение этих данных с результатами экспериментов без внесения базовых питательных элементов показало, что в присутствии азота, фосфора и калия положительное действие активных форм кремния было более заметным и усиливалось в ряду: монокремниевая кислота <диатомит <диатомит + монокремниевая кислота.

3.6.Влияние активных форм кремния на устойчивость ДНК зерен ячменя

Ухудшение экологической обстановки, выраженное в повышении концентрации тяжелых металлов и органических загрязняющих веществ в почве, деградация почвенного покрова, глобальные изменения климата ведут к снижению устойчивости сельскохозяйственных растений к неблагоприятным условиям роста на генетическом уровне. В середине 70-х годов прошлого столетия было высказано предположение о способности кремния повышать устойчивость многих органических молекул растений, включая ДНК (Воронков и др., 1978). В последние годы было экспериментально показано, что кремний воздействует на устойчивость растений к абиогенным и биогенным стрессам на уровне генетического аппарата (Belanger, 2008; Gong et al., 2008; Ma, 2004). Однако прямых доказательств повышения устойчивости растений на уровне ДНК или РНК до сих пор не было получено.

С целью изучения возможности повышения устойчивости ДНК растений при оптимизации кремниевого питания в условиях вегетационного опыта выращивали ячмень до полного созревания зерна при разных уровнях кремниевого питания: в почву вносили аморфный диоксид кремния марки А-300 в дозах 0,03; 0,05; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 и 1 г/кг почвы.

Исследование энергетики прорастания семян ячменя показало, что при увеличении дозы кремниевого удобрения от 0,03 г/кг до 0,7 г/кг наблюдалась устойчивая тенденция к увеличению длины корешков и колеоптилей, соответственно с 32,8 см и 50, 4 см в контроле до 41,5 см и 58,6 см в варианте с аморфным кремнеземом в дозе 0,7 г/кг. Внесение кремнезема в дозе 1 г/кг почвы обеспечивало стабилизацию процесса вегетации ячменя без ингибирующего влияния на продуктивность.

Цитофотометрический анализ позволяет оценить скорость деления клеток корешка путем определения количества клеток, содержащих альдегидные группировки дезоксипентозы ДНК и построения на основе полученных данных гистограмм. Анализ гистограмм дает информацию о степени жизнеспособности растений. При внесении аморфного кремнезема было выявлено уменьшение G_1 периода, что соответствует увеличению средних значений концентрации ДНК. При дозе 0,05 г/кг аморфного кремнезема среднее относительное содержание ДНК составило 81,3±0,5 по сравнению с

72,3±0,4 в контроле. При дозе 0,05 г/кг относительное среднее содержание было 94,5±0,6 и при дозе 0,7 г/кг 110,0±0,5. При других дозах наблюдалось некоторое увеличение пресинтетического периода и уменьшение относительного содержания ДНК до величин 111,2±0,8; 119,0±0,6; 120,3±0,7 и 124,1±0,3 при дозах аморфного кремнезема 0,1, 0,3, 0,5 и 0,7 г/кг, соответственно, по сравнению с 102,1±0,5 в контроле. Наибольшее уменьшение содержания ДНК наблюдалось при дозе 0,7 г/га SiO_2.

На основе полученных данных гистограмм цитофотометрического анализа и содержания различных форм кремния в почве были вычислены коэффициенты корреляции. Расчеты позволили установить наличие четкой обратной зависимости между содержанием активного кремния в почве и величиной G_1 периода. Коэффициент корреляции составил R= -0,93. Коэффициент корреляции между содержанием монокремниевой кислоты и величиной G_1 периода также характеризовался высоким отрицательным значением (R= -0,88).

Полученные данные свидетельствуют о том, что при дозах SiO_2 0,05; 0,5 и 0,7 г/кг, которые, как было установлено, обеспечивали более высокие по сравнению с другими дозами концентрации монокремниевой кислоты в почве и, следовательно, лучшее кремниевое питание ячменя, происходит стабилизация структуры молекул ДНК. Таким образом, внесение активного кремния в почву повышает жизнеспособность растений на уровне генома и усиливает природную устойчивость растений к физиологическим стрессам.

3.7. Исследование механизма повышения солеустойчивости ячменя при оптимизации кремниевого питания

Было изучено влияние монокремниевой кислоты на транспорт натрия в апопласте и аккумуляцию Si и Na в симпласте различных тканей растений ячменя. Ячмень (солеустойчивый сорт California Mariout) выращивали в вегетационных сосудах с серой лесной почвой (по 1 кг/сосуд). Срок вегетации - 3 недели при температуре 24-26°C, световом периоде 12 часов и оптимальном увлажнении. Затем растения были осторожно извлечены из почвы вместе с корнями, промыты в дистиллированной воде и помещены в следующие растворы: дистиллированную воду, раствор монокремниевой кислоты (150±3 мг/л Si), раствор хлорида натрия (12000±10 мг/л Na), смесь растворов хлорида натрия (12000±10 мг/л Na) и монокремниевой кислоты (150±3 мг/л Si). Образцы листьев, корней и стеблей растений отбирали через 0, 24, 48 и 96 часов пребывания в растворах. Отбор проводили в трехкратной повторности.

В образцах определяли динамику содержания натрия и растворимых соединений кремния в апопласте и симпласте, а также общее содержание Si и Na.

Установлено, что присутствие монокремниевой кислоты снижало общее поступление натрия из раствора (табл. 11). Уменьшение общего содержания кремния в листьях растений и одновременное его повышение в корнях и стеблях в варианте с раствором соли свидетельствуют о наличии у растений механизма аккумуляции активных форм кремния в листьях и возможности их быстрой транспортировки в ткани растений подверженные стрессу.

Таблица 11.

Общее содержание кремния и натрия в тканях ячменя до и после эксперимента, %, срок вегетации 21 день

Варианты опыта	**До эксперимента**		**После эксперимента**	
	Si	**Na**	**Si**	**Na**
Корни				
Вода	0,89±0,05	0,38±0,04	0,93±0,08	0,32±0,05
Моно Si к-та			1,31±0,11	0,36±0,07
NaCl			1,59±0,12	1,11±0,06
NaCl+ моно Si к-та			2,11±0,13	1,23±0,05
Стебли				
Вода	0,49±0,09	0,29±0,05	0,43±,09	0,29±0,07
Моно Si к-та			0,89±0,10	0,34±0,06
NaCl			0,57±0,11	1,92±0,09
NaCl+ моно Si к-та			0,92±0,08	0,85±0,09
Листья				
Вода	0,72±0,09	0,52±0,06	0,68±,09	0,51±0,06
Моно Si к-та			1,35±0,11	0,64±0,05
NaCl			0,53±0,08	1,05±0,04
NaCl+ моно Si к-та			0,78±0,9	0,85±0,05

Наибольшее увеличение содержания натрия в апопласте корней было установлено в растениях, находившихся в солевом растворе (рис. 6а). Присутствие в растворе монокремниевой кислоты резко снижало поступление натрия в апопласт, особенно в течение первых 20-24 часов. В итоге концентрации натрия в апопласте корней растений были в 2 раза ниже, чем в растениях, стоявших в солевом растворе без кремния. Однако со временем барьер, созданный за счет присутствия кремниевой кислоты, ослабел и содержание натрия в апопласте растений, находившихся в смеси монокремниевой кислоты и хлорида натрия, заметно увеличилось. В апопласте стеблей ингибирующее влияние монокремниевой кислоты на поступление натрия было более заметным, а в апопласте листьев оно значимо усиливалось (рис. 6б и 6в).

Следует отметить, что динамика содержания натрия в симпласте корней представляла собой более сложную картину (рис. 6г, 6д и 6е). Обращает на себя внимание тот факт, что присутствие высокой концентрации натрия в растворе не привело к значительному изменению его концентрации в симпласте корней (рис. 6г). В то же время в варианте с монокремниевой кислотой, содержащей некоторое количество натрия (70 мг/л Na), содержание натрия в симпласте корневых клеток ячменя резко возрастало.

Содержание натрия в симпласте стеблей увеличивалось при помещении ячменя в раствор соли, а также в раствор монокремниевой кислоты. Однако наибольшее увеличение Na в стеблях было установлено в варианте при совместном внесении натрия и кремния. В симпласте листьев в растворе монокремниевой кислоты наблюдалось снижение содержания натрия по сравнению с контролем (рис. 6е). В растениях, находившихся в растворе соли, наблюдалось резкое повышение содержания натрия в первые часы эксперимента, однако, затем наблюдали снижение его содержания в расчете на сухую массу, что было вызвано обезвоживанием клеток и их гибелью. В варианте с совместным внесением натрия и кремния содержание натрия достигало предельного

значения в течение первых 40 часов опыта и затем сохранялось на одном уровне до окончания эксперимента.

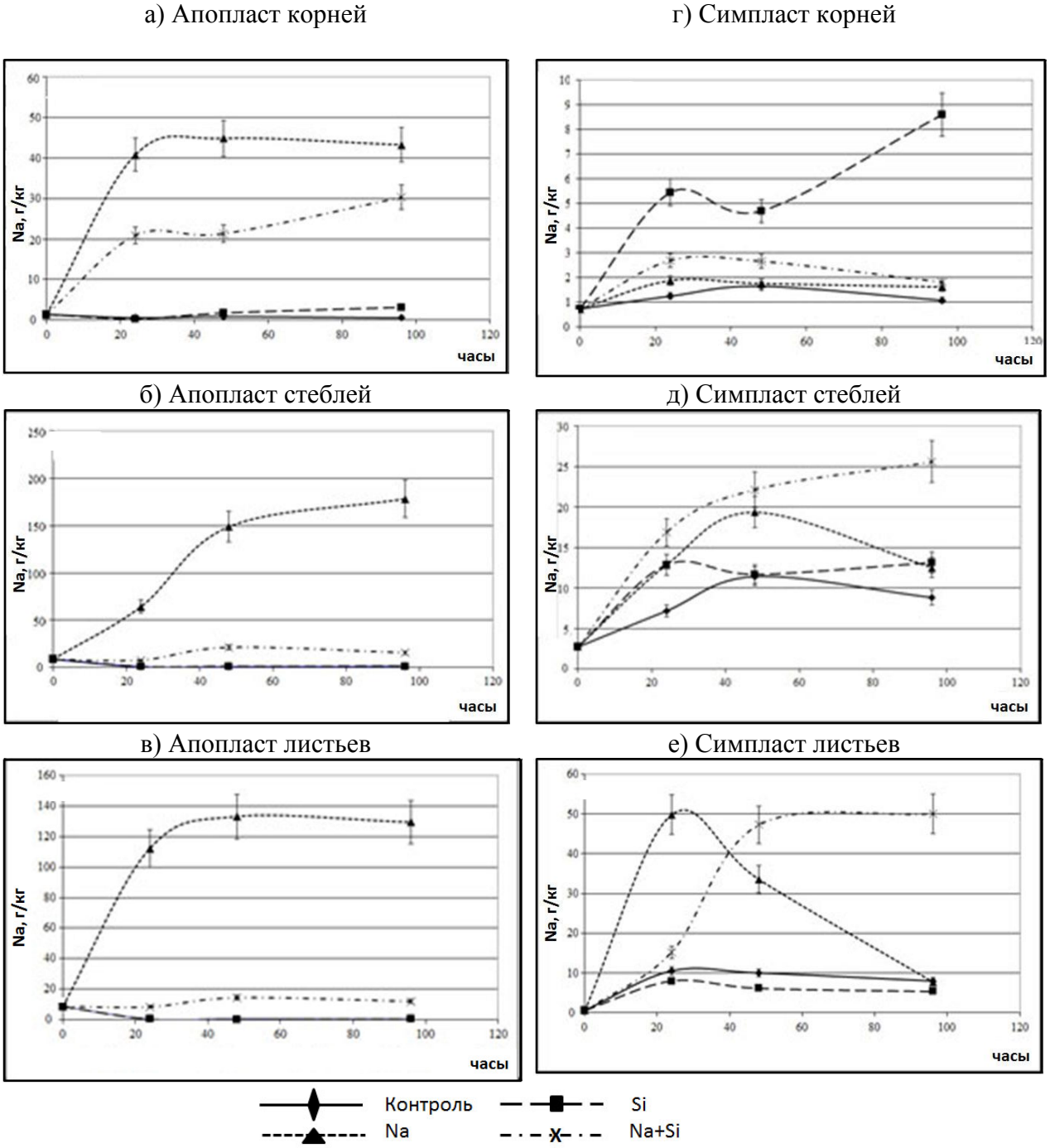

Рис. 6. Динамика содержания Na в тканях ячменя по срокам измерения: 0, 24, 48, 96 часов

Помимо динамики натрия в тканях растений было изучено изменение содержания монокремниевой кислоты (рис. 7). Во всех органах растений, находившихся в дистиллированной воде, отмечалось снижение концентрации монокремниевой кислоты в апопласте. В то же время в растениях, находившихся в растворе монокремниевой кислоты, было отмечено повышение ее концентрации в стеблях, более интенсивное и статистически значимое увеличение концентрации монокремниевой кислоты в корнях и еще более резкое нарастание в листьях. В варианте с раствором соли в корнях было отмечено снижение концентрации монокремниевой кислоты, аналогичное, как в варианте

с дистиллированной водой. В то же время в апопласте стеблей наблюдалось увеличение количества монокремниевой кислоты даже по сравнению с вариантом раствора монокремниевой кислоты. Для апопласта листьев было характерно увеличение содержания монокремниевой кислоты только в течение первых 24 часов. Затем во всех вариантах опыта наблюдалось снижение содержания до минимальных значений.

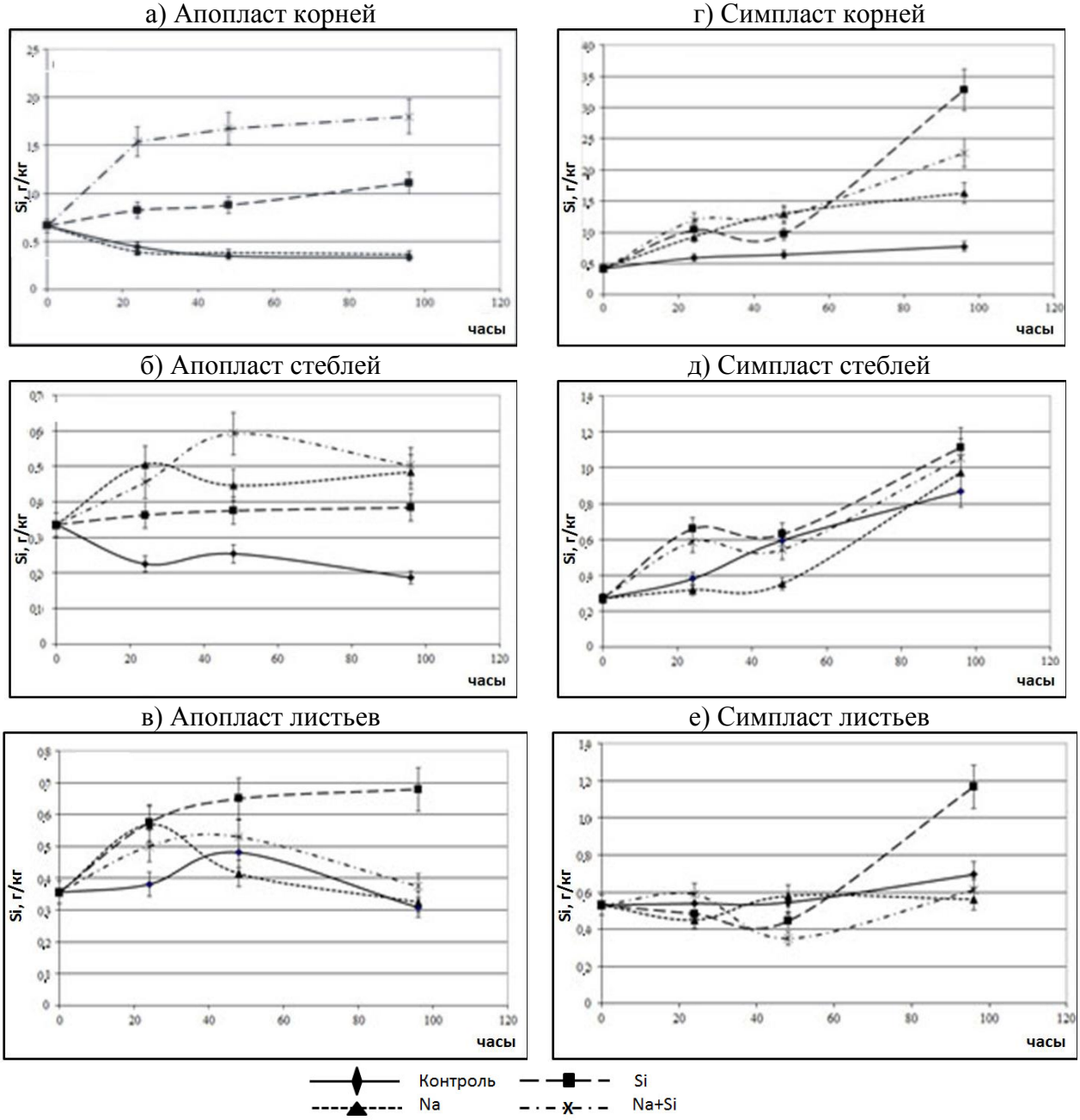

Рисунок 7. Динамика содержания монокремниевой кислоты в тканях ячменя по срокам измерения: 0, 24, 48, 96 часов.

В симпласте динамика содержания монокремниевой кислоты была совершенно иной (рис. 7г,7д и 7е). В растениях, помещенных в дистиллированную воду, наблюдалось увеличение монокремниевой кислоты в симпласте корней и стеблей, тогда как в листьях ее увеличение отмечалось только в конце эксперимента, то есть на 4-ые сутки пребывания в растворе указанной концентрации. В растениях, находившихся в растворе монокремниевой кислоты, по сравнению с другими вариантами было отмечено

наибольшее увеличение ее концентрации в симпласте корней, стеблей и листьев ячменя. В присутствии солей натрия содержание монокремниевой кислоты значительно снижалось в симпласте стеблей и листьев и увеличивалось в корнях.

При незначительном увеличении содержания натрия в растворе наблюдалось его накопление в симпласте корней. Однако при токсической концентрации натрия в растворе, несмотря на резкое повышение его концентрации в апопласте, поступление дополнительного натрия в клетки симпласта практически прекращалось. Таким образом, мембраны симпласта корней обладают специфическим механизмом, позволяющим регулировать поступление натрия. Причем, проницаемость натрия через мембраны зависит как от его концентрации в апопласте, так и от содержания в нем растворимых форм кремния. Необходимо также подчеркнуть, что мембраны клеток симпласта листьев лишены такого контрольно-блокирующего механизма - повышение концентрации натрия в апопласте тут же приводило к резкому повышению содержания этого элемента в симпласте листьев.

Промежуточным механизмом контроля поступления натрия между корнями и листьями, по-видимому, обладают клетки симпласта стеблей, но у них механизм блокировки транспорта натрия при его высоких концентрациях проявляется слабее по сравнению с клетками корней ячменя. Следовательно, защитный механизм блокировки поступления катионов натрия постепенно снижается в ряду: корень-стебель-лист. Можно предположить, что защита растений от солей натрия растворимыми соединениями кремния в первую очередь связана с возможностью предотвращения поступления Na в симпласт листьев. При этом могут функционировать два основных механизма: задержка движения натрия по апопласту и предотвращение проникновения натрия из апопласта в симпласт. Увеличение общего содержания кремния в корнях с одновременным снижением его количества в листьях и стеблях в варианте с дистиллированной водой может быть связано не столько с его вымыванием во внешний раствор, сколько с активным транспортом кремния в подверженные гипоксии корни.

Проведённые исследования позволили впервые показать, что основным механизмом повышения солеустойчивости растений активными формами кремния является снижение интенсивности транспорта натрия по апопласту. Причем эта способность усиливается в ряду: корень<стебель<лист. Вероятно, это обусловлено блокировкой миграции натрия, связанного с монокремниевой кислотой, через транспортные ворота.

3.8. Влияние кремниевых удобрений на культуру ятрофу (*Jatropha L.*).

Основные исследования по влиянию кремниевых удобрений на солеустойчивость растений проводили на однолетних растениях, поэтому было важно изучить возможность повышения солеустойчивости древесных культур. Для исследований была выбрана древесная культура ятрофа (*Jatropha*). Исследования проводили в лабораторных и полевых условиях.

В вегетационных лабораторных экспериментах семена ятрофы выращивали в пластиковых сосудах, наполненных 1 кг промытого песка или серой лесной почвы. Монокремниевая кислота (концентрация 100 мг/л Si) и диатомит были взяты в качестве источников активного кремния. Диатомит (доза 1г/кг) вносили при высадке семян ятрофы, а монокремниевую кислоту - во время полива (100 мл) раз в 2 недели. Для симуляции

солевой токсичности в сосуды добавляли раствор хлорид натрия в дозах 0,5 и 1% по Na и объеме 100 мл раз в 2 недели. Повторность опыта была 4-х кратной. Через 2 месяца роста растений измеряли наземную и подземную биомассу, а также концентрацию кремния в растительных тканях.

Улучшение кремниевого питания ятрофы обеспечило существенное увеличение биомассы подземной и наземной частей (рис. 8 - 11). В течение двух первых месяцев вегетации масса корней ятрофы нарастала в 3 раза быстрее, чем наземная биомасса как на песке, так и на серой лесной почве. Добавление соли в систему приводило к резкому снижению биомассы ятрофы. При внесении активных форм кремния солеустойчивость ятрофы заметно возрастала. Было также установлено, что в условиях солевой токсикации поглощение кремния растением увеличивалось (табл. 12).

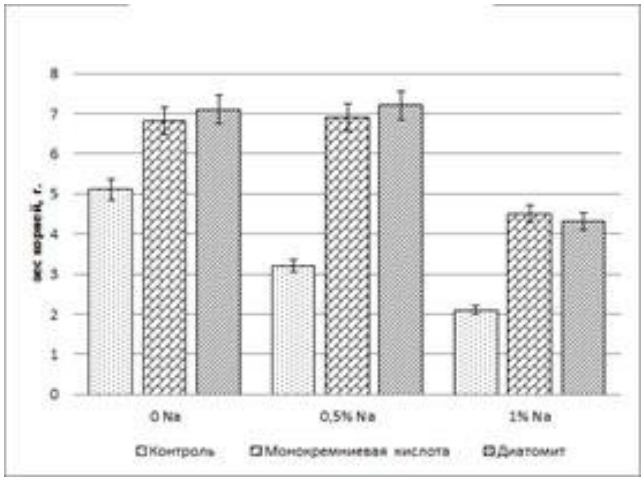

Рис. 8. Влияние кремний-содержащих препаратов на вес корней ятрофы (песок).

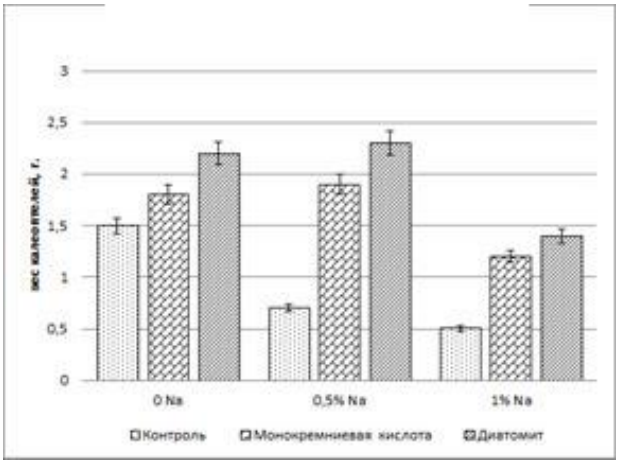

Рис. 9. Влияние кремний-содержащих препаратов на вес наземной биомассы ятрофы, (песок).

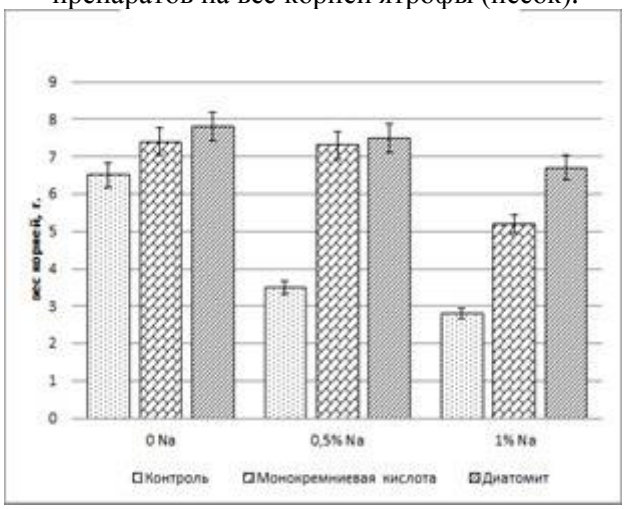

Рис. 10. Влияние кремний-содержащих препаратов на вес корней ятрофы (серая лесная почва).

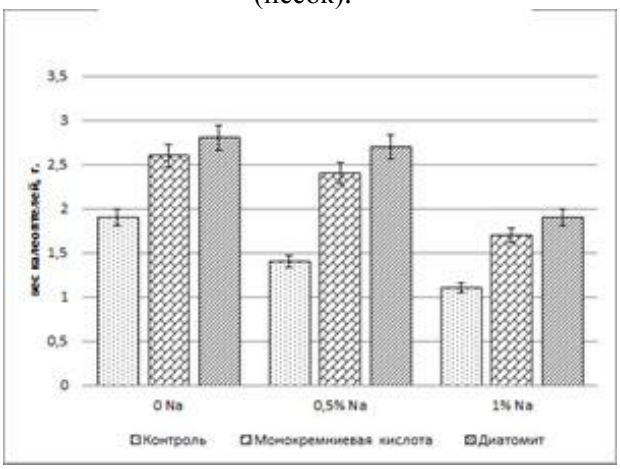

Рис. 11. Влияние кремний-содержащих препаратов на вес наземной биомассы ятрофы, (серая лесная почва).

Полевые исследования были проведены на территории плантации, расположенной в республике Гана (Западная Африка) в (50 км на север от г. Ломе. Почва плантации была определена как тропическая железистая почва легкого гранулометрического состава. На экспериментальном поле были выделены 24 участка площадью по 4 м^2, на которые были высажены 1-месячные саженцы ятрофы (по 4 саженца/участок). Были заложены

следующие варианты: контроль, 0,5% Na, 1% Na, диатомит (10 г/м^2), диатомит + 0,5% Na, диатомит +1% Na. Соль вносили в виде растворов хлорида натрия во время еженедельных поливов из расчета 8 литров раствора на 1 м^2 с концентрацией по натрию 0,5 и 1%. Через 1,2, 4 и 8 месяцев измеряли высоту ятрофы.

Внесение кремниевых удобрений не только ускорило рост, но и снизило негативное воздействие соли на рост и развитие ятрофы (рис. 12). Таким образом, на примере ятрофы впервые было показано, что активные формы кремния могут повышать устойчивость древесных культур к солевому стрессу. Полученные данные позволяют предположить, что в ятрофе, возможно, действует механизм снижения солевой токсикации аналогичный, описанному ранее.

Таблица 12.

Содержание общего кремния в корнях и листьях ятрофы при различных уровнях солевой токсикации (% Si в сухой массе)

Вариант опыта	**Концентрация Na при симуляции солевого стресса**					
	0%		**0,5%**		**1%**	
	Корни	**Листья**	**Корни**	**Листья**	**Корни**	**Листья**
Промытый песок						
Контроль	1,2	0,4	1,2	0,5	1,2	0,5
Монокремниевая кислота	2,4	1,3	2,7	1,7	2,9	1,9
Диатомит	2,8	1,7	3,4	2,1	3,5	2,2
Серая лесная почва						
Контроль	3,8	1,8	4,1	2,3	4,3	2,4
Монокремниевая кислота	4,5	2,0	4,9	2,2	5,1	2,2
Диатомит	4,8	2,1	5,1	2,4	5,2	2,7
$НСР_{05}$	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3

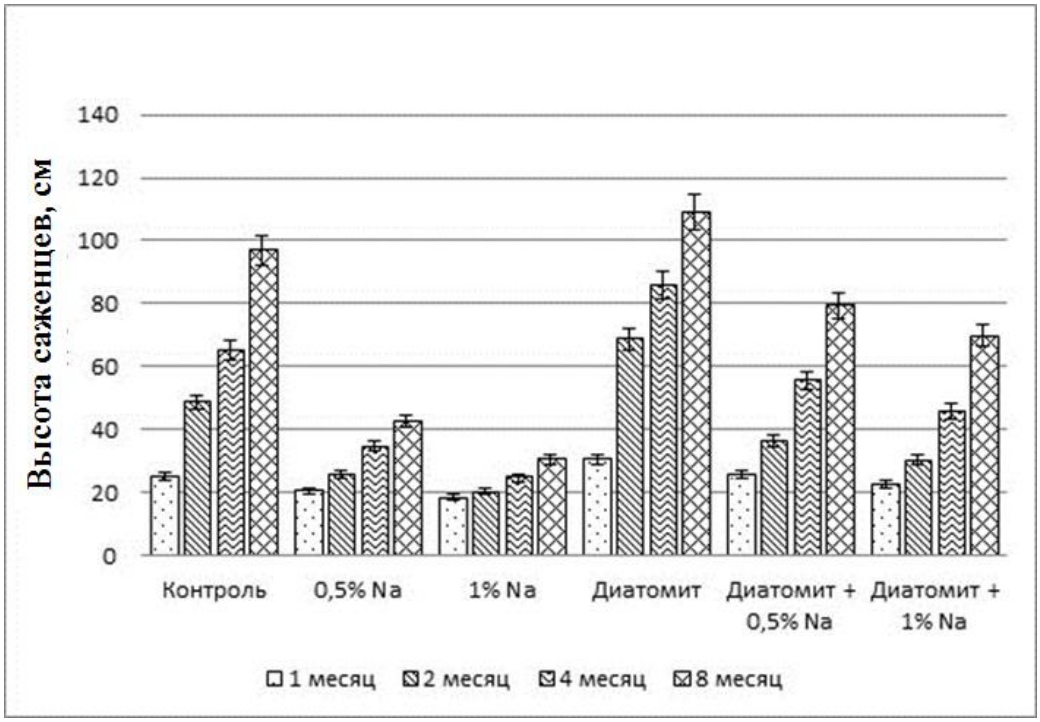

Рис. 12. Влияние солевого стресса и кремниевого питания на развитие саженцев ятрофы на разных сроках вегетации.

4. ВЫВОДЫ

1. Кремний является структурообразующим почвенным макроэлементом, недостаток его биогеохимически активных форм в агроэкосистеме обязательно приводит к снижению почвенного плодородия. Этот эффект выявлен для различных почв, но наиболее выражен на засоленных почвах, а также почвах легкого гранулометрического состава. Применение кремнийсодержащих удобрений повышает продуктивность и стрессоустойчивость с/х культур.

2. Определены основные механизмы влияния форм кремния на трансформацию труднорастворимых фосфатов в почве: повышение концентрации монокремниевой кислоты в почвенном растворе приводит к реакции замещения фосфат-аниона на силикат-анион при pH больше 2 для фосфатов кальция и при pH больше 4 для фосфатов магния. Внесение кремниевых удобрений изменяет адсорбционно-десорбционные свойства дерново-подзолистой песчаной почвы и снижает вымывание фосфора из пахотного слоя.

3. Обработка природных фосфоритов концентрированным раствором монокремниевой кислоты вытесняет фосфат-анион из фосфорита, обогащает почвенный раствор подвижным фосфором с одновременным снижением подвижных форм тяжелых металлов: свинца, кадмия, ртути. Эффективность модифицированного фосфорита в пересчете на наземную биомассу (38-49%) была сопоставима с эффективностью суперфосфата (44-56%) на дерново-подзолистой песчаной почве в опыте с кормовой травой (*Paspalum notatum*).

4. Изучение фракционного состава фосфора в черноземе карбонатном аллювиальном тяжелосуглинистом целинном и с-х. показало, что при повышении концентрации монокремниевой кислоты в почве происходит перераспределение фосфатов по фракциям: содержание прочносвязанного фосфора уменьшается, а доля растворимых форм фосфора увеличивается в 1,5 раза. При этом суммарное содержание фосфора в почве остается постоянным.

5. Совместное применение кремниевых и азотных удобрений позволило повысить продуктивность цветной капусты, томатов и биомассу кукурузы на 35-70% по отношению к контролю, а также снизить содержание нитратов в плодах томатов на 25-30%. Исследование диатомита и монокремниевой кислоты при совместном и раздельном внесении с аммиачной селитрой в опытах с томатами и рассадной культурой: белокочанной и цветной капустой показало увеличение продуктивности (для томатов 70%, для белокочанной капусты 61%, для цветной капусты 226%) при проведении пикировки по сравнению с вариантами опыта без внесения кремниевых удобрений. Сравнительный анализ биомассы рассады с пикировкой и без пикировки показал устойчивое позитивное воздействие кремниевых удобрений при всех режимах минерального питания, что позволяет рассматривать кремний как надежный антидепрессант.

6. В условиях солевого стресса введение в систему питания активных форм кремния (жидких и твердых) повышает солеустойчивость культур. Включение кремния в состав питательных смесей положительно влияет на растения на ранней стадии их развития. Этот эффект носит универсальный характер поскольку прослеживался на с-х культурах из разных ботанических семейств с различными физиолого-биохимическими особенностями роста и развития: рис, цветная капуста, томаты, кукуруза, сладкий перец, арбузы, огурцы и др. Впервые в условиях вегетационного опыта на песке и серой лесной почве, а также в полевых опытах на тропической железистой почве (Республика Гана, западная Африка) показано, что активные формы кремния: монокремниевая кислота и диатомит повышают устойчивость древесных культур на примере ятрофы (*Jatropha L.)* к солевому стрессу.

7. Снижение солевой токсикации растений активными формами кремния объясняется уменьшением интенсивности транспорта натрия по апопласту растений. Эта способность усиливается в ряду: корень-стебель-лист. Введение активных форм кремния в экосистему приводит к блокировке натрия в корнях растений и препятствует его транспорту по растению. Клеточные стенки корней ячменя препятствуют поступлению натрия из апопласта в симпласт, однако, клеточные стенки стеблей и листьев такой способностью не обладают.

8. Активные формы кремния при внесении в почву повышают жизнеспособность растений на уровне ДНК и усиливает устойчивость к физиологическим стрессам. Цитофотометрический анализ выявил увеличение скорости деления клеток корней ячменя *(Hordeum vulgare)*, исследование энергетики прорастания семян показало увеличение длины корней и колеоптилей.

9. Проведенные лабораторные, вегетационные и полевые исследования позволили изучить ряд механизмов взаимовлияния кремниевых удобрений с фосфорными и азотными удобрениями и установить их положительное действие на рост и развитие ряда сельскохозяйственных растений. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования кремниевых удобрений совместно с традиционными минеральными удобрениями, что позволяет не только повысить урожайность сельскохозяйственных культур, но и улучшить качество получаемой продукции.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бочарникова Е.А., Матыченков В.В., Матыченков И.В. Кремниевые удобрения и мелиоранты: история изучения, теория и практика применения // Агрохимия. 2011. № 7. С. 84-96.
2. Бочарникова Е. А., Матыченков И. В. Активный кремний и повышение засухоустойчивости растений // Материалы международной конференции «Биология – наука XXI века», май 2012, РЭУ им. Г. В. Плеханова, М. 130-131 стр.
3. Матыченков В. В., Матыченков И. В., Активный кремний и повышение засухоустойчивости растений // Материалы международной конференции «Биология – наука XXI века», май 2012, М., 564-565 стр.
4. Матыченков И.В., Пахненко Е.П. Изменение содержания подвижных фосфатов почвы при внесении активных форм кремния // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2013. №6. С.24-28.
5. Матыченков И.В. - Влияние активных форм кремния на уровень плодородия почв // Материалы XIX международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов», М., 2012; 173-174 стр.
6. Матыченков И.В. - Повышение засухоустойчивости сельскохозяйственных растений // Материалы XX международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов», М., 2013; 251-252 стр.
7. Пахненко Е.П., Бочарникова Е.А., Матыченков В.В., Матыченков И.В., Влияние кремниевых препаратов на засухоустойчивость ячменя // Электронный научно-производственный журнал «АгроЭкоИнфо» №2 (13) 2013.
8. Matychenkov I. V., Pahnenko E. P., Bocharnikova E. A., Matychenkov V. V. Detoxification of Heavy metals in industrial and municipal wastes by activated Si, China, 5-th conference Si in agriculture, 2011. – с. 123.