

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И**  
**БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ПОЧВОВЕДЕНИЯ РАН**

*На правах рукописи*

**ЛЕБЕДЕВА Татьяна Николаевна**

**ЭКОЛОГО-АГРОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ**  
**МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ КАРТОФЕЛЯ**  
**НА СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЕ**

Специальность 06.01.04 – агрохимия

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата биологических наук

Научный руководитель:  
доктор биологических наук  
**Семенов В.М.**

**Пушино 2015**

<b>СОДЕРЖАНИЕ</b>	Стр.
<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	5
<b>ГЛАВА 1. ПОЧВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЗИОЛОГО-АГРОХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ КАРТОФЕЛЯ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)</b>	11
1.1. Производство картофеля в России и в мире	11
1.2. Основные требования картофеля к почвенному плодородию и гидротермическим условиям, пути их оптимизации	13
1.3. Особенности потребления картофелем макроэлементов в онтогенезе	21
1.3.1. Азот	21
1.3.2. Фосфор	23
1.3.3. Калий	25
1.3.4. Сера	27
1.3.5. Влияние макроэлементов (N, P, K и S) на урожай и качество клубней картофеля	32
1.3.6. Почвенно-растительная диагностика обеспеченности картофеля макроэлементами	36
1.4. Значение микроэлементов (Zn, Mo и Se) для роста, развития и продукционного процесса картофеля и других растений	40
1.4.1. Физиологическая роль и особенности потребления микроэлементов растениями в течение вегетации	41
1.4.2. Влияние цинка, молибдена и селена на урожай и качество сельскохозяйственных культур	48
1.4.3. Почвенно-растительная диагностика питания растений цинком, молибденом и селеном	53
1.5. Заключение	59

<b>ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ</b>	62
2.1. Объекты исследований	62
2.1.1. Климат на территории Тульской области и гидротермические условия 2010-2012 гг.	62
2.1.2. Морфогенетическая характеристика серых лесных почв района исследований	66
2.1.3. Условия проведения опытов	68
2.1.3.1. Полевые опыты: схемы, сроки проведения и порядок отбора проб растений и почвы	68
2.1.3.2. Вегетационные опыты: схемы, сроки проведения и порядок отбора проб растений и почвы	70
2.2. Методы исследований	71
2.2.1. Определение агрохимических свойств почвы	71
2.2.2. Определение химического состава растений	72
2.2.3. Статистическая обработка результатов исследований	72
<b>ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ</b>	73
3.1. Влияние минеральных удобрений на содержание в почве доступных форм азота, фосфора, калия и их потребление картофелем	73
3.1.1. Азот	73
3.1.2. Фосфор	83
3.1.3. Калий	89
3.1.4. Влияние макроэлементов (азота, фосфора и калия) на урожай и качество клубней картофеля	96
3.1.5. Заключение	100
3.2. Влияние гидротермических условий вегетационного периода на эффективность минеральных удобрений, применяемых под картофель	102
3.2.1. Эффективность потребления азота, фосфора и калия удобрений	103

3.2.2. Агрономическая эффективность удобрений	108
3.2.3. Физиологическая эффективность удобрений	111
3.2.4. Заключение	113
3.3. Динамика содержания серы в почве, серное питание картофеля и его отзывчивость на серосодержащие удобрения	115
3.3.1. Заключение	119
3.4. Значение минеральных удобрений в поддержании сбалансированного соотношения макроэлементов в питании картофеля	120
3.4.1. Заключение	125
3.5. Влияние микроудобрений на минеральное питание картофеля	126
3.5.1. Содержание цинка, молибдена и селена в клубнях	126
3.5.2. Роль микроэлементов в оптимизации потребления картофелем макроэлементов	129
3.5.3. Влияние микроэлементов (цинка, молибдена и селена) на урожай и качество клубней картофеля	131
3.5.4. Заключение	133
<b>ВЫВОДЫ</b>	135
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>	137

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность проблемы.** Создание в почвах питательного режима, позволяющего не только формировать высокие и устойчивые урожаи сельскохозяйственных культур, но и длительно сохранять и даже повышать естественное плодородие почв является одной из важнейших задач современного земледелия.

Серые лесные почвы активно используются в земледелии. Однако без систематического, научно обоснованного применения удобрений они быстро теряют свои ценные агрономические свойства [Никитишен, 2002; Никитишен, Курганова, 2007]. Характерное для пахотной серой лесной почвы низкое содержание подвижных соединений азота и фосфора, предопределяет сильное взаимодействие азотного и фосфорного удобрений в обеспечении сбалансированного питания и интенсификации продукционного процесса сельскохозяйственных культур [Никитишен, 2003; Никитишен, 2012]. Существует потребность в более детальном изучении вопроса серного питания растений, установлении критериев обеспеченности почвы доступной серой и целесообразности дополнительного внесения серных удобрений с целью наиболее полной реализации биологического потенциала сельскохозяйственных культур [Аристархов, 2007]. То же самое справедливо и в отношении микроэлементов, недостаток которых негативно отражается на физиолого-биохимических процессах в растениях, а избыток несет угрозу загрязнения растительной продукции. Поэтому исследование эффектов взаимодействия макро- и микроэлементов на основе анализа сбалансированности минерального питания растений и интенсивности круговорота веществ в агроэкосистемах остается приоритетным направлением агрохимии.

Картофель является одной из основных продовольственных культур, возделываемых в Нечерноземной зоне. Важность оптимизации минерального питания и продукционного процесса картофеля с помощью внесения удобрений подтверждается работами многих исследователей. [Терехова,

1980; Аристархов, 2000; Костюк, 2007; Махруленко, 2009 и др.]. Достаточно хорошо известны основные требования картофеля к уровню обеспеченности азотом, фосфором и калием, на базе которых разработаны основные принципы системы удобрения этой культуры [Бардышев, 1984; Карманов, 1988; Минеев, 2004; Шпаар и др., 2004]. Однако, не смотря на кажущуюся изученность вопроса многие аспекты динамики потребления растениями элементов минерального питания в онтогенезе и зависимости продукционного процесса картофеля от сбалансированности азотного, фосфорного и калийного питания остаются не ясными. Не определены оптимальные уровни сбалансированного потребления картофелем макро- и микроэлементов в течение вегетации в зависимости от естественного плодородия почвы и обеспеченности почвы питательными веществами.

Высокая эффективность удобрений может быть достигнута лишь при учете и оптимизации почвенно-экологических и физиолого-агрохимических факторов, определяющих поведение элементов питания в почве и способность вегетирующих растений потреблять и усваивать имеющиеся запасы питательных элементов [Кореньков, 1993; Минеев, 2000; Сычев и др., 2013; Кудеяров, Семенов, 2014]. Существенное влияние на эффективность минеральных удобрений оказывают факторы окружающей среды [Панников, Минеев, 1987; Романенков и др., 2009; Коршунов и др., 2011]. Экстремальные погодные условия все чаще и отчетливее лимитируют эффективность применяемых минеральных удобрений [Усков, 2008]. Нечерноземная зона характеризуется нестабильным гидротермическим режимом, в связи с чем возникает необходимость более тщательного изучения вопросов питания сельскохозяйственных культур в различных экологических условиях. Разработка систем удобрения растений, смягчающих воздействие стрессовых нагрузок на растения и повышающих адаптационный потенциал агроэкосистем, является важным и перспективным направлением агрохимии [Сычев и др., 2013; Кудеяров, Семенов, 2014].

**Цель исследований.** Изучение роли комплексного применения минеральных удобрений в регулировании и оптимизации потребления макро- и микроэлементов картофелем на серой лесной почве.

**Задачи исследований:**

1. Установить особенности питательного режима почвы и динамики потребления азота, фосфора и калия картофелем.
2. Определить агрономическую и физиологическую эффективность минеральных удобрений, применяемых под картофель при разных гидротермических условиях вегетационного периода.
3. Выявить роль минеральных удобрений в поддержании сбалансированного соотношения азота, фосфора и калия в питании картофеля.
4. Изучить характер потребления серы картофелем и определить отзывчивость растений на серосодержащие удобрения.
5. Оценить влияние микроудобрений на состояние минерального питания, продуктивность и качество урожая картофеля.

**Научная новизна.** Установлено, что основным лимитирующим элементом минерального питания картофеля на серой лесной почве является азот. Определена зависимость содержания в почве подвижных форм азота, фосфора и калия, динамики их потребления картофелем от метеорологических условий вегетационного периода, характеризующегося длительной засухой, периодическим недостатком влаги и оптимальным увлажнением. Обнаружено уменьшение доступности растениям соединений калия и фосфора в условиях экстремальной засухи, что является причиной резкого снижения их потребления картофелем. Выявлено уменьшение содержания в растениях азота и калия и расширение соотношения N:P в условиях резкого дефицита влаги. Получены соотношения N:S, характеризующие оптимальный уровень питания картофеля на серой лесной почве. Показано, что внесение микроудобрений цинка, молибдена и селена на серой лесной почве не оказывает существенного влияния на урожайность картофеля, но способствует оптимизации азотного питания. Для минерального питания картофеля свойственно наличие антагонизма между

серой и молибденом, и отсутствие такового между цинком и серой, цинком и селеном, серой и селеном. Установлено, что в зоне серых лесных почв погодные условия года являются более значимым фактором интенсификации минерального питания и урожайности картофеля, чем минеральные удобрения в умеренных дозах, но их применение смягчает последствия неблагоприятных факторов окружающей среды за счет сбалансирования макро- и микроэлементов в питании растений.

**Практическая значимость.** Результаты исследований позволяют уточнить общепринятую систему применения минеральных удобрений под картофель на серых лесных почвах в части внесения азотных удобрений и использования комплекса микроудобрений. Для получения урожая клубней картофеля на уровне 30 т/га рекомендуемая доза азотных удобрений должна составлять не менее 120 кг д.в./га, а фосфорных и калийных удобрений – по 90 кг д.в./га каждого, что обеспечивает сбалансированность питания картофеля макроэлементами. Получены величины агрономической (окупаемость прибавкой урожая клубней элементов питания внесенных с удобрениями) и физиологической (окупаемость прибавкой урожая клубней поглощенных растениями элементов питания) эффективности применения азота, фосфора и калия под картофель на серой лесной почве, которые могут считаться ориентировочными для хозяйств Тульской области. Разработанные в исследованиях принципы сбалансирования минерального питания картофеля макро- и микроэлементами используются во внутрихозяйственной технологии производства этой культуры и рекомендуются для распространения в зоне серых лесных почв. Агротехника возделывания картофеля в южной полосе Нечерноземной зоны должна предусматривать возможность орошения посевов в периоды проявления летних засух.

**Защищаемые положения.** Гидротермические условия – доминирующий фактор, определяющий состояние минерального питания картофеля, агрономическую и физиологическую эффективность минеральных удобрений, применяемых под картофель на серой лесной почве

Нечерноземной зоны. Экстремальная засуха резко ограничивает поступление в растения фосфора и калия, растения испытывают острый дефицит этих элементов, независимо от уровня обеспеченности почвы.

Азотные удобрения оказывают самое сильное среди минеральных удобрений положительное действие на рост, развитие и продуктивность картофеля, как при нормальных гидротермических условиях, так и в условиях засухи.

Содержание доступных соединений серы в серой лесной почве очень динамично в течение вегетационного периода, но внесение серосодержащих удобрений не отражается на прибавке урожая клубней картофеля.

При возделывании картофеля на серой лесной почве азотные удобрения снижают, а фосфорно-калийные – повышают содержание крахмала в клубнях, причем положительное влияние фосфора более выражено, чем калия. Внесение с удобрениями серы и цинка отрицательно влияет на процесс накопления крахмала.

**Декларация личного участия.** Автор работы лично разрабатывала схемы полевого и вегетационного опытов, участвовала в их постановке и проведении, отбирала образцы почвы и растений, осуществляла учет урожая, выполняла основные лабораторные анализы, проводила статистическую обработку массива экспериментальных данных. При выполнении диссертации автор проводила реферирование специальной литературы, обобщение результатов, сопоставление их с литературными материалами, подготовку публикаций, представление исследований на научных конференциях, написание настоящей рукописи.

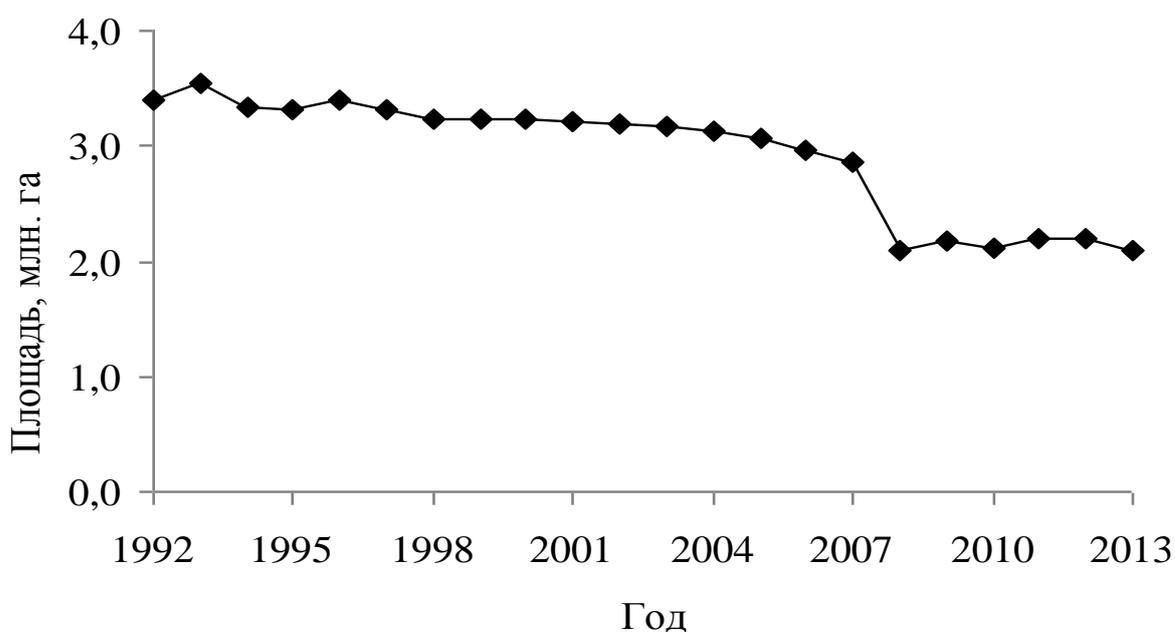
**Благодарности.** Диссертационная работа выполнена в лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН по планам научно-исследовательских работ Института (тема № 01200902109 «Исследование взаимодействия азота с макро- и микроэлементами на основе анализа сбалансированности минерального питания растений и интенсивности

круговорота веществ в агроэкосистемах»). Настоящая работа посвящается светлой памяти первого научного руководителя, безвременно ушедшего от нас, д.б.н., профессора, Владимира Ивановича Никитишена, оказавшего неоценимую помощь в выборе темы исследований, организации и проведении экспериментов. Ценные советы и помощь в обобщении и научном обосновании полученных экспериментальных данных были оказаны автору диссертации заведующим лабораторией, д.б.н., членом-корреспондентом РАН В.Н. Кудеяровым и гл.н.с., д.б.н. В.М. Семеновым. Автор выражает искреннюю признательность с.н.с., к.б.н. В.И. Личко, вед.н.с. к.б.н. А.А. Ларионовой за полезные консультации и оказанную помощь в лабораторных исследованиях, а также генеральному директору ООО «Максим Горький» А.А. Самошину за предоставленную возможность и всестороннее содействие в проведении полевых опытов.

# ГЛАВА 1. ПОЧВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЗИОЛОГО-АГРОХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ КАРТОФЕЛЯ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

## 1.1. ПРОИЗВОДСТВО КАРТОФЕЛЯ В РОССИИ И В МИРЕ

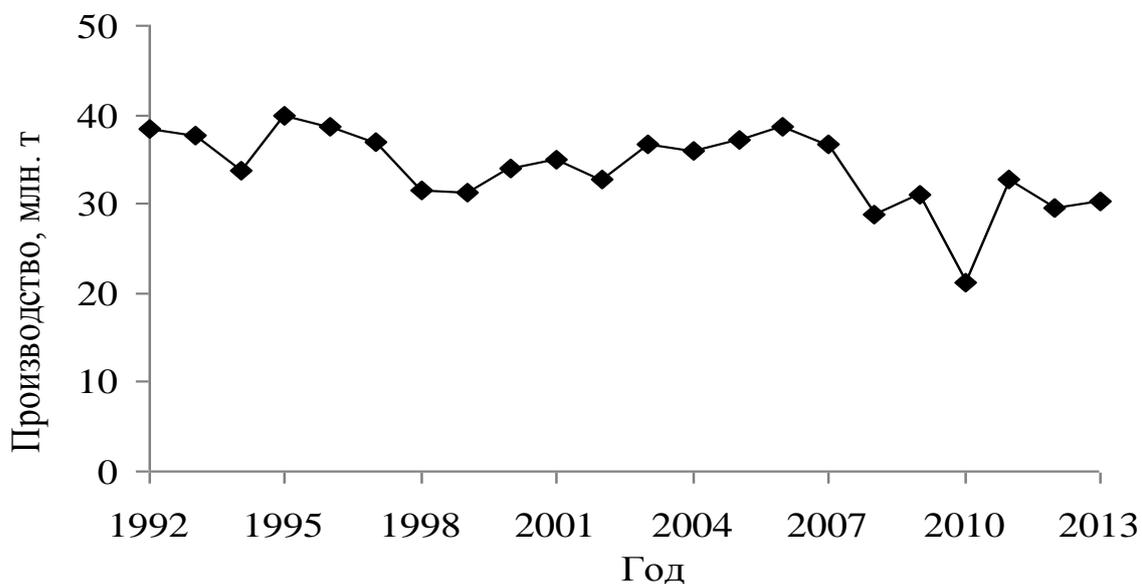
Картофель является одной из основных продовольственных культур в мире. Общая площадь, занятая картофелем в мире по данным ФАО на 2013 год составляет около 19 млн. га [FAOSTAT, 2015]. Россия по этому показателю занимает первое место в Европе и второе – в мире, уступая только Китаю. В последние годы площадь, занимаемая под картофелем в России, составляет около 2 млн. га (рис. 1).



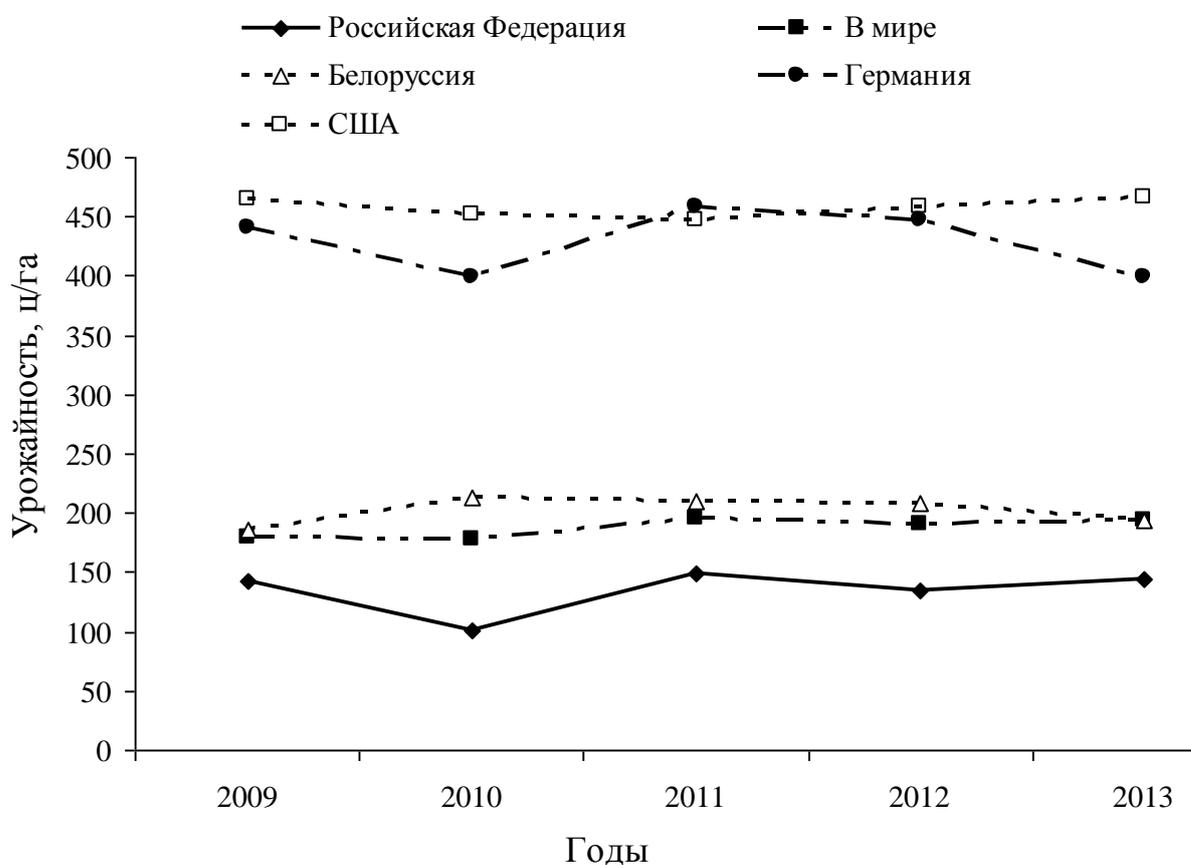
**Рис. 1.** Площади, занятые под картофелем в Российской Федерации

По валовому производству картофеля Россия занимает третье место в мире. Картофель – единственная сельскохозяйственная культура, производство которой не снизилось по сравнению с дореформенным периодом. В среднем за последние пять лет производство картофеля составило 28,9 млн. тонн (рис. 2). Значительное снижение валового производства до 21,1 млн. тонн отмечено в 2010 году, что вызвано крайне

неблагоприятными погодными условиями в большей части районов возделывания картофеля.



**Рис.2.** Производство картофеля в Российской Федерации



**Рис.3.** Урожайность картофеля в России и в других странах мира

Однако фактическая урожайность картофеля в земледелии России значительно ниже, чем в странах с интенсивным агропромышленным комплексом и меньше среднемировых значений (Рис. 3). Исходя из этих данных, можно уверенно говорить о том, что уровень картофелеводства в РФ не полностью реализует потенциал этой культуры. Значительная роль в интенсификации картофелеводства принадлежит оптимизации минерального питания картофеля [Власенко, 1987, Карманов и др., 1988, Артюшин и др., 1991, Аристархов, 2000; Костюк и др., 2007; Махруленко, 2009 и др.]. Поскольку в России картофель выращивается почти повсеместно [Агробиологические основы..., 2003], система оптимизации минерального питания картофеля должна учитывать почвенно-климатические условия мест возделывания культуры и предусматривать меры по смягчению неблагоприятных факторов окружающей среды.

## **1.2. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ КАРТОФЕЛЯ К ПОЧВЕННОМУ ПЛОДОРОДИЮ И ГИДРОТЕРМИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ, ПУТИ ИХ ОПТИМИЗАЦИИ**

Биологические особенности картофеля (*Solanum tuberosum*) определяют его высокую пластичность (наибольшую из всех сельскохозяйственных культур), позволяя расти в достаточно широком диапазоне температур и на разных типах почв (тяжелые суглинки, рыхлые пески, торфяно-болотные почвы различных типов) [Физиология..., 1971]. Однако полная реализация продукционного потенциала и получение высоких урожаев возможно лишь при соблюдении ряда условий. Растение картофеля характеризуется слаборазвитой корневой системой, по сравнению с другими сельскохозяйственными культурами. Развивается корневая система преимущественно до глубины 60-70 см [Вечер, 1973]. Объем почвы, занимаемый корневой системой картофеля, в 1.4 раза меньше, чем у ячменя и в 2.2 раза меньше, чем у сахарной свеклы [Модестов, 1932]. При этом

картофель в целом формирует достаточную большую биомассу. Два этих факта, определяют высокую требовательность картофеля к влажности почвы и уровню почвенного плодородия. По сравнению с другими сельскохозяйственными культурами картофель потребляет значительно больше питательных веществ из почвы. Это позволило отнести картофель к одной из наиболее требовательных культур к питательным веществам почвы [Тамман, 1944].

Прорастающие клубни потребляют кислород воздуха в почве во много раз больше, чем прорастающие семена растений, то же можно сказать и о молодых растущих клубнях, поэтому для нормального функционирования корней требуется хорошая аэрация почвы. Интенсивность дыхания корней картофеля в пять раз выше, чем у подсолнечника и в десятки раз выше, чем у других исследованных растений [Bushnell, 1956]. Этим объясняется высокая требовательность картофеля к скважности почвы. Лучшие почвы для этой культуры – легкие песчаные, хорошо аэрируемые [Физиология..., 1971].

Говоря о требованиях картофеля к почвенному плодородию, нельзя не отметить такой показатель, как кислотность почвенной среды. Картофель терпимо относится к кислой почве, в щелочной среде усиливается повреждение клубней паршой. Долгое время эти факторы являлись основанием для того, чтобы избегать известкования почвы при посадке картофеля. Однако нормальное поглощение элементов минерального питания корнями картофеля возможно только при среде близкой к нейтральной, поэтому при возделывании картофеля следует стремиться к тому, чтобы обеспечить указанный оптимум. При этом внесение мелиоранта должно согласовываться с дозами минеральных удобрений. Известкование в сочетании с высокими дозами минеральных удобрений оказывается не эффективным, вызывая дисбаланс в поступлении основных макроэлементов [Елькина, 2006]. Установлено, что известкование почвы усиливает поступление нитратного азота в растения картофеля, поэтому для получения продукции с низким содержанием нитратов и повышения эффективности

известкования целесообразно снижать дозы азотных удобрений на 30% в сравнении с кислой почвой и повышать фосфорно-калийное питание. Оптимальные дозы мелиоранта являются важной частью технологии возделывания картофеля. Половинные и полные дозы доломитовой муки высоко окупаются картофелем [Федотова, 2003].

В оценке отзывчивости картофеля на наличие доступной влаги в почве длительное время существовали разногласия. Картофель относили как к растениям засухоустойчивым, малотребовательным к влажности почвы, так и к культурам с повышенной требовательностью к влажности почвы [Физиология..., 1971]. Современное представление о требовательности картофеля к влажности почвы сложилось на основании исследований, проведенных в Белорусской сельскохозяйственной академии [Гончарик, 1933; Гончарик, 1962]. Было показано, что потребность картофеля в почвенной влаге зависит от фазы развития растения. В начале вегетации (от посадки до бутонизации) растения наименее чувствительны к изменению влажности почвы, а в последующие периоды (от цветения до полной спелости) оптимальной являлась влажность 80-100% ППВ для супесчаной почвы и 70% ППВ для суглинистой почвы. Эти исследования позволили характеризовать картофель как растение весьма требовательное к влажности почвы и одновременно устойчивое к засухе [1993; Бузовер, 1966; Новиков, 1937]. Было показано, что критическим периодом является фаза начала цветения. Недостаток влаги в этот период приводит к наиболее сильному снижению урожая клубней. Различное отношение картофеля к влажности почвы нашло свое отражение в широко известной формулировке Лорха [Лорх, 1948], что урожай клубней картофеля ранних сортов определяется осадками июля, среднеспелых сортов – осадками июля-августа, и поздних – осадками июля-августа-сентября. Соотношение приростов биомассы по группам сортов в каждом из периодов достаточно специфично. У скороспелых сортов в первый период накапливается до 23%, во второй – 63% и в третий – 14% от биомассы конечного урожая. Среднеранние сорта

накапливают в первый период (от всходов до начала цветения) 13% от конечного урожая, во второй (цветение и до начала увядания ботвы) – 71%, а прирост клубней в третьем периоде (до естественного увядания ботвы) составляют 15% от всего урожая. Среднеспелые и позднеспелые сорта образуют в первый период всего 4-5% от массы конечного урожая, во второй – 71-75% и в третий – 20-24% урожая. Таким образом, второй период является наиболее важным в формировании урожая клубней. В этот период накапливается до 63-75% массы конечного урожая. Поэтому погодные условия в этот период являются критическими для урожая картофеля [Физиология..., 1971].

Клубни, как и материнские, так и вновь образуемые, являются как бы запасными вместилищами влаги, которые наполняются в период достаточного увлажнения и из которых растение черпает влагу в период ее дефицита в почве. Это способствует более рациональному использованию влаги, предупреждающему глубокое и необратимое обезвоживание вегетативных органов. Этим объясняется тот факт, что даже в условиях сильного иссушения почвы, близкого к уровню недоступной влаги, не наблюдается увядания ботвы картофеля [Анцыферов, 1957]. В условиях засушливого 2010 года наблюдалась аналогичная картина: несмотря на экстремальные условия засухи, ботва картофеля практически не теряла тургор, хотя накопление биомассы резко ослабевало.

Считается, что картофель – растение умеренного, влажного климата и рыхлых почв. На родине культурного картофеля в районах Чили развитие растений протекает в условиях обильного увлажнения (до 3000 мм) при среднесуточной температуре воздуха +10-15<sup>0</sup>С и продолжительности светового дня 12-15 часов. В указанных районах отсутствуют резкие колебания дневных и ночных температур воздуха, заморозки случаются не ежегодно или совсем отсутствуют, в течение вегетации наблюдается высокая относительная влажность воздуха (выше 75%) [Руденко, 1958]. Таким образом, картофель в филогенезе приспособился к умеренным температурам,

обильному увлажнению и средней длине дня. Картофель плохо переносит повышение температуры в течение вегетации. Нормальное клубнеобразование происходит при температуре почвы не выше +18-19°C. Кроме непосредственного влияния на процесс клубнеобразования, температура оказывает большое влияние на ферментативное превращение углеводов, обеспечивающих отток ассимилятов и накопление крахмала в клубнях. Высокая температура в сочетании с длинным днем вызывает превращение столонов в надземные побеги и израстание (возникновение новообразований на клубнях в виде выростов, либо образование разделенных столонами клубней первого, второго и последующих порядков в виде цепочки, обусловленное преимущественно перерывами роста) клубней [Физиология..., 1971; Шпаар и др., 2004].

Гидротермические условия, складывающиеся в течение вегетации, оказывают существенное влияние на урожай и качество картофеля [Ивойлов, 2012]. В зависимости от условий выращивания содержание крахмала и азотистых веществ в клубнях картофеля может изменяться в 1.5-2 раза. При относительно низкой влажности и высокой температуре в растениях усиливается синтез азотистых веществ и снижается накопление углеводов, однако доля крахмала в общем углеводном комплексе клубней возрастает. Вместе с тем недостаток влаги в период клубнеобразования, хотя и повышает накопление в клубнях крахмала, значительно снижает урожайность картофеля, поэтому общий выход крахмала с 1 га уменьшается. В условиях переувлажнения, как правило, снижается как урожайность картофеля, так и накопление в клубнях крахмала [Третьяков и др., 2005].

Влияние влагообеспеченности на урожай и на качественные показатели выявлено не только для картофеля, но и для других сельскохозяйственных культур. В засушливом году содержание клейковины в зерне озимой пшеницы было 1.8 раза выше, чем в менее засушливом (29.4 и 16.2% соответственно) [Самотоенко, 2011]. При благоприятном режиме увлажнения цинк, молибден и сера оказывали положительное влияние на плотность

стеблестоя посевов, а в засушливом году, наоборот, вызывали снижение этого показателя. В засушливых погодных условиях от некорневой подкормки озимой пшеницы микроэлементами и серой при их недостаточном содержании в почве прибавка урожая составила около 3 ц/га, тогда как в более благоприятные годы – до 6 ц/га. Положительное влияние микроудобрений и серы на урожайность и качество зерна озимой пшеницы проявляется как в близкие к нормальным погодным условиям, так и в засушливых условиях, что свидетельствует об их антистрессовом влиянии в неблагоприятных условиях роста и развития растений [Самотоенко, 2011]. Показано, что водный стресс (недостаточное или избыточное увлажнение в критический для растений период) существенно снижал урожайность зерна, причем степень его отрицательного воздействия зависела от уровня азотного питания. Высокий уровень обеспеченности азотом отрицательно влиял на засухоустойчивость, но повышал адаптационные возможности пшеницы к переувлажнению. Предпосевная обработка семян цинком положительно влияла на продуктивность зерна яровой пшеницы независимо от уровня обеспеченности азотом. При недостаточном увлажнении применение цинка снижало отрицательное действие высокой дозы азота на засухоустойчивость растений [Дианова, 1999]. Так как основные физиологические процессы схожи у разных видов растений, закономерности, выявленные на других сельскохозяйственных культурах, возможно, применимы и для картофеля.

К традиционным способам воздействия на устойчивость растений к водным стрессам является оптимизация их минерального питания. Важная роль в получение стабильных урожаев принадлежит азотным удобрениям, так как азот является одним из лимитирующих элементов питания в Нечерноземной зоне. На долю азота приходится 48-51% прибавки урожая в сухие годы, и 72% в переувлажненные годы [Ивойлов, 1995; Дианова, 1999]. В засушливых условиях возрастает роль азотных и калийных удобрений, «ответственных» в основном за создание общей ионной силы раствора [Рузавин, 2009].

Минеральное питание и водный обмен – взаимосвязанные и взаимовлияющие процессы. Лучшие условия питания способствуют более продуктивному использованию влаги, а достаточная обеспеченность влагой, в свою очередь, повышает отдачу от внесения удобрений. Для объективной оценки эффективности применения минеральных удобрений необходимо учитывать погодные условия (в частности, режим увлажнения) в период вегетации, которые часто имеют решающее значение. Изменчивостью погодных условий объясняется 25-60% изменений эффективности удобрений в Нечерноземной зоне [Минеев, 2010; Чухина, 2014; Убугунов, 2003].

Чтобы получать высокие и стабильные урожаи сельскохозяйственных культур (в том числе и картофеля) в различных гидротермических условиях, необходимо понимать процессы, происходящие в растении при резком изменении водного и температурного режима. Недостаток влаги, особенно сопровождающийся высокой температурой, вызывает сдвиги в физиологической деятельности растения, и то, насколько сильными они будут, обратимыми или необратимыми, зависит от длительности обезвоживания и от вида растения [Полевой, 1989]. Как правило, дефицит воды изменяет такие основные физиологические процессы, как фотосинтез и дыхание. Интенсивность фотосинтеза падает, а интенсивность дыхания (особенно в первый период завядания) возрастает. Так было показано, что уменьшение оводненности листа у сахарной свеклы на 3-4 % приводит к снижению фотосинтеза на 76 % [Бриллиант, 1951]. Под влиянием завядания усиливается процесс распада крахмала, возрастает количество сахаров – основного субстрата дыхания. При этом сахара в основном накапливаются в листьях, так как отток ассимилятов при засухе резко тормозится, а энергия, которая выделяется в процессе дыхания, не аккумулируется в виде АТФ, а выделяется в виде тепла и не может быть использована растением [Третьяков и др., 2005].

На начальных этапах недостаток воды вызывает в растениях физиологические изменения, повышающие его устойчивость. Одним из

таких процессов является осморегуляция – накопление осмотически действующих веществ, таких как ионы (в первую очередь  $K^+$ ) и органические вещества. Однако при более глубоком стрессе направленность процесса может меняться, и происходит уменьшение концентрации некоторых ионов, наблюдается экзосмос [Якушкина, 2004].

Изменение динамики потребления минеральных элементов из почвы, а также явление экзосмоса в условиях сильной засухи имеет физиологическое объяснение. Существует связь между коллоидно-химическими свойствами содержимого клеток и засухоустойчивостью. Результаты по определению степени гидрофильности коллоидов свидетельствуют о том, что катионы натрия и кальция вызывают повышение гидрофильности коллоидов, причем наибольшее увеличение гидрофильности вызывает катион кальция. Анионы органических кислот понижают гидрофильность коллоидов. Увеличение вязкости протоплазмы сопровождается повышением жароустойчивости растений [Генкель, 1982]. Возможно, что наблюдаемое при длительной засухе явление экзосмоса некоторых элементов, в частности калия, играет защитную приспособительную роль. Уменьшая концентрацию одновалентных катионов ( $K^+$  и  $Na^+$ ) и увеличивая двухвалентных катионов ( $Ca^{2+}$ ), растение защищает протоплазму от деградации.

Еще одной причиной, объясняющей экзосмос при сильной и продолжительной засухе, является нарушение функционирования клеточных мембран. В условиях сильной и продолжительной засухи, не только приостанавливается активное мембранное поглощение ионов из почвы, но и уже поглощенные ионы не удерживаются в клетке, так как возрастает проницаемость мембран, нарушается такая важная их функция как избирательность поглощения-выделения ионов [Кузнецов, 2006].

Наиболее тяжело дефицит влаги переносится растениями на фоне высоких температур, так как чрезмерно высокая температура является самостоятельным стрессовым фактором, отрицательно влияющим на поступление питательных веществ в растения. Например, для поступления

азота и фосфора в растения оптимальная температура в большинстве случаев 23-25<sup>0</sup>С [Минеев, 1990]. При температурах близких к 40-50<sup>0</sup>С происходит уменьшение поглощения солей, по-видимому, в результате инактивации ферментных систем, ответственных за поглощение и усвоение ионов [Ягодин, 1989].

Таким образом, продуктивность картофеля является функцией физиологических процессов, почвенно-агрехимических режимов и экологических факторов, интегрирующих корневое (минеральное) и воздушное (фиксация диоксида углерода) питание растений.

### **1.3. ОСОБЕННОСТИ ПОТРЕБЛЕНИЯ КАРТОФЕЛЕМ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ В ОНТОГЕНЕЗЕ**

Для нормального роста и развития растения должны быть обеспечены многими элементами минерального питания и в достаточных количествах. Из макроэлементов для питания растений важнейшее значение имеют азот, фосфор, калий, кальций, магний, железо, сера [Минеев, 1990]. Рассмотрим роль и значение азота, фосфора, калия и серы, а также особенности их потребления картофелем.

#### **1.3.1. АЗОТ**

Азот – основной элемент молекулы белка, нуклеиновых кислот, липоидных компонентов мембран, фотосинтетических пигментов, витаминов и других жизненно важных соединений. Образование новых клеток, функционирование растения как живого организма невозможно при отсутствии азота. Недостаток азота замедляет рост растений, вызывает серьезные нарушения энергетического обмена, снижает интенсивность фотосинтеза и ухудшает водный режим за счет снижения водоудерживающей способности растительных тканей [Прянишников, 1965; Никитишен, 2003; Никитишен, 2012]. По уровню обеспеченности почвы в слое 0-20 см минеральными соединениями азота ( $N-NO_3+NH_4$ , мг/100 г почвы)

предложена следующая группировка: очень низкая обеспеченность –  $< 1.5$ ; низкая –  $1.5-3.0$ ; средняя –  $3.0-5.0$ ; высокая –  $> 5$  [Гамзиков, 2000].

Картофель испытывает потребность в азоте с момента прорастания клубня, образования корневой системы и ростков. Если на первом этапе развития корневой системы образование клеток идет за счет азота материнского клубня, то для роста стеблей этих запасов обычно не хватает. Поэтому всходы появляются только после укоренения и начала поступления элементов минерального питания через корни [Физиология..., 1971]. Количество азота в растениях зависит от видовых особенностей, возрастных изменений, а также от условий произрастания. Как правило, больше всего азота содержат молодые растения, когда идет активный синтез аминокислот, необходимых для образования белков. Содержание азота колеблется в значительных пределах не только в отдельных органах, но и в одном и том же органе растения в зависимости от возраста [Церлинг, 1990].

По данным Бардышева [1984] максимальное содержание азота в растениях картофеля отмечено в листьях в фазу всходы-бутонизация ( $3.83-4.55\%$  в зависимости от сорта), пик содержания азота в стеблях также приходится на этот период ( $2.19-3.53\%$  от сухого вещества). После цветения содержание азота в листьях, стеблях и корнях убывает, что, по-видимому, объясняется оттоком его в молодые клубни. К моменту уборки содержание азота в надземной биомассе снижается почти в 2 раза, а в клубнях составляет  $1.0-1.7\%$  [Бардышев, 1984]. По другим данным наиболее высокое содержание азота в ботве отмечено в фазу всходов ( $4.93-5.67\%$  на сухое вещество), а по мере роста и развития оно снижалось, составляя ко времени уборки  $2.45-3.06\%$  от массы [Терехова, 1980]. В клубнях также содержалось больше азота в начальный период их формирования, затем содержание его постепенно уменьшалось вследствие интенсивного прироста массы клубней и проявления, так называемого эффекта «разбавления».

Следует подчеркнуть, что оптимальные уровни внесения азотных удобрений определены, как правило, исходя из того, что действие азота не

ограничивается дефицитом других элементов питания и, прежде всего, фосфора.

### 1.3.2. ФОСФОР

Фосфор является обязательным компонентом таких важнейших соединений, как нуклеиновые кислоты, фосфопротеиды, фосфолипиды, фосфорные эфиры сахаров, нуклеотиды, принимающих участие в энергетическом обмене (АТФ, НАД, ФАД и др.), витамины. Недостаток фосфора вызывает серьезные нарушения биосинтетических процессов, функционирования мембран, энергетического обмена. Обеспечивая вместе с азотом образование нуклеопротеидов, фосфор увеличивает поступление в растения азота. Поэтому, говоря об оптимизации фосфорного питания, всегда следует учитывать его связь с азотным питанием. Следует отметить, что количество фосфора всегда велико в физиологически активных органах [Никитишен, 2003; Никитишен, 2012].

Содержание доступных форм фосфора в почве — важнейший показатель ее плодородия. Обеспеченность растений достаточным количеством фосфатов находится в большой зависимости от их запасов в почве, степени подвижности и ряда условий, влияющих на потребление фосфора из почвы и удобрений [Шафран, 2015]. Для серых лесных почв принята следующая группировка по содержанию в них подвижных форм фосфора (по Кирсанову), мг  $P_2O_5/100$  г почвы: очень низкая обеспеченность —  $< 3$ ; низкая — 3-8; средняя — 8-15; повышенная — 15-20; высокая — 20-30 [Минеев, 2001]. Оптимальное содержание подвижных фосфатов для картофеля составляет 10-15 мг/100 г [Касицкий, 1979], причем величина эта варьирует в зависимости от гранулометрического состава: на суглинистых она выше, чем на песчаных.

Фосфор поглощается растением в форме аниона ортофосфорной кислоты, доступны также и некоторые органические формы. В растениях фосфор встречается только в окисленной форме, в виде остатков

ортофосфорной кислоты [Третьяков и др., 2005]. В питании картофеля фосфор имеет наибольшее значение на ранних этапах развития, когда быстрый рост ботвы обеспечивает ускоренное наращивание листового аппарата растения, определяя тем самым будущий урожай. При достаточном обеспечении растений фосфором раньше появляются всходы, ускоряется прохождение других фаз, быстрее развивается корневая система. Использование фосфора картофелем проходит сравнительно равномерно на протяжении всей вегетации, а распределение фосфора в различных органах растения аналогично распределению азота: в репродуктивных органах фосфора содержится в 3-6 раз больше, чем в вегетативных органах [Минеев, 1990]. Относительно содержания фосфора в отдельных органах картофеля по фазам развития имеются разные сведения. В одних исследованиях было показано увеличение содержания фосфора в листьях картофеля в первую половину вегетации, а в корнях – вплоть до уборки [Ахромейко, 1939]. В других работах указывается на равномерное уменьшение содержания фосфора во всех органах в процессе созревания, кроме клубней, где процент фосфора увеличивается [Гилис, Лишак, 1969].

Особенности динамики потребления фосфора и его содержания в растениях приведены в работе Бардышева [1984]. Показано, что содержание фосфора в листьях молодых растений колеблется от 0.55 до 0.63%. В дальнейшем оно заметно снижается, достигая минимального значения в самых старых листьях при уборке (0.12-0.21%). В корнях содержание фосфора также снижается с максимальных значений в фазе всходов (0.28-0.31%) до минимальных при уборке (0.09-0.17 %). Содержание фосфора в молодых клубнях в период цветения достигает максимального значения и сохраняется на данном уровне (0.19-0.23%) вплоть до полного созревания. Общее содержание фосфора в целом растении в отличие от азота плавно увеличивалось в течение всей вегетации [Бардышев, 1984].

Установлено, что использование растениями фосфора из удобрений и воздействие его на продуктивность сельскохозяйственных культур находится

в обратной связи с исходным фосфатным уровнем почвы и в прямой зависимости от обеспеченности азотом и возрастает по мере обогащения почвы подвижными фосфатами до определенного значения (11-12 мг/100 г), который принят за нижний предел оптимума [Никитишен, 2003]. Следует отметить, что достижение высокого фосфатного уровня почвы путем систематического внесения фосфорных удобрений способно обеспечить фосфорное питание культур севооборота в течение длительного времени [Хлыстовский, Касицкий, 1989; Никитишен и др., 2000, 2001]

### **1.3.3. КАЛИЙ**

В почве калий находится в четырех состояниях, между которыми поддерживается динамичное равновесие: 1) калий, входящий в состав первичных и вторичных минералов, в основном недоступный для растений; 2) необменный калий, находящийся в структуре слюдоподобных минералов и органоминеральных комплексов, частично доступный растениям; 3) обменный калий в составе ППК, доступный растениям; 4) калий почвенного раствора, непосредственно участвующий в питании растений [Прокошев, Дерюгин, 2000].

Для более глубокой оценки плодородия почвы в отношении калия рекомендуется анализировать все формы калия, но в большинстве случаев при диагностике обеспеченности почвы калием определяют содержание его обменно-поглощенной формы. Для серых лесных почв принята следующая группировка по содержанию в них обменного калия (мг  $K_2O$ /100 г почвы): очень низкая обеспеченность – < 3; низкая – 3-7; средняя – 7-10; повышенная – 10-15; высокая – 15-20 [Минеев, 2001].

Оптимальный уровень питания зерновых культур калием достигается при следующем его содержании в почве в обменной форме (мг/100 г): суглинки – 22-25; супеси – 20-24; песчаные – 18-20 [Кулаковская, 1990]. В работе другого автора приводятся аналогичные значения: содержание обменного калия в почве 17-21 мг/100 г оказывается достаточным для

формирования высоких урожаев озимой пшеницы, ячменя, картофеля, поэтому при такой обеспеченности почвы калием растения слабо отзываются на внесение калийных удобрений [Стребков, 1990]. Хотя урожайность картофеля как на тяжелых, так и на легких почвах повышается при содержании обменного калия до 30 мг/100 г, эффективность калийных удобрений снижается по мере увеличения как их доз, так и запасов калия в почве. Было показано, что увеличение содержания калия с 2-4 до 26 мг/100 г сопровождается ростом урожая клубней картофеля по фону NP с 12.8 до 25.6 т/га, а прибавка урожая от внесения калийных удобрений соответственно снижается с 32 до 7% [Кулаковская, 1990].

В растительных тканях калия содержится больше, чем других катионов. Калий поступает в растение в виде катиона  $K^+$ , присутствует в клетках в основном в ионной форме и легко подвижен [Физиология..., 1971]. В наибольшем количестве калий сосредоточен в молодых растущих тканях, характеризующихся высоким уровнем обмена веществ. Калий участвует в регуляции вязкости цитоплазмы, в повышении гидратации ее коллоидов и водоудерживающей способности. Высокая подвижность калия создает разность электрических потенциалов на мембране, обеспечивая генерацию биотоков в растении. Калий принимает активное участие в осморегуляции, играет большую роль в процессе открывания и закрывания устьиц. Транспорт углеводов в растении также связан с перераспределением калия. Под влиянием калия увеличивается накопление крахмала в клубнях картофеля, сахарозы в сахарной свекле [Никитишен, 2012]. При дефиците калия нарушаются водный режим, процессы деления и растяжения клеток, развития проводящих тканей, снижается продуктивность фотосинтеза за счет уменьшения оттока ассимилятов из листьев [Третьяков и др., 2005].

Подобно другим химическим элементам, входящим в состав растения, содержание в них калия не является постоянным и подвержено весьма значительным колебаниям. Содержание калия в растениях наиболее высоко в первые фазы его развития и уменьшается по мере роста растения. Было

показано [Бардышев, 1984], что в фазу всходов листья разных сортов картофеля содержали 4.51-5.74% калия. В процессе вегетации количество калия в листьях уменьшалось и к моменту уборки составляло 2.10-3.09%. В корнях процент калия в фазе всходов колебался от 2.59 до 3.15% в зависимости от сорта и года вегетации. По мере роста и развития картофеля содержание калия в корнях закономерно уменьшалось до 0.38-1.12%. Наиболее высоким содержанием калия отличаются стебли, затем следуют листья, цветки, маточные клубни, молодые клубни и корни. Такая же последовательность в распределении калия отмечена и в работах других исследователей [Ахромейко, 1939; Гилис, Лишак, 1969]. По мере созревания листьев и стеблей калий передвигается в репродуктивные органы, частично возвращается в почву через корневую систему [Журбицкий, 1963] и вымывается из листьев дождями [Петербургский, 1953].

#### **1.3.4. СЕРА**

При оценке содержания серы в почве, как правило, учитываются следующие установленные исследованиями теоретические положения. Основными источниками серы в почве служат почвообразующие породы, атмосферные выпадения и серосодержащие удобрения. В процессе почвообразования сера накапливается преимущественно в верхних перегнойных горизонтах. В пахотном слое обычно сосредоточено около 50 % запасов серы метрового слоя почвы. Чем больше гумуса в почве и чем тяжелее гранулометрический состав, тем больше запас серы. Превращение серы в почве во многом сходно с превращением азота, которое также носит сезонный характер, т.е. зависит от температуры и влажности почвы. К осени количество сульфатной серы снижается в результате выноса ее с урожаем. В почвах содержится сера в органической (75–90 %) и минеральной (10–25 %) форме. Запасы минеральной серы в почвах пополняются за счет минерализации органической [Аристархов, 2007].

На основе анализа имеющего экспериментального материала Маслова [Маслова, 1980] отмечает, что каких-либо четких градаций показателей, характеризующих обеспеченность растений серой, пока нет. Мнения исследователей на этот счет противоречивы. Некоторые свидетельствуют о том, что при содержании 0.2–0.3 мг сульфатной серы на 100 г почвы можно ожидать ее дефицита, при содержании меньшем, чем 0.6 мг S/100 г, можно ожидать отзывчивости на добавление серы, а на почвах содержащих больше 1 мг, отзывчивости на серу не наблюдается [Gupta, Veinot, 1974]. В ряде работ встречаются сведения о действии серосодержащих удобрений при более высоком содержании сульфатной серы. Отмечен небольшой эффект от серы на мощных черноземах при довольно высоком содержании сульфатной серы — 4.2–5.2 мг/100 г почвы. Следует учесть, что большая роль при этом принадлежала обеспеченности растений азотом [Сырый, Мамонтова, 1973].

Найти показатель для диагностики эффективности серных удобрений достаточно трудно. Почвенная сера в основном сосредоточена в органическом веществе, ее минерализация идет параллельно азоту в определенном отношении к нему [Слущкая, 1972]. Кроме того, в почвах, находящихся под воздействием загрязнения техногенными выбросами, содержание ее минеральных соединений связано с этим фактором, а также с закреплением в почве поступившей серы. То есть, в обоих случаях процесс превращения ее соединений в почве очень динамичен, поэтому величина содержания подвижной серы в почве может характеризовать лишь тот момент, когда взят образец. Вряд ли абсолютные показатели можно использовать для суждения о мере обеспеченности растений доступной серой [Маслова, 1980].

Несмотря на имеющиеся сложности, предложено несколько вариантов группировки почв по обеспеченности растений сульфатной серой (мг/кг почвы). Сильный недостаток – 0-7; умеренный недостаток – 8-16; полная обеспеченность – 17-57; избыточная обеспеченность – > 57 [Церлинг,

Ерофеев, 1974]. Низкое содержание подвижной (сульфатной) серы – <6.0; среднее – 6.1-12.0; высокое – > 12.0 [Державин, 2006]

Сера принимает активное участие в многочисленных реакциях обмена веществ в растениях. Почти все белки содержат серосодержащие аминокислоты – метионин, цистеин, цистин [Аристархов, 2007]. Другая важнейшая функция серы состоит в поддержании определенного уровня окислительно-восстановительного потенциала в клетке, необходимого для нормального функционирования всех ферментных систем. Сера является также компонентом биологических соединений – кофермента А и витаминов (тиамина, липоевой кислоты, биотина), играющих важную роль в дыхании и липидном обмене [Авдонин, 1972]. Недостаточное снабжение растений серой тормозит белковый синтез, снижает фотосинтез и скорость роста растений, особенно надземной части [Шевякова, 1979; Третьяков и др., 2005]. Сера поступает в растение в окисленной форме, в виде аниона  $SO_4^{2-}$ . В органические соединения сера входит только в восстановленной форме – в составе сульфгидрильных групп и дисульфидных связей. Восстановление сульфата происходит преимущественно в листьях [Хоменко, 1983].

По мере интенсификации земледелия вынос серы из почв возросшими урожаями увеличивается. Более того, многие ученые приходят к выводу, что в минеральном питании растений среди необходимых элементов питания серу по физиологическому значению следует поставить на третье место, после азота и фосфора [Кардиналовская, 1984; Хоменко, 1983; Шкель, 1979]. Потребность в сере сильно различается у разных сельскохозяйственных культур. Самая высокая потребность в сере характерна для растений рода *Brassica* (рапс, капуста кочанная), затем следуют бобовые культуры и злаки. Для картофеля также показано положительное влияние серы на урожай и качество клубней [Чернова и др., 1983].

Потребность растений в сере меняется в течение вегетационного периода. Например, у рапса максимум потребления серы приходится на период цветения и образования семян [Нортон, 2014]. Поглощение серы

кукурузой протекает с фактически постоянной скоростью в течение всего вегетационного периода. При этом в зерне аккумулируется до 50% поглощенной растениями серы. Растения пшеницы между фазами цветения и созревания могут терять (за счет вымывания из растений) до половины накопленной серы [Нортон, 2014]. Накоплен достаточно большой материал, подтверждающий высокую сопряженность азотного и серного метаболизма [Хоменко, 1983; Полякова 1983; Маслова, 2004; Нортон, 2014]. Сера, влияя на метаболизм азота, выполняет регулируемую функцию в продукционном процессе. Так для яровой пшеницы было показано, что на начальных этапах органогенеза сера повышает коэффициент продуктивного кушения, улучшает использование экзогенного азота. На фоне дефицитного питания серой накопление азота растениями яровой пшеницы прекращалось через 15-20 суток после начала цветения [Маслова, 2004].

Экспериментальные данные, полученные [Церлинг, Ерофеев, 1974] при работе с горчицей, овсом и кукурузой, показывают, что в любой период развития при низкой обеспеченности сульфатами растения выносят относительно больше серы, чем при нормальной обеспеченности. Растения, выращиваемые при низком содержании сульфатов, поглощают основную часть доступной серы в первые периоды развития, а растения, выращиваемые на почвах с большим запасом доступных сульфатов, поглощают их более равномерно во все периоды развития. Кроме того, было показано, что накопление сухого вещества у всех культур в определенной степени зависело от уровня обеспеченности серой: чем ниже уровень серного питания, тем слабее интенсивность прироста, причем при избыточной обеспеченности серой интенсивность прироста также была ниже, чем при нормальной. При этом было отмечено, что период максимального потребления серы при разных уровнях обеспеченности серой не всегда совпадает с периодом максимального накопления сухого вещества: при недостатке серы период максимальной интенсивности потребления серы предшествует периоду

максимальной интенсивности прироста сухого вещества [Церлинг, Ерофеев, 1974].

Сера, как и азот, необходима для синтеза белков. Поэтому можно предположить, что максимальная потребность в сере бывает в период наибольшей метаболической активности в местах активного синтеза белка. При определении серы в листьях отмечается наиболее высокое ее содержание в молодых жизнедеятельных органах, в старых листьях сера содержится в меньших количествах [Булгакова, 1959; Biddulph, 1958]. Внешние признаки недостатка серы в первую очередь проявляются на молодых тканях растений. Хлороз, наблюдаемый при недостатке серы, напоминает недостаток азота. К концу вегетации происходит перераспределение серы в растительном организме: наибольшее ее количество сосредотачивается в семенах [Полякова, 1983]. Учитывая крайне неравномерное поступление серы в почву с атмосферными осадками, большая часть которой поступает в осенне-зимний период, для предотвращения уменьшения запасов почвенной серы в условиях интенсивного земледелия, при выращивании озимой пшеницы, ячменя, картофеля, овощных и кормовых культур, необходимо предусматривать внесение серосодержащих удобрений (простого суперфосфата, азотно-сульфатной нитрофоски, сульфатов аммония и калия, гипса и фосфогипса). Дозу серы следует предусматривать с учетом биологических особенностей сельскохозяйственных культур, но не менее 30-40 кг/га в год [Фомина, 1982].

Приведенные данные указывают на необходимость определения потребности в сере в динамике для каждой конкретной культуры, в частности, для картофеля таких данных в литературе недостаточно.

### **1.3.5. ВЛИЯНИЕ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ (N, P, K и S) НА УРОЖАЙ И КАЧЕСТВО КЛУБНЕЙ КАРТОФЕЛЯ**

Эффективность действия удобрений на урожай и качество клубней картофеля зависит от многих факторов: типа почвы, ее окультуренности,

сортовых особенностей, погодных условий, вида и формы удобрений, дозы, сроков и способов внесения удобрений, других факторов. За весь период агрохимических исследований накоплено достаточное количество данных о влиянии макроэлементов на урожай и качество клубней, однако работы в этом направлении продолжаются, затрагивая новые аспекты этого вопроса.

В большинстве случаев азотные удобрения ухудшают, а фосфорные улучшают такие показатели, как содержание крахмала, аскорбиновой кислоты, кулинарные свойства, лежкость клубней и т.д. В то же время при сбалансированном соотношении питательных веществ в почве и растениях, азот нередко оказывает положительное действие на качество клубней [Брагин, 1968; Тихонов, 1969; Назарюк, 1989; Белоус и др., 2010], в частности, при возрастании доз азотных удобрений до определенного уровня увеличивается содержание в клубнях незаменимых аминокислот [Убугунов, 2003]. Если картофель убирать после завершения образования крахмала, то качество клубней будет хорошее.

Азот усиливает рост ботвы, удлиняет период вегетации и физиологического вызревания клубней, снижая лежкость клубней [Власенко, 1987; Минеев, 1990], однако, дефицит азота приводит к более выраженному ухудшению лежкости клубней [Убугунов, 2003], что обусловлено несбалансированностью питания макроэлементами. То же касается и устойчивости клубней к болезням: исключение азотных удобрений, приводящее к дефициту этого элемента, приводило к усилению пораженности клубней болезнями (сухой и мокрой гнилью, фитофторозом) так же, как и избыток азота при завышенных дозах удобрений [Убугунов, 2003]. В другой работе было показано, что дефицит азота влияет на такой показатель качества как потемнение клубней (after-cooking darkening) [Wang-Pruski, 2007].

Фосфор ускоряет развитие растений, в том числе и процесс клубнеобразования, тем самым, сокращая вегетационный период. Оптимальное фосфорное питание обеспечивает физиологическую зрелость

клубней к уборке, они содержат больше крахмала, имеют более плотную кожуру, меньше подвергаются механическим повреждениям при уборке и транспортировке [Физиология..., 1971]. В то же время избыточные дозы фосфорных удобрений могут приводить к снижению продуктивности, повышению себестоимости и ухудшению показателей качества товарной продукции [Убугунов, 2004].

Калий активирует процессы углеводного обмена и превращение сахаров в крахмал, в результате чего в клубнях повышается накопление крахмала [Убугунов, 2005]. В то же время при внесении хлористых калийных удобрений может происходить значительное ухудшение качества клубней, связанное с действием хлора, являющегося активатором гидролитических ферментов, которые катализируют распад крахмала [Третьяков и др., 2005]. Наряду с положительным действием калия на качественные показатели клубней картофеля некоторые исследователи отмечают, что избыточная обеспеченность растений калием, особенно при ограниченном азотном питании, может вызвать негативное влияние на качество продукции. Наиболее качественный урожай картофеля по содержанию в клубнях крахмала, сухого вещества и аскорбиновой кислоты был получен при средней обеспеченности почвы обменным калием (16-17 мг/100 г) [Кулаковская, 1990]. Дальнейшее увеличение количества калия в почве сопровождалось снижением качественных показателей. Калий в растениях влияет на азотный обмен и синтез белковых соединений. Согласно литературным данным [Убугунов, 2005], содержание сырого протеина в клубнях при возрастании доз калия снижается, однако его качество, напротив, улучшается за счет повышения содержания в нем аминокислот, в том числе и незаменимых.

Получить высокий урожай качественных клубней можно в том случае, когда система удобрений направлена на ускорение ростовых процессов в начале вегетации, что обеспечивается высоким уровнем как азотного, так и фосфорно-калийного питания. В период клубнеобразования уровень азотного

питания должен быть существенно снижен, чтобы стимулировать физиологическое созревание клубней [Физиология..., 1971].

Проведено достаточно много исследований, в которых изучалось влияние отдельных макроэлементов на урожай и качество клубней картофеля [Коршунов, 1978; Толстоусов, 1987; Белоус, 1995; Федотова, 2003 и др.]. Так было показано, что азотные удобрения не изменяли содержание жиров в продукции, но снижали в картофеле содержание крахмала, сухих веществ, витамина С, особенно – хлористый аммоний [Федотова, 2003; Убугунов, 2003]. Было показано, что хлористые формы калийных удобрений снижали содержание крахмала в клубнях картофеля на 0.2-0.6%, а сульфат калия повышал его на 0.3-1.2% [Костин, 2001]. Хлористый калий также ухудшает сохранность клубней, за счет повышения обводненности и насыщенности тканей хлором [Власенко, 1987]. Внесение фосфоритной муки способствует максимальному накоплению крахмала и снижению содержания нитратов в клубнях картофеля [Костин, 2001].

На урожай и качество клубней картофеля влияют не только те или иные виды удобрений, но в значительной степени и их дозы. С увеличением доз удобрений в клубнях картофеля уменьшалось содержание сухого вещества на 22.8-25.0%, крахмала – с 14.9 до 14.1%, в то же время содержание сырого белка в клубнях увеличивалось с 8.1 до 10.1%, а содержание витамина С при увеличении доз удобрений существенно не изменялось [Сырцев, 2006]. Аналогичные результаты представлены в и других работах [Федотова, 2003; Чухина, 2014]. Так было показано, что минеральные удобрения, увеличивая валовую урожайность и товарность картофеля, повышают обводненность тканей клубней, снижая содержание крахмала на 1.5-1.7% и сухого вещества на 1.1-1.2%, витамина С на 0.7-1.2%. При совместном применении минеральных удобрений с навозом происходит дальнейший рост урожайности и ухудшение показателей качества [Федотова, 2003].

Азотные удобрения в меньшей степени снижали содержание крахмала в клубнях картофеля на высококультуренной почве, но при этом повышали содержание нитратов. Выявлена корреляционная зависимость урожайности картофеля от конкретных агрохимических показателей. Наиболее высокими коэффициентами корреляции характеризуется связь урожайности с содержанием фосфора ( $r=0.62$ ), с величиной рН ( $r=0.62$ ) и с содержанием гумуса ( $r=0.40$ ) [Носиков, 2001].

Более ценные клубни по химическому составу были получены на почвах низкого и среднего уровней окультуренности без внесения удобрений или при одностороннем фосфорном и калийном удобрении. Внесение одностороннего азотного, полного минерального и органо-минерального удобрений на почвах с хорошей степенью окультуренности снижает накопление сухого вещества на 0.7%, крахмала на 2.3% и аскорбиновой кислоты на 0.6-2.7 мг % [Барри, 2001]. Отрицательное влияние удобрений усиливается в годы с избыточным увлажнением, что связано с удлинением вегетационного периода и более поздним вызреванием клубней. Несбалансированное азотное питание и совместное применение минеральных и органических удобрений повышает содержание в клубнях картофеля редуцирующих сахаров, что приводит к ухудшению качества хрустящего картофеля. Использование полного минерального, одинарных фосфорных и калийных удобрений обеспечивает лучшее созревание клубней и получение продукции повышенного качества [Барри, 2001]. Применение калийных удобрений (в дозе 60 кг/га) способствует улучшению лежкости картофеля, а повышение доз до 120-180 кг/га приводит к снижению этого показателя [Убугунов, 2005].

При возделывании сельскохозяйственных культур на низкообеспеченных подвижной серой почвах может снижаться урожайность и ухудшаться качество продукции. Обеспеченность растений серой – основной фактор получения качественного растительного белка [Нортон, 2014]. Положительное влияние серы удобрений проявлялось на ряде культур:

увеличивалось содержания белка в зеленой массе овса, зерне ячменя и озимой пшеницы. Прибавки урожайности от сульфата кальция составили: для ранней капусты – 96 %, корнеплодов брюквы – 67 %, клубней картофеля – 33 %, плодов томатов – 31 %, корзинок подсолнечника – 34 %. Под влиянием серы количество моносахаров в сухом веществе брюквы увеличилось на 5%, в плодах томатов содержание моно- и дисахаров в сумме возросло на 2.3 %, содержание крахмала в клубнях картофеля увеличилось на 1.2 % [Фомина, 1982]. При изучении питания риса было показано, что внесение серных удобрений увеличивает содержание азота в растениях на протяжении всего вегетационного периода. Содержание фосфора в растениях риса зависит от их обеспеченности серой, увеличиваясь при внесении серных удобрений на 0.01-0,07 % в листьях и 0.03-0.11 % в зерне [Беспалов, 2003].. Сера способствует накоплению в растениях риса большего количества калия во все фазы вегетации. Содержание его увеличивается в надземных вегетативных органах на 0.16-0.17 %, в зерне – на 0.03 %. Повышение урожайности при внесении серных удобрений сопровождается улучшением качества зерна риса: содержание крахмала и белка увеличиваются на 0.9-1.9% и 0.34-0.4%, соответственно [Беспалов, 2003].

### **1.3.6. ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ОБЕСПЕЧЕННОСТИ КАРТОФЕЛЯ МАКРОЭЛЕМЕНТАМИ**

Потребление питательных веществ растениями в процессе вегетации идет не равномерно. В зависимости от потребности в конкретный момент развития из почвы поглощаются преимущественно те элементы, которые необходимы для нормального развития. Кроме того, в растении постоянно происходит передвижение веществ из одних органов в другие: из более старых в молодые, из вегетативных в генеративные [Физиология..., 1971]. Это легко прослеживается при определении содержания химических элементов в растениях в разные фазы развития. Накопленные экспериментальные данные позволяют предсказать потребность

растительного организма в том или ином элементе на каждом этапе развития. Еще лучше этот процесс характеризует соотношение содержания питательных элементов. Его изменение в течение вегетации по отдельным органам дает качественную характеристику питания растений. Зная, в каких соотношениях находятся элементы в растении на разных стадиях его развития, можно создать для него оптимальные условия минерального питания [Бардышев, 1984].

Согласно положению Журбицкого соотношение основных питательных элементов (N:P:K) является наиболее устойчивой характеристикой, специфичной для каждой культуры. При этом следует учитывать, что это соотношение изменяется как по фазам развития и отдельным органам растения, так и в зависимости от гидротермических условий, складывающихся в период вегетации, а также от сортовых особенностей культуры [Журбицкий, 1963].

Несбалансированность элементов питания – ограничивающий фактор формирования высокого урожая картофеля. Причем это чаще связано не только с недостатком в почве того или иного элемента в усвояемой форме, но и с избытком другого [Елькина, 2006]. Поэтому диагностика является оперативным методом контроля уровня и режима минерального питания сельскохозяйственных культур, который позволяет управлять формированием урожая и его качеством. Почвенная диагностика обеспечивает надежный контроль минерального питания картофеля в периоды до посадки и появления всходов, растительная – позволяет точно определить уровень, и, что особенно важно, качество минерального питания в период интенсивного роста и развития картофеля. Качественную оценку состояния минерального питания картофеля дает визуальная диагностика. Более точную количественную характеристику минерального питания можно получить, анализируя содержание жизненно важных макро- и микроэлементов. Недостаток или избыток элемента определяют по степени отклонения его содержания от оптимальных значений [Захаров, 1991].

С помощью растительной диагностики можно установить периоды наибольшего поглощения растениями того или иного элемента, а следовательно, и острой потребности в нем. Кроме того, становится возможным определение степени обеспеченности растений элементами в условиях различного питательного режима почв [Бардышев, 1984]. Растительная диагностика не только отвечает на вопрос, нужно ли вносить то или иное удобрение на данном поле в текущем году, но и позволяет количественно рассчитать дозы питательных веществ и оптимального соотношения элементов в удобрениях [Болдырев, 1970].

Для большинства сельскохозяйственных культур установлены уровни недостаточного, оптимального и высокого содержания основных элементов питания в разные фазы вегетации [Церлинг, 1990]. Теоретически и практически значимо установление соотношений между элементами питания в растениях. Для картофеля оптимальным является соотношение N:P:K равное 1:0.3:1.4 [Артюшин и др., 1991], однако оно может варьировать как в зависимости от сорта, так и от фазы развития. Если для расчета использовать оптимальные значения содержания азота, фосфора и калия, предложенные Церлинг [Церлинг, 1990], то можно сказать, что для картофеля оптимальное соотношение N:P в фазу всходов составляет 11, в фазу цветения (ботва) – 12, в фазу полной спелости (ботва) – 8; оптимальное соотношение N:K в фазу всходов составляет 1.3, в фазу цветения (ботва) – 1.0, а в фазу полной спелости (ботва) – 0.6.

В работе Кулаковской [1990] предложены другие соотношения. Если принять за единицу удельный вынос фосфора, как элемента, в меньшей степени варьирующего под влиянием внешних условий и биологических свойств растений, то для картофеля соотношение  $N:P_2O_5:K_2O:CaO:MgO$  составит 4:1:5:1:0.6 [Кулаковская, 1990]. Однако, со ссылкой на работы других исследователей, автор указывает на значительное варьирование этих значений в зависимости от почвенно-климатических условий.

Для оптимизации минерального питания растений необходимо учитывать и содержание в них серы. Целым рядом исследований показано, что между серой и фосфором соотношение близко к единице [Демолон, 1961; Баранов, 1969; Чернова, Хоменко, 1983 и др.] Имея данные по фосфору, можно получать представление о количестве серы. При оптимальном серном питании соотношение между общим фосфором и общей серой в картофеле, клевере, подсолнечнике и пшенице близко к единице, а при недостатке серы эти показатели возрастают в 1.5-2 раза и более [Фомина, 1979]. В целях диагностики обеспеченности растений серой предлагается также использовать соотношение между азотом и серой. Последнее положение обосновывается тем, что эти элементы входят в состав белков в строго определенном количестве, характеризующем биологическую ценность каждого вида растений. Количество общей и неорганической серы в биомассе, а также соотношение в ней азота к сере являются диагностическими признаками условий серного питания растений. Растительные протеины обычно содержат 1% серы и 17% азота [Аристархов, 2007]. Если отношение азота к сере выше 17, то образование белка задерживается, так как аккумулируются протеиновые соединения и растение испытывает недостаток серы [Хоменко, 1983]. В настоящее время установлены критические уровни содержания серы в растениях, для картофеля этот показатель составляет – 0.21-0.23 % (в ботве) [Аристархов, 2007]. При оптимальном серном питании отношение общего азота к сере для клубней и ботвы картофеля составило соответственно 11.1 и 7.9. Отношение общего фосфора к сере для клубней и ботвы картофеля было 1.3 и 0.4. Эти показатели рекомендуются для контроля обеспеченности растений серой [Фомина, 1982].

В тоже время некоторые исследователи считают, что при проведении растительной диагностики не следует полностью полагаться на соотношение N:S, так как этот показатель может вводить в заблуждение. Например, требуемое соотношение N:S может быть достигнуто при низких содержаниях

обоих элементов. Кроме того, избыток азота может быть истолкован как недостаток серы и наоборот [Нортон, 2014].

Таким образом, картофель относится к культурам, требовательным к уровню обеспеченности и соотношению элементов минерального питания. Физиологические особенности картофеля определяют разную его потребность в элементах питания на протяжении вегетационного периода. По содержанию макроэлементов в органах картофеля можно судить о степени обеспеченности растений элементами питания и целесообразности улучшения питания с помощью минеральных удобрений.

#### **1.4. ЗНАЧЕНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ (Zn, Mo и Se) ДЛЯ РОСТА, РАЗВИТИЯ И ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА КАРТОФЕЛЯ И ДРУГИХ РАСТЕНИЙ**

Микроэлементы относятся к группе незаменимых питательных элементов, содержание которых в растительных тканях измеряется тысячными и сотыми долями процента. Несмотря на столь низкую потребность в микроэлементах, в их отсутствии нормальная жизнедеятельность невозможна [Минеев, 1990]. Открытия о вхождении микроэлементов в состав большого числа ферментов сыграли важную роль в понимании их физиологического значения. Стало ясно, что микроэлементы – основа основ жизни, так как почти все процессы синтеза и превращения веществ осуществляются с помощью ферментов, в состав которых входят микроэлементы. Однако этим их роль в жизнедеятельности организмов не ограничивается. Показано, что некоторые микроэлементы (в частности, цинк, медь, молибден, марганец) способны образовывать комплексы с нуклеиновыми кислотами. Тем самым, они оказывают влияние на их физические свойства, структуру и биологическую функцию, и как следствие, на биосинтез белка [Школьник, 1974]. Поэтому невозможно говорить об оптимизации питания растений без учета влияния на этот процесс микроэлементов. При этом необходимо изучать эффективность отдельных

сочетаний макро- и микроэлементов в удобрении в различных погодных условиях с тем, чтобы создать такие системы удобрений, которые бы обеспечили наиболее высокий уровень урожайности даже при неблагоприятных условиях. Микроэлементы часто повышают доступность растениям из почвы макроэлементов. И наоборот, недостаток того или иного микроэлемента ограничивает поступление в растения основных элементов питания [Торшин и др., 1996а; 1996б; Панасин, 2000; Елькина, 2006].

#### **1.4.1. ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ И ОСОБЕННОСТИ ПОТРЕБЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ РАСТЕНИЯМИ В ТЕЧЕНИЕ ВЕГЕТАЦИИ**

**ЦИНК.** Цинк поступает в растение в виде ионов  $Zn^{2+}$ . Содержание цинка в растениях колеблется в диапазоне 1-80 мг/кг сухой массы. Повышенное содержание цинка отмечается в таких органах растений, как листья, генеративные органы и точки роста [Битюцкий, 2011]. В растениях цинк не участвует в окислительно-восстановительных реакциях, поскольку не меняет степень окисления, но входит в состав более тридцати ферментов, включая фосфатазы, карбоангидразы, РНК-полимеразы и др. Цинк компонент многих, если не всех, дегидрогеназ. Вхождение цинка в состав фермента карбоангидразы определяет его влияние на процесс фотосинтеза. Цинк также конститутивная часть и других ферментов, участвующих в фотосинтезе [Brown et al., 1993]. Цинк связан с метаболизмом ауксинов: в условиях дефицита цинка в тканях растений снижается уровень индолилуксусной кислоты. Характерный признак для всех растений, страдающих от недостатка цинка – это задержка роста, почти полное прекращение роста междоузлий. Внесение цинка повышает содержание ауксинов и заметно сказывается на темпах роста растений [Школьник и др., 1967]. Важной физиологической ролью цинка является влияние на развитие конуса нарастания, рост и развитие вегетативных органов: колоса с колосками и цветками [Серегина и др., 2004]. При дефиците цинка возрастает

проницаемость мембран, что свидетельствует о роли этого элемента в структуре мембран, в поддержании их интеграции. При недостатке цинка наблюдается нарушение регуляции транспорта ионов через клеточные мембраны. Цинк влияет на белковый синтез, на активность РНКазы. Обнаружены белки, содержащие цинк и участвующие в репликации ДНК и транскрипции. Цинк входит в состав одного из факторов регуляции транскрипции в соединении с остатками гистидина и цистеина («цинковые пальцы») [Никитишен, 2012].

Подвижность цинка в растениях не очень велика, этот элемент слабо подвержен повторному использованию: закончившие свой рост листья удерживают цинк даже в случае наступления сильной недостаточности. Значительная реутилизация цинка старых листьев происходит лишь в процессе их отмирания [Школьник и др., 1967]. Поступление цинка в растение наблюдается в течение всего периода их роста и развития. Под действием цинка меняется накопление фосфора корнями, замедляется его транспорт в надземные органы растения. Недостаток цинка снижает скорость превращения неорганических фосфатов в органические формы. Цинк принимает участие и в азотном обмене. При недостатке цинка нарушается синтез белка, происходит накопление нитратов, амидов и аминокислот [Школьник, 1974; Битюцкий, 2011]. Предпосевная обработка семян цинком значительно усиливает положительное действие высокого уровня азотного питания, что выражается в достоверном возрастании урожайности яровой пшеницы [Серегина и др., 2004]

Участие цинка в основных биохимических процессах определяет его влияние на адаптационную способность растений. В ряде работ показано, что цинк способствует стабилизации дыхания при резкой смене температур, тем самым положительно влияя как на жаростойкость, так и на морозоустойчивость растений [Петинов, 1963; Хисамутдинова, 1970].

Чувствительность отдельных групп сельскохозяйственных культур к недостатку цинка неодинакова. Наиболее высокую потребность в этом

элемента испытывают кукуруза, лен и фасоль. Зерновые злаки (овес, рожь, пшеница, ячмень) нечувствительны к недостатку цинка, а картофель, сахарная свекла, клевер и люцерна занимают в этом отношении промежуточное положение [Никитишен, 2012]. Исследования по накоплению цинка в различных органах картофельного растения показали, что в фазе всходов в листьях содержание цинка в зависимости от сорта составляло 1.5-2.0 мг % [Бардышев, 1984]. В дальнейшем наблюдалось его повышение до самой уборки (до 2.18-2.96 мг %) при значительном накоплении к фазе бутонизации (2.51-4.62 мг %) и резком уменьшении его во время цветения (1.60-2.24 мг %). По-видимому, значительная часть цинка в этот период перемещалась в цветки и молодые клубни. Содержание цинка в стеблях колебалось от 2.70-3.24 мг % в фазу всходов до 3.51-5.13 мг % к моменту уборки. При этом в процессе вегетации растений наблюдалось заметное повышение его к фазе бутонизации и снижение к фазе цветения. В молодых клубнях происходило накопление цинка от 0.64-0.87 мг % в фазу цветения до 1.43-2.07 мг % во время уборки [Бардышев, 1984]. По другим данным поступление цинка во все органы картофельного растения равномерно нарастает до самой уборки урожая [Терентьева, 1967]. В стеблях к моменту уборки содержание цинка было наибольшим (60 мг/кг), в корнях и листьях – несколько меньше (35-38 мг/кг), а в клубнях еще меньше (22 мг/кг).

**МОЛИБДЕН.** Молибден поступает в растения в виде аниона  $\text{MoO}_4^{2-}$ . Содержание молибдена в растениях составляет 0.0005-0.002% (менее 1 мг/кг сухой массы). Если в тканях растений концентрации молибдена составляют 0.03–0.15 мг/кг сухой массы, то он содержится в необходимых для нормальной жизнедеятельности количествах; только для некоторых бобовых культур его требуется больше [Якушкина, 2004; Кабата-Пендиас, 1989]. Молибден входит в состав более двадцати ферментов, выполняя при этом не только каталитическую, но и структурную функцию [Sigel, 2002]. Молибден вместе с железом входит в состав активного центра ферментного комплекса нитрогеназы в виде Mo-Fe-белок и участвует в фиксации азота атмосферы

различными микроорганизмами. При недостатке молибдена происходят заметные изменения в азотном обмене растений – наблюдается уменьшение синтеза белка при одновременном падении содержания аминокислот и амидов [Битюцкий, 2011; Никитишен, 2012]. Нарушения в азотном обмене особенно проявляются на фоне питания растений нитратами. Это связано с тем, что молибден входит в активный центр фермента, восстанавливающего нитраты до нитритов – нитратредуктазы. Нитратредуктаза – это флавопротеид, простетической группой которого является флавинадениндинуклеотид (ФАД). При восстановлении нитратов молибден действует как переносчик электронов от ФАД к нитрату, при этом  $\text{NO}_3^-$  переходит в  $\text{NO}_2^-$ , а  $\text{Mo}^{5+}$  – в  $\text{Mo}^{6+}$  [Ягодин, 1989]. Образование нитратредуктазы является одним из немногих примеров адаптивного синтеза ферментов в растительном организме. Этот фермент образуется, когда в среде имеются нитраты и молибден. Активность нитратредуктазы возрастает в десять раз и более при питании растений нитратами по сравнению с аммонием, причем появление фермента происходит уже через 1-3 ч после внесения в среду нитратов. Молибден участвует в азотном обмене не только благодаря присутствию в нитратредуктазе и нитрогеназе. Под влиянием молибдена в клубеньках бобовых культур усиливается активность дегидрогеназ – ферментов, обеспечивающих непрерывный приток водорода, который необходим для связывания азота атмосферы [Школьник, 1974]. По-видимому, молибден обладает и другими функциями, так как необходим растению и в условиях достаточного уровня аммонийного питания. При недостатке молибдена резко падает содержание аскорбиновой кислоты. При отсутствии молибдена наблюдаются нарушения в фосфорном обмене растений. Со способностью молибдена к комплексообразованию связано влияние этого элемента на стабилизацию структуры нуклеиновых кислот [Якушкина, 2004].

Содержание молибдена в растениях разных семейств не одинаково. Наибольшее количество отмечено у бобовых (0.5-20.0 мг/кг сухого

вещества), а злаки содержат всего 0.2-1.0 мг/кг. Нижним пределом содержания молибдена в растениях для большинства видов считается 0.1 мг/кг сухого вещества, для бобовых – 0.4 мг/кг. Ниже этих величин возможна недостаточность молибдена [Ягодин, 1989]. Для картофеля оптимальным содержанием молибдена в листьях в фазу цветения считается значение в интервале 2.0-2.6 мг/кг, к моменту уборки этот показатель снижается до 0.30-0.96 мг/кг, в клубнях в фазу полной спелости содержание молибдена составляет 0.18-0.24 мг/кг [Церлинг, 1990].

Молибден локализуется в молодых растущих органах, сосредотачиваясь в основном в верхней части растения [Власюк, 1969; Даутова 1971]. Листья содержат его больше, чем стебли и корни, в больших количествах молибден аккумулируется в клубеньках бобовых растений. По мере развития растений количество молибдена в листьях, особенно верхних, увеличивается, в фазе же плодообразования в них происходит снижение содержания молибдена, что, по-видимому, объясняется его оттоком в репродуктивные органы [Даутова, 1971; Никитишен, 2012].

**СЕЛЕН.** Селен был открыт в 1817 году, но жизненно важным для человека этот элемент был признан лишь в 1973 году. В последние два десятилетия в мире резко возрос интерес к селену, накапливается все больше экспериментального материала подтверждающего, что селен способен не только повышать общую сопротивляемость организма человека к действию биопатогенов, но также оказывает протекторный эффект при некоторых видах онкологических заболеваний и даже при иммунодефиците [Вапиров, 2000]. Но более всего он знаменит как «микроэлемент долголетия», поскольку не только предохраняет клеточные мембраны от повреждения агрессивными формами кислорода, но и повышает антиокислительный потенциал витамина Е. Хотя следует признать, что пока механизм действия селена в животном организме изучен недостаточно [Дорохов, 2007].

Недостаток поступления селена в организм человека и животных вызывает ряд нарушений: замедление роста, потерю массы тела, нарушение

репродуктивной функции, при дефиците селена развивается экссудативный диатез, атрофия поджелудочной железы, поражение сердца. Введение в рацион питания селена предупреждает эти процессы. В то же время избыточное поглощение селена приводит к хроническим отравлениям [Вапиров, 2000]. Об избытке селена много говорят врачи, занимающиеся лечением профессиональных заболеваний. Он встречается у рабочих в шахтах, где есть природные пласты селеновых руд. В последнее время избыток селена в организме человека – это результат бесконтрольного приема селеносодержащих препаратов [Levander, 1986; «Селен...», 1989].

Физиологическая роль селена в растениях окончательно не выяснена, хотя сейчас во многих развитых странах проводятся обширные исследования по изучению закономерностей накопления селена в растениях и роли этого элемента в их метаболизме. Если для животных и человека однозначно доказана необходимость в селене, так как он входит в ряд важных ферментов, таких как глутатионпероксидаза [Mikkelsen et al., 1989; Van Campen, 1991], селенфосфататсинтетаза [Lacourciere, Stadtman, 2001], то для высших растений селен – полезный, частично эссенциальный элемент [Pais, 1992; Marschner, 1997]. К аналогичному выводу о роли селена пришли и другие исследователи: высшие растения большей частью не нуждаются в селене для завершения своего жизненного цикла и не способны противостоять токсическому действию этого элемента [Novoselov et al., 2002]. Однако полностью исключить биологическую необходимость селена для высших растений пока не представляется возможным, так как известна способность этих организмов поглощать, помимо почвенного селена, селен из воздушного пула, например, в виде диметилселена, который активно поглощается листьями и транспортируется к корням: около 2% селена растение может поглощать из атмосферы [Шеуджен, 2013].

Тем не менее, имеются данные о положительном влиянии селена на рост растений. В условиях вегетационных опытов в почвенной культуре выявлено значительное повышение урожая конских бобов, проса и горчицы

под влиянием селена [Бобко, Шендерикова, 1945]. Внесение селена в небольших количествах (0.1 мг/л) стимулировал рост салата-латука, при этом активировались защитные механизмы в условиях окислительного стресса. Антиоксидантный эффект селена, вносимого в низких концентрациях, также обнаружен в опытах с райграсом. При высоких концентрациях селен, напротив, действовал как вещество, усиливающее окислительные процессы в растениях [Битюцкий, 2011]. В опытах с соей селен стимулировал рост стареющих растений и увеличение в их листьях хлорофилла [Djanaguiraman et al., 2005].

В растениях селен входит в состав разнообразных органических соединений, включая селеноаминокислоты (селеноцистеин, селенометионин) и селенобелки [Broun, 1982; Торшин и др., 1996а]. Содержание селена в растениях зависит от типа почвы, величины рН, окислительно-восстановительного потенциала, запасов селена в почвах, количества осадков, температуры и от фазы развития самого растения. Среди перечисленных факторов основным считается кислотность почвы. Обычное среднее содержание селена в растениях на щелочных почвах составляет 0.01-10.0 мг/кг, на кислых почвах определяется от «следов» до 0.2 мг/кг [Шеуджен, 2003].

По способности ассимилировать и аккумулировать селен покрытосеменные растения делят на три группы: неаккумуляторы, индикаторы и аккумуляторы [Ковальский, 1974; White et al., 2005]. Большинство растений (в т.ч. все сельскохозяйственные культуры) относится к группе неаккумуляторов селена, они не способны к нормальному росту при концентрациях селена в тканях, превышающих 10-100 мг/кг. Минимальное содержание приближается к 0.05 мг/кг, ниже которого отмечается дефицит селена. [Ковальский, 1974; Битюцкий, 2011]. Максимальное количество селена содержится в растениях зерновых культур (1-30 мг/кг), меньше его в корне- и клубнеплодах (0.3-1.2 мг/кг, в т.ч. в картофеле – 0.2-0.9 мг/кг) [Шеуджен, 2013].

В биохимическом отношении поведение селена в растениях во многом сходно с поведением серы. Селен может замещать серу в аминокислотах, а также в некоторых биологических процессах [Кабата-Пендиас, 1989]. Выявлен антагонизм между селенатом и сульфатом при поглощении их корнями растений. Предполагается, что причина токсического действия селена на растения – его вмешательство в метаболизм серы [Никитишен, 2012].

Таким образом, если говорить об использовании селеносодержащих удобрений в сельском хозяйстве, необходимо учитывать несколько моментов. С одной стороны, большинство почв России, а, следовательно, и выращенный на них урожай беден селеном, что ставит задачу обогащения сельскохозяйственной продукции этим важным элементом [Трошин и др., 1996а]. С другой стороны, необходимо избегать избыточного накопления селена в конечном урожае. Кроме того, нужно учитывать влияние селена на серное питание, и как следствие, на продуктивность и качество сельскохозяйственных культур.

#### **1.4.2. ВЛИЯНИЕ ЦИНКА, МОЛИБДЕНА И СЕЛЕНА НА УРОЖАЙ И КАЧЕСТВО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР**

**ЦИНК.** Непосредственное участие цинка в наиболее важных физиологических процессах в растениях, его влияние на обмен веществ и устойчивость к неблагоприятным факторам окружающей среды определяет большой интерес исследователей к этому элементу. К настоящему моменту накоплен достаточно большой объем информации о влиянии цинковых удобрений на урожай и качество различных сельскохозяйственных культур, в т. ч. и картофеля [Дианова, 1999; Ковалева, 1999; Поспелова, 2001; Склярова, 2008; Аристархов, 2010 и др.]. При этом важная роль отводится взаимодействию цинка с макроэлементами, причем процесс этот двунаправленный: макроэлементы усиливают поглощение растениями цинка, и обратно, усиление цинкового питания оказывает положительное

влияние на потребление растениями азота, фосфора, калия, обеспечивая повышение продуктивности растений [Никитишен, 2012].

Взаимное влияние цинка и фосфора на процесс поглощения и утилизации их растениями предопределяет необходимость их сбалансированного внесения. Дефицит цинка нарушает фосфорное питание растений, в то же время, при внесении избытка фосфорных удобрений подвижность цинка снижается, и коэффициент использования его из почвы резко уменьшается. Для кукурузы было показано, что на фоне сбалансированного азотно-фосфорного минерального питания при использовании цинка в дозе 18 кг/га в благоприятных метеоусловиях доля урожайности зерна за счет применения цинковых удобрений составляет 20.1-42.6 % [Склярова, 2008]. Аналогичные результаты были получены на яровой пшенице. Дополнительные прибавки зерна яровой пшеницы от цинка на фонах фосфорных удобрений (P30, P60, P90) в благоприятные годы колебались от 0.21 до 0.28 т/га (12.8-17.0 %), а в неблагоприятные – от 0.19 до 0.25 т/га (15.2-20.0%) [Поспелова, 2001].

Участие цинка в азотном обмене определяет его влияние на белковые показатели качества продукции. Для яровой пшеницы было показано влияние цинка на клейковину зерна: при увеличении содержания цинка в почве количество клейковины повышается до 36-39% [Клевлина, 2010]. Положительное влияние цинка на содержание клейковины установлено и для озимой пшеницы [Самотоенко, 2011]. Аналогичные результаты приводятся и в работе другого автора [Аристархов, 2010]. Прибавка урожайность зерна озимой пшеницы за счет цинкового удобрения составила от 1.0 до 5.6 ц/га. Содержание белка в зерне при использовании цинка увеличивалось на 0.4-2.4%, клейковины – на 0.5–3.4%.

Цинк оказывает влияние и на адаптационную способность растений, их устойчивость к засухе. Отмечено повышение продуктивности яровой пшеницы под действием обработки семян цинком в условиях засухи, за счет сохранения ассимиляционной поверхности листьев, снижения сброса

цветковых зачатков и активизации ростовых функций в репарационный период [Серегина, 2008a]. Кроме того, цинк способствовал более продуктивному использованию азота почвы и удобрений.

Известно, что при дефиците цинка в растениях накапливаются редуцирующие сахара, и уменьшается содержание сахарозы и крахмала, увеличивается количество органических кислот и небелковых соединений азота – свободных аминокислот и амидов [Третьяков и др., 2005]. Поэтому естественно предположить, что применение цинковых удобрений будет влиять на основной показатель качества картофеля – содержание крахмала.

В опытах с картофелем показано, что внесение в почву цинка усиливает поступление в растения азота, калия, кремния, марганца и молибдена. Обработка клубней картофеля перед посадкой раствором сернокислого цинка в концентрации 0.05% обеспечивает повышение урожая на 36 ц/га и крахмала – на 6,6 ц/га по сравнению с контролем, а также содержание белка до 2.08 % при 1.65% в контроле [Горелкин, 1962]. Отзывчивость картофеля на внесение цинковых удобрений подтверждена и в других работах: прибавка урожая в среднем за три года составила 17 % [Томаровский, 1999]; внесение цинковых удобрений дало прибавку урожая клубней на 2.1-6.3 т/га [Адам, 2005].

На урожайность картофеля влияет способ применения цинксодержащих удобрений: внесение в почву дает прибавку 6-38 ц/га (1.6-10.3%) по сравнению с контролем, обработка клубней – 3 ц/га (5.4%), опрыскивание растений – 5 ц/га (6.5 %). Применение цинка всеми способами оказывает положительное влияние на синтез сырого протеина и белка. Однако наиболее благоприятное влияние на эти показатели оказывает внесение цинка в почву. В этом случае содержание сырого протеина увеличивается на 15-20%, а белка – на 9.8–10.4%. По влиянию микроудобрений и способа их внесения на содержание витамина С в клубнях картофеля не установлено четкой зависимости [Володько, 1988]. Необходимо отметить, что как азотное, так и полное минеральное удобрение

статистически достоверно увеличивают поглощение цинка растениями картофеля [Бардышев, 1984; Костин, 2001].

**МОЛИБДЕН.** Известна исключительно высокая эффективность применения молибдена под бобовые культуры, особенно на кислых почвах [Школьник, 1974; Пейве, 1980; Петербургский, 1972]. Однако не только бобовые культуры хорошо отзываются на внесение молибдена. Применение молибденовых удобрений способствовало повышению урожая гречихи на 18-25 %, кормовой свеклы – на 27 %, зерновых культур – на 6–73 %, кукурузы на силос – на 5–30 % [Айзупиет, 1969].

Молибденовые удобрения оказывали значительное влияние на увеличение урожайности и качества зерна. При внесении молибдена в почву прибавка урожайности зерна яровой пшеницы возрастала до 1.4 ц/га, содержание в нем белка и клейковины увеличивалось на 1.0 % [Аристархов, 2010]. Молибденовые микроудобрения при основном внесении на дерново-подзолистых почвах повышали урожайность зеленой массы кукурузы на 34-175 ц/га, а содержание в ней белка – на 0.9-2.7%. Эффективность молибдена зависела от способа применения этого микроэлемента, а также содержания в почве подвижного молибдена [Аристархов, 2010].

Положительный эффект молибдена на величину и качество урожая овощных культур обусловлен не только прямым действием, но и влиянием на азотное питание растений, в частности, лучше усваивается азот из почвы и удобрений [Ягодин, 1989]. Применение молибдена на почвах с недостаточным его содержанием обеспечивает наряду с ростом урожая более полное включение азота в состав белка, что ограничивает опасность получения избытка нитратов [Ягодин, 1989].

**СЕЛЕН.** Селен повышает устойчивость растений к условиям водного дефицита, засоления и загрязнения почвы солями тяжелых металлов [Серегина, 2008b]. Внесение селена под яровую пшеницу и фасоль не оказало влияния на их продуктивность, но положительно сказалось на содержании белка в зерне. [Родионова, 2001]. Установлено стимулирующее действие

селена на массу колосьев и зерна ярового ячменя в условиях высокой обеспеченности элементами минерального питания, причем применение повышенных доз селена вело к более выраженному положительному эффекту: масса зерна повышается на 39% [Долгодворова, 2012]. Некорневое применение селенсодержащего удобрения в фазу кущения ярового ячменя увеличивало вегетативную массу растений, массу зерна в учетном снопе и массу 1000 зерен. Эффективность действия селенсодержащих удобрений зависит от уровня обеспеченности почвы основными элементами минерального питания [Долгодворова, 2012].

Предпосевная обработка семян раствором селенита натрия повышала урожайность зерна яровой пшеницы (прибавка 8.7–12.6 %) и улучшала его качество за счет увеличения содержания сырого протеина и фосфора [Шубина, 2013]. Положительное действие селена сильнее проявлялось в неблагоприятных по влагообеспеченности условиях. Обработка растений селенитом натрия обогащает зерно пшеницы селеном в 4.7-12.2 раза в зависимости от способа обработки [Шубина, 2013]. Данные о возможности обогащения селеном зерна пшеницы, выращиваемой на почвах с недостаточным содержанием селена и в условиях недостаточного увлажнения представлены и в другом исследовании [Кузнецов, 2004].

Применение селенового удобрения положительно сказывается на продуктивности растений риса. При этом степень воздействия зависит от способа его использования, максимальная прибавка урожайности получена при обработке семян (4.1 ц/га) [Денисенко, 2008]. Отмечено, что селеновое удобрение оказывает влияние на технологические и биохимические показатели качества зерна риса: повышается содержание белка на 0.2-0.4 % и амилозы – 0.7-1.1 %; выход крупы увеличивается на 1.5-2.5 %, содержание целого ядра в крупе – 0.4-0.9 %, стекловидность возрастает на 1.0-4.0 % [Денисенко, 2008].

Установлено, что воздействие низких доз селена на козлятник восточный вызывает увеличение его адаптивного и продуктивного

потенциала, повышает жизнестойкость растений козлятника на ранних этапах развития в условиях водного дефицита, засоленности почвы, гипертермии и гипоксии [Вихрева, 2001]. Показано, что повышение стресс-резистентности обеспечивается способностью селена увеличивать антиоксидантный потенциал растений, усиливать протеолиз и интенсифицировать накопление в тканях специальных защитных веществ. Установлено, что ростостимулирующий эффект селена в отношении козлятника восточного вызван, помимо прочих причин, позитивным воздействием микроэлемента на интенсивность фотосинтеза и симбиотическую деятельность растений, а при удобрении селеном почвы обусловлен и сильным увеличением ее общей биологической активности [Вихрева, 2001]. Аналогичные результаты были получены и для картофеля [Seppänen, 2003]. Для картофеля также показано положительное влияние селена на урожайность клубней: совместное применение полного минерального и селенсодержащего удобрений повысило урожайность на 3.7-5.7 т/га [Дорохов, 2005].

#### **1.4.3. ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПИТАНИЯ РАСТЕНИЙ ЦИНКОМ, МОЛИБДЕНОМ И СЕЛЕНОМ**

Недостаток микроэлементов у растений вызывает разнообразные функциональные нарушения. Причины возникновения этого дефицита обусловлены как свойствами почвы, степенью обеспеченности их подвижными биологически доступными формами микроэлементов, так и физиологическими факторами, связанными с особенностями питания растений [Битюцкий, 2011]. При диагностике питания растений микроэлементами необходим комплексный подход. Во-первых, агрохимический анализ почвы с целью определить количество в ней доступных форм элементов питания; во-вторых, анализ растений в течение вегетации и сравнение полученных результатов с оптимальными значениями

содержания элементов, установленных для каждого вида растений и разных фаз их развития; и, в-третьих, визуальная диагностика.

**ЦИНК.** Содержание цинка в поверхностных слоях почв разных типов изменяется в пределах 17-125 мг/кг [Кабата-Пендиас, 1989]. Наиболее высокое валовое содержание цинка в почвах РФ выявлено в тундровых (53-76 мг/кг) и черноземных (24-90 мг/кг), наиболее низкое – в дерново-подзолистых (20-67 мг/кг). Недостаток цинка чаще всего проявляется на нейтральных и слабощелочных карбонатных почвах, в кислых почвах цинк более подвижен и доступен растениям [Ягодин, 1989]. Содержание валовых форм цинка сильно зависит от гранулометрического состава и в меньшей степени – от кислотности почв. Песчаные почвы содержат цинка на 40% меньше, чем глинистые с  $pH_{\text{сол}} < 5.5$ . В свою очередь глинистые почвы с  $pH_{\text{сол}} < 5.5$  содержат цинка на 10%, меньше, чем глинистые почвы с  $pH_{\text{сол}} > 5.5$  [Меленцова, 2007].

В работе Панасина [2000] приводится следующая градация обеспеченности почв по содержанию цинка: низкая обеспеченность –  $< 2$  кг/га, средняя обеспеченность – 2-4 кг/га, высокая обеспеченность –  $> 4$  кг/га. Оптимальная норма внесения цинковых удобрений на почвах с низкой обеспеченностью цинком – 8 кг/га (в виде сульфата цинка), а на среднеобеспеченных – 2 кг/га. При этом урожай ячменя повышается на 8.8-15.6%. На почвах с достаточным запасом цинка применять микроудобрения не рекомендуется. В ряде случаев дополнительное внесение микроудобрений приводит к снижению урожая ячменя. Влияние цинковых удобрений на урожай кукурузы было существенным на почвах с запасом микроэлемента ниже 4 кг/га [Панасин, 2000]. При этом следует учитывать содержание в почве фосфора. Так, на почвах с высоким содержанием подвижных фосфатов, где поступление в растения цинка блокируется фосфором, необходимо дополнительно вносить цинковые удобрения [Курганова, 2004].

Характерные внешние признаки недостатка цинка – заторможенный рост, короткие междоузлия, маленькая поверхность листа. Эти симптомы

могут комбинироваться с признаками хлороза. У двудольных культур симптомы цинкового дефицита сходны с признаками вирусной инфекции. У картофеля на верхних и средних, а иногда и на нижних листьях появляется серовато-бурый, бронзовый оттенок. Листья становятся узкими с завернутыми вовнутрь краями. Клубни мелкие. Оптимальное содержание цинка в листьях картофеля в фазу цветения 39-90 мг/кг сухого вещества, в клубнях в фазу полной спелости – 13-20 мг/кг [Церлинг, 1990].

Наибольший эффект дает внесение микроудобрений в почву. При этом наблюдается длительное положительное последствие микроудобрений. Цинк в последствии эффективен в течение 4-5 лет. Однако использование данного способа внесения ограничивается значительным расходом дорогостоящих солей микроэлементов и несовершенства технологии их равномерного внесения. Более предпочтителен прием предпосевного смачивания семян растворами солей микроэлементов. Эффективным способом внесения цинковых удобрений является предпосевное смачивание семян раствором сульфата цинка. Данный прием позволяет повысить урожай зерна ячменя на почвах, бедных микроэлементами, на 3.9-11.2 %, а на среднеобеспеченных – на 3.4-7.3 % [Панасин, 2000]. Также было показано, что обработка семян кукурузы цинковыми удобрениями (опудривание) оказалось более эффективным методом, чем опрыскивание вегетирующих растений: прибавки урожайности зерна составляют 18.1-31.6%, а при опрыскивании 14.4-21.7% [Склярова, 2008].

**МОЛИБДЕН.** Содержание валового молибдена в почве колеблется от 0.2 до 8.3 мг/кг, а подвижных форм – от 0.10 до 0.27 мг/кг [Кабата-Пендиас, 1989; Ягодин, 1989]. Наиболее бедны молибденом почвы легкого гранулометрического состава с низким содержанием гумуса. Наименьшее содержание подвижного молибдена отмечено в дерново-подзолистых, песчаных почвах (0.05 мг/кг). Более высокое содержание валовых и подвижных форм молибдена в черноземных почвах указывает на его биологическую аккумуляцию. Количество водорастворимых форм

молибдена увеличивается при снижении кислотности почвенного раствора, но при pH 7.5-8.0 начинает снижаться вследствие увеличения количества карбонатов в почве. Молибденовая недостаточность может проявляться на дерново-подзолистых, серых лесных, осушенных кислых торфяниках и черноземных почвах [Ягодин, 1989].

В подзолистых почвах среднее содержание этого микроэлемента составляет 2.1 мг/кг, с вариациями от 1.0 до 4.0; в серых лесных, соответственно – 2.5 и 1.7–4.0 мг/кг; каштановых – 1.1 и 0.2–2.0 мг/кг; горных – 4.0 и 0.5–12.0 мг/кг [Ковда и др., 1959; Виноградов, 1962]. В Центрально-Черноземной области валовое содержание молибдена в пахотном слое черноземов варьирует от 1.6 до 2.5, со средним значением 2 мг/кг [Протасова, Щербаков, 2003]. Я.В. Пейве и Г.Я. Ринькисом [цит. по Ягодин, 1989] предложена следующая градация обеспеченности почвы подвижными формами молибдена (в оксалатной вытяжке): очень бедная – < 0.05 мг/кг, бедная – 0.05-0.15 мг/кг, средняя – 0.2-0.25, богатая – 0.3-0.5 мг/кг, очень богатая – > 0.5 мг/кг. Высокая эффективность молибденовых удобрений при достаточном уровне обеспеченности другими элементами питания достигается при содержании молибдена в почвах Нечерноземной зоны менее 0.15 мг/кг, в Черноземной – менее 0.15-0.30 мг/кг, на каштановых и черноземных почвах – менее 0.20-0.55 мг/кг [Ягодин, 1989].

Симптомы дефицита обычно появляются у растений, произрастающих на кислых минеральных почвах с высоким содержанием гидроокислов железа и марганца. Обострению дефицита способствует содержание в почвенном растворе сульфатных анионов, конкурирующих с ионами молибдата, в результате поглощение последних растениями уменьшается [Битюцкий, 2011]. Недостаток молибдена в первую очередь негативно отражается на метаболизме азота и соответственно на росте растений. В листьях регистрируют низкую активность нитратредуктазы и повышенный уровень содержания нитратов [Jones et al., 1976; Agarwala et al., 1978; Unkles et al, 2004]. Внешние признаки недостатка молибдена у растений имеют

много общего с симптомами дефицита азота. У многих растений симптомы Мо-дефицита начинаются с образования бледных пятен между жилками на молодых листьях. В пораженных участках тканей появляются многочисленные перфорации. У картофеля пятнистость сопровождается закручиванием листовых пластинок [Битюцкий, 2011]. Критический уровень концентрации молибдена в растениях варьирует в зависимости от их вида и источников азотного питания в диапазоне 0.1-1 мг/кг сухого веса. Для картофеля оптимальными считаются следующие значения: листья в фазу цветения – 2.0-2.6 мг/кг, ботва в фазу полной спелости – 0.3-0.96 мг/кг, клубни при уборке – 0.18-0.24 мг/кг [Церлинг, 1990].

Из способов внесения молибденовых удобрений наиболее экономически выгодна предпосевная обработка семян. Возможно опрыскивание растений в период вегетации раствором молибденовокислого аммония. Внесение молибденовых солей в почву дает наибольший эффект, при этом наблюдается длительное положительное последствие микроудобрений (в течение 3-8 лет). Однако этот способ ограничивает высокая стоимость солей микроэлемента [Панасин, 2000]. Перспективной формой удобрений является молибденизированный суперфосфат, который вносят в рядки при посадке [Минеев, 1990]. При возделывании картофеля на серой лесной почве с недостаточной обеспеченностью микроэлементом следует применять удобрения в дозе 1 кг д. в. /га [Костин, 2001].

**СЕЛЕН.** Среднее содержание селена в поверхностном слое почв земного шара составляет 0.4 мг/кг [Виноградов, 1957], значительно варьируя в зависимости от типа почвы и территориального расположения. На подзолистых и песчаных почвах пределы колебаний составляют 0.05 до 0.32 мг/кг, суглинисты и глинисты – 0.18-0.6 мг/кг, на черноземах – 0.32-0.37 мг/кг [Кабата-Пендиас, 1989].

Биогеохимический мониторинг содержания селена в почвах России показал, что обширные территории в Нечерноземной зоне, Центральной и Восточной Сибири, Удмуртии характеризуются разной степенью недостатка

селена [Ермаков, Ковальский, 1974; Ермаков, 1978; Конова, 1993]. В продукции растениеводства, выращенной на таких почвах, концентрация селена зачастую не превышает 0.02 мг/кг [Битюцкий, 2011]. Провинции острого дефицита селена установлены в Забайкалье, а отдельные очаги недостатка выявлены в Ярославской области [Ермаков, Ковальский, 1974] и в лесостепной зоне [Торшин и др., 1995]. Считается, что значительные территории Российской Федерации характеризуется низким уровнем содержания селена в почве [Ермаков, 1978; Конова, 1993]. Однако следует помнить, что избыток селена в почве, и как следствие, в растениях, более опасен, чем его недостаток. При концентрации селена в почве больше 0.5 мг/кг продукция растениеводства становится токсична для животных [Dhillon, 2004].

Поведение селена в почве зависит от ее физико-химических свойств. В кислых глеевых почвах и в почвах с высоким содержанием органического вещества преобладают селениды и сульфиды селена, которые малоподвижны и поэтому труднодоступны для растений. В хорошо дренируемых минеральных почвах, рН которых близок к нейтральному, доминируют исключительно селениты, при этом селениты щелочных металлов растворимы, а селениты железа нерастворимы и поэтому труднодоступны для растений. В щелочных и хорошо аэрируемых почвах в основном преобладают селенаты, они легко растворимы, слабо фиксируются оксидами железа и достаточно подвижны, что делает их доступными для растений [Кабата-Пендиас, 1989].

Так как селен не является обязательным элементом для питания растений, то о его дефиците можно говорить лишь в связи с отрицательным воздействием обедненных селеном растений на потребляющих их животных и человека. Хотя некоторые авторы все же определяют критический уровень содержания селена в растениях (0.05 мг/кг), ниже которого возможен дефицит этого элемента [Ковальский, 1974; Битюцкий, 2011]. В отношении селена скорее следует говорить о рисках при его избытке в растениях.

Критический уровень концентрации селена в побегах, ингибирующий рост растений, для кукурузы составляет 41 мг/кг, риса и пшеницы – 19 мг/кг [Rani et al., 2005]. Токсичный для животных уровень селена в кормах – 1-5 мг/кг сухого вещества [Miller et al., 1991].

В качестве селенсодержащих удобрений применяют хорошо растворимые в воде селенаты калия и натрия. Такие формы могут применяться самостоятельно или для модификации макроудобрений из расчета 6-16 мг/кг удобрений. Продолжительность действия селеновых удобрений может быть повышена, если использовать слабо растворимые селенаты бария или гранулированные формы селеновых удобрений. Конечная вносимая доза селена составляет в зависимости от вида растений и дозы макроудобрений от 3 до 10 г Se/га в год [Битюцкий, 2011].

## **1.5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Многочисленные исследования биологических особенностей картофеля однозначно указывают на то, что получение высоких урожаев возможно лишь при выполнении ряда условий. Для решения этой задачи необходим сравнительно высокий уровень плодородия, что подразумевает наличие в почве достаточного количества питательных элементов, обеспечение оптимального физического состояния почвы и уровня кислотности почвенного раствора. Кроме того, не меньшая роль в формировании высокого урожая принадлежит и гидротермическим условиям в период вегетации картофеля. И если на водный режим можно влиять путем использования орошения, то температурный фактор можно лишь учитывать при разработке систем удобрения.

Минеральное питание и водный обмен – взаимосвязанные и взаимовлияющие процессы. Лучшие условия питания способствуют более продуктивному использованию влаги, а достаточная обеспеченность влагой, в свою очередь, повышает отдачу от внесения удобрений. К традиционным способам воздействия на устойчивость растений к водным стрессам является

оптимизация их минерального питания. Для объективной оценки эффективности применения минеральных удобрений необходимо учитывать погодные условия (в частности, режим увлажнения) в период вегетации, которые часто имеют решающее значение.

Воздействие на минеральное питание картофеля, путем внесения в почву дополнительных доз макроэлементов – основной путь повышения продуктивности культуры. Причем помимо азота, фосфора и калия, немаловажную роль в этом играет и сера, внимание к которой зачастую недостаточно. Для достижения максимального эффекта необходимо учитывать не только абсолютные значения потребности в каждом элементе, но также обращать внимание на динамику их потребления в процессе вегетации и, самое главное, на соотношение элементов. Дефицит какого-либо элемента может снизить эффективность других, даже если они вносятся в нужном количестве и в оптимальные сроки.

К настоящему моменту накоплен достаточно большой экспериментальный материал, подтверждающий необходимость и эффективность дополнительного внесения микроэлементов при возделывании сельскохозяйственных культур. Однако необходимо расширять знания в этой области, уделяя особое внимание динамике поглощения микроэлементов в течение вегетации разными видами культур, установлению оптимальных и критических значений содержания микроэлементов в разные фазы развития растений. Кроме того, следует учитывать, что в отличие от макроэлементов для микроэлементов (в частности, для тяжелых металлов) достаточно остро стоит проблема их избыточного накопления в растениях, в концентрациях токсичных как для самих растений, так и для животных и человека их потребляющих.

Решение о необходимости внесения, выборе доз и способов применения микроудобрений должно приниматься с учетом запасов микроэлементов в почве, причем важно не валовое количество, а содержание их в подвижной форме, доступной для растений. Кроме того, следует

помнить о взаимосвязи питания растений макро- и микроэлементами. Макроэлементы способны изменять доступность растениям микроэлементов. Так, было установлено, что повышение азотного питания увеличивает поступление в растения кальция, магния, меди, марганца, цинка. С другой стороны, избыточные дозы фосфора снижают поступление в растения меди, железа, марганца и особенно цинка.

## **ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

### **2.1. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Объектом исследований являлся картофель (*Solanum tuberosum*), выращиваемый в полевом и вегетационном опытах на серой лесной почве различной степени окультуренности, залегающей на территории Ленинского района Тульской области.

#### **2.1.1. КЛИМАТ НА ТЕРРИТОРИИ ТУЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ И ГИДРОТЕРМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ 2010-2012 гг.**

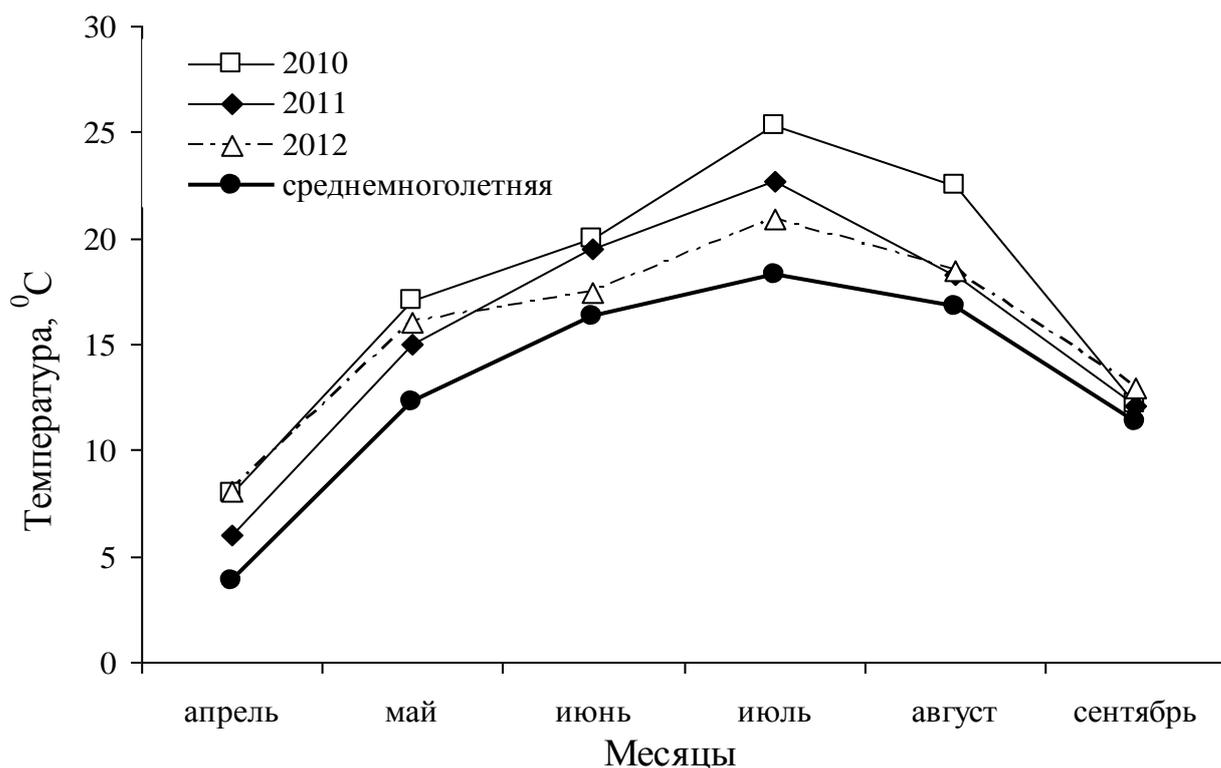
Климат Тульской области умеренно-континентальный с теплым летом, умеренно холодной зимой и ясно выраженными сезонами года. Весна короткая – продолжительность ее в большинстве лет 40-50 дней. Месяц май является самым сухим и ясным в году. Прекращение ночных заморозков приходится в среднем на конец первой декады мая. В отдельные годы бывают значительные отклонения от этой даты – иногда заморозки прекращаются в середине апреля. Нередко в первой декаде июня наблюдается возврат холодов, вызванный вхождением холодного арктического воздуха, с ночными температурами ниже 0°C.

Среднемесячная температура воздуха июля, самого теплого месяца года, колеблется от 17.5°C в северной части области до 18.5°C в юго-восточной части. В отдельные дни максимальная температура воздуха достигает 38°C. В летнее время преобладает малооблачная погода. Число пасмурных дней невелико – от 2 до 3 в месяц.

Максимум осадков приходится на летний период, но дожди в летнее время преимущественно ливневого характера, часто сопровождаемые грозами, число которых за лето достигает 20-23. Годовое количество осадков составляет 480-600 мм. За вегетационный период – с апреля по октябрь – выпадает 370-450 мм. Колебание количества осадков из года в год бывает весьма значительным.

Первые осенние заморозки обычно наблюдаются в конце сентября, но возможны колебания от конца августа до конца октября. Среднемесячная температура самого холодного месяца года, января,  $-10.5^{\circ}\text{C}$  в северо-восточной части и  $-9.5^{\circ}\text{C}$  на остальной территории области. Минимальная температура воздуха в отдельные дни достигает  $-42^{\circ}\text{C}$ , однако такие сильные морозы бывают редко, примерно один раз в 20-25 лет. Устойчивый снежный покров образуется в среднем в конце ноября и сходит в начале апреля. Высота снежного покрова к концу зимы достигает 35-50 см, средняя продолжительность его залегания 130-140 дней [Агроклиматический справочник..., 1958].

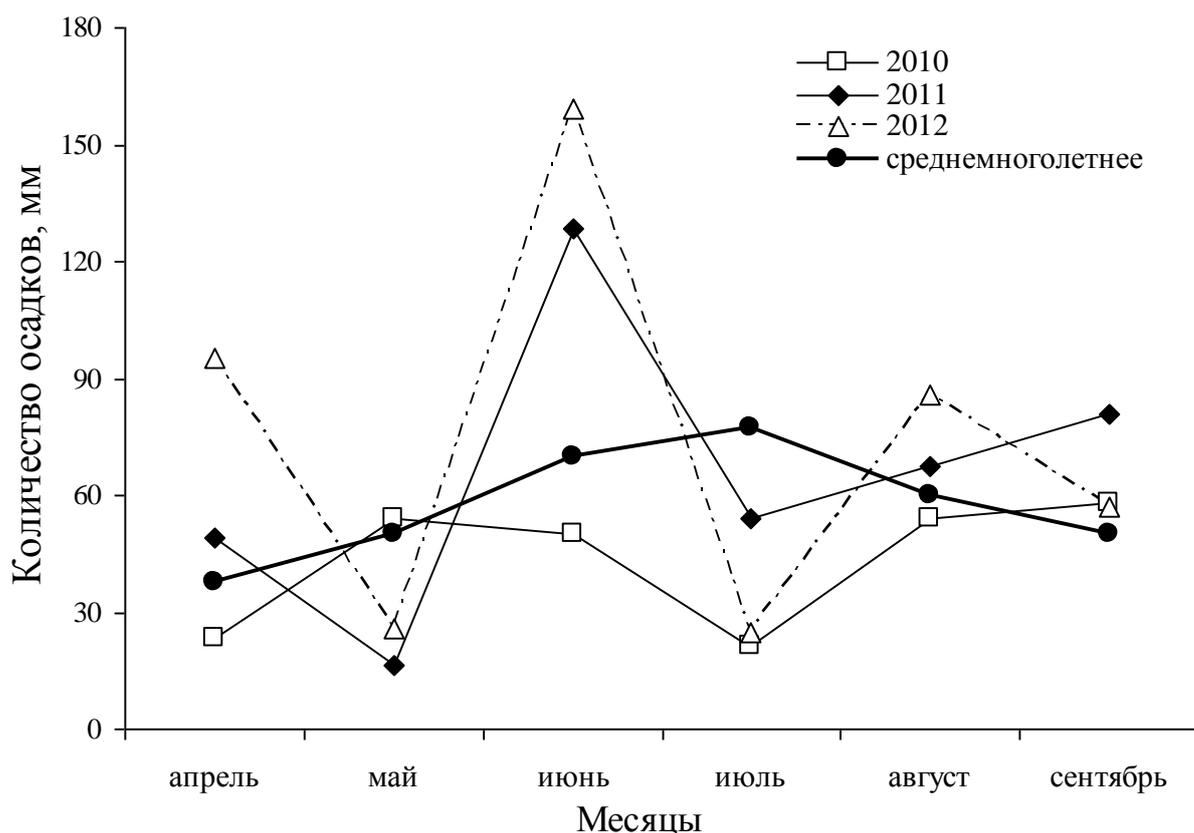
Агрометеорологические условия в годы проведения полевого эксперимента (2010-2012 гг.) были различными (рис. 4 и 5, табл.1).



**Рис. 4.** Динамика среднемесячной температуры воздуха [по данным сайта [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru)]

Условия 2010 года были аномальными для зоны по количеству осадков и температуре в летние месяцы. Растения испытывали острый дефицит влаги на фоне аномально высоких температур (максимальные значения температур

в мае достигали  $+28^{\circ}\text{C}$ , в июне –  $+34.5^{\circ}\text{C}$ , в июле –  $+38^{\circ}\text{C}$ , в августе –  $+38.8^{\circ}\text{C}$ ) небывало продолжительное время, начиная со второй декады июня и до конца второй декады августа (рис. 4). За этот период выпало всего 42 мм осадков, при норме – около 150 мм (рис. 5). На протяжении фаз всходы–цветение и цветение–полная спелость значения гидротермического коэффициента (ГТК) были стабильно ниже единицы (табл. 1). Считается, что засуха 2010 г. была беспрецедентно жесткой, обширной и продолжительной: по температурному режиму и наличию атмосферно-почвенной засухи и суховеев относится к одной из самых напряженных за последние 120 лет метеорологических наблюдений [Золотокрылин и др., 2013].



**Рис. 5.** Динамика выпадения осадков [по данным сайта [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru)]

В 2011 году погодные условия были более благоприятными. Хотя температурный фон несколько превышал среднегодовое значения,

выпавшего количества осадков было достаточно для влагообеспеченности растений.

**Таблица 1.** Значения гидротермических коэффициентов (ГТК) на протяжении вегетационных периодов по Селянинову [Селянинов, 1928]

Год	Дата	Фаза	Сумма температур выше +10°C	Количество осадков, мм	ГТК
2010	1.05-20.05	До посадки	368	23	0.6
	21.05-15.06	Посадка – всходы	444	78	1.8
	16.06-15.07	Всходы – цветение	643	11	0.2
	16.07-24.08	Цветение – полная спелость	1034	34	0.3
2011	1.05-24.05	До посадки	349	16	0.5
	25.05-21.06	Посадка – всходы	518	19	0.4
	22.06-20.07	Всходы – цветение	632	134	2.1
	21.07-6.09	Цветение – полная спелость	906	102	1.1
2012	1.05-19.05	До посадки	304	24	0.8
	20.05-18.06	Посадка – всходы	500	144	2.9
	19.07-4.07	Всходы – цветение	300	16	0.5
	5.07-11.09	Цветение – полная спелость	1263	149	1.2

В 2012 году показатели температуры были близки к среднемноголетним значениям, а количество осадков – даже выше среднего, однако их выпадение было неравномерным. Например, пику количества осадков, выпавших в июне, предшествовал период недостаточного увлажнения в мае (ГТК=0.5). Июль также характеризовался низкими значениями

гидротермического коэффициента (ГТК=0.4), а августовский пик осадков пришелся на третью декаду месяца.

Таким образом, кратковременные периоды дефицита влаги приходились на периоды критические для формирования и налива клубней картофеля, что сказалось на режиме минерального питания и продуктивности картофеля.

### **2.1.2. МОРФОГЕНЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ**

Тульская область занимает северную часть лесостепной зоны, в которой лесные массивы чередуются со степными участками. Почвенный покров области неоднороден. На почвенной карте выделено 11 разновидностей почв, но в основном преобладают серые лесные почвы (44%) и черноземы (43%), дерново-подзолистые почвы занимают около 4% площади области и распространены лишь в западной ее части.

Серые лесные почвы имеют широкое распространение в области, занимая полностью ее северную часть и небольшую часть территории на западе. Развита преимущественно на пылеватых тяжелых суглинках, а в заокской части на средних суглинках [Алифанов, 1995; Урусевская и др., 2000].

Серые лесные почвы имеют следующее строение. Сверху гумусовый горизонт различной мощности и интенсивности окрашивания (А), в зависимости от степени выраженности дернового процесса; в нижней половине горизонта интенсивной гумусовой прокраски наблюдается кремнеземистая присыпка по поверхностям граней структурных отдельностей. Структура верхней части гумусового горизонта ореховато-комковатая. Ниже идет иллювиальный горизонт (В) – бурый, плотный, постепенно переходящий в почвообразующую породу. На глубине 150-200 см иногда обнаруживаются карбонаты.

Характерной особенностью серых лесных почв является распределение кислотности по профилю почвы. Наиболее низкое показание рН обычно бывает в иллювиальном горизонте.

По окраске и по содержанию гумуса в слое 0-10 см серые лесные почвы делятся на три подтипа, образование которых обусловлено биоклиматическими условиями [Агроклиматический справочник..., 1958]:

1. Светло-серые лесные почвы обычно сильно оподзоленные. Мощность гумусового горизонта 25-30 см. Иллювиальный горизонт выражен отчетливо. Содержание гумуса у пахотных почв 2.0-2.5 %,  $pH_{\text{сол}}$  около 5.0.

2. Серые лесные почвы преимущественно сильнооподзоленные. Гумусовый горизонт мощностью от 30 до 40 см. Иллювиальный горизонт также выражен отчетливо. Содержание гумуса от 2.0 до 3.5 %.

3. Темно-серые лесные почвы обладают большей мощностью гумусового горизонта от 35 до 45 см. Содержание гумуса 3.0-4.5 %. Реакция почвенного раствора от слабокислой до нейтральной.

Темно-серые и серые лесные почвы распространены на границе с черноземами, занимающими южную часть области, а серые и светло-серые лесные почвы – на границе с дерново-подзолистыми почвами. Степень эродированности серых лесных почв достигает 8–14%. [Ахтырцев, 1979].

Серые лесные почвы на севере и на юге области отличаются между собой степенью оподзоленности, мощностью гумусового горизонта и содержанием гумуса. Если в почвенном горизонте серых лесных почв на севере Тульской области мощность гумусового горизонта составляет 17-26 см, а содержание гумуса – 1.2-1.4%, то на границе с черноземами гумусовый горизонт увеличивается до 27–36 см, а содержание гумуса до 2.3-3.8% от массы. По бонитету серые лесные почвы относятся к группе хороших почв с высокой степенью их земледельческой освоенности, достигающей 50–80% [Важенина, 1984].

### **2.1.3. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ**

#### **2.1.3.1. ПОЛЕВЫЕ ОПЫТЫ: СХЕМЫ, СРОКИ ПРОВЕДЕНИЯ И ПОРЯДОК ОТБОРА ПРОБ РАСТЕНИЙ И ПОЧВЫ**

Полевые опыты по исследованию режима минерального питания картофеля и его оптимизации с помощью удобрений проводили в производственных условиях (ООО «Максим Горький», Тульская область, Ленинский район) в 2010–2012 гг. Опытный участок в каждый год размещался на разных полях, согласно схеме севооборота, принятой в хозяйстве. На опытном участке были выполнены все агротехнические мероприятия, принятые в хозяйстве. Агротехника возделывания картофеля в хозяйстве обычная для данной зоны. Предшественник — яровой ячмень. Для посадки использовался среднеранний сорт картофеля «Rosara».

По результатам почвенно-агрохимического обследования хозяйства почва опытного участка серая лесная среднесуглинистая. Агрохимические показатели почвы перед закладкой опытов в 2010-2012 гг. были следующими: содержание гумуса – 2.2-2.6 % от массы;  $pH_{KCl}$  – 5.4-5.6; содержание минерального азота ( $N-NO_3+N-NH_4$ ) – 12.4, 9.4 и 19.4 мг/кг соответственно в 2010, 2011 и 2012 гг.; подвижного фосфора ( $P_2O_5$ ) – 233.3; 70.0 и 161.1 мг/кг; обменного калия ( $K_2O$ ) – 104.5, 118.5 и 195.3 мг/кг.

Площадь опытных делянок 120 м<sup>2</sup> (6 x 20 м), учетных – 22.5 м<sup>2</sup> (1.5 x 15 м). Повторность опыта – четырехкратная. В основу опыта положен сокращенный вариант классической схемы Жоржа Виля, позволяющий вычленить влияние каждого элемента питания на фоне двух других. Схема опыта включала следующие варианты: N0P0K0, N90P90, N90K90, P90K90, N90P90K90. В 2011 и 2012 гг. схема опыта была дополнена вариантом с внесением серы на фоне полного минерального удобрений N90P90K90S40. Данные дозы удобрений соответствуют усредненным, рекомендуемым для картофеля на дерново-подзолистых среднесуглинистых и серых лесных почвах [Анспек П.И., 1981, Справочник картофелевода, 1987, Эффективность....., 2003.].

В качестве удобрений во все годы опыта применяли аммиачную селитру (34 % N), суперфосфат двойной (42 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), хлорид калия (60% K<sub>2</sub>O), сульфат аммония (24 % S). В варианте N90P90K90S40 количество азота, внесенного с аммиачной селитрой, было уменьшено на то его количество, которое вносилось с сернокислым аммонием. Удобрения на опытных делянках вносили вразброс вручную. После чего их заделывали в почву культиватором на глубину 10–12 см во время обработки всего поля. Клубни картофеля высаживались с помощью картофелесажалки VL 20 KLZ (AMAZONE, Германия). Схема посадки 0,2 x 0,75 м.

В рамках проводимых хозяйством плановых агротехнических мероприятий по повышению плодородия почвы в 2011 г. на всем поле, в том числе и на опытных делянках, перед посадкой картофеля было внесено 200 кг/га нитрофоски с помощью разбрасывателя минеральных удобрений AMAZONE ZAM (Германия), обеспечивающего высокую степень равномерности распределения удобрений по поверхности почвы. В связи с этим, в 2011 году эффективность удобрений в полевом опыте изучена на повышенном фоне содержания азота и фосфора в почве.

Растительные пробы отбирали в разные фазы вегетации (всходы, цветение, полная спелость), срезая по три растения с каждой делянки (табл. 2).

**Таблица 2.** График посадки, уборки и отбора проб в полевом опыте

Год	Посадка	Всходы	Цветение	Полная спелость, уборка
2010	20 мая	15 июня	15 июля	24 августа
2011	24 мая	21 июня	20 июля	6 сентября
2012	19 мая	18 июня	4 июля	11 сентября

Срезанную массу объединяли в смешанные пробы, после чего высушивали до воздушно-сухого состояния и измельчали на электрической мельнице. Пробы почвы из слоя 0-20 см получали путем объединения и смешивания 12 отдельных проб, взятых по диагонали на каждой делянке. Отобранные образцы доводили до воздушно-сухого состояния на открытом

воздухе. Для расчетов принята плотность почвы 1.2 т/м<sup>3</sup> (усредненное значение для среднесуглинистых почв).

### **2.1.3.2. ВЕГЕТАЦИОННЫЕ ОПЫТЫ: СХЕМЫ, СРОКИ ПРОВЕДЕНИЯ И ПОРЯДОК ОТБОРА ПРОБ РАСТЕНИЙ И ПОЧВЫ**

Вегетационные опыты с целью определения влияния макро- и микроэлементов на состояние минерального питания картофеля проводились в 2013-2014 гг. в сетчатом вегетационном павильоне Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН. Использовали серую лесную почву, отобранную с расположенного в Тульской области поля, на котором проводились полевые опыты. Агрохимические показатели почвы: содержание гумуса – 2.4 %, рН<sub>KCl</sub> – 5.2, содержание минерального азота (N-NO<sub>3</sub>+N-NH<sub>4</sub>) – 23,5 мг/кг, подвижного фосфора (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) – 161.1 мг/кг, обменного калия (K<sub>2</sub>O) – 195.3 мг/кг Zn – 0.047 мг/кг, Mo, Se – 0 (ниже предела определения).

Схема опыта включала в себя следующие варианты: NPK, NPK+S, NPK+S+Zn, NPK+S+Mo, NPK+S+Se. Каждый вариант имел 5 повторностей.

Объем вегетационных сосудов составлял 10 литров, в которые помещали по 8 кг почвы. Макро- и микроэлементы вносили в почву до посадки картофеля в виде химически чистых солей по следующей схеме: азот – NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 150 мг действующего вещества (д.в.) /кг почвы; фосфор – KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 200 мг д.в. /кг почвы; калий – KCl 200 мг д.в. /кг почвы; сера – (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 40 мг д.в. /кг почвы; цинк – ZnSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 5 мг/кг почвы (по элементу); молибден – (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub> · 4H<sub>2</sub>O 5 мг/кг почвы (по элементу); селен – Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub> 5 мг/кг почвы (по элементу). Навески удобрений равномерно перемешивали с почвой. В каждый сосуд высаживали по одному клубню картофеля на глубину 10 см. В 2013 году клубни были высажены 21 мая, в 2014 году – 7 мая. Уборку урожая производили через 85 (2013 г.) и 77 (2014 г.) суток после посадки перед началом пожелтения и подсыхания листьев картофеля.

Растительные образцы отбирали в момент уборки урожая, срезая всю ботву, после чего высушивали до воздушно-сухого состояния и измельчали на электрической мельнице. Клубни убирали полностью для учета урожая, отбирали среднюю пробу, разрезали на мелкие части, высушивали в термостате при 60 °С и измельчали для химических анализов. Образцы почвы отбирали перед посадкой для определения исходных агрохимических показателей.

## **2.2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **2.2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АГРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ**

Определение агрохимические свойства почвы проводили в растертых до частиц <1 мм воздушно-сухих образцах. Определяли нитратный азот дисульфифеноловым методом [Аринушкина, 1970], аммонийный азот колориметрическим феноловым методом по Кудеярову [Кудеяров, 1965], подвижные формы фосфора ( $P_2O_5$ ) колориметрическим методом с применением аскорбиновой кислоты и калия ( $K_2O$ ) (на пламенном фотометре BWB-XP Perfomance Plus, BWB-Technologies) в вытяжке 0.2 н. HCl по Кирсанову [Аринушкина, 1970], органический углерод методом мокрого сжигания по Тюрину [Аринушкина, 1970],  $pH_{сол}$  потенциометрическим методом в вытяжке 1н. KCl [Аринушкина, 1970], серу (сульфаты) – турбидиметрическим методом [Минеев, 2001]. Валовое содержание микроэлементов (Zn, Mo, Se) измеряли на рентгеновском аппарате «СПЕКТРОСКАН МАКС–GV» по методике измерения массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах методом рентгенофлуоресцентного анализа (методика № 309/242 – (01.00250–2008)–2012).

### **2.2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РАСТЕНИЙ**

Озоление растительных образцов проводили смесью серной и хлорной кислот по Гинзбург [Аринушкина, 1970]. В озоленных пробах определяли

содержание азота феноловым методом по Кудеярову [Кудеяров, 1965], фосфора колориметрическим методом с применением аскорбиновой кислоты [Аринушкина, 1970] и калия на пламенном фотометре BWB-XP Performance Plus, BWB-Technologies. Все данные по содержанию и выносу фосфора и калия растениями приведены в расчете на  $P_2O_5$  и  $K_2O$ . Валовое содержание микроэлементов определяли на рентгеновском аппарате «СПЕКТРОСКАН МАКС–GV» по методике измерения массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах методом рентгенофлуоресцентного анализа (методика № 242/18–2010). Крахмал определяли антроновым методом по ГОСТу 7194-81. Потребление картофелем макро- и микроэлементов оценивали по их содержанию в процентах от массы сухого вещества и по выносу с урожаем ботвы и клубней.

### **2.2.3. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Средние значения из повторений и стандартные отклонения, регрессию, дисперсию вычисляли с помощью программы Excel. Наименьшую существенную разность средних рассчитывали по Доспехову [Доспехов, 1985], используя пакет однофакторного анализа программы Excel.

## **ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

### **3.1. ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА СОДЕРЖАНИЕ В ПОЧВЕ ДОСТУПНЫХ ФОРМ АЗОТА, ФОСФОРА, КАЛИЯ И ИХ ПОТРЕБЛЕНИЕ КАРТОФЕЛЕМ**

Уровень естественного плодородия почвы очень часто бывает недостаточным для обеспечения оптимального уровня потребления растениями питательных веществ, что обуславливает необходимость решения проблемы восполнения образующегося дефицита. Одной из важнейших задач современного земледелия является создание в почвах такого уровня содержания основных элементов питания для растений, который позволяет не только формировать высокие и устойчивые урожаи сельскохозяйственных культур, но также сохранять и даже повышать естественное плодородие почв [Кудеяров, Семенов, 2014].

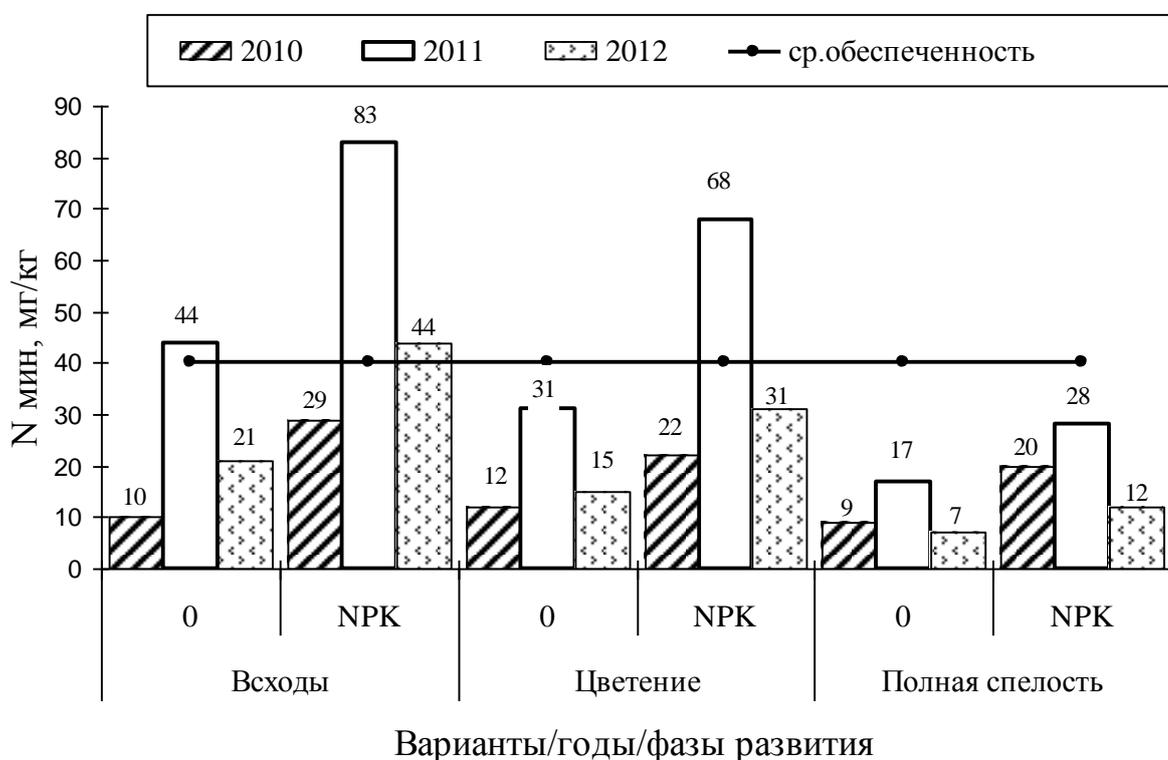
Оптимальные параметры основных показателей плодородия почвы достигаются путем применения комплекса агротехнических и агрохимических приемов. Однако в поддержании достаточно высокого уровня питания сельскохозяйственных культур макроэлементами ведущая роль принадлежит минеральным удобрениям прямого действия [Минеев, 1990]. Но сбалансированное их применение возможно только на основе достоверной информации о том, какое количество питательных веществ может усваиваться растениями из почвы без ущерба для ее плодородия и какова потребность в удобрении для достижения продуктивности заданного уровня [Никитишен, 2003].

#### **3.1.1. АЗОТ**

Существующие методы диагностики обеспеченности почвы доступным для растений азотом основаны на определении исходных запасов нитратного и аммонийного азота в корнеобитаемом слое почвы. Многочисленные экспериментальные данные, полученные как в нашей стране, так и за

рубежом подтверждают правомерность такого подхода к разработке метода диагностики азотного питания растений [Никитишен, 2003]. Выявлена тесная корреляционная связь между содержанием минерального азота в почве, величиной урожая и эффективностью азотных удобрений [Буныкина, 1975; Славина, 1976; Жерер, 1977 и др.]

Чтобы получить полное и объективное представление об обеспеченности картофеля азотом был проведен анализ почвенных образцов, отобранных в течение вегетации, на содержание в них минеральных форм азота. Судя по полученным данным обеспеченность картофеля азотом в первый и третий год опытов (2010 г. и 2012 г.) была невысокая в течение всего периода вегетации (табл. 3, рис. 6). Обеспеченность почвы на уровне выше среднего (30–50 мг/кг по Гамзикову, 2000) была отмечена только в 2012 году в фазу всходов на варианте NPK и в 2011 году до фазы цветения.



**Рис. 6.** Содержание минерального ( $N_{\text{мин}}$ ) азота в почве контроля и с полным минеральным удобрением

В целом, в 2011 году уровень содержания минерального азота в почве был значительно выше по сравнению с 2010 и 2012 гг., что было обусловлено фоновым применением нитрофоски на всем поле, включая и экспериментальный участок.

**Таблица 3.** Динамика содержания минерального (N-NO<sub>3</sub>+NH<sub>4</sub>) азота в почве под картофелем, мг/кг

Вариант опыта	Фаза вегетации картофеля		
	Всходы	Цветение	Полная спелость
2010 г.			
0	10.1±0.2	11.9±0.2	8.7±1.9
NP	37.9±6.9	29.4±0.4	24.1±9.2
NK	22.8±2.8	20.3±1.3	22.9±3.5
PK	11.7±3.1	10.7±2.8	9.4±2.9
NPK	29.4±0.0	22.1±0.4	19.5±3.9
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>9.3</b>	<b>3.6</b>	<b>12.8</b>
2011 г.			
0	44.3±2.6	31.2±0.8	17.2±7.2
NP	79.9±0.7	60.9±5.6	24.7±0.5
NK	79.0±4.3	55.0±0.6	26.7±2.0
PK	45.1±0.4	28.7±8.7	14.2±3.7
NPK	82.7±0.2	67.4±6.1	27.9±4.7
NPK+S	85.0±0.8	60.9±0.1	37.2±11.9
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>5.2</b>	<b>12.0</b>	<b>15.3 (р/н)</b>
2012 г.			
0	21.1±4.1	15.3±1.6	7.1±0.9
NP	39.7±5.7	28.9±4.8	11.5±2.2
NK	37.0±1.1	27.4±6.4	14.7±5.4
PK	14.8±1.0	16.7±2.1	8.8±3.9
NPK	44.1±6.5	31.1±4.8	12.4±2.2
NPK+S	38.6±6.1	40.9±3.4	11.5±0.9
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>7.2</b>	<b>6.2</b>	<b>4.5</b>

**Примечание:** Здесь и далее в таблицах приведены средние значения ± стандартное отклонение; р/н – разница не существенна.

Данные, представленные в табл. 3, подтверждают необходимость внесения минерального азота в почву при возделывании картофеля для поддержания ее азотного статуса. В процессе вегетации картофеля от фазы всходов до полной спелости содержание азота в почве снижается в 1.5–3

раза. Исключение составил 2010 год, когда неблагоприятные погодные условия привели к изменению азотного питания картофеля и, как следствие, не наблюдалось значительного снижения содержания минерального азота в почве. Даже высокий уровень содержания азота в почве в первой половине вегетации в 2011 году, достигнутый за счет внесения дополнительного азота в качестве фона, не позволил сохранить к концу вегетации средний уровень обеспеченности почвы азотом [Никитишен, 1977]. Следовательно, когда мы говорим о необходимости внесения азотных удобрений под картофель, нужно иметь в виду не только достижение определенного уровня продуктивности культуры, но и экологический аспект, а именно, сохранение плодородия почвы.

Чтобы ответить на вопрос, в какой степени наблюдаемые отличия азотного режима почвы предопределили уровень потребления азота растениями в разные периоды его вегетации, рассмотрим динамику содержания азота в вегетативной массе и клубнях картофеля (табл. 4).

Повышение обеспеченности почвы минеральным азотом, обусловленное действием азотного удобрения, в большинстве случаев не отразилось на содержании азота в растениях на стадии всходов. Достоверное увеличение содержания азота у растений в фазе всходов выявлено только в опыте 2012 г. в вариантах NP и НК. В опытах 2011 и 2012 гг. содержание азота в фазу всходов было ниже по сравнению с 2010г., при этом проявлялся некоторый дефицит этого элемента в растениях. Возможно, на процесс потребления азота повлияло недостаточное увлажнение в этот период, что было показано на рис. 5.

Увеличение уровня азотного питания картофеля под влиянием азотного удобрения наиболее ощутимо проявилось в последующий период вегетации. В в опытах 2010 и 2012 гг. отмечены статистически значимые отличия в содержании азота в фазы цветения и полной спелости. На безазотных вариантах происходило существенное снижение содержания азота в растениях. В 2011 году высокое исходное содержание азота почве

обеспечило содержание этого элемента в растениях, близкое к оптимуму. Это ограничивало степень положительного влияния азотного удобрения на потребление азота картофелем, из-за чего различия между вариантами были не существенны в течение всей вегетации.

**Таблица 4.** Динамика содержания азота в надземной биомассе и клубнях картофеля по фазам вегетации, % сухого вещества

Вариант	Всходы (Надземная биомасса)	Цветение (Надземная биомасса)	Полная спелость	
			Надземная биомасса	Клубни
2010 г.				
0	4.82±0.21	2.91±0.45	1.74±0.19	1.95±0.13
NP	5.05±0.35	3.55±0.19	2.27±0.21	1.96±0.32
NK	5.07±0.17	3.58±0.22	1.93±0.08	2.09±0.19
PK	4.81±0.43	2.93±0.27	1.78±0.08	1.92±0.33
NPK	5.12±0.17	3.76±0.25	2.35±0.45	2.05±0.23
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>0.43 (р/н)</b>	<b>0.44</b>	<b>0.37</b>	<b>0.38 (р/н)</b>
2011 г.				
0	4.29±0.37	3.22±0.34	1.77±0.16	1.45±0.06
NP	4.48±0.68	3.29±0.73	2.06±0.11	1.55±0.06
NK	4.29±0.56	3.29±0.13	2.09±0.11	1.52±0.17
PK	4.35±0.58	2.80±0.27	1.93±0.19	1.41±0.07
NPK	3.96±0.83	3.59±0.27	2.22±0.21	1.60±0.07
NPK+S	4.42±0.54	3.13±0.27	2.13±0.08	1.55±0.09
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>0.90 (р/н)</b>	<b>0.57 (р/н)</b>	<b>0.23 (р/н)</b>	<b>0.14 (р/н)</b>
2012 г.				
0	2.87±0.34	2.51±0.13	1.55±0.11	0.90±0.14
NP	3.81±0.43	3.83±0.32	1.73±0.29	1.22±0.09
NK	4.39±0.15	3.86±0.24	1.62±0.24	1.18±0.16
PK	3.52±0.64	2.19±0.69	1.29±0.16	0.86±0.12
NPK	3.32±0.75	3.60±0.33	1.43±0.18	1.34±0.13
NPK+S	4.40±0.20	3.60±0.74	1.31±0.13	1.25±0.20
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>0.83</b>	<b>0.71</b>	<b>0.29</b>	<b>0.22</b>
<b>оптимум*</b>	<b>4.5-6.0</b>	<b>3.5-5.5</b>	<b>1.4</b>	<b>1.45</b>

\*Здесь и далее в таблицах указаны оптимальные значения по Церлинг [Церлинг, 1990]

В фазу полной спелости содержание азота в ботве картофеля было выше оптимального во все три года эксперимента, кроме вариантов PK и NPK+S в 2012 году. В 2010 и 2011 гг. содержания азота в клубнях также было выше оптимальных значений, за исключением 2012 года, когда к фазе

уборки содержание азота в клубнях не достигло оптимума. Скорее всего, причиной этого явилось недостаточное увлажнение в период критичный для формирования и налива клубней, что могло повлиять на передвижение азота из ботвы, где его содержание было близким к оптимуму, в клубни.

Накопление биомассы и вынос азота урожаем клубней и ботвы картофеля находился в соответствии со складывающимся уровнем азотного питания этой культуры (табл. 5 и 6).

**Таблица 5.** Динамика накопления сухого вещества, ц/га

Вариант	Всходы	Цветение	Полная спелость	
			ботва	клубни
2010 г.				
0	5.3	28.6	15.3	24.6
NP	4.6	32.9	23.4	21.6
NK	3.1	35.4	17.2	20.7
PK	4.6	29.1	14.5	23.3
NPK	5.1	32.7	21.2	19.1
2011 г.				
0	0.6	18.7	44.0	55.7
NP	1.1	24.6	53.6	60.4
NK	1.2	21.6	36.7	52.9
PK	1.2	21.4	41.1	58.5
NPK	1.2	33.4	55.4	66.0
NPK+S	1.4	33.8	45.0	59.5
2012 г.				
0	5.3	21.2	7.0	44.1
NP	11.6	32.2	24.5	70.5
NK	8.2	31.5	25.7	72.5
PK	6.8	19.5	6.1	48.5
NPK	12.5	35.9	28.0	63.5
NPK+S	11.4	36.1	28.1	63.0

Полученные данные согласуются с результатами других исследователей [Гилис, 1975; Васильев, 2014], которые также отмечали наиболее интенсивное усвоение элементов минерального питания в период всходы–цветение, когда картофель усваивал до 70 % азота, 60–70 % фосфора и до 80 % калия от их максимального содержания в растениях.

Фосфорно-калийное удобрение не оказало существенного влияния на потребление азота растениями. Определяющее положительное влияние оказывало азотное удобрение, внесенное в сочетании с фосфором, калием и парной комбинацией этих элементов. Эффективность его была наиболее высокой в опыте 2012 г. Это выражалась в увеличении выноса азота урожаем с 50.6 кг/га на контроле и 49.7 кг/га в варианте РК до 115.4–128.2 кг/га в вариантах с азотным удобрением.

**Таблица 6.** Накопление азота в биомассе картофеля по фазам развития, кг/га

Вариант	Всходы	Цветение	Полная зпелость		
			ботва	клубни	ботва+клубни
2010 г.					
0	25.3 (36.4 %)*	83.4 (120.1 %)	26.6	48.0	74.6 (100 %)
NP	23.4 (24.5 %)	116.5 (122.2 %)	53.1	42.3	95.4 (100 %)
NK	15.4 (20.2 %)	126.4 (165.6 %)	33.1	43.4	76.5 (100 %)
PK	22.2 (31.4 %)	85.1 (120.6 %)	25.8	44.8	70.6 (100 %)
NPK	26.1 (29.3 %)	122.5 (137.4 %)	49.8	39.2	89.0 (100 %)
2011 г.					
0	2.3 (1.4 %)	60.1 (37.9 %)	77.9	80.7	158.6 (100 %)
NP	4.7 (2.3 %)	81.1 (39.8 %)	110.4	93.6	204.1 (100 %)
NK	5.4 (3.4 %)	71.5 (45.5 %)	76.6	80.5	157.1 (100 %)
PK	5.0 (3.1 %)	60.0 (37.1 %)	79.3	82.4	161.7 (100 %)
NPK	5.0 (2.2 %)	119.9 (52.4 %)	123.0	105.6	228.6 (100 %)
NPK+S	6.3 (3.4 %)	105.2 (56.2 %)	95.5	91.6	187.1 (100 %)
2012 г.					
0	15.2 (30.0 %)	53.1 (104.9 %)	10.9	39.7	50.6 (100 %)
NP	44.2 (34.5 %)	123.1 (95.9 %)	42.2	86.0	128.2 (100 %)
NK	38.3 (30.1 %)	121.6 (99.7 %)	41.6	85.6	127.2 (100 %)
PK	24.0 (48.3 %)	42.6 (85.7 %)	7.9	41.7	49.6 (100 %)
NPK	41.8 (33.4 %)	128.7 (103.0 %)	40.0	85.1	125.1 (100 %)
NPK+S	50.1 (43.3 %)	130.0 (112.4 %)	36.7	78.7	115.4 (100 %)

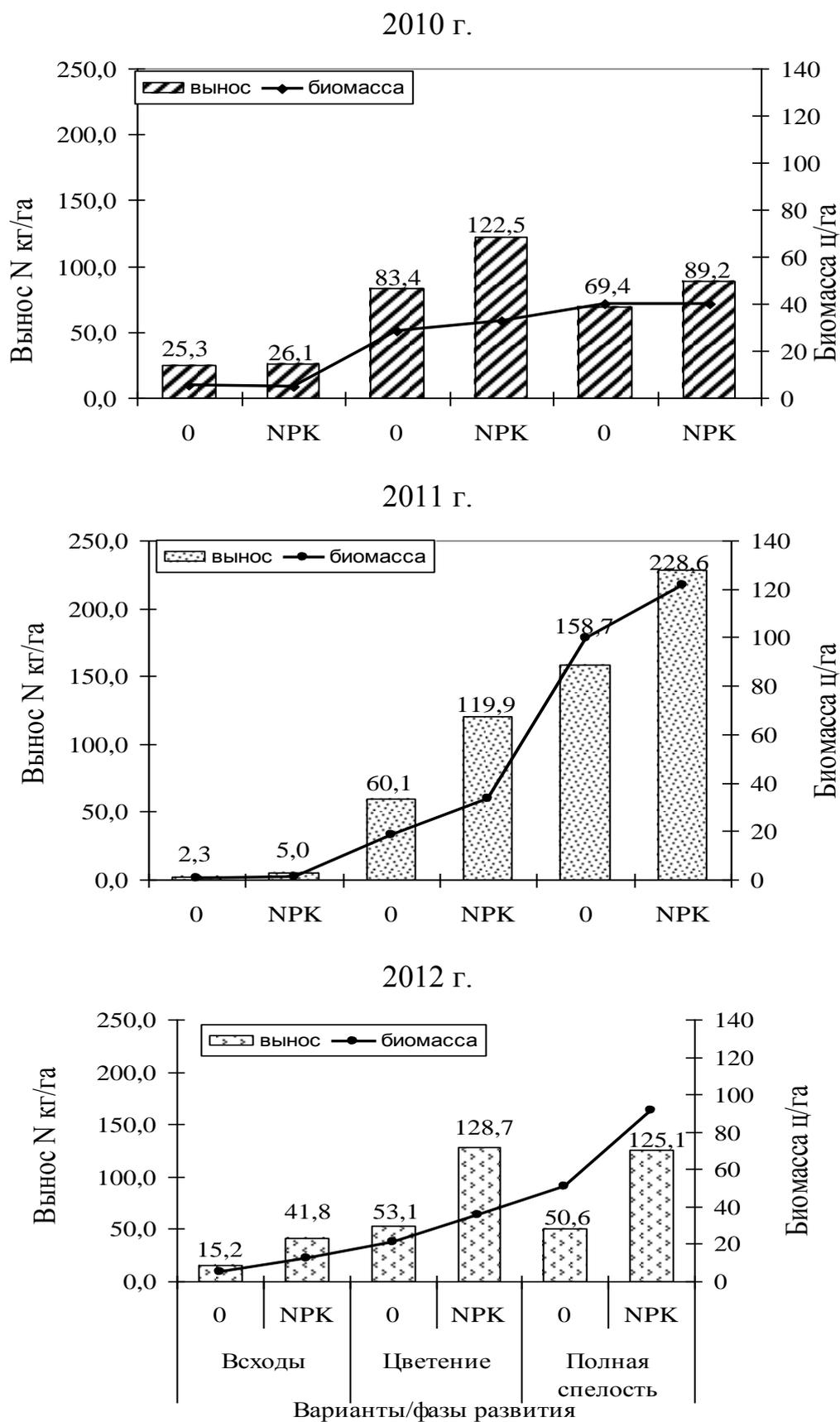
\*В скобках указано накопление азота в каждую фазу вегетации в % от конечного выноса.

Несмотря на то, что в 2011 г. исходная обеспеченность картофеля минеральным азотом была наиболее высокой, внесение азотного удобрения и в таких условиях оказалось фактором, усиливающим потребление растениями этого элемента. Вынос азота с урожаем возрастал по сравнению с

безазотными вариантами в 1.2–1.4 раз. В 2010 году отмечены самые низкие значения выноса азота с урожаем, внесение азотных удобрений слабо влияло на вынос азота, повышая его в 1.1–1.3 раза, так как основным лимитирующим фактором в этот год был дефицит влаги. В среднем за три года опыта вынос азота с урожаем картофеля уменьшался в следующей последовательности вариантов с удобрениями: NPK > NP > NK > PK = Контроль (без удобрений).

Полученные данные показали, что накопление растениями азота в относительных показателях (% сух. в-ва) достаточно стабильно (табл. 4). Если же говорить об абсолютных значениях (накопление и вынос, кг/га), то отличия при разных режимах увлажнения были более выражены. При экстремальном дефиците влаги (2010 г.), несмотря на увеличение прироста надземной биомассы картофеля, наблюдалось уменьшение уровня накопления в ней азота, начиная с фазы цветения и вплоть до уборки, в то время как в нормальных условиях влагообеспеченности (2011 г.) для этого периода вегетации характерно наиболее активное поступление его в растения (рис. 7). В данном случае, по всей вероятности, имело место явление экзосмоса, описанное для других культур (например, для озимой пшеницы) [Никитишен, 2007]. В 2012 году, не столь экстремальном как 2010 год, но также характеризующимся нестабильным режимом увлажнения, картина была схожая. Азот усваивался картофелем наиболее активно в начале вегетации, а после цветения, хотя и не наблюдалось резкого снижения его накопления, увеличения этого показателя не происходило, и вынос его конечным урожаем был практически таким же, как и в фазе цветения (рис. 7). Для наглядности на рис. 7 представлены данные для крайних вариантов (контроль и NPK).

Чтобы определить влияние изучаемых факторов (удобрения и условия года) на азотный режим почвы и азотное питание растений был проведен дисперсионный анализ данных за 2010–2012 гг., результаты которого представлены в таблице 7.



**Рис. 7.** Динамика накопления биомассы картофелем (сух. в-во, ц/га) и потребления азота растениями (вынос, кг/га).

Результаты дисперсионного анализа показывают, что основной вклад в дисперсию минерального азота в почве вносят гидротермические условия, которые действуют прямо или косвенно.

Прямое действие гидротермических условий осуществляется путем изменения подвижности и доступности азота в почве, а опосредованное – через изменение способности растений поглощать азот, содержащийся в почве. К концу вегетационного периода возрастает влияние удобрений: их вклад в общую дисперсию повышается до 46.5%. Статистически значимые различия между вариантами наблюдались в течение всей вегетации.

**Таблица 7.** Дисперсионный анализ влияния факторов на содержание азота в почве и растениях за 2010–2012 гг.

Дисперсия и вклад фактора	Всходы		Цветение		Полная спелость		
	Почва	Растения	Почва	Растения	Почва	Растения	
						Ботва	Клубни
Дисперсия, в т.ч.	80.2	6.4	42.1	3.6	7.4	1.4	2.3
влияние удобрений, %	30.1	11.4*	31.6	76.1	46.5	23.5*	6.2
влияние года, %	66.3	76.5	60.5	1.9*	43.8	58.0	91.5

\* Влияние фактора недостоверно ( $F_{\text{факт}} < F_{\text{крит}}$ )

Степень влияния сравниваемых внешних факторов на азотное питание растений на каждом этапе развития растений меняется. Так, на содержание азота в растениях в фазу всходов основное воздействие оказывали погодные условия, вклад которых составлял 76.5%, а внесенный с удобрениями азот практически не влиял на его поступление в растения, поскольку питание картофеля на этом этапе идет, главным образом, за счет запасов в клубнях. В фазу цветения вклад в общую дисперсию удобрений возрастает, а роль гидротермических условий снижается до статистически незначимых значений. К концу вегетационного периода вновь усиливается влияние

гидротермических условий на азотное питание растений, что обусловлено спецификой синтетических и транслокационных процессов на стадии созревания клубней.

Данные дисперсионного анализа указывают на значительное влияние погодных условий на азотное питание картофеля. Обращает на себя внимание следующая тенденция: недостаток влаги в фазу всходов в 2011 и особенно в 2012 гг. привел к дефициту азота в растениях. В 2010 году в фазу всходов в почве было достаточно влаги, поэтому дефицита азота в растениях не было. Аналогичное явление наблюдалось и в фазу цветения: дефицит влаги в 2010 и 2012 гг. приводил к недостаточному поступлению азота в растения, тогда как в условиях 2011 г. с достаточным увлажнением потребление азота в эту фазу было нормальным.

### **3.1.2. ФОСФОР**

Содержание подвижного фосфора в почве зависело от применяемых удобрений и менялось как в течение вегетации, так и в разные годы опыта, давая представление о складывающихся условиях фосфорного питания картофеля (табл. 8 и рис. 8).

В 2010 г. содержание подвижного фосфора в почве соответствовало высокому уровню обеспеченности [Минеев, 2001]. В 2011–2012 годах исходное содержание подвижного фосфора в почве было средним. В результате дополнительного внесения в 2011 году нитрофоски во время посадки картофеля не наблюдалось снижения подвижного фосфора в течение вегетации. В 2012 году содержание подвижного фосфора в почве, также как и в первый год опыта, закономерно снижалось к концу вегетационного периода за счет потребления растениями.

Следует отметить, что наряду с высоким исходным уровнем содержания подвижного фосфора в почве (>230 мг/кг) в 2010 году, отмечены сильные колебания этого показателя в пределах опытного участка. Эта пространственная неоднородность не позволила обнаружить закономерности

изменения содержания фосфора в почве в течение вегетации между вариантами с внесением фосфорных удобрений и без их внесения.

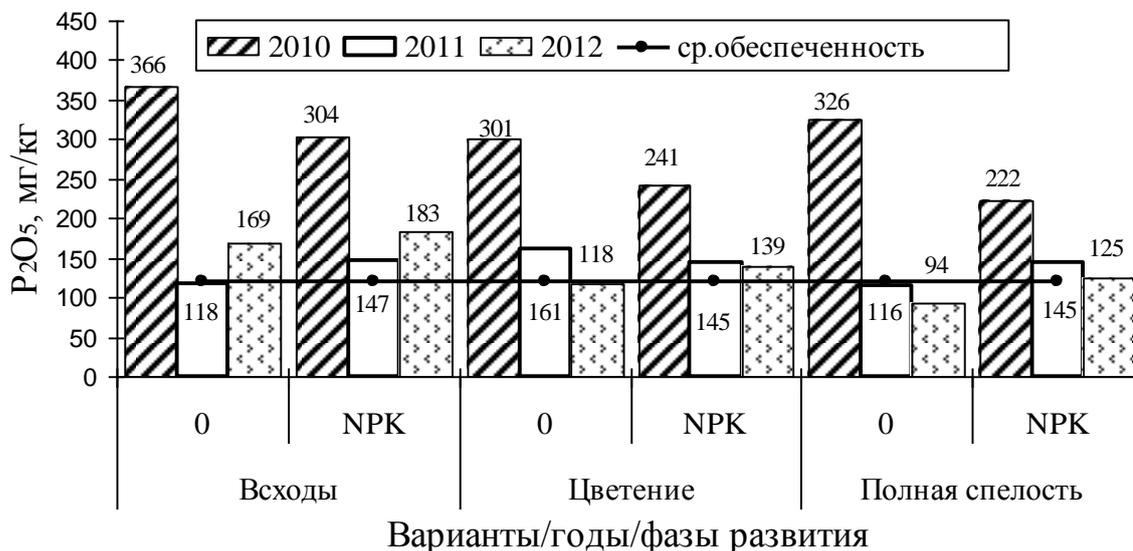
**Таблица 8.** Содержание фосфора ( $P_2O_5$ ) в почве, мг/кг

Вариант опыта	Фаза вегетации картофеля		
	Всходы	Цветение	Полная спелость
2010 г.			
0	366.4±106.3	300.6±91.2	325.8±27.7
NP	429.3±283.5	438.5±226.5	377.4±87.1
NK	400.4±413.0	457.3±314.7	321.0±188.1
PK	382.7±47.8	278.7±14.4	241.2±6.0
NPK	403.8±53.1	241.1±10.2	222.4±27.3
2011 г.			
0	118.3±10.5	109.2±4.2	116.3±9.2
NP	150.3±23.0	153.7±8.9	162.7±24.7
NK	113.0±12.8	111.0±14.7	132.4±18.7
PK	128.8±3.5	128.8±10.7	148.4±21.0
NPK	146.8±24.4	160.9±12.2	144.8±21.4
NPK+S	154.0±9.3	132.3±3.6	162.7±18.4
<b>HCP<sub>05</sub></b>	<b>23.4</b>	<b>14.7</b>	<b>28.9</b>
2012 г.			
0	169.0±6.3	118.0±6.3	93.8±10.9
NP	195.0±6.3	157.8±22.2	124.7±9.6
NK	169.0±6.3	113.0±3.5	91.8±3.5
PK	203.7±14.4	138.5±16.0	125.8±11.9
NPK	183.5±4.0	138.5±12.0	124.5±3.0
NPK+S	196.5±12.0	149.8±17.0	116.5±7.5
<b>HCP<sub>05</sub></b>	<b>12.8</b>	<b>21.3</b>	<b>12.5</b>

Из данных, представленных на рис. 8 видно, что в почве контроля и с применением полного минерального удобрения сохранялся средний уровень обеспеченности растений подвижным фосфором вплоть до уборки урожая.

В условиях достаточного увлажнения 2011 года и при умеренном дефиците влаги в 2012 году исходное содержание подвижного фосфора и тем более достигнутое в результате внесения фосфорного удобрения в большинстве случаев обеспечивало оптимальный уровень [Церлинг, 1990]

фосфорного питания картофеля в течение всей вегетации, а в фазе всходов даже избыточный (табл. 9).



**Рис.8.** Содержание в почве подвижного фосфора в вариантах контроля и с внесением полного минерального удобрения.

Этого не наблюдалось в опыте 2010 года в условиях острого дефицита влаги, проявляющегося продолжительное время. Несмотря на высокий уровень обеспеченности почвы, в экстремальных условиях сильной и продолжительной засухи начиная с фазы цветения, растения испытывали дефицит фосфора, который не устранялся посредством внесения фосфорного удобрения. Об этом свидетельствуют данные по содержанию фосфора в надземной биомассе картофеля в фазу цветения (0.46–0.57%) и полной спелости (0.25–0.32%), значения которого были гораздо ниже оптимума. Характерно, что экстремальные погодные условия 2010 года не сказались на содержании фосфора в клубнях, в которых его содержалось столько же, сколько и в более благоприятном 2011 году. В 2012 году уровень содержания доступного фосфора в почве в фазу всходов был несколько выше по сравнению с 2011 годом. Однако на поглощение фосфора растениями это не оказало решающего влияния, напротив, в 2012 году содержание фосфора в

надземной биомассе и клубнях картофеля было даже ниже, чем в 2011 году, хотя и находилось в пределах оптимальных значений в обоих случаях.

**Таблица 9.** Динамика содержания фосфора в надземной биомассе и клубнях картофеля по фазам вегетации (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, % сух. в-ва)

Вариант	Всходы (Надземная биомасса)	Цветение (Надземная биомасса)	Полная спелость	
			Надземная биомасса	Клубни
2010 г.				
0	1.08±0.17	0.46±0.14	0.27±0.05	0.69±0.05
NP	1.12±0.02	0.52±0.08	0.30±0.05	0.69±0.02
NK	0.92±0.13	0.57±0.06	0.32±0.02	0.76±0.02
PK	1.03±0.09	0.47±0.06	0.25±0.06	0.69±0.05
NPK	1.20±0.09	0.50±0.03	0.27±0.05	0.71±0.03
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>0.17</b>	<b>0.13</b>	<b>0.07</b>	<b>0.06</b>
2011 г.				
0	1.40±0.04	0.70±0.08	0.43±0.07	0.66±0.00
NP	1.37±0.11	0.80±0.10	0.57±0.08	0.65±0.03
NK	1.30±0.15	0.64±0.09	0.59±0.09	0.64±0.03
PK	1.42±0.19	0.59±0.05	0.66±0.14	0.66±0.00
NPK	1.30±0.07	0.73±0.05	0.57±0.09	0.67±0.01
NPK+S	1.49±0.09	0.64±0.02	0.53±0.03	0.69±0.04
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>0.17 (р/н)</b>	<b>0.11</b>	<b>0.13 (р/н)</b>	<b>0.032</b>
2012 г.				
0	1.12±0.09	0.80±0.00	0.46±0.01	0.54±0.07
NP	1.23±0.12	0.83±0.04	0.43±0.02	0.45±0.04
NK	1.06±0.00	0.78±0.02	0.39±0.05	0.44±0.04
PK	1.30±0.03	0.82±0.02	0.45±0.06	0.53±0.02
NPK	1.26±0.11	0.83±0.06	0.38±0.04	0.44±0.06
NPK+S	1.35±0.00	0.83±0.03	0.36±0.02	0.46±0.08
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>0.11</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	<b>0.08</b>
<b>Оптимум</b>	<b>0.9-1.1</b>	<b>0.7-1.1</b>	<b>0.41</b>	– *

\*Данные отсутствуют

Вынос фосфора с урожаем клубней и ботвы картофеля в полевых опытах 2010–2012 гг. колебался в очень широких пределах, варьируя от 19.3 в 2010 г. до 88.8 кг/га в 2011 г. (табл. 10). В опыте 2010 года потребление фосфора растениями в значительной степени ограничивалось сильным

дефицитом влаги, который исключал также возможность прироста выноса фосфора за счет фосфорного удобрения.

**Таблица 10.** Вынос фосфора с урожаем картофеля по фазам развития, кг/га

Вариант	Всходы	Цветение	Полная спелость		
			ботва	клубни	ботва+клубни
2010 г.					
0	5.6 (29.1 %)	13.2 (68.5 %)	4.1	17.0	21.1 (100 %)
NP	5.2 (23.7 %)	17.1 (77.2 %)	7.0	15.1	22.1 (100 %)
NK	2.8 (13.0 %)	20.1 (94.8 %)	5.5	15.8	21.3 (100 %)
PK	4.7 (23.6 %)	13.7 (68.5 %)	3.6	16.3	19.9 (100 %)
NPK	5.6 (29.0 %)	16.6 (85.9 %)	5.9	13.4	19.3 (100 %)
2011 г.					
0	0.8 (1.4 %)	12.7 (22.6 %)	19.4	36.7	56.1 (100 %)
NP	1.4 (2.0 %)	19.5 (27.7 %)	31.1	39.3	70.4 (100 %)
NK	1.6 (2.9 %)	14.1 (25.2 %)	22.0	33.9	55.9 (100 %)
PK	1.6 (2.5 %)	12.9 (19.8 %)	26.7	38.6	65.3 (100 %)
NPK	1.6 (2.1 %)	24.4 (32.0 %)	32.1	44.2	76.3 (100 %)
NPK+S	2.1 (3.2 %)	21.5 (33.1 %)	64.9	23.9	88.8 (100 %)
2012 г.					
0	5.9 (21.8 %)	16.9 (62.4 %)	3.2	23.9	27.1 (100 %)
NP	14.3 (33.8 %)	26.7 (63.1 %)	10.5	31.8	42.3 (100 %)
NK	8.8 (21.1 %)	24.6 (58.9 %)	9.9	31.9	41.8 (100 %)
PK	8.9 (31.2 %)	16.0 (56.1 %)	2.8	25.7	28.5 (100 %)
NPK	15.9 (41.4 %)	29.7 (77.3 %)	10.5	27.9	38.4 (100 %)
NPK+S	15.4 (53.1 %)	30.0 (76.7 %)	10.0	29.0	39.0 (100 %)

\* В скобках указано накопление фосфора в каждую фазу вегетации в % от конечного выноса.

В условиях благоприятного увлажнения (2011 г.) и при умеренном дефиците влаги (2012 г.) действие фосфорного удобрения на вынос фосфора урожаем картофеля было достаточно эффективным, обеспечивая его повышение по сравнению с контролем и вариантом НК соответственно в 1.2–1.6 и 1.1–1.2 раза. При этом более низкий в 2012 году вынос фосфора с урожаем, по сравнению с 2011 г., вызван снижением урожайности, обусловленной, по всей вероятности, ухудшением влагообеспеченности во второй половине вегетации картофеля. Характерно, что в эти годы

применение азотных удобрений сопровождалось ростом потребления фосфора при формировании урожая картофеля. Так, на варианте РК вынос фосфора составлял 65.3 кг/га и 28.5 кг/га в 2011 и 2012 гг. соответственно, а на варианте NPK — 76.3 и 38.4 кг/га. В среднем за три года вынос фосфора с урожаем картофеля уменьшался в следующей последовательности вариантов опыта: NPK = NP > NK > РК > Контроль.

Следует также отметить, что в экстремальных условиях 2010 года в отличие от азота, поступление фосфора в растения картофеля после фазы цветения продолжалось, хотя и крайне низкими темпами. Об этом говорят данные о накоплении фосфора в разные фазы вегетации в процентном отношении от конечного выноса с общей биомассой (табл. 10). Что подтверждает данные других исследователей о плавном увеличении содержания фосфора в растениях в течение вегетации [Бардышев, 1984], вне зависимости от погодных условий.

**Таблице 11.** Дисперсионный анализ влияния факторов на содержание фосфора в почве и растениях за 2010–2012 гг.

Дисперсия и вклад фактора	Всходы		Цветение		Полная спелость		
	Почва	Растения	Почва	Растения	Почва	Растения	
						ботва	клубни
Дисперсия, в т.ч.	2679	0.35	1976	0.28	1183	0.23	0.16
влияние удобрений, %	4.8*	18.0*	7.4*	5.0*	5.1*	3.5*	1.5*
влияние года, %	85.8	62.7	78.2	87.0	83.9	84.6	90.8

\* Влияние фактора недостоверно ( $F_{\text{факт}} < F_{\text{крит}}$ )

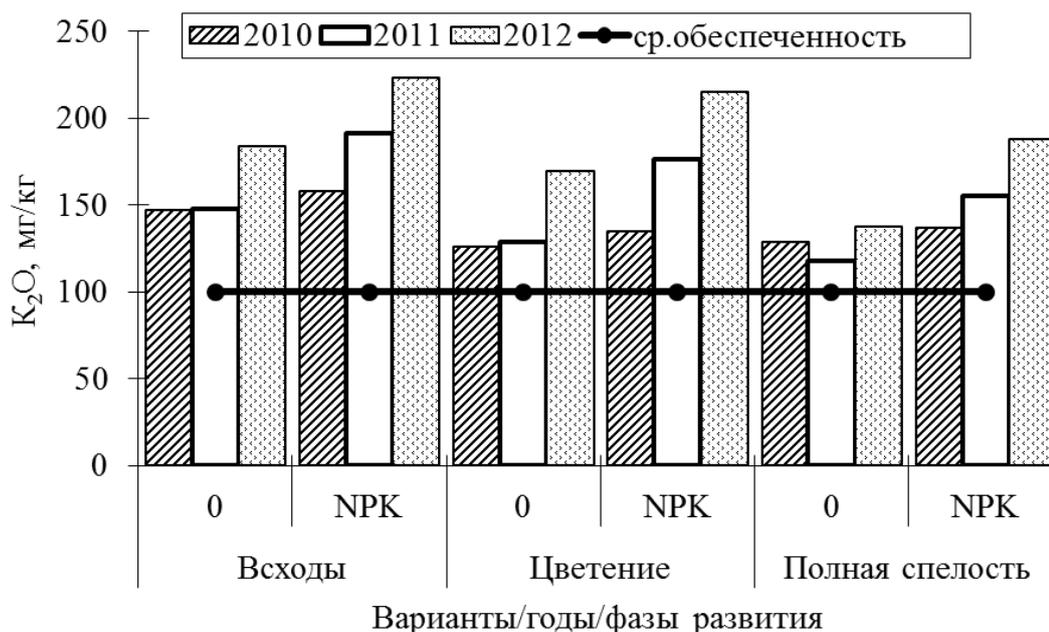
В целом по опыту, фактор года имел преобладающее влияние на содержание фосфора в почве в течение всей вегетации (табл. 11). Годовые отличия связаны как с разницей в исходной обеспеченности почвы подвижным фосфором, так и с разными гидротермическими условиями в

течение вегетации картофеля, контролирующими высвобождение фосфора из вносимых удобрений. Вклад удобрений в общую дисперсию был незначительным и статистически недостоверным.

Что касается содержания фосфора в растениях, то и в этом случае основное влияние на уровне от 62.7 до 90.8% оказывал фактор года. Следовательно, питание картофеля фосфором, в еще большей степени, чем азота, зависит от исходных свойств почвы и условий погоды, которые складываются в течение вегетации. Это согласуется с ранее полученными результатами [Убугунов, 2003] о том, что уровень накопления клубнями фосфора в большей степени зависел от погодных условий года и в меньшей — от доз вносимых удобрений.

### 3.1.3. КАЛИЙ

Содержание в почве обменного калия соответствовало высокому уровню обеспеченности [Минеев, 2001] в течение всех трех лет эксперимента 2010-2012 гг. (рис. 9). Это позволяет предположить, что количество калия в почве не являлось лимитирующим фактором, и наблюдаемые различия в уровне калийного питания картофеля объясняются другими причинами.



**Рис. 9.** Содержание в почве обменного калия в вариантах контроля и с внесением полного минерального удобрения.

Из-за большой пестроты в исходном содержании подвижного калия в почве в первый год опыта, как и в случае с фосфором, не проявлялось различий между вариантами с внесением калийных удобрений и без их внесения (табл. 12). Во второй и третий год опытный участок был более однородным по содержанию в почве обменного калия. Однако внесение калийных удобрений в дозе 90 кг д.в./га в 2011 году, хотя в целом и повышало содержание в почве  $K_2O$ , но различия между вариантами оказались несущественными. В опыте 2012 года действие калийных удобрений проявилось достаточно четко: варианты без внесения калия (0 и NP) значимо отличались от вариантов, где калий вносился.

**Таблица 12.** Содержание обменного калия ( $K_2O$ ) в почве, мг/кг

Вариант опыта	Фаза вегетации		
	Всходы	Цветение	Полная спелость
2010 г.			
0	147.2±83.6	126.5±71.8	128.6±77.6
NP	166.3±40.1	150.9±45.7	141.2±32.6
NK	126.7±2.0	116.0±6.9	110.1±5.9
PK	108.7±7.4	82.4±6.7	92.4±22.2
NPK	158.5±6.1	135.3±14.1	137.0±3.7
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>88.8 (р/н)</b>	<b>82.7(р/н)</b>	<b>83.2 (р/н)</b>
2011 г.			
0	148.5±7.1	128.5±7.1	118.1±11.7
NP	147.3±1.8	141.0±7.1	119.6±20.2
NK	182.3±33.6	171.0±24.7	147.4±32.0
PK	176.0±31.8	158.5±21.2	127.3±26.9
NPK	191.0±28.3	176.0±35.4	139.1±24.4
NPK+S	192.3±8.8	168.5±10.6	155.3±36.8
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>55.4 (р/н)</b>	<b>50.3 (р/н)</b>	<b>65.1 (р/н)</b>
2012 г.			
0	184.3±7.3	169.8±5.4	137.5±14.3
NP	177.5±11.0	151.8±27.6	118.3±14.1
NK	222.3±3.8	180.0±5.8	148.8±15.8
PK	200.7±11.0	176.0±10.4	173.0±13.1
NPK	223.3±11.4	215.0±14.2	188.3±21.4
NPK+S	207.0±11.9	176.8±4.1	156.0±12.8
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>14.6</b>	<b>20.6</b>	<b>23.1</b>

Как видно из данных табл. 13, в 2010 году в фазу всходов уровень обеспеченности растений калием был оптимальным [Церлинг, 1990], а в последующие фазы цветения и полной спелости он был недостаточным.

**Таблица 13.** Динамика содержания калия в надземной биомассе и клубнях картофеля по фазам вегетации, % сухого вещества

Вариант	Всходы (Надземная биомасса)	Цветение (Надземная биомасса)	Полная спелость	
			Надземная биомасса	Клубни
2010 г.				
0	3.98±1.24	2.94±1.37	1.39±0.86	1.54±0.20
NP	3.30±0.31	2.89±1.18	1.73±0.47	1.53±0.25
NK	3.22±0.35	2.65±0.15	0.97±0.01	1.41±0.15
PK	2.99±0.10	2.27±0.65	0.98±0.26	1.44±0.21
NPK	3.33±0.18	3.32±0.72	1.74±0.17	1.71±0.12
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>0.91 (р/н)</b>	<b>1.39 (р/н)</b>	<b>0.70 (р/н)</b>	<b>0.29 (р/н)</b>
2011 г.				
0	3.24±0.16	3.63±0.20	2.02±0.13	1.41±0.01
NP	3.49±0.06	3.44±0.04	2.28±0.18	1.46±0.04
NK	3.86±0.01	4.20±0.19	3.28±0.34	1.58±0.00
PK	3.80±0.19	3.92±0.01	2.72±0.23	1.61±0.05
NPK	3.77±0.19	4.21±0.04	3.04±0.24	1.51±0.01
NPK+S	3.76±0.06	4.05±0.38	3.26±0.01	1.51±0.02
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>0.33</b>	<b>0.47</b>	<b>0.52</b>	<b>0.07</b>
2012 г.				
0	3.91±0.12	4.16±0.32	1.46±0.20	1.41±0.12
NP	4.39±0.52	3.75±0.30	1.23±0.21	1.28±0.10
NK	5.03±0.13	5.28±0.64	1.71±0.10	1.47±0.01
PK	5.65±0.44	4.60±0.29	1.69±0.25	1.45±0.04
NPK	5.31±0.59	5.26±0.45	2.07±0.25	1.48±0.06
NPK+S	5.66±0.40	5.10±0.75	1.56±0.26	1.46±0.12
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>0.64</b>	<b>0.73</b>	<b>0.33</b>	<b>0.13</b>
<b>Оптimum</b>	<b>4.2-5</b>	<b>4.2-5.1</b>	<b>3.0</b>	<b>–</b>

Таким образом, несмотря на достаточное количество обменного калия в почве, его поступление в растения было слабым. Возможно, что причиной этого было закрепление калия в почве в необменной форме и переход его в недоступное для растений состояние, обусловленное сильным иссушением почвы. Это предположение согласуется с выводом, сделанным другими

исследователями [Кораблева, 1972; Кузнецова, 1975]. Данное явление наблюдалось как в вариантах с внесением калия, так и без его внесения. В условиях длительной засухи калийное удобрение оказалось малоэффективным.

При более благоприятных погодных условиях в 2011 году питание картофеля калием осуществлялось активнее. В фазу всходов обеспеченность растений калием была немного ниже нормы, а в фазы цветения и полной спелости на вариантах с внесением калийных удобрений содержание калия в надземной биомассе картофеля приближалось к оптимальным значениям. Следует отметить, что в отличие от опыта 2010 года, когда продолжительная засуха ограничила положительное действие калийных удобрений, в опытах 2011 и 2012 гг. они существенно влияли на состояние калийного питания картофеля. В 2011 г. содержание калия в растениях на вариантах НК, РК NPK и NPK+S повышалось в фазе всходов до 3.76–3.86 %, во время цветения до 3.92–4.21 % и в период полной спелости в ботве — до 2.72–3.28 % на сухое вещество. В 2012 году содержание калия надземными органами картофеля в эти фазы вегетации возрастало соответственно до 5.03–5.65; 4.60–5.28 и 1.69–2.07 %, в ряде случаев, превысив оптимум. Характерно, что, несмотря на различия в обеспеченности растений калием в ходе вегетации в результате различного исходного содержания обменного калия в почве, а также вследствие внесения калийных удобрений, в клубнях картофеля содержалось примерно одинаковое количество калия на протяжении трех лет опыта (2010–2012 гг.), составившее 1.28–1.71%.

Вынос калия урожаем клубней и ботвы картофеля определялся не только исходной обеспеченностью почвы обменным калием и влиянием внесенных удобрений, но и в значительной степени режимом увлажнения в течение вегетации. Величина выноса калия достигала максимальных значений при выращивании картофеля в условиях достаточной обеспеченности влагой в 2011 г., составив на контроле 167.4 кг/га, в варианте NP — 209.8 кг/га, а в варианте NPK — 268.0 кг/га (табл.14). Наоборот, при

умеренном дефиците влаги в 2012 г., в меньшей степени, а при сильной и продолжительной засухе в 2010 г., в значительной мере, потребление калия картофелем снижалось. Вынос калия урожаем картофеля в вариантах 0, NP и NPK в 2012 г. был меньше, чем в 2011 г. соответственно в 2.3; 1.7 и 1.6 раза, а в 2010 году — в 2.8; 2.8 и 3.4 раза. Приведенные данные свидетельствуют о том, что не только калийное, но и азотно-фосфорное удобрение оказывает положительное влияние на потребление калия растениями. Подобный вывод о влиянии азота и фосфора был сделан ранее в работе Тереховой [Терехова, 1980].

**Таблица 14.** Накопление калия биомассой картофеля, кг/га

Вариант	Всходы	Цветение	Полная спелость		
			ботва	клубни	ботва+клубни
2010 г.					
0	22.6 (36.0 %)	100.6 (160.2 %)	21.2	37.9	59.1 (100 %)
NP	18.0 (20.9 %)	116.5 (135.4 %)	40.5	33.1	73.6 (100 %)
NK	12.0 (23.6 %)	103.1 (203.0 %)	16.6	29.2	45.8 (100 %)
PK	15.8 (29.7 %)	78.4 (147.6 %)	14.1	33.6	47.7 (100 %)
NPK	20.4 (25.3 %)	126.5 (156.5 %)	36.8	32.7	69.5 (100 %)
2011 г.					
0	1.7 (1.0 %)	67.8 (40.5 %)	88.8	78.5	167.3 (100 %)
NP	3.6 (1.7 %)	84.7 (40.4 %)	122.2	87.6	209.8 (100 %)
NK	4.8 (2.4 %)	91.2 (44.7 %)	120.3	83.6	203.9 (100 %)
PK	4.4 (2.1 %)	84.0 (41.0 %)	111.7	93.6	205.3 (100 %)
NPK	4.7 (1.8 %)	140.6 (52.4 %)	168.4	99.7	268.1 (100 %)
NPK+S	5.4 (2.3 %)	136.1 (57.6 %)	146.8	89.3	236.1 (100 %)
2012 г.					
0	20.7 (28.6 %)	87.9 (121.6 %)	10.2	62.1	72.3 (100 %)
NP	51.0 (42.5 %)	120.5 (100.4 %)	30.0	90.0	120.0 (100 %)
NK	41.6 (27.6 %)	166.4 (110.6 %)	43.7	106.8	150.5 (100 %)
PK	38.5 (47.8 %)	89.7 (111.3 %)	10.4	70.2	80.6 (100 %)
NPK	66.8 (44.1 %)	188.1 (124.1 %)	57.8	93.8	151.6 (100 %)
NPK+S	64.5 (47.5 %)	184.2 (135.7 %)	43.8	91.6	135.4 (100 %)

\* В скобках указано накопление калия в каждую фазу вегетации, % от конечного выноса.

При остром дефиците влаги в динамике потребления калия растениями картофеля наблюдалась закономерность, отмеченная нами при изучении азотного питания (рис. 10).

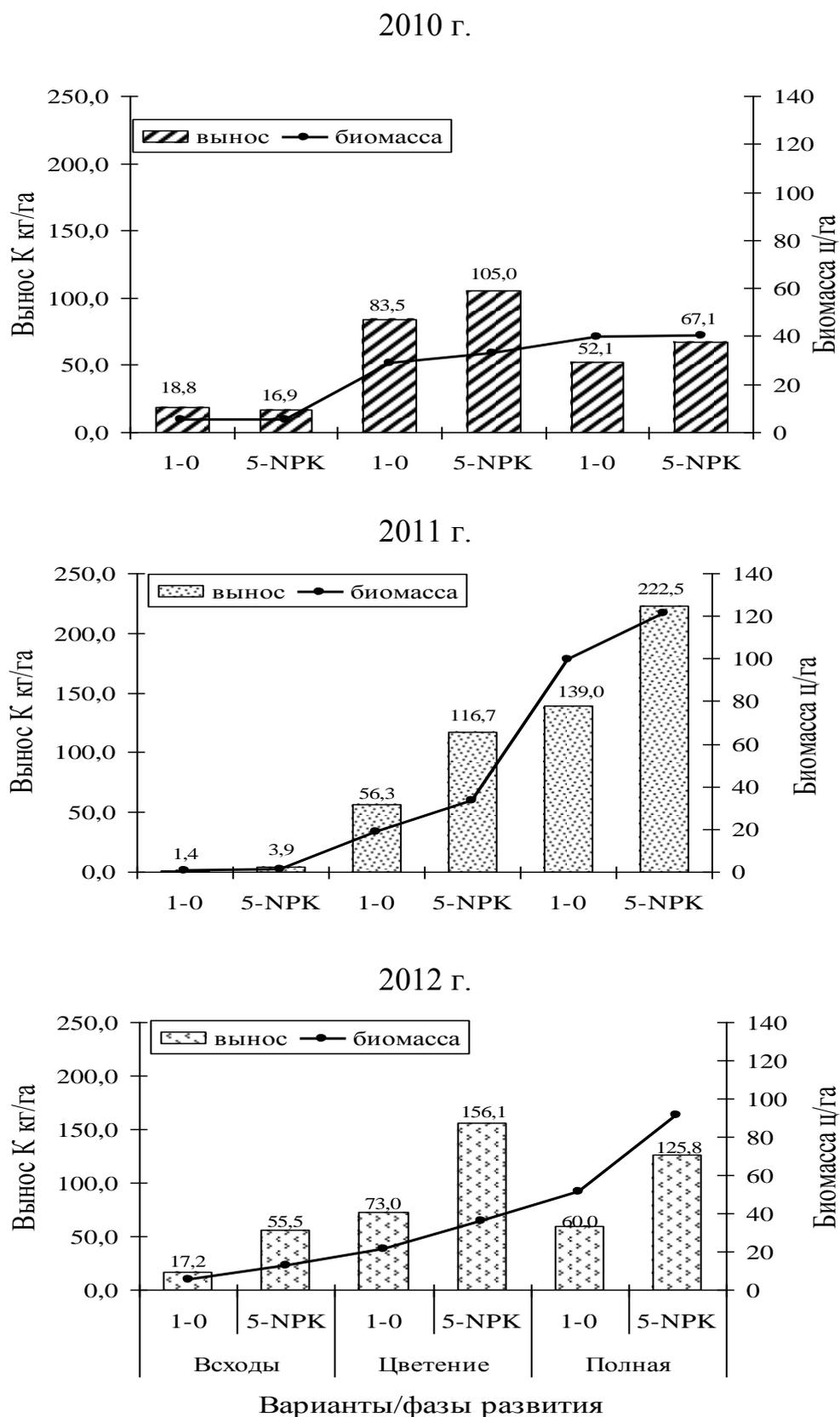
В условиях длительного недостаточного увлажнения отмечено заметное снижение содержания калия в надземной биомассе картофеля от фазы цветения до уборки, более выраженное, чем для азота. По всей вероятности, это можно объяснить преобладанием процесса выделения калия корнями растений над его потреблением в условиях продолжительной засухи. В 2012 году отмечена схожая тенденция. Хотя год оказался не столь экстремальным по условиям увлажнения, как 2010 г., тем не менее, дефицит влаги, имевший место в период клубнеобразования, привел к снижению накопления калия в биомассе картофеля к фазе полной спелости. Об этом же говорят данные таблицы 14: в 2010 и 2012 гг. вынос калия в фазу цветения превышал вынос с конечным урожаем.

Дисперсионный анализ данных, полученных в 2010–2012 гг. показал, что внесение удобрений не оказало существенного влияния на содержание подвижного калия в почве, а основной причиной его вариабельности были годовые различия, хотя к концу вегетации их роль снижалась (табл. 15).

**Таблица 15.** Дисперсионный анализ влияния факторов на содержание калия в почве и растениях за 2010–2012 гг.

Дисперсия и вклад фактора	Всходы		Цветение		Полная спелость		
	Почва	Растения	Почва	Растения	Почва	Растения	
						Ботва	Клубни
Дисперсия, в т.ч.	148,2	9,1	144,5	11,0	80,5	6,8	0,14
влияние удобрений, %	14,0*	6,2*	18,1*	15,0	20,1*	11,6*	24,4*
влияние года, %	61,7	69,4	55,5	73,9	32,4*	69,8	24,3*

\*Влияние фактора недостоверно ( $F_{\text{факт}} < F_{\text{крит}}$ )



**Рис. 10.** Динамика накопления биомассы картофеля (сух. в-во, ц/га) и потребления калия растениями (вынос, кг/га).

Более сильное влияние погодных условий проявлялось на содержание калия в ботве картофеля, составив 69.4–73.9% со статистически значимыми отличиями между вариантами. В отличие от надземной биомассы, содержание калия в клубнях не имело строгой связи с условиями года, что обусловлено перераспределением калия вместе с углеводами из листьев в клубни в фазу созревания. Влияние вносимых удобрений на содержание калия в картофеле было значимым только в фазу цветения.

### 3.1.4. ВЛИЯНИЕ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ (АЗОТА, ФОСФОРА, КАЛИЯ) НА УРОЖАЙ И КАЧЕСТВО КЛУБНЕЙ

Данные учета урожайности представлены в таблице 16. Величина урожая клубней картофеля в полевых опытах и отзывчивость этой культуры на удобрение в решающей степени определялись взаимодействием двух факторов роста: обеспеченностью влагой и элементами минерального питания. За счет мобилизации почвенных запасов питательных веществ и фонового внесения удобрений в условиях благоприятного увлажнения 2011 г. формировался наиболее высокий урожай клубней на контроле, равный 27,7 т/га. Урожай картофеля, испытывающего умеренный дефицит влаги в 2012 г. и выращиваемого без внесения удобрений, составил 17,1 т/га. Картофель, подверженный воздействию сильной и продолжительной засухи в 2010 г., сформировал минимальную продуктивность, не превышающую 9.5 т/га.

**Таблица 16.** Урожайность клубней картофеля, т/га

Вариант	2010 г.	2011 г.	2012 г.	Среднее за 3 года	
				урожай	прибавка урожая
0	9.5±0.2	27.7±4.6	17.1±4.2	18.1	–
NP	9.0±0.3	28.9±3.2	26.8±3.6	21.6	3.5
NK	9.3±2.0	26.6±3.5	28.0±3.0	21.3	3.2
PK	9.7±0.6	26.7±3.9	17.5±1.4	18.0	–0.1
NPК	9.1±0.2	30.7±0.4	25.7±2.2	21.8	3.7
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>1.7 (р/н)</b>	<b>6.2 (р/н)</b>	<b>4.4</b>		

Минеральные удобрения, внесенные под картофель в условиях острого дефицита влаги в 2010 г. оказались неэффективны, поскольку в первом минимуме находились не обеспеченность растений элементами корневого питания, а содержание доступной влаги в почве. В опыте 2011 г. благодаря внесению удобрений при посадке картофеля был достигнут высокий уровень питания растений. Известно, что чем выше обеспеченность почвы доступными питательными веществами, тем ниже отзывчивость культуры на внесение удобрений [Bowen, 1991; Семенов, 1999; Шафран и др., 2015]. Но и в этих условиях наблюдалась тенденция положительного действия азотного и фосфорного удобрений на урожай картофеля. Относительно высокая эффективность азотного удобрения, обеспечившего достоверный рост урожая клубней на 8.2 т/га, достигалась лишь в опыте 2012 г., что находилось в соответствии со складывающимся уровнем азотного питания растений в первой половине вегетации картофеля. Внесение фосфорного и калийного удобрений под эту культуру не обеспечивало повышения ее продуктивности, что объясняется повышенным [Минеев, 2001] исходным уровнем обеспеченности почвы этими элементами. Другими исследователями также было показано, что эффективность фосфорных удобрений наиболее высока при низком содержании подвижного фосфора в почве. По мере увеличения его содержания эффективность фосфорных удобрений под картофель закономерно и нелинейно снижается [Прошкин, 2014].

Многочисленные исследования подтверждают, что применение минеральных удобрений влияет не только на урожай, но и на качество клубней картофеля [Власенко, 1987; Убугунов, 2003; Окороков, 2005; Белоус, 2010 и др.]. Содержание крахмала — один из основных показателей качества клубней картофеля. Результаты анализа содержания крахмала в клубнях, полученных в ходе проведения полевых опытов 2010–2012 гг. представлены в таблице 17 и на рис. 11. Максимальные значения получены на варианте РК, превышая значения, полученные как на контроле (без применения

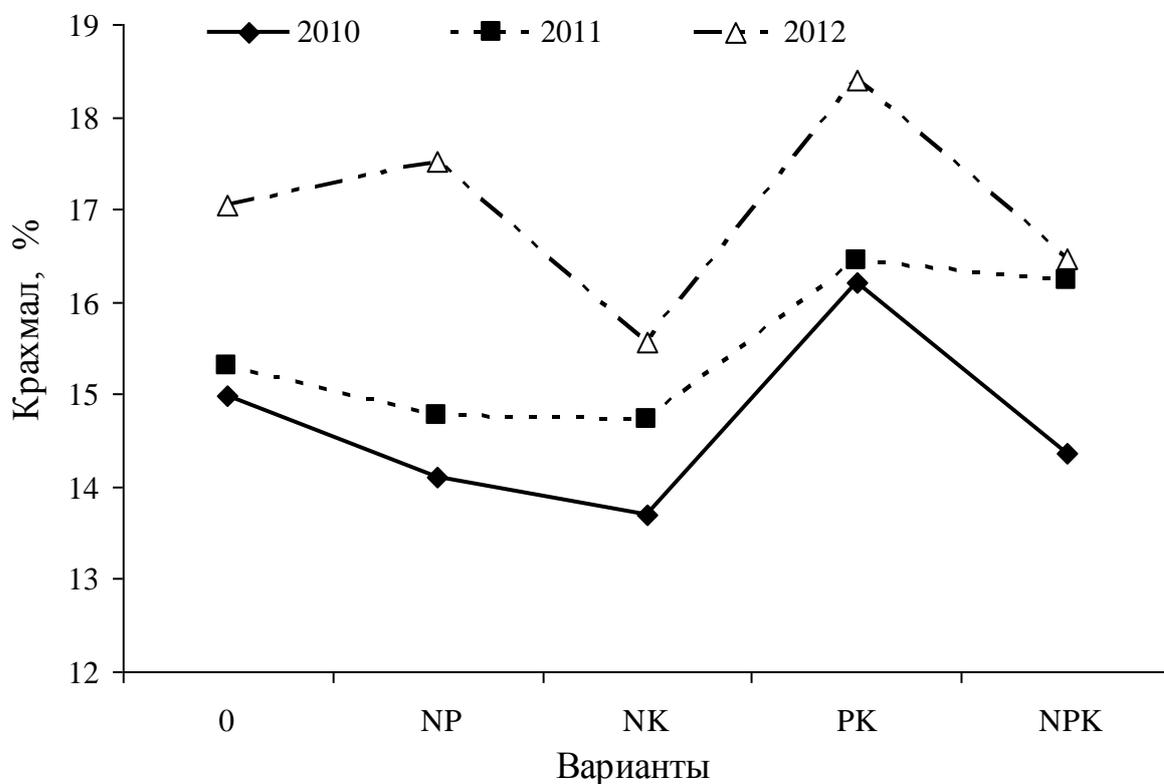
удобрений), так и на вариантах с внесением азотных удобрений. Следовательно, можно утверждать, что азотные удобрения снижают содержание крахмала, а фосфорно-калийные повышают, причем преобладает положительное влияние фосфора (сравнение вариантов NPK, NK и NP), что подтверждает имеющиеся в литературе данные [Федотова, 2003; Костин, 2001; Убугунов, 2003 и др.]. В 2012 году содержание крахмала в клубнях было выше по сравнению с 2010–2011 гг., тем не менее, закономерность, отмеченная в 2010–2011 гг., наблюдалась и в 2012 году: на варианте РК получены максимальные значения.

**Таблица 17.** Содержание крахмала, % сырого в-ва

Вариант	2010 г.	2011 г.	2012 г.
0	15.0±0.8	15.3±0.8	17.0±1.2
NP	14.1±0.6	14.8±0.6	17.5±2.0
NK	13.7±1.3	14.7±1.2	15.6±1.6
PK	16.2±2.5	16.5±1.1	18.4±2.4
NPK	14.4±1.5	16.2±0.7	16.5±0.6
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>1.5</b>	<b>0.9</b>	<b>1.7</b>

Дисперсионный анализ данных за 2010–2011 гг. показал, что в целом за два года вариабельность между вариантами находится в пределах статистической ошибки, а влияние года имеет достоверные различия. Таким образом, можно предположить, что благоприятные гидротермические условия способствуют повышению содержания крахмала. В литературных источниках имеется информация по изучению влияния гидротермических условий на накопление крахмала в клубнях картофеля. Была обнаружена тесная корреляционная связь между содержанием крахмала и количеством осадков за вегетационный период. Зависимость эта описывается параболой: максимальное накопление крахмала отмечено при 250 мм осадков, снижение и увеличение количества осадков от этой величины вызывало снижение качества картофеля по данному показателю. Аналогичная (параболическая) зависимость содержания крахмала выявлена и от теплообеспеченности

вегетационного периода. Наиболее активное накопление крахмала в клубнях происходило при температуре около 15 °С [Батомункуева и др., 2006].



**Рис. 11.** Содержание крахмала в клубнях, % сырого в-ва

Еще одним показателем качества клубней картофеля является содержание в них сухого вещества. Результаты анализа клубней, полученных в полевых опытах, представлены в таблице 18. Достоверных различий по этому показателю между вариантами отмечено не было.

**Таблица 18.** Содержание сухого вещества в клубнях, %

Вариант	2010 г.	2011 г.	2012 г.
0	23.2	20.1	25.8
NP	21.7	20.9	26.3
NK	22.5	19.9	25.9
PK	22.7	21.9	27.7
NPK	20.0	21.5	24.7
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>3.4 (р/н)</b>	<b>2.4 (р/н)</b>	<b>2.2 (р/н)</b>

### 3.1.5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные подтверждают необходимость внесения минерального азота в почву при возделывании картофеля. В процессе вегетации картофеля содержание азота в почве снижается в 1.5–3 раза. Внесение рационально обоснованных доз азотных удобрений позволяет достигнуть необходимого уровня продуктивности культуры, а также сохранить плодородие почвы.

Исходное содержание в почве подвижного фосфора на среднем уровне обеспеченности позволяет достигнуть оптимального уровня фосфорного питания картофеля в течение всей вегетации. Однако в экстремальных условиях сильной и продолжительной засухи поступление фосфора в растения резко замедляется, растения испытывают дефицит этого элемента, независимо от уровня обеспеченности почвы.

На процесс поступления калия в растения влияют условия увлажнения. Возможно, что причиной этого является закрепление калия в почве в необменной форме и переход его в недоступное для растений состояние, обусловленное сильным иссушением почвы.

Уровень азотного питания, выраженный в относительных показателях (содержание в растениях азота в % сух. в-ва) достаточно стабилен при разных условиях увлажнения. Однако абсолютные показатели (накопление и вынос, кг/га) значительно отличаются при разных режимах увлажнения: при дефиците влаги, несмотря на увеличение прироста надземной биомассы картофеля, наблюдается уменьшение уровня накопления в ней азота, начиная с фазы цветения и вплоть до уборки.

Условия острого дефицита влаги резко снижают поступление фосфора в растения, но в отличие от азота, его поглощение картофелем после фазы цветения продолжается, хотя и крайне низкими темпами. В динамике потребления калия растениями картофеля наблюдается закономерность, отмеченная для азота: в условиях длительного дефицита влаги имеет место

заметное снижение накопления калия в надземной биомассе картофеля от фазы цветения до уборки.

Азотные удобрения снижают содержание крахмала, а фосфорно-калийные повышают, причем преобладает положительное влияние фосфора

Результаты дисперсионного анализа показывают, что степень влияния внешних факторов на минеральное питание картофеля различно для разных элементов. Так для азотного питания характерна зависимость от фазы развития, однако можно отметить, что недостаток влаги приводит к дефициту азота в растениях. Что касается содержания фосфора в растениях, то основное влияние на этот показатель оказывает фактор года, причем питание картофеля фосфором, в еще большей степени, чем азотом, зависит от исходных свойств почвы и гидротермических условий, которые складываются в течение вегетации. Для калия влияние погодных условий проявляется в изменении содержания его в ботве картофеля, в отличие от клубней, где содержание этого элемента не имеет строгой связи с условиями года.

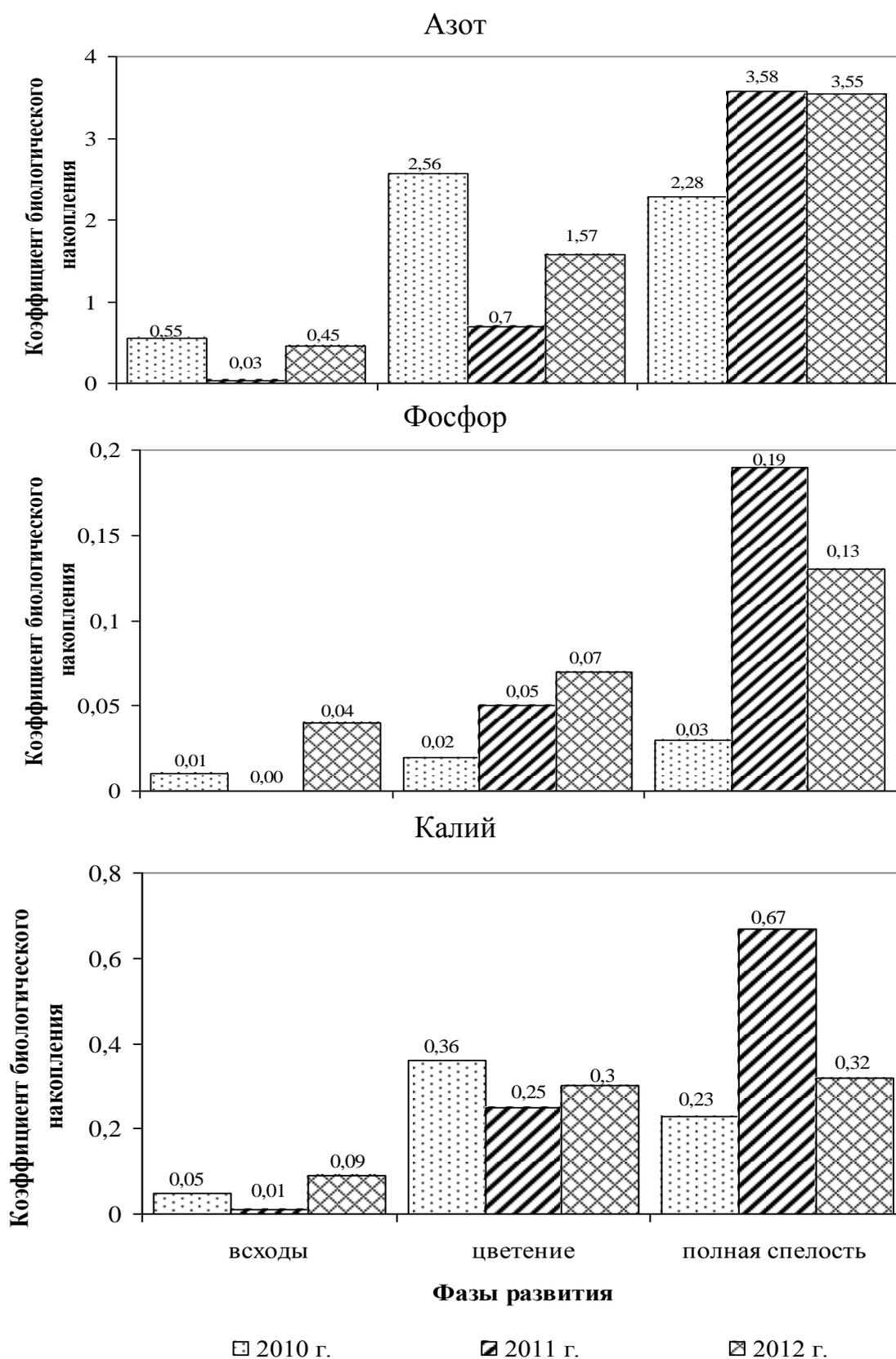
### **3.2. ВЛИЯНИЕ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВЕГЕТАЦИОННОГО ПЕРИОДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПОД КАРТОФЕЛЬ**

Резкие изменения гидротермических условий в течение вегетационного периода оказывают комплексное влияние на трансформацию элементов минерального питания в почве и физиолого-метаболическое состояние растений. Как следствие, экстремальные погодные условия все чаще и отчетливее лимитируют эффективность применяемых минеральных удобрений [Усков, 2008]. Влажность почвы является одним из ключевых факторов, контролирующих циклы азота и фосфора в экосистемах [Sardans, 2012]. Дефицит влаги может снижать рост растений за счет сокращения поглощения элементов питания, изменения их транспорта и перераспределения между органами [Rouphael, 2012]. Имеется много экспериментальных примеров ослабления поглощения культурами азота и фосфора при уменьшении влажности почвы [Cramer, 2009; Waraich, 2011; Sardans, 2012]. Показано, что стрессовая засуха оказывает более сильное отрицательное действие на содержание в растениях фосфора, чем азота, в результате чего расширяется соотношение N:P и обостряется фосфорное голодание растений [Заборин, Никитишен, 1988; He, 2014]. Процессы диффузии фосфора в почве более зависимы от влажности почвы по сравнению с азотом [Убугунов, 2003; Lambers, 2008], поэтому изменение содержания азота и фосфора в почве при засухе будет разно выраженным, что может быть причиной разбалансированности азотно-фосфорного питания растений в течение онтогенеза. Особую роль погодные условия оказывают на рост, развитие и минеральное питание картофеля [Шпаар, 2004; Коршунов, 2011; Лебедева, 2014]. Картофель относится к гидрофильному типу растений, более приспособленных к гумидным условиям, с высокой отрицательной чувствительностью к резким изменениям температуры и влажности [Шпаар, 2004; Лапшинов, 2009]. Поддержание оптимального режима влагообеспеченности почвы способствует существенному повышению

прибавки урожая картофеля от применения минеральных удобрений [Завалин, 1994; Коршунов, 2011]. Однако создание сбалансированной системы питания сельскохозяйственных культур с учетом экологических факторов, требует разработки новых критериев оценки состояния минерального питания растений и эффективности применяемых удобрений, в зависимости от гидротермических условий в течение вегетационного периода. Данные показатели было предложено оценивать системой параметров, отражающих степень потребления питательных элементов растениями, идущих на формирование урожая (коэффициент эффективности потребления, КЭП, то же самое, что и «разностный коэффициент использования»), окупаемость внесенного (агрономическая эффективность, АЭ) и потребленного растениями (физиологическая эффективность, ФЭ) питательного вещества полученной прибавкой [Семенов, 1999].

### **3.2.1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ КАРТОФЕЛЕМ АЗОТА, ФОСФОРА И КАЛИЯ УДОБРЕНИЙ**

Одним из параметров, характеризующих доступность растениям содержащихся в почве элементов, является так называемый коэффициент биологического поглощения, представляющий собой отношение содержания элемента в растениях к его содержанию в почве. Коэффициенты биологического поглощения наиболее часто употребляются при оценке аккумуляции микроэлементов (тяжелых металлов) растениями [Большаков, 1978; Алексеев, 1987; Ильин, 1991]. Однако содержание элемента в относительных величинах не всегда адекватно отражает его реальное потребление растениями из-за возможных эффектов разбавления и концентрирования в зависимости от величины биомассы. Более объективным показателем может быть коэффициент биологического накопления, который представляет собой отношение выноса питательного элемента к запасам его подвижной формы в почве.



**Рис 12.** Динамика коэффициента биологического накопления (КБН) макроэлементов картофелем в годы с разными погодными условиями (среднее по вариантам опыта), кг/га выноса с урожаем на кг/га запасов в почве.

Результаты расчетов коэффициентов биологического накопления (КБН) макроэлементов в годы с разными гидротермическими условиями представлены на рис. 12. Величина КБН азота в фазу полной спелости (ботва + клубни) в острозасушливый 2010 г. была даже меньше, чем в фазу цветения, составляя 2.28, что в 1.5 раза ниже, чем в 2011 и 2012 годы. Июльская засуха в 2012 г. не оказала влияния на КБН: величины КБН азота в 2011 и 2012 гг. были практически одинаковыми.

Влияние метеоусловий на процесс биологического накопления фосфора проявилось более заметно. В экстремальном 2010 году КБН фосфора был в 6.3 раза меньше по сравнению с более благоприятным по режиму увлажнения 2011 годом и в 4.3 раза — по сравнению с 2012 годом с краткосрочной засухой в июле.

Гидротермические условия отражались и на накоплении в растениях картофеля калия. Наибольшие значения КБН калия были в 2011 году, составляя 0.67. В условиях длительной засухи в 2010 году и периодической в 2012 году коэффициент биологического накопления был соответственно в 2.9 и 2.1 раза меньше.

В процессе вегетации растения потребляют элементы питания как внесенные с удобрениями, так и содержащиеся в почве. Поэтому эффективность использования питательных веществ целесообразнее оценивать по суммарному потреблению элемента из удобрений и из почвы, рассчитывая, так называемый «разностный коэффициент использования удобрений», или по другому определению «коэффициент эффективности поглощения» [Семенов, 1999], используя следующую формулу (1):

$$КЭП = [(V_{\text{вар}} - V_{\text{конт}}) : D] \times 100 \quad (1),$$

где, КЭП – коэффициент эффективности поглощения питательного вещества удобрениями растениями, % к дозе,  $V_{\text{вар}}$  и  $V_{\text{конт}}$  – вынос элемента питания (надземная биомасса+клубни) в варианте с удобрением и на контроле,  $D$  – доза питательного вещества, внесенного с удобрением. Обобщенные

значения коэффициентов эффективности потребления азота, фосфора и калия картофелем приведены в таблице 19.

**Таблица 19.** Коэффициенты эффективности потребления (КЭП) картофелем элементов минерального питания в течение вегетации, % к внесенному с удобрениями

Элемент	Всходы			Цветение			Полная спелость		
	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
Азот	4.4	0.0	19.8	41.6	66.6	95.7	20.7	74.4	83.7
Фосфор	3.2	0.0	7.9	-3.9	11.4	5.7	-2.1	22.7	-3.8
Калий	2.7	1.2	17.6	11.1	62.1	75.1	-5.8	65.1	35.1

**Азот.** Эффективность поглощения азота зависела от фазы развития растений, а также от гидротермических условий в течение вегетации. До появления всходов питание картофеля в значительной степени определяется запасами элементов питания в материнском клубне, поэтому данные об эффективности потребления макроэлементов из почвы могут быть не совсем информативны. Более интересны значения КЭП в фазы цветения и полной спелости, т.е. в периоды максимальной интенсивности питания. Наиболее эффективно азот удобрений потреблялся в 2012 году, причем КЭП увеличился от фазы всходов до цветения с 19.8 до 95.7 %, хотя к фазе полной спелости уменьшился до 83.7 % от дозы. Уменьшение разностного коэффициента использования удобрений растениями между фазами цветения и полного созревания довольно распространенное явление для многих культур, вызванное как оттоком в корни ассимилятов и их выделением в ризосферу, так и частичным опадом вегетативной массы. Достаточно высокий КЭП азота картофелем был и в 2011 году, хотя эффективность потребления азота была несколько ниже из-за высокой исходной обеспеченности почвы минеральным азотом. Хуже всего поглощался азот в острозасушливом 2010 году: наибольшее его значение в фазу цветения

составило всего 41.6 %, а к моменту полной зрелости клубней уменьшилось почти в 2 раза. Таким образом, засушливые условия года резко ограничили поглощение картофелем азота из удобрений и почвы.

**Фосфор.** Коэффициент использования растениями фосфора, как правило, существенно меньше, чем азота. При этом, судя по данным, представленным в таблице 19, эффективность поглощения фосфора удобренными растениями в большей мере зависит от погодных условий, чем поглощение азота. В резко засушливом 2010 году фосфор из удобрений либо практически не использовался, либо его использование было значительно меньше потребленного из почвенных запасов, что и привело к отрицательным величинам КЭП. В 2011 году, в условиях достаточного увлажнения, наблюдался плавный рост КЭП фосфора в течение всего периода вегетации, достигая максимальных значений к фазе полной спелости (22.7 % от дозы). Июльская засуха 2012 года также сказалась на эффективности потребления фосфора: в фазу полной спелости, которой предшествовал засушливый период, также отмечены отрицательные значения КЭП.

**Калий.** Влияние дефицита влаги отразилось и на эффективности поглощения калия. В 2010 году калий из удобрений поглощался только до фазы цветения, и то незначительно, составив всего 11.1 % от внесенного количества, а в фазу полной спелости коэффициент эффективности поглощения калия имел отрицательное значение (табл. 19). Иными словами, растения не могли использовать дополнительное количество калия из удобрения из-за его позиционной недоступности или избыточно высокой концентрации в почвенном растворе. Этим объясняется дефицит калия в растениях, характерный для 2010 года, несмотря на достаточную обеспеченность почвы подвижным калием и внесение удобрений.

В условиях достаточного увлажнения 2011 г. наблюдался плавный рост эффективности потребления калия из удобрений с 1.2% в фазу всходов до 65.1% к концу вегетации. В условиях 2012 г. КЭП в фазу цветения достигал

максимального значения, более высокого, чем в 2011 году, но из-за краткосрочной июльской засухи уменьшился к моменту уборки урожая до 35.1% от дозы. Известно, что в условиях резкой засухи наблюдается выделение калия растениями [Генкель, 1982]. Чем длительней засуха, тем продолжительнее отток калия из растений. Вероятно, этим объясняются различия в эффективности потребления калия при длительной и краткосрочной засухе в 2010 и 2012 гг., соответственно.

Таким образом, метеорологические условия, складывающиеся на протяжении вегетационного периода, в значительной мере влияют как на доступность растениям элементов питания из удобрения и почвы, так и на способности растений поглощать их из почвы.

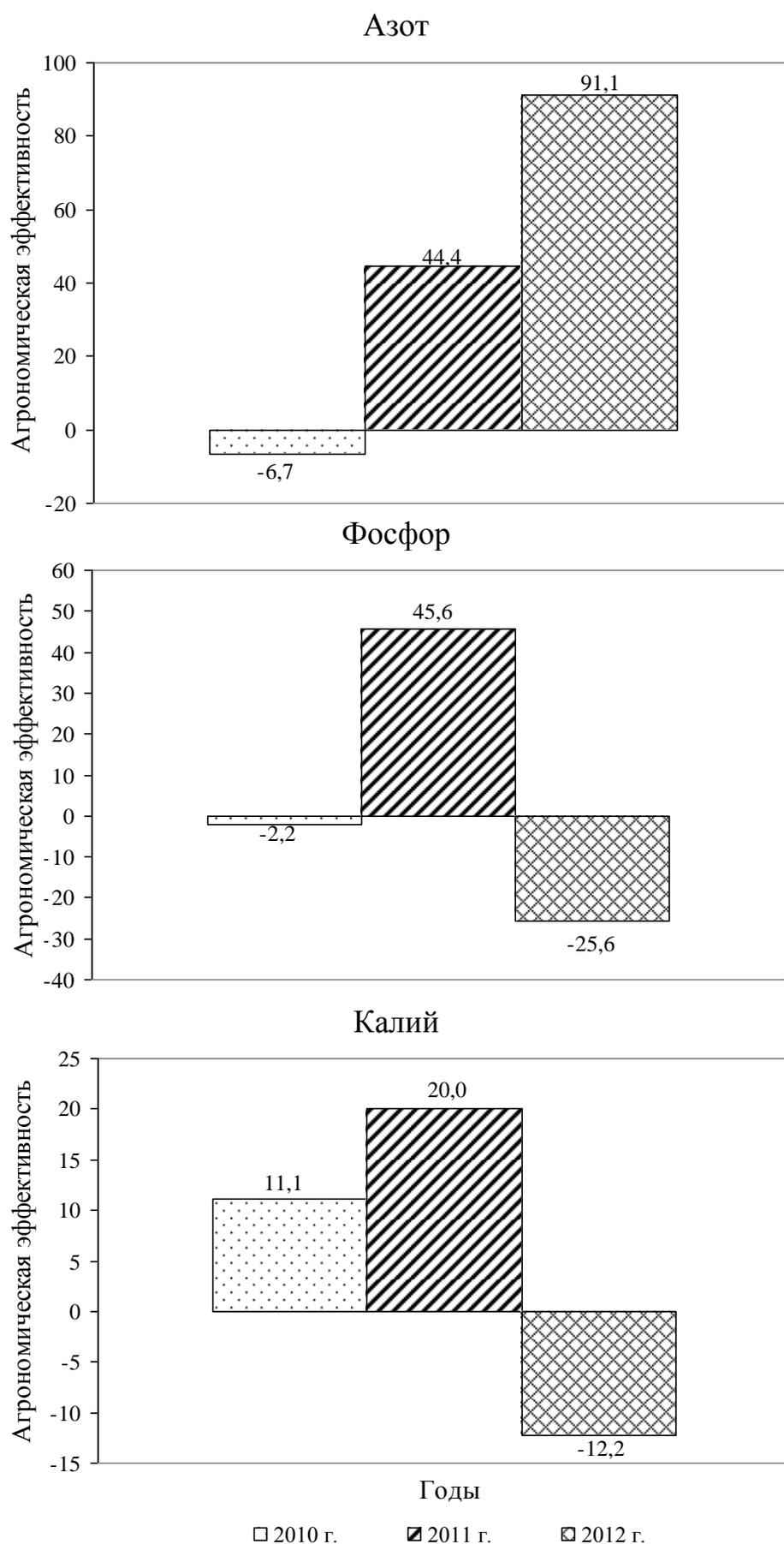
### **3.2.2. АГРОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДОБРЕНИЙ**

Результирующим показателем эффективности удобрений считается величина прибавки урожая основной продукции по отношению к контролю. Но это не позволяет оценить эффективность разных доз удобрений, так как максимальная прибавка урожая при высоких дозах может сопровождаться значительными потерями действующих веществ удобрений [Семенов, 1999]. Чтобы получить более ясную картину о реальной эффективности удобрений, используется показатель окупаемости внесенного элемента с удобрениями прибавкой урожая основной продукции. В англоязычной литературе этот показатель обозначается как агрономическая эффективность удобрения [Bowen, 1991] и рассчитывается по формуле (2):

$$АЭ=(У_{\text{вар}}-У_{\text{конт}}):Д \quad (2),$$

где, АЭ – агрономическая эффективность,  $У_{\text{вар}}$  и  $У_{\text{конт}}$  – урожай основной продукции на варианте с удобрением и на контроле, Д – доза действующего вещества удобрений.

Было оценено влияние гидротермических условий, складывающихся в течение вегетации, на агрономическую эффективность азота, фосфора и калия минеральных удобрений, вносимых под картофель (рис. 13).



**Рис 13.** Агрономическая эффективность азота, фосфора и калия удобрений, применяемых под картофель, кг клубней / кг действующего вещества удобрений

Судя по полученным результатам, агрономическая эффективность каждого макроэлемента по-разному проявляется при разных режимах увлажнения, хотя в целом, просматривается закономерность: в благоприятных погодных условиях 2011 г. внесенные удобрения были наиболее эффективны.

**Азот.** В экстремально засушливых условиях 2010 года азот удобрений не окупался прибавкой урожая клубней. В благоприятных условиях 2011 года агрономическая эффективность азота удобрений составила 44,4 кг клубней/кг N (рис.13), что согласуется с другими данными для серых лесных почв, в которых окупаемость азотных удобрений, применяемых под картофель, была на уровне 40–60 кг/кг [Окороков, 2005; Шафран и др., 2015]. Некое противоречие, что при краткосрочной засухе в 2012 года агрономическая эффективность азотных удобрений была выше, чем в благоприятном 2011 году является, в действительности, кажущимся, и вызвано повышенной обеспеченностью почвы азотом во второй год опыта из-за планового допосевного внесения нитрофоски на всем производственном массиве, включая и экспериментальный участок. Известно, что чем выше обеспеченность растений питательными веществами, тем ниже агрономическая эффективность элементов, внесенных с удобрениями [Bowen, 1991; Семенов, 1999; Батомункуева, 2006; Шафран и др., 2015].

**Фосфор.** Уровень обеспеченности почвы доступным фосфором был выше среднего в течение всех трех лет эксперимента, т.е. его содержание в почве не было лимитирующим фактором для картофеля. Вероятно, что в этих условиях режим увлажнения был одним из решающих факторов, влияющих на агрономическую эффективность фосфорных удобрений. В благоприятных метеоусловиях 2011 года фосфор, внесенный с удобрениями, активно использовался на формирование урожая клубней, давая прибавку 45.6 кг клубней на кг действующего вещества (рис.13). В условиях длительной 2010

года и краткосрочной засухи в 2012 году агрономическая эффективность фосфорных удобрений имела отрицательные значения, т.е. фосфор удобрений не окупался прибавкой урожая.

**Калий.** Разные погодные условия, складывающиеся в течение вегетации, влияли на агрономическую эффективность калийных удобрений (рис. 13). Как следует из полученных данных, наибольшая эффективность калийных удобрений получена в 2011 году, составив 20 кг клубней/кг внесенного  $K_2O$ , что в 2 раза выше, чем в засушливом 2010 году. Это согласуется с экспериментальными данными полученными другими исследователями [Рузавин, 2009]. Несмотря на высокий калийный фон в 2010 году калий, внесенный с удобрениями, также оказался эффективным и обеспечивал прибавку урожая в размере 11.1 кг клубней/кг внесенного  $K_2O$ . В экстремально засушливых условиях калий в почве переходил в недоступное для растений состояние, и внесение дополнительных доступных форм этого элемента положительно влияло на продуктивность картофеля. В 2012 году калий удобрений не окупался прибавкой урожая клубней, вследствие недостаточных доступных запасов этого элемента в почве.

Таким образом, агрономическая эффективность азотных, фосфорных и калийных удобрений существенно варьирует в разные годы возделывания картофеля. Окупаемость азота удобрений прибавкой урожая клубней в среднем за три года исследований составила 43 кг/кг внесенного азота, фосфора и калия – примерно 6 кг/кг, достигая в отдельные годы 46 и 20 кг/кг соответственно.

### **3.2.3. ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДОБРЕНИЙ**

Целью повышения эффективности вносимых удобрений является увеличение их вклада в прибавку урожая основной продукции. Показателем, который характеризует этот вклад, является физиологическая эффективность, отражающая не только активность поглощения растением того или иного элемента, но и степень включения его в биохимические процессы,

ответственные за синтез сложных органических соединений [Семенов, 1999]. По физиологической эффективности можно судить об окупаемости поглощенного растением элемента питания прибавкой урожая основной продукции (3):

$$\Phi Э = (Y_{\text{вар}} - Y_{\text{конт}}) : (B_{\text{вар}} - B_{\text{конт}}) \quad (3),$$

где,  $\Phi Э$  – физиологическая эффективность, а  $Y_{\text{вар}}$ ,  $Y_{\text{конт}}$ ,  $B_{\text{вар}}$ , и  $B_{\text{конт}}$  то же, что в формулах 1 и 2. При этом следует учитывать, что если прибавка урожая, прибавка выноса, а также оба эти показателя — отрицательны, то физиологическая эффективность также будет отрицательной.

**Таблица 20.** Физиологическая эффективность удобрений, кг клубней/кг выноса элемента

Элемент	Прибавка урожая, кг/га			Прибавка выноса, кг/га			Физиологическая эффективность		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
Азот	-600	4000	8200	18.6	67.0	75.3	-32.2	59.7	108.9
Фосфор	-200	4100	-2300	-1.9	20.4	-3.4	-105.5	201.0	-676.5
Калий	100	1800	-1100	-5.2	58.6	31.6	-19.1	30.7	-34.8

Как видно из результатов, представленных в табл. 20, азотные удобрения повышали вынос азота с урожаем как в благоприятных по режиму увлажнения 2011 и 2012 годах, так и в засушливом 2010 году. Однако в 2010 году азот, хотя и поглощался растениями, не шел на формирование клубней: прибавки урожая клубней от внесенного азота не наблюдалось, и физиологическая эффективность была отрицательной. В 2012 г. прибавка выноса азота была незначительно выше, чем в 2011 г., но прибавка урожая клубней оказалась выше более чем в два раза, и как следствие, почти в два раза возросла физиологическая эффективность. Таким образом, условия 2012 года с краткосрочной июльской засухой не отразились на эффективности усвоения азота, поглощенного картофелем.

Фосфорные удобрения были физиологически эффективны только в достаточно благоприятном по метеоусловиям 2011 году (табл. 20). В два других года фосфор удобрений не только слабо поглощался картофелем, но и плохо усваивался вегетирующими растениями, что и ограничивало его физиологическую эффективность. Следовательно, эффективность фосфорных удобрений в большей мере зависима от погодных условий по сравнению с азотными удобрениями. Этот факт отмечен и в работах других авторов [Убугунов, 2003].

Схожая с фосфором ситуация была свойственна и для калия: положительные значения физиологической эффективности, были получены только в 2011 году (табл. 20). В экстремальном 2010 году применение калийных удобрений давало статистически недостоверную прибавку урожая клубней, но не приводило к увеличению выноса калия с урожаем. В условиях этого года было отмечено снижение выноса калия к концу вегетации во всех вариантах опыта, т.е. поглощенный калий не включался в синтетические процессы при клубнеобразовании, а терялся из растений. По той же причине из-за краткосрочной июльской засухи основное количество поглощенного в 2012 году калия удобрений не усваивалось растениями.

Таким образом, показатель физиологической эффективности является хорошим индикатором способности растений использовать поглощенные элементы питания на формирование урожая. При определенных метеоусловиях эффективность минеральных удобрений лимитируется не столько доступностью питательных веществ в почве или размерами их поглощения, сколько общим состоянием метаболизма растений, активность которого в значительной мере обусловлена экологическими факторами.

### **3.2.4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Гидротермические условия, складывающиеся в течение вегетационного периода, выступают одним из ключевых факторов эффективности

минеральных удобрений, отражаясь как на размерах поглощения азота, фосфора и калия, так и на эффективности их усвоения растениями.

Что касается влияния погодных условий на эффективность азотных удобрений, было показано следующее: все рассматриваемые показатели проявили одинаковую зависимость от погодных условий — дефицит влаги сказался на них отрицательно. В условиях экстремально-засушливого года коэффициент эффективности поглощения картофелем азота составил 20.7 % от дозы удобрения, а внесенный с удобрениями и поглощенный растениями азот не обеспечивал прироста урожая клубней. В годы с краткосрочной июльской засухой и благоприятными в течение периода вегетации метеоусловиями коэффициент эффективности поглощения азота достигал 74.4-83.7 % от дозы, а величины агрономической и физиологической эффективности азотных удобрений составляли 44-91 и 60-109 кг клубней/кг N соответственно.

Эффективность фосфорных удобрений в большей мере зависела от метеоусловий вегетационного периода, чем азотных удобрений. Как продолжительные, так и краткосрочные высокие температуры на фоне дефицита влаги ограничивали поглощение удобрениями растениями фосфора и его использование на формирование прибавки урожая клубней. При достаточно благоприятных условиях вегетационного периода коэффициент эффективности поглощения картофелем фосфора составил 22.7 % от внесенного, а окупаемость внесенного и поглощенного растениями фосфора – 46 и 201 кг клубней/кг  $P_2O_5$ .

Применение калийных удобрений было отчетливо эффективным только в благоприятном по гидротермическим условиям сезоне. Коэффициент эффективности поглощения картофелем калия составлял 65 % от дозы, агрономическая эффективность калия удобрений – 20 кг клубней/кг внесенного  $K_2O$ , а физиологическая эффективность поглощенного калия – 30.7 кг клубней /кг  $K_2O$ .

### **3.3. ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ СЕРЫ В ПОЧВЕ, СЕРНОЕ ПИТАНИЕ КАРТОФЕЛЯ И ЕГО ОТЗЫВЧИВОСТЬ НА СЕРОСОДЕРЖАЩИЕ УДОБРЕНИЯ**

Одной из особенностей современного земледелия является увеличение числа случаев проявления дефицита серы в питании растений. Это обусловлено изменениями в ассортименте минеральных удобрений и структуре севооборотов, сокращении объемов внесения органических удобрений, ростом продуктивности сельскохозяйственных культур и, как следствие, увеличением количества отчуждаемой с урожаем серы [Нортон, 2014]. Если в одних регионах дефицит серы может частично или полностью покрываться атмосферными выпадениями, то в других регионах размеры атмосферных выпадений серы существенно меньше потребляемого растениями количества [Маслова, 2008; Scherer, 2009].

В связи с резким снижением применения агрохимических средств, например в Московском регионе, наметилась тенденция снижения запасов сульфатной серы в пахотных почвах. За три года (1998-2001) ее средневзвешенное содержание уменьшилось на 29%, площади обследованной пашни с низким содержанием серы возросли на 35% [Курганова, 2004]. Учитывая довольно резкую динамику снижения серы, необходимо проведение систематического контроля за содержанием этого элемента в почвах региона. В связи с тем, что 43% земель региона имеют низкую обеспеченность доступными соединениями серы, на них следует применять серосодержащие удобрения в дозе 30-50 кг/га д.в. S, в особенности под культуры с повышенной потребностью в сере, например под бобовые и крестоцветные.

Сера в почве присутствует в неорганической и органической форме, но доступного для растений иона  $SO_4^{2-}$  содержится только около 5% от ее запасов в почве, а остальное количество серы находится в связанном состоянии в виде органических соединений [Scherer, 2009]. Между органическим и минеральным пулами происходит постоянный обмен серы в

результате противоположно направленных процессов мобилизации и сорбции, минерализации и иммобилизации, окисления и восстановления. Высвобождение серы в доступной для растений форме зависит от факторов, контролируемых как минерализацию органических субстратов микроорганизмами, так и соотношение сорбции и десорбции сульфат-иона, таких как концентрация  $SO_4^{-2}$  и других ионов в почвенном растворе, pH почвы, характера почвенно-поглощающего комплекса [Scherer, 2009].

В таблице 21 представлены результаты анализа почвы по содержанию в ней подвижной серы. Согласно существующей классификации [Церлинг, Ерофеев, 1974], почва опытных участков может быть охарактеризована как имеющая умеренный недостаток серы (на контрольных вариантах) и полностью обеспеченная серой (на вариантах NPK и NPK+S), причем внесение серных удобрений статистически значимо повышает этот показатель.

**Таблица 21.** Содержание серы ( $SO_4^{-2}$ ) в серой лесной почве, мг /кг

Вариант опыта	Фаза вегетации		
	Всходы	Цветение	Полная спелость
2011 г.			
0	14.6±3.3	10.8±1.1	13.4±4.2
NPK	40.9±3.3	12.7±1.1	15.6±5.7
NPK+S	62.5±3.7	20.4±5.1	20.4±9.2
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>5.3</b>	<b>4.9</b>	<b>12.8 (р/н)</b>
2012 г.			
0	10.3±2.4	12.7±2.5	15.1±3.9
NPK	14.1±2.9	18.9±3.3	20.8±3.3
NPK+S	24.2±2.5	26.1±10.1	26.6±3.6
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>4.1</b>	<b>10.0</b>	<b>5.8</b>

Кроме того, эти данные подтверждают факт, установленный другими исследователями, что процесс превращения соединений серы в почве очень динамичен [Маслова, 1980]. Например, на контроле в 2011 г. от фазы всходов до цветения наблюдается снижение содержания серы с 14.6 до 10.8 мг/кг, что можно объяснить ее потреблением растениями, а затем, несмотря на

продолжающийся рост потребления, количество подвижной серы в почве возрастает. Причиной этого могут быть процессы внутрипочвенной трансформации соединений серы, например, минерализация органических субстратов. В условиях 2012 г. на всех вариантах отмечено увеличение содержания подвижной серы в почве в течение вегетации.

В настоящее время установлены критические уровни содержания серы в растениях: для картофеля этот показатель составляет 0.21-0.23% в ботве [Аристархов, 2007]. В фазу всходов содержание серы было наибольшим (0.40-0.63%), а затем происходит постепенное снижение содержания до 0.21-0.27% в фазу полной спелости (табл. 22). Содержание серы в клубнях было на уровне 0.10-0.17%. Эти данные подтверждают теоретические представления о максимальном потреблении серы в период наибольшей метаболической активности растений. Кроме того, исходя из критерия критического содержания серы в растениях можно утверждать, что растения картофеля не испытывали дефицита серы в течение вегетации.

**Таблица 22.** Динамика содержания серы в надземной биомассе и клубнях картофеля по фазам вегетации, % сух. в-ва

Вариант	Всходы (надземная биомасса)	Цветение (надземная биомасса)	Полная спелость	
			надземная биомасса	клубни
2011 г.				
0	0.40±0.02	0.31±0.02	0.23±0.02	0.16±0.01
NPK	0.41±0.02	0.34±0.02	0.27±0.03	0.17±0.02
NPK+S	0.44±0.02	0.34±0.01	0.27±0.03	0.15±0.01
2012 г.				
0	0.61±0.05	0.39±0.04	0.22±0.01	0.10±0.01
NPK	0.61±0.05	0.46±0.05	0.23±0.02	0.12±0.01
NPK+S	0.63±0.02	0.48±0.04	0.21±0.01	0.12±0.01

Вынос серы с урожаем основной продукции находится, как правило, в интервале 10-30 кг/га и зависит от вида культуры и уровня урожайности. Так зернобобовые (соя, горох, нут, чечевица) в среднем выносят 1.4-3.5 кг/т;

зерновые (пшеница, ячмень, кукуруза) – 1.1-1.4 кг/т; масличные (рапс, подсолнечник) – 1.7-5.0 кг/т [Нортон, 2014].

**Таблица 23.** Накопление серы биомассой картофеля, кг/га

Вариант	Всходы	Цветение	Полная спелость			Вынос кг/т *
			ботва	клубни	ботва+клубни	
2011 г.						
0	0.2 (0.9 %)	5.8 (26.1 %)	12.8	9.4	22.2 (100 %)	0.3
NPK	0.5 (2.0 %)	11.4 (43.4 %)	15.0	11.2	26.2 (100 %)	0.4
NPK+S	0.6 (3.0 %)	11.4 (55.3 %)	11.7	8.9	20.7 (100 %)	0.3
2012 г.						
0	3.2 (30.6%)	8.2 (78.0 %)	6.2	4.4	10.6 (100 %)	0.3
NPK	7.7 (54.6 %)	16.4 (117.0 %)	6.4	7.6	14.1 (100 %)	0.3
NPK+S	7.1 (46.1 %)	17.3 (113.2 %)	6.5	8.8	15.3 (100 %)	0.4

\* Указан вынос с основной продукцией (клубни). В скобках указано накопление серы в каждую фазу вегетации, % от конечного выноса.

Как видно из таблицы 23, вынос серы картофелем на единицу основной продукции значительно ниже, чем другими культурами, составляя 0.3-0.4 кг/т. Схожие результаты получены и другими исследователями [Григорьев, 1973; Кук, 1975, Вальников, 1981, цит. по Аристархову, 2007].

Рассмотрим влияние серосодержащих удобрений на урожай и качество клубней картофеля. Данные учета урожайности представлены в таблице 24.

**Таблица 24.** Влияние серосодержащих удобрений на урожай клубней картофеля, т/га

Вариант	2011 г.	2012 г.	Среднее за 2 года	
			урожай	прибавка урожая
0	27.7±4.6	17.1±4.2	22.4	–
NPK	30.7±0.4	25.7±2.2	28.2	5.8
NPK+S	28.2±6.7	24.7±2.8	26.5	4.1
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>6.2 (р/н)</b>	<b>4.4</b>		

Как видно из полученных результатов, дополнительное внесение серы не оказывает положительного влияния на урожай картофеля. Хотя разница

между вариантами NPK и NPK+S находится в пределах статистической ошибки, все же можно отметить тенденцию снижения урожайности в варианте NPK+S, которая проявилась как при благоприятном режиме увлажнения, так в условиях периодической засухи.

Внесение серных удобрений не привело к увеличению содержания крахмала, скорее наоборот, можно говорить о снижении крахмалистости клубней относительно варианта NPK (табл.25).

**Таблица 25.** Содержание крахмала в клубнях картофеля, % сырого в-ва

Вариант	2011 г.	2012 г.
0	15.3±0.8	17.0±1.2
NPK	16.2±0.7	16.5±0.6
NPK+S	15.6±0.6	15.9±1.0
<b>НСП<sub>05</sub></b>	<b>0.9</b>	<b>1.7</b>

Результаты, полученные другими исследователями о том, что под действием серы содержание крахмала в клубнях картофеля увеличилось на 1.2 % [Фомина, 1982], в наших опытах не подтвердились.

### 3.3.1. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заметные колебания в содержании в серой лесной почве доступных соединений серы на протяжении летних месяцев свидетельствует о динамичности этого питательного элемента, связанной с интенсивным внутрипочвенным оборотом с участием химических и биологических процессов. Необходимы дополнительные исследования для понимания процессов и механизмов, контролируемых формирование доступного растениям пула серы в почве. Картофель, по-видимому, не относится к культурам с высокой потребностью в сере. Дополнительное внесение серы с удобрением не давало прироста урожая клубней картофеля, а также не способствовало увеличению содержания крахмала в клубнях, скорее наоборот, отмечена тенденция уменьшения крахмалистости клубней на фоне серосодержащего удобрения.

### 3.4. ЗНАЧЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В ПОДДЕРЖАНИИ СБАЛАНСИРОВАННОГО СООТНОШЕНИЯ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ В ПИТАНИИ КАРТОФЕЛЯ

Известно, что величина урожая лимитируется элементом, который находится в минимуме, однако максимальный урожай может быть получен только при обеспечении потребности во всех элементах в нужной пропорции, т.е. при сбалансированном питании [Ринькис, 1972; Ермохин, 1989; Горшкова, 2000; Елькина, 2006]. Растения более чувствительны не к абсолютным количествам элементов в питательной среде, а к соотношениям их концентраций [Уоллес, 1966].

Согласно положению Журбицкого [Журбицкий, 1963] соотношение основных питательных элементов (N:P:K) является устойчивой характеристикой, специфичной для каждой культуры. При этом следует учитывать, что это соотношение изменяется как по фазам развития и отдельным органам растения, так и в зависимости от гидротермических условий, складывающихся в период вегетации, а также от сортовых особенностей культуры. Проанализировав показатели соотношения между содержанием основных макроэлементов в растениях в фазы всходов, цветения и полной спелости и сопоставив их с оптимальными значениями, предложенными Церлинг [Церлинг, 1990], можно составить представление о сбалансированности питания картофеля этими элементами в ходе вегетации (табл. 26).

Как показали полученные данные, сбалансированное поступление азота и фосфора (N:P) в надземные органы картофеля в **фазу всходов** наблюдалось только в опыте 2010 г. В опытах 2011 и 2012 гг. проявился дисбаланс питания растений азотом и фосфором, обусловленный недостатком азота во всех вариантах опыта, кроме НК (2012 г.). Что касается соотношения азота и калия (N:K) в растениях в фазу всходов, то в опытах 2010 и 2011 гг. оно было сбалансированным, а в опыте 2012 г. — неуравновешенным вследствие дефицита калия.

**Таблица 26.** Соотношение макроэлементов в биомассе картофеля в течение вегетации

Вариант	Фаза вегетации картофеля							
	Всходы		Цветение		Полная спелость			
	N:P	N:K	N:P	N:K	ботва		клубни	
N:P					N:K	N:P	N:K	
2010 г.								
0	10	1.1	15	0.8	15	0.9	6	1.3
NP	10	1.3	16	1.0	17	1.0	6	1.3
NK	13	1.3	14	1.2	14	1.5	7	1.5
PK	11	1.4	14	1.1	16	1.3	6	1.3
NPK	11	1.3	17	0.9	20	1.0	6	1.2
2011 г.								
0	7	1.3	11	0.9	9	0.9	5	1.0
NP	7	1.3	9	1.0	8	0.9	6	1.1
NK	8	1.1	12	0.8	8	0.6	5	1.0
PK	7	1.1	11	0.7	7	0.7	5	0.9
NPK	7	1.1	11	0.9	9	0.7	6	1.1
NPK+S	7	1.2	11	0.8	9	0.7	5	1.0
2012 г.								
0	6	0.7	7	0.6	8	1.1	4	0.6
NP	7	0.9	11	1.0	9	1.4	6	1.0
NK	10	0.9	11	0.7	10	1.0	6	0.8
PK	6	0.6	6	0.5	7	0.8	4	0.6
NPK	6	0.6	10	0.7	9	0.7	7	0.9
NPK+S	7	0.8	10	0.7	9	0.8	6	0.9
<b>Оптимум</b>	<b>9-12</b>	<b>1.2</b>	<b>11</b>	<b>0.8-1.1</b>	<b>8</b>	<b>0.5</b>	<b>—*</b>	<b>—*</b>

\* — нет данных

В фазу цветения в опыте 2010 г. из-за сильной засухи складывались крайне неблагоприятные условия фосфорного питания картофеля, что предопределило несбалансированность питания растений азотом и фосфором. В опыте 2011 г. потребление макроэлементов растениями во всех вариантах, кроме NP (обусловленного повышенным содержанием фосфора) и PK (за счет некоторого дефицита азота), протекало в сбалансированном соотношении. В 2012 году соотношение N:P на вариантах с внесением азота было оптимальным, а на контроле и в варианте PK картофель испытывал дефицит азота. В опыте 2012 г. на контроле и вариантах с внесением

калийного удобрения выявлен дисбаланс потребления растениями азота и калия, обусловленный дефицитом азота. Характерно, что в варианте NP питание картофеля этими элементами осуществлялось сбалансировано.

**В фазу полной спелости** недостаток фосфора у картофеля, проявившийся во время цветения в опыте 2010 г., еще более обострился, что предопределило усиление степени несбалансированности питания растений азотом и фосфором. Соотношение N:P составило 15-20 при норме 8. В опытах 2011 и 2012 гг. складывались более благоприятные условия для обеспечения уравновешенного поступления азота и фосфора в надземные органы картофеля. Во всех вариантах, кроме РК, соотношение N:P находилось в пределах, близких к оптимуму, что характеризовало нормальный уровень сбалансированности азотного и фосфорного питания картофеля. О дисбалансе азота и калия у картофеля в фазу полной спелости, наиболее выраженном в опыте 2010 г., свидетельствуют показатели соотношения N:K, в ряде случаев заметно превышающие значение оптимума (1.3-1.5 – варианты НК и РК). Эти данные позволяют предположить, что дисбаланс азотно-фосфорного питания (на варианте НК – ухудшается фосфорное питание, а на варианте РК – азотное) в неблагоприятных условиях увлажнения является дополнительным негативным фактором, ухудшающим калийное питание. Тот же самый эффект отмечен и в 2012 г. на варианте NP.

Таким образом, полученные в полевых опытах данные свидетельствуют о том, что сбалансированность питания картофеля в условиях 2010 г. в большей степени ограничивалась дефицитом фосфора и калия, вызванным, в свою очередь, крайне неблагоприятными гидротермическими условиями в течение вегетации. В более благоприятном 2012 г. в первом минимуме находился, главным образом, азот. В опыте 2011 г. потребление растениями азота и фосфора во время цветения и полной спелости протекало в уравновешенном соотношении, а сбалансированное потребление азота и калия – в фазе всходов и цветения.

Данных о соотношении азота, фосфора и калия с серой в органах растений и по фазам развития растений, в литературе недостаточно. Существует общее положение, что азот и сера входят в состав белков в строго определенном количестве, характеризующем биологическую ценность каждого вида растений. Как правило, растительные протеины обычно содержат 1% серы и 17% азота [Аристархов, 2007], и поэтому отношение содержания в растениях азота к сере может служить диагностическим признакам условий серного питания. В тоже время некоторые исследователи считают, что при проведении растительной диагностики не следует полностью полагаться на соотношение N:S, так как этот показатель может вводить в заблуждение [Нортон, 2014]. Вероятно, следует признать, что соотношение N:S равное 17 как критерий оптимума, не может быть единым для разных культур. Так в работе Фоминой [Фомина, 1982] было показано, что при оптимальном серном питании отношение общего азота к сере для клубней и ботвы картофеля составило соответственно 11.1 и 7.9. Это согласуется с нашими данными (табл. 27), когда соотношение N:S в ботве в фазу полной спелости находилось в интервале 6-8, а в клубнях – 8-11.

Согласно имеющимся в литературе данным, критический уровень содержания серы для картофеля составляет – 0.21-0.23 % (в ботве) [Аристархов, 2007]. Данные по содержанию серы в растениях, полученные в наших опытах (табл. 22), говорят о том, что содержание серы в растениях не было дефицитным. Содержание азота в ботве и клубнях картофеля в фазу полной спелости в 2011-2012 гг. также было оптимальным (табл. 4, гл.3.1.1.), за исключением варианта NPK+S (ботва), что проявилось в более низком значении соотношения N:S (табл. 27).

Следовательно, можно предположить, что соотношение N:S в фазу полной спелости в надземной биомассе в интервале 6-8, а в клубнях – 8-11, характеризует оптимальный уровень питания картофеля. Для уточнения данного показателя необходимо проводить дальнейшие исследования.

Целым рядом исследований показано, что между серой и фосфором соотношение близко к единице [Демолон, 1961; Баранов, 1969; Чернова, Хоменко, 1983 и др.]. Для картофеля были предложены следующие значения: соотношение P:S на уровне 1.3 и 0.4 для клубней и ботвы картофеля, соответственно рекомендуются как критерии достаточной обеспеченности растений серой [Фомина, 1982]. При недостатке серы эти показатели возрастают в 1.5-2 раза и более [Фомина, 1979]. Данное явление наблюдалось в наших опытах (табл. 27), но объясняется это скорее некоторым избытком фосфора (табл. 9), чем дефицитом серы.

**Таблица 27.** Соотношения азота и фосфора с серой в органах картофеля

Вариант	Фаза вегетации картофеля							
	всходы		цветение		полная спелость			
					ботва		клубни	
	N:S	P:S	N:S	P:S	N:S	P:S	N:S	P:S
2011 г.								
0	11.0	1.6	10.4	1.0	7.7	0.8	8.5	1.7
NPK	9.7	1.4	10.6	1.0	8.2	0.9	9.4	1.7
NPK+S	10.0	1.5	9.2	0.8	8.2	0.9	10.3	2.0
2012 г.								
0	4.7	0.8	6.4	0.9	7.0	0.9	9.0	2.4
NPK	5.4	0.9	7.8	0.8	6.2	1.6	11.2	1.6
NPK+S	7.1	1.0	7.5	0.8	5.7	1.6	8.9	1.4

Приведенные выше результаты подтверждают мнение, высказанное другими исследователями [Нортон, 2014], что к показателям соотношений между содержанием элементов при диагностике питания растений нужно относиться осторожно, так как оптимальное соотношение может быть достигнуто при низких содержаниях обоих элементов, а, кроме того, избыток одного элемента может быть истолкован как недостаток другого и наоборот.

### 3.4.1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные в полевых опытах, свидетельствуют, что неблагоприятные гидротермические условия, сложившиеся в течение вегетации 2010 года, привели к несбалансированности питания картофеля, обусловленной дефицитом фосфора и калия. Следует отметить, что дисбаланс азотно-фосфорного питания в неблагоприятных условиях увлажнения является дополнительным негативным фактором, ухудшающим калийное питание.

В умеренно благоприятных условиях 2012 г. в первом минимуме находился, главным образом, азот, и именно его дефицит обусловил дисбаланс питания картофеля. Можно предположить, что рекомендуемые для серых лесных почв дозы азотных удобрений на уровне 90 кг д.в./га [Анспек П.И., 1981, Справочник картофелевода, 1987, Эффективность....., 2003.] являются недостаточными. Подтверждением такому предположению является и тот факт, что опыте 2011 г., когда за счет подкормки, проведенной хозяйством на всем поле, в почве был создан высокий азотный фон, потребление растениями азота, фосфора и калия протекало в уравновешенном соотношении.

Парные соотношения азота, фосфора и калия в вегетативных органах картофеля в фазу всходов не в полной мере отражают состояние минерального питания и продукционного процесса картофеля. Более объективное представление об обеспеченности растений элементами питания можно получить в фазу цветения.

Для уточнения критериев оптимального серного питания необходимо проводить дальнейшие исследования. Исходя из полученных экспериментальных данных и имеющихся литературных источников, можно предположить, что соотношение N:S в фазу полной спелости в надземной биомассе в интервале 6-8, а в клубнях 8-11, характеризует оптимальный уровень питания картофеля.

### **3.5. ВЛИЯНИЕ МИКРОУДОБРЕНИЙ НА МИНЕРАЛЬНОЕ ПИТАНИЕ КАРТОФЕЛЯ**

Жизненно важная роль микроэлементов в питании растений является общепризнанным фактом, поэтому оптимизация минерального питания сельскохозяйственных культур предусматривает использование микроудобрений. Кроме того, в ряде случаев необходимо решать проблему обогащения микроэлементами сельскохозяйственной продукции. При этом важно установить оптимумы концентраций эссенциальных элементов, при которых химический баланс растения не нарушается [Торшин и др., 1996b].

В литературе имеется достаточно много работ, посвященных изучению потребления и накопления микроэлементов растениями, однако имеющиеся данные не охватывают всего разнообразия сельскохозяйственных культур, сочетаний макро- и микроэлементов, условий выращивания растений, кроме того, результаты, полученные разными исследователями, часто противоречат друг другу.

#### **3.5.1. СОДЕРЖАНИЕ ЦИНКА, МОЛИБДЕНА И СЕЛЕНА В КЛУБНЯХ**

В ходе проведения вегетационных опытов в 2013-2014 гг. было изучено влияние цинка, молибдена и селена, вносимых в почву в виде химически чистых солей, на питание растений картофеля макроэлементами (азот, фосфор, калий, сера), а также взаимное влияние микроэлементов на процесс их поглощения растениями. Имеющиеся в литературе данные по этому вопросу зачастую неоднозначны. Так, например, в одних источниках говорится об антагонизме цинка и селена [Кабата-Пендиас, 1989], а в других, отмечается тенденция увеличения накопления селена в присутствии цинка [Торшин и др., 1996a]. В работе Поспеловой [Поспелова, 2001] показано получение дополнительной прибавки зерна яровой пшеницы от цинка на различных фонах фосфорных удобрений, а другие авторы отмечают лишь

снижение угнетающего действия цинковых удобрений на урожай пшеницы при усилении питания макроэлементами [Торшин и др., 1996b].

Прежде, чем обсуждать влияние вносимых микроудобрений на минеральное питание картофеля, необходимо оценить уровень обеспеченности почвы макро- и микроэлементами (цинк, молибден, селен). Напомним значения агрохимических показателей почвы, используемой в вегетационном опыте: содержание гумуса — 2.4 %,  $pH_{KCl}$  — 5.2; содержание минерального азота ( $N-NO_3+N-NH_4$ ) — 23.5 мг/кг, подвижного фосфора ( $P_2O_5$ ) — 161.1 мг/кг, обменного калия ( $K_2O$ ) — 195.3 мг/кг, Zn — 0,047 мг/кг, Mo и Se — 0 (ниже предела определения). Согласно имеющимся классификациям, уровень обеспеченности почвы минеральным азотом — низкий [Гамзиков, 2000], подвижным фосфором — повышенный и высокий [Минеев, 2001], обменным калием — высокий [Минеев, 2001], серой — умеренно дефицитный [Церлинг, Ерофеев, 1974], микроэлементами — очень низкий [Церлинг, 1990].

Результаты анализа растений картофеля на содержание в них микроэлементов (в фазу полной спелости) представлены в таблице 28.

**Таблица 28.** Содержание микроэлементов в клубнях (полная спелость), мг/кг

	Вегетационный опыт				
	2013 г.				
	NPK	NPK+S	NPK+S+Mo	NPK+S+Zn	NPK+S+Se
Zn	15.02±0.13	14.30±1.18	15.23±0.01	15.80±1.24	15.05±0.20
Mo	1.00±0.0	1.01±0.0	1.01±0.0	0.96±0.0	1.00±0.0
Se	0.81±0.0	0.81±0.0	0.83±0.0	0.80±0.0	0.82±0.0
	2014 г.				
Zn	19.35±1.71	18.68±1.16	18.25±1.03	19.14±2.67	17.90±0.53
Mo	1.00±0.01	1.00±0.02	0.97±0.02	1.02±0.02	0.99±0.02
Se	1.01±0.01	1.02±0.03	1.00±0.01	1.02±0.01	1.29±0.04

Содержание **цинка** в клубнях картофеля находилось в пределах 14.30-19.35 мг/кг, что соответствует результатам, полученных другими исследователями [Терентьева, 1967; Бардышев, 1984]. Различия между

вариантами опыта были в пределах статистической ошибки. Таким образом, не было выявлено влияния других изучаемых микроэлементов на процесс поглощения и накопления картофелем цинка. Следует отметить, что во всех вариантах опыта не было отмечено избыточного накопления цинка в товарной продукции, значения этого показателя находилось в пределах ПДК [Минеев, 2001]

Согласно литературным данным, нижним пределом содержания **молибдена** в растениях для большинства видов считается 0.1 мг/кг сухого вещества, для бобовых — 0.4 мг/кг. Ниже этих величин возможна недостаточность молибдена [Ягодин, 1989]. В клубнях картофеля в фазу полной спелости оптимальное содержание молибдена составляет 0.18–0.24 мг/кг [Церлинг, 1990]. В наших опытах валовое содержание молибдена в клубнях картофеля составило 0.79-1.02 мг/кг (табл.28). Возможно, что высокое значение этого показателя в наших опытах можно объяснить различиями в методике количественного определения элемента, и сравнивать их с имеющимися в литературе данными не совсем корректно. Однако сравнение между собой результатов в разных вариантах внутри опыта вполне оправдано. Действие исследуемых микроэлементов на поглощение картофелем молибдена не было однозначным. Если в 2013 году отмечено снижение содержания молибдена на варианте с внесением цинка, то в 2014 году картина была противоположной: вариант NPK+S+Zn показал статистически значимое ( $HCp_{05}=0.03$ ) повышение содержания молибдена в клубнях картофеля. Очевидно, что ответ на вопрос сказались ли на результатах разные условия года выращивания, могут лишь дальнейшие исследования.

Хотя активные исследования по изучению роли **селена** в минеральном питании сельскохозяйственных культур ведутся не так давно, в литературных источниках постепенно накапливается информация о содержании селена в разных видах растений. Обычное среднее содержание селена в растениях составляет 0.1–1.0 мг/кг даже на почвах, богатых этим

элементом. Минимальное содержание приближается к 0.05 мг/кг. Было установлено, что максимальное количество селена содержится в растениях зерновых культур (1–30 мг/кг), меньше его в корне- и клубнеплодах (0.3–1.2 мг/кг, в т.ч. в картофеле — 0.2–0.9 мг/кг) [Шеуджен, 2013]. Эти данные подтверждают и наши результаты: валовое содержание селена в клубнях картофеля в фазу полной спелости находилось в пределах от 0.80 до 1.29 мг/кг (табл.28). Полученные результаты не подтверждают имеющиеся в литературе данные об антагонизме Zn и Se [Кабата-Пендиас, 1989]: на варианте с внесением цинка не было отмечено снижение концентрации селена.

### **3.5.2. РОЛЬ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ОПТИМИЗАЦИИ ПОТРЕБЛЕНИЯ КАРТОФЕЛЕМ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ**

Микроэлементы влияют на минеральное питание растений не только напрямую (при этом изменяется уровень поглощения самого микроэлемента), но и опосредовано, через изменение поглощения макроэлементов.

Например, было показано, что усиление цинкового питания оказывает положительное влияние на потребление растениями азота, фосфора, калия, обеспечивая повышение продуктивности растений [Горелкин, 1962; Никитишен, 2012]. В вегетационных опытах нами также была отмечена тенденция повышения уровня накопления азота в надземной биомассе картофеля под действием дополнительно внесенного **цинка** (табл. 29).

Внесение **молибдена** также оказало положительное влияние на накопление азота в надземной биомассе картофеля. В условиях вегетационного опыта 2013 г. отличия были статистически значимыми, а в 2014 г. можно говорить лишь о тенденции. Положительное влияние молибдена на накопление фосфора отмечено только в 2013 году. А в случае с калием, скорее можно говорить, о негативном влиянии (табл.29). По мнению ряда авторов [цит. по Торшин, 1996b], для взаимоотношений молибдена и

серы характерен антагонизм. Мы также отмечали такую реакцию: под действием молибдена наблюдается снижение уровня накопления серы в надземной биомассе картофеля.

Относительно влияния **селена** на уровень питания макроэлементами было показано, что предпосевная обработка семян яровой пшеницы селеном способствовала увеличению общего выноса азота. Селен при внесении его с азотными удобрениями увеличивал поступление в растения азота почвы и удобрений и увеличивал его вынос с урожаем [Серегина, 2008а].

**Таблица 29.** Содержание макроэлементов (полная спелость), мг/кг

2013 г.				
Вариант	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	S
Надземная биомасса				
NPK	0.68±0.10	0.23±0.07	0.42±0.13	0.36±0.08
NPK+S	0.71±0.13	0.33±0.08	0.55±0.04	0.39±0.01
NPK+S+Zn	0.80±0.21	0.32±0.05	0.63±0.11	0.21±0.0
NPK+S+Mo	1.00±0.14	0.21±0.09	0.52±0.07	0.27±0.03
NPK+S+Se	1.12±0.20	0.20±0.02	0.75±0.22	0.84±0.0
Клубни				
NPK	0.76±0.15	0.77±0.04	1.30±0.05	0.17±0.0
NPK+S	0.82±0.12	0.79±0.02	1.34±0.09	0.19±0.04
NPK+S+Zn	0.85±0.14	0.77±0.05	1.37±0.15	0.20±0.01
NPK+S+Mo	0.92±0.12	0.77±0.03	1.38±0.08	0.20±0.01
NPK+S+Se	0.88±0.27	0.77±0.02	1.34±0.11	0.24±0.02
2014 г.				
Вариант	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	S
Надземная биомасса				
NPK	1.28±0.23	0.33±0.07	1.22±0.21	0.37±0.0
NPK+S	1.39±0.24	0.29±0.04	1.23±0.26	0.40±0.01
NPK+S+Zn	1.55±0.30	0.35±0.10	1.01±0.14	0.33±0.01
NPK+S+Mo	1.54±0.23	0.35±0.11	0.83±0.26	0.31±0.0
NPK+S+Se	1.56±0.51	0.35±0.12	1.04±0.16	1.54±0.07
Клубни				
NPK	1.31±0.12	0.67±0.05	1.13±0.08	0.17±0.0
NPK+S	1.25±0.13	0.62±0.05	1.09±0.05	0.20±0.0
NPK+S+Zn	1.28±0.14	0.60±0.06	1.04±0.07	0.18±0.02
NPK+S+Mo	0.86±0.21	0.63±0.04	1.05±0.04	0.19±0.0
NPK+S+Se	0.93±0.11	0.56±0.06	1.03±0.03	0.21±0.0

В наших опытах этот вывод также нашел подтверждение: отмечена тенденция повышения концентрации азота под действием дополнительно внесенного селена (табл.29). Правда, это касается только надземной биомассы, так как накопление азота в клубнях более стабильно, что было показано нами и в полевых опытах (табл.4, гл.3.1.1.).

В литературе имеется информация об антагонизме между серой и селеном [Никитишен, 2012]. Однако результаты наших опытов этого не подтвердили, скорее, наоборот: внесение селена привело к повышению уровня серного питания.

### **3.5.3. ВЛИЯНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ (ЦИНКА, МОЛИБДЕНА И СЕЛЕНА) НА УРОЖАЙ И КАЧЕСТВО КЛУБНЕЙ КАРТОФЕЛЯ**

В результате исследований, проводимых как в нашей стране, так и за рубежом, накапливается все больше экспериментального материала, позволяющего делать выводы о влиянии тех или иных микроэлементов на продуктивность и качество сельскохозяйственных культур. Тем не менее, сделать однозначные заключения в некоторых случаях не получается, что объясняется, по нашему мнению, большим разнообразием факторов, влияющих на конечный результат (виды и сорта культурных растений, почвенно-климатических условия их выращивания, сочетание микроэлементов, дозы и способы их внесения). Поэтому любая дополнительная информация по этому вопросу представляет значительный интерес.

В литературных источниках имеется некоторая информация относительно влияния микроэлементов на продуктивность картофеля. Так в частности, показано, что внесение в почву цинка усиливает поступление в растения азота, калия, кремния, марганца и молибдена. Обработка клубней картофеля перед посадкой раствором сернокислого цинка обеспечивает повышение урожая на 36 ц/га и крахмала — на 6.6 ц/га по сравнению с

контролем, а также содержание белка до 2.08 % при 1.65 % в контроле [Горелкин, 1962]. Об отзывчивости картофеля на внесение цинковых удобрений говорится и в других работах: прибавка урожая от внесения в среднем за три года составила 17 % [Томаровский, 1999]; внесение цинковых удобрений дало прибавку урожая клубней на 2.1– 6.3 т/га [Адам, 2005]. Для картофеля также показано положительное влияние селена на урожайность клубней: совместное применение полного минерального и селенсодержащего удобрений повысило урожайность на 3.7–5.7 т/га [Дорохов, 2005]. Однако наши данные не подтверждают эти выводы. Результаты оценки продуктивности картофеля, выращиваемого в условиях вегетационных опытов (2013–2014 гг.), представлены в таблице 30.

**Таблица 30.** Продуктивность картофеля в вегетационном опыте (в расчете на 1 растение)

Вариант	Надземная биомасса			Клубни		
	Сырое в-во, г	% сух. в-ва	Сухое в-во, г	Сырое в-во, г	% сух. в-ва	Сухое в-во, г
	2013 г.					
NPK	19.1±1.9	94.4±1.0	18.0±1.7	576±76	22.0±0.6	126±17
NPK+S	19.3±1.8	94.9±0.6	18.3±1.7	578±25	21.7±0.4	125±6
NPK+S+Zn	19.3±0.7	94.7±0.9	18.3±0.8	530±71	22.3±0.7	94±13
NPK+S+Mo	19.2±1.7	94.5±1.4	18.1±1.5	551±129	21.6±1.5	119±28
NPK+S+Se	22.5±3.3	87.5±17.3	19.2±2.3	589±82	20.3±1.3	120±22
	2014 г.					
NPK	172±52	13.5±3.8	21.7±2.9	421±21	23.3±1.1	98±8
NPK+S	206±46	11.1±2.0	22.9±6.4	424±79	23.5±0.5	99±16
NPK+S+Zn	155±42	13.4±5.1	17.9±3.7	349±69	24.1±1.3	84±20
NPK+S+Mo	184±86	13.1±3.5	22.0±7.5	441±110	22.7±1.2	101±28
NPK+S+Se	182±63	11.6±2.1	20.3±5.0	397±28	21.3±1.1	85±9

Как видно из представленных данных, микроэлементы (цинк, молибден и селен) при внесении в используемых в опытах концентрациях на серой лесной почве не оказали существенного влияния на урожайность картофеля. Это касается как надземной биомассы, так и клубней.

Результаты анализа качественных показателей клубней картофеля представлены в таблице 31.

**Таблица 31.** Содержание крахмала в клубнях картофеля, % сыр. в-ва

Вариант	2013 г.	2014 г.
NPК	15.7±0.6	14.4±0.7
NPК+S	15.1±0.6	16.4±1.2
NPК+S+Zn	13.6±0.7	15.1±0.9
NPК+S+Mo	14.9±0.5	16.5±0.6
NPК+S+Se	15.3±0.6	16.6±0.7
<b>НСР<sub>05</sub></b>	<b>0.6</b>	<b>0.8</b>

Известно, что при дефиците цинка в растениях накапливаются редуцирующие сахара, и уменьшается содержание сахарозы и крахмала [Третьяков и др., 2005]. Поэтому естественно предположить, что применение цинковых удобрений будет влиять на основной показатель качества картофеля – содержание крахмала. Результаты вегетационных опытов 2013-2014 гг. подтверждают отрицательное влияние цинка на процесс накопления крахмала: отмечено статистически значимое снижение содержания крахмала в варианте NPК+S+Zn (относительно варианта NPК+S). Другие микроэлементы (молибден и селен) не оказали влияния на содержание крахмала в клубнях картофеля.

#### **3.5.4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Суммируя результаты, можно выделить следующие основные положения, касающиеся взаимного влияния микроэлементов в питании картофеля, взаимодействия макро- и микроэлементов, влияния микроудобрений на урожай и качество клубней картофеля.

Не было выявлено влияния других изучаемых элементов (молибдена и селена) на процесс поглощения и накопления цинка картофелем. Взаимодействие молибдена и цинка было неоднозначным: в 2013 году

отмечено снижение содержания молибдена на варианте с внесением цинка, тогда как в 2014 году обнаружено статистически значимое повышение содержания молибдена в клубнях картофеля. Полученные результаты не подтверждают имеющиеся в литературе данные об антагонизме Zn и Se: на варианте с внесением цинка не было отмечено снижение концентрации селена.

Отмечена тенденция повышения уровня накопления азота в надземной биомассе картофеля при внесении цинка, молибдена и селена. Для взаимоотношений молибдена и серы характерен антагонизм: под действием молибдена наблюдается снижение уровня накопления серы в надземной биомассе картофеля. Результаты опытов не подтвердили информацию об антагонизме между серой и селеном. Скорее, наоборот, внесение селена привело к повышению уровня серного питания.

Микроэлементы (цинк, молибден и селен) не оказали существенного влияния на урожайность картофеля, это касается как надземной биомассы, так и клубней. Подтверждено отрицательное воздействие цинка на процесс накопления крахмала, молибден и селен не оказали влияния содержание крахмала в клубнях картофеля.

## ВЫВОДЫ

1. Гидротермические условия, складывающиеся в течение вегетационного периода, являются доминирующим фактором, определяющим состояние минерального питания и величину урожая картофеля на серой лесной почве Тульской области. Применение полного минерального удобрения смягчает влияние неблагоприятных погодных условий на питательный режим почвы, рост и развитие картофеля.

2. В течение вегетации картофеля содержание минерального азота в серой лесной почве уменьшается в 1.5-3 раза, поэтому внесение азотных удобрений при возделывании картофеля обязательно даже на исходно высоком азотном фоне. Уменьшение содержания в почве подвижных форм  $P_2O_5$  и  $K_2O$  менее значительно и при среднем уровне обеспеченности почвы фосфором и калием минеральное питание картофеля не лимитируется этими элементами.

3. Применение минеральных удобрений эффективно только в благоприятном по гидротермическим условиям сезоне: величины окупаемости внесенного в почву и поглощенного растениями азота удобрений составляли 44-91 и 60-109 кг клубней/кг N соответственно, фосфора – 46 и 201 кг клубней/кг  $P_2O_5$ , калия – 20 и 31 кг клубней/кг  $K_2O$ . Как продолжительные, так и краткосрочные высокие температуры на фоне дефицита влаги ограничивали поглощение растениями азота, фосфора и калия, и препятствовали их усвоению на формирование прибавки урожая клубней.

4. При благоприятных условиях увлажнения главным фактором сбалансированности минерального питания картофеля является содержание в почве доступного азота. Несбалансированное питание картофеля в неблагоприятные по метеоусловиям годы обусловлено возникновением дефицита фосфора и калия. Нарушение соотношения азота с фосфором в

засушливых условиях сезона является дополнительным фактором, ухудшающим калийное питание картофеля.

5. Наибольший урожай клубней картофеля в размере 30.7 т/га достигается при содержании в ботве картофеля азота, фосфора и калия с соотношением в фазу цветения  $N:P=11$  и  $N:K=0.9$ , а в фазу полной спелости –  $N:P=9$  и  $N:K=0.7$ .

6. Содержание доступных соединений серы в серой лесной почве динамично в течение вегетационного периода. Соотношение  $N:S$  в фазу полной спелости в ботве и в клубнях в интервалах 6-8 и 8-11 соответственно характеризует оптимальный уровень серного питания картофеля. Внесение серы с удобрением не дает дополнительного прироста урожая картофеля.

7. Внесение микроудобрений цинка, молибдена и селена на серой лесной почве способствует оптимизации азотного питания картофеля, но не обеспечивает роста прибавки урожая клубней. Внесение молибдена вызывает уменьшение накопления серы в надземной массе картофеля на 25-30%, а селен способствует накоплению серы картофелем в 2-2.5 раза.

8. При возделывании картофеля на серых лесных почвах азотные удобрения снижают, а фосфорно-калийные повышают содержание крахмала в клубнях. Положительное влияние фосфора на крахмалистость клубней было более выраженным, чем калия. Внесение с основным удобрением серы и цинка отрицательно влияет на содержание крахмала в клубнях картофеля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдонин Н.С. Научные основы применения удобрений. М.: Колос, 1972. 319 с.
2. Агробиологические основы производства, хранения и переработки продукции растениеводства. Под редакцией Филатова В.И. М.: КолосС, 2003. 724 с.
3. Агроклиматический справочник по Тульской области. Л.: Гидрометеорологическое из-во, 1958. 128 с.
4. Адам А. Я. Влияние макро- и микроудобрений на урожайность картофеля в условиях колочной степи Алтайского края. Дисс.... канд. с-х. наук. 2005. 129 с.
5. Айзупиет Л.П. и др. Использование микроэлементов в растениеводстве Латвийской ССР // Агрохимия. 1969. № 7. С. 130-149.
6. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, 1987. 142 с.
7. Алифанов В.М. Палеокриогенез и современное почвообразование. Пушкино: ОНТИ, 1995. 320 с.
8. Анспок П.И., Щелканс Ю.А., Визла Р.Р. Справочник агрохимика Нечерноземной полосы. Л.: Колос, 1981. 293 с.
9. Анцыферов Н.А. Биологические основы высоких урожаев картофеля на Севере. Вологда, 1957. 244 с.
10. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487с.
11. Аристархов А.Н. Агрохимия серы. Под редакцией Сычева В.Г. М.: ВНИИА, 2007. 272 с.
12. Аристархов А.Н. Оптимизация питания растений и применения удобрений в агроэкосистемах. М.: ЦИНАО, 2000. 522 с.
13. Аристархов А.Н., Толстоусов В.П., Харитонов А.Ф., Ефимова Н.К., Бушуев Н.Н. Действие микроудобрений на урожайность, сбор белка,

качество продукции зерновых и зернобобовых культур // Агрохимия. 2010. № 9. С. 36-49.

14. Артюшин А.М., Дерюгин И.П., Кулюкин А.Н., Ягодин Б.А. Удобрения в интенсивных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур. М.: Агропромиздат, 1991. 223 с.

15. Ахромейко А.И. Динамика поглощения питательных веществ и накопление крахмала картофелем // Изв. АН СССР. Сер. биол., 1939. № 6, С. 1055-1100.

16. Ахтырцев Б.П. Серые лесные почвы Центральной России. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1979. 232 с.

17. Баранов П.А. Об удовлетворении потребности растений в сере и серосодержащих удобрениях // Химия в сельском хозяйстве. 1969. № 1. С. 18-22.

18. Бардышев М.А. Минеральное питание картофеля. Минск: Наука и техника, 1984. 192 с.

19. Барри О.В. Урожайность и технологические свойства картофеля в зависимости от сорта и условий выращивания. Дисс....канд. с-х. наук, 2001. 152 с.

20. Батомункуева Ц.-Д. Д., Убугунов Л.Л., Убугунов В.Л., Рузавин Ю.Н., Мангатаев Ц.Д. Эффективность возрастающих доз азотных удобрений при выращивании картофеля в сухостепной зоне Забайкалья // Агрохимия. 2006. № 5. С. 20-29.

21. Белоус Н.М. Влияние удобрений на урожайность и кулинарные качества картофеля // Агрохимия. 1995. № 10. С. 55-61.

22. Белоус Н.М., Талызин В.В., Шаповалов В.Ф., Симоненко Н.К. Влияние удобрений на содержание азотистых веществ и тяжелых металлов в клубнях картофеля // Агрохимия. 2010. № 3. С. 22-28.

23. Беспалов А.Л. Сера в питании и продуктивности риса в условиях правобережья р. Кубани. Дисс....канд. с-х. наук, 2001. 117 с.

24. Битюцкий Н.П. Микроэлементы высших растений. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2011. 368 с.
25. Бобко Е.В. Шендрикова Н.П. О влиянии селенистой и селеновой кислот на развитие растений // Докл. АН СССР. 1945. Т.46. № 3. С. 122-124.
26. Болдырев Н.К. Анализ листьев как метод определения потребности растений в удобрениях. Омск, ОМСХИ, 1970. 125 с.
27. Большаков В.А., Гальпер Н.Я., Клименко Г.А. Лычкина Т.И., Башта Е.В. Загрязнение почв и растительности тяжелыми металлами. М.: Изд-во ВНИИИиТЭИсельхоз, 1978. 54 с.
28. Брагин А.М., Савицкая Г.В. Зависимость величины и качества урожая картофеля от системы удобрения в севообороте // Агрохимия. 1968. № 2. С. 80-86.
29. Бриллиант В.А. О различиях в фотосинтезе высших и низших растений в зависимости от условий среды // Тр. Ботан. Ин-та АН СССР. Сер. 4. Эксперим. Ботаника. 1951. Вып. 8. С. 5-34.
30. Бузовер Ф.Я. Водный режим картофеля // Исследования по физиологии и биохимии картофеля. Сб. науч. тр. Киев: «Урожай», 1966. Т.7. С. 50-63.
31. Булгакова А.Н. Скорость поступления серы в растения // Докл. АН СССР, 1959. Т. 126. № 6. С.1362-1369.
32. Бунякина Р.Ф., Ширинян М.Х. Методы определения азота в почве для диагностики обеспеченности этим элементом на выщелоченных черноземах Кубани // Химия в сельском хозяйстве. 1975. Т.13. № 9. С. 32-35.
33. Важенина Е.А. Оптимизация пищевого режима серых лесных почв // Оптимизация свойств почв Нечерноземья и повышение их плодородия. М.: Почвенный институт, 1984. С. 35-42.
34. Вальников И.У. Проблема серы в земледелии среднего Поволжья. В кн. Вопросы сельскохозяйственного производства Западной Сибири. Барнаул, 1981. Ч.1. С. 30-32.

35. Вапиров В.В., Шубина М.Э., Вапирова Н.В., и др., Селен. Некоторые аспекты химии, экологии и участия в развитии патологии. Петрозаводск: ПетрГУ, 2000. 68 с.
36. Васильев А.А. Влияние глауконита на поступление азота, фосфора и калия в растения картофеля // Агрехимия. 2014. №8. С. 40-50.
37. Вечер А.С., Гончарик М.Н. Физиология и биохимия картофеля. Минск: Наука и техника, 1973. 264 с.
38. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Наука, 1957. 218 с.
39. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555-571.
40. Вихрева В.А. Влияние селена на рост, развитие и адаптивный потенциал козлятника восточного. Дисс.... канд. б. наук, 2001. 160 с.
41. Власенко В.Н. Удобрение картофеля. М.: Агропромиздат, 1987. 218 с.
42. Власюк П.А., Кузнецова Т.А. Значение микроэлементов молибдена и ванадия в пусковых механизмах прорастающих семян // Докл. ВАСХНИЛ, 1969. № 7. С. 9-11.
43. Володько О.К. Влияние способов внесения микроудобрений на урожайность и качество картофеля // Межведомственный сб. «Картофелеводство», вып. 7 Минск: «Ураджай», 1988.
44. Гамзиков Г.П. Принципы почвенной диагностики азотного питания полевых культур и применение азотных удобрений // Совершенствование методов почвенно-растительной диагностики азотного питания растений и технологий применения удобрений на их основе. М.: 2000. С. 33-46.
45. Генкель П.А. Физиология жаро- и засухоустойчивости растений. М.: Наука, 1982. 279 с.
46. Гилис М.Б. Рациональные способы внесения удобрений. М.: Колос, 1975. 140 с.

47. Гилис М.Б., Лищак Л.П. Влияние питания на содержание и распределение азота, фосфора и калия в растении картофеля на торфяных почвах // Агрохимия. 1969. № 11. С. 85-91.
48. Гончарик М.Н. Кривые роста бульбы. Минск, Изд-во АН БССР, 1933.
49. Гончарик М.Н. Влияние экологических условий на физиологию культурных растений. Минск: Изд-во АН БССР, 1962. 248 с.
50. Горелкин Л.И. Пути повышения урожайности картофеля в БССР. Минск: Белсельхозиздат, 1962. 105 с.
51. Горшкова М.А. Нормативная база для проведения комплексной почвенно-растительной диагностики минерального питания макро- и микроэлементами // Современные проблемы почвоведения. М.: Почвенный ин-т им. В.В.Докучаева, 2000. С. 303-316.
52. Григорьев А.А., Фатьянов А.С. Некоторые результаты исследования круговорота серы в Горьковской области // Агрохимия. 1973. № 5. С.102-107.
53. Даутова Э.С. Особенности поступления молибдена в хлопчатник и его влияние на некоторые физиолого-биохимические процессы растений. Автореф. канд. дисс., 1971. 24 с.
54. Демолон А. Рост и развитие культурных растений. М.: Сельхозиздат, 1961. 400 с.
55. Денисенко Д.В. Агроэкологическая эффективность применения селенового удобрения под рис. Дисс.... канд. с-х. наук, 2008. 126 с.
56. Державин Л.М. Агрохимические средства в адаптивно-ландшафтном земледелии Центрального района Нечерноземной зоны России. М., РАСХН, 2006. 267 с.
57. Дианова Т.Б. Влияние азота и микроэлементов на устойчивость яровой пшеницы к водным стрессам. Дисс.... канд. б. наук, 1999. 138 с.
58. Долгодворова А.П., Воронина Л.П. Влияние селеновых удобрений на рост и развитие ярового ячменя // Питание растений. 2012. № 3. С. 15-19.
59. Дорохов С.В., Новиков В.А. Влияние селенового микроудобрения на рост и развитие картофеля в зависимости от доз минеральных удобрений //

Селекция, семеноводство и технология плодово-ягодных культур и картофеля. Челябинск: Южно-Уральский научно-исследовательский ин-т плодовоовощеводства и картофелеводства, 2007. Т. 9. С. 173-177.

60. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

61. Елькина Г.Я. Сбалансированность элементов питания и продуктивность картофеля на подзолистых почвах // Агрохимия. 2006. №1. С. 23-31.

62. Ермаков В.В., Ковальский В.В. Биологическое значение селена. М.: Наука, 1974. 298 с.

63. Ермаков В.В. Субрегионы и биогеохимические провинции СССР с различным содержанием селена // Труды биогеохимической лаборатории. М.: Наука, 1978. Т.15. С. 54-57.

64. Ермохин Ю.И. Концепция единства почвы и растений при разработке системы применения удобрений // Комплексная диагностика потребности сельскохозяйственных культур в удобрениях. Омск, 1989. С.17-23.

65. Жерер Л.В. Содержание подвижных форм азота и эффективность азотных удобрений в Алтайском крае // Наука – земледелию. Барнаул, 1977. С. 94-99.

66. Журбицкий З.И. Физиологические и агрохимические основы применения удобрений. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 296 с.

67. Заборин А.В., Никитишен В.И. Продуктивность водопотребления озимой пшеницей в различных условиях // Почвоведение. 1988. № 12. С. 89-97.

68. Завалин А.А., Гремицких О.А. Влияние удобрений на урожайность и качество клубней картофеля на дерново-глеевой почве // Агрохимия. 1994. № 3. С. 60-69.

69. Захаров В.Н. Диагностика минерального питания // Картофель и овощи. 1991. №1. С. 9-13.

70. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А., Виноградова В.В. Сравнительные исследования засух 2010 и 2012 гг. на Европейской территории России по метеорологическим и MODIS данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013 г. Т.10. № 1. С. 246-253.

71. Ивойлов А.В. Влияние погодных условий на продуктивность яровой пшеницы и ячменя, эффективность отдельных видов и сочетаний удобрений в зоне неустойчивого увлажнения // *Агрохимия*. 1995. № 11. С.58-65.
72. Ивойлов А.В., Танин А.А. Влияние минеральных удобрений на сортовую отзывчивость картофеля // *Агрохимия*. 2012. № 3. С. 52-63.
73. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение. Новосибирск: Наука, 1991. 150 с.
74. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
75. Кардиналовская Р.И. Реакция сельскохозяйственных культур на улучшение серного питания // *Химия в сельском хозяйстве*. 1984. № 3. С. 21-36.
76. Карманов С.Н., Кирюхин В.П., Коршунов А.В. Урожай и качество картофеля. М.: Россельхозиздат, 1988. 167 с.
77. Касицкий Ю.И. Об оптимальном уровне обеспеченности почв СССР подвижным фосфором // *Агрохимия*. 1979. № 5. С.135-151.
78. Клевлина Т.П. Микроэлементы в черноземах выщелоченных лесостепи Кузнецкой котловины и их влияние на продуктивность и качество яровой пшеницы. Дисс.... канд. с-х. наук, 2010. 177 с.
79. Ковалева Т.П. Влияние уровней содержания подвижных форм микроэлементов в почвах на урожай сельскохозяйственных культур. Дисс.... канд. б. наук, 1999. 97 с.
80. Ковальский В.В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. 282 с.
81. Ковда В.А., Якушевская И.В., Тюрюканов А.Н. Микроэлементы в почвах Советского Союза. М.: Наука, 1959. 67 с.
82. Конова Н.И. К вопросу о биогеохимии селена в различных геохимических условиях // *Микроэлементы в СССР*, 1993. Вып. 33. С.43-48.
83. Кораблева Л.И. Слуцкая Л.Д. Об агрономическом значении содержания обменного калия, определяемого в сырых и воздушно-сухих почвенных образцах // *Агрохимия*. 1972. № 6. С.58-64.

84. Кореньков Д.А. Агрохимия – важное направление научно-технического прогресса в земледелии // Агрохимия. 1993. № 2. С. 3-6.
85. Коршунов А.В., Попов Б.А. Информативность факториальной схемы опытов с удобрениями на примере изучения картофеля // Бюлл. ВИУА. 1978. № 42. С. 3-13.
86. Коршунов А.В., Кутовенко Л.Н., Лысенко Ю.Н., Рахимов Р.Л. Уроки засухи в картофелеводстве // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 3. С. 21-24.
87. Костин Я.В. Динамика изменения плодородия и продуктивности серых лесных почв при длительном применении разных форм минеральных удобрений. Дисс....д. с-х. наук, 2001. 260 с.
88. Костюк В.И., Шмакова Н.Ю., Вихман Н.И. Многокритериальная оптимизация питания картофеля сорта Хибинский ранний // Агрохимия. 2007. № 9. С. 18-23.
89. Кудеяров В.Н. Колориметрическое определение аммонийного азота в почвах и растениях феноловым методом // Агрохимия. 1965. №6. С. 146-150.
90. Кудеяров В.Н., Семенов В.М. Проблемы агрохимии и современное состояние химизации сельскохозяйственного производства в Российской Федерации // Агрохимия. 2014. №10. С. 3-17.
91. Кузнецов В.В. Защитное действие селена при адаптации растений пшеницы к условиям засухи. Дисс.... канд. б. наук, 2004. 163 с.
92. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М.: Высшая школа, 2006. 742 с.
93. Кузнецова З.А., Сигаркин С.С. Влияние метеорологических условий и удобрений на урожай картофеля // Бюллетень ВИУА. 1975. № 24. С.75-79.
94. Кук Д.У. Системы удобрения для получения максимальных урожаев. М.: Колос, 1975. 416 с.
95. Кулаковская Т.Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М.: Агропромиздат, 1990. 219 с.

96. Курганова Е.В. Динамика плодородия и продуктивности дерново-подзолистых почв в условиях интенсивного земледелия. Дисс... д. с.-х. наук, 2004. 279 с.
97. Лапшинов Н.А. Урожайность картофеля в зависимости от влагообеспеченности // Достижения науки и техники АПК. 2009. № 3. С. 26-28.
98. Лебедева Т.Н., Никитишен В.И. Минеральное питание и удобрение картофеля на серой лесной почве // Агрохимия. 2014. № 8. С. 39-52.
99. Лорх А.Г. Динамика накопления урожая картофеля. М., Сельхозгиз, 1948. 192 с.
100. Маслова И. Я. Условия возникновения относительного дефицита серы и особенности его влияния на продуктивность яровой пшеницы // Агрохимия. 1980. №4. С.82-88
101. Маслова И.Я., Якушева Т.Г. Роль серы в продукционном процессе и усвоении азота в период налива зерна яровой пшеницы // Агрохимия. 2004. № 7. С.22-32.
102. Маслова И.Я. Воздействие содержащих серу аэротехногенных веществ на некоторые агрохимически значимые процессы и свойства почв // Агрохимия. 2008. №6. С.80-94.
103. Махруленко А.В. Агрохимические приемы повышения урожайности, качества клубней и картофелепродуктов в условиях юго-запада Центрального региона России. Дисс. ...канд. с.-х. наук, 2009. 166 с.
104. Меленцова С.В. Агроэкологическая оценка химических элементов S, Zn, Mn, Cu, Cd, Pb в почвах лесостепной и степной зон на примере Белгородской области. Дисс.... канд. с.-х. наук, 2007. 147 с.
105. Минеев В.Г. Агрохимия. М.: Изд-во МГУ, 1990. 486 с.
106. Минеев В.Г. Агрохимия: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, Изд-во «КолосС», 2004. 720 с.
107. Минеев В.Г. Практикум по агрохимии. М.: Из-во МГУ, 2001. 689 с.

108. Минеев В.Г. Экологические функции агрохимии в современном земледелии // Агрохимия. 2000. № 5. С. 5-13.
109. Минеев В.Г., Лебедева Л.А., Васильева Н.Г. Влияние метеоусловий на варьирование величины оптимального содержания фосфора в почве для растений ячменя // Агрохимия. 2010. № 6. С.50-58.
110. Модестов А.П. Правда о корнях. Сельхозиздат, 1932. 80 с.
111. Назарюк В.И., Прозоров А.С. Азотные удобрения под картофель // Химизация сел. хоз-ва. 1989. № 9. С. 45.
112. Никитишен В.И. Питание и удобрение озимой пшеницы на черноземе. М.: Наука, 1977
113. Никитишен В.И., Дмитракова Л.К., Личко В.И. Фосфатный режим серой лесной почвы и эффективность фосфорного удобрения // Почвоведение. 2000. № 10. С.1255-1265.
114. Никитишен В.И., Личко В.И., Орехова Е.В. Эффективность последствий фосфорного удобрения в зависимости от остаточного количества фосфатов в почве и обеспеченности растений азотом и влагой // Агрохимия. 2001. №11. С.34-42.
115. Никитишен В.И. Плодородие почвы и устойчивость функционирования агроэкосистемы. М.: Наука, 2002. 258 с.
116. Никитишен В.И. Эколого-агрохимические основы сбалансированного применения удобрений в адаптивном земледелии. М.: Наука, 2003. 183 с.
117. Никитишен В.И., Курганова Е.В. Плодородие и удобрение серых лесных почв ополей Центральной России. М.: Наука, 2007. 367 с.
118. Никитишен В.И. Питание растений и удобрение агроэкосистем в условиях ополей Центральной России. М.: Наука, 2012. 485 с.
119. Новиков Ф.А. Картофель, Сельхозгиз, 1937. 365.с
120. Нортон Р., Миккелсен Р., Дженсен Т. Значение серы в питании растений // Питание растений. 2014. №3. С. 2-5.

121. Носиков В.В. Эффективность применения азотных удобрений под озимую пшеницу и картофель в зависимости от уровня плодородия почвы. Дисс....канд. с-х. наук, 2001. 99 с.
122. Огороков В.В. Эффективность систем удобрения под картофель на серых лесных почвах Владимирского ополья // Агрохимия. 2005. №3. С.36-41.
123. Панасин В.И. Микроэлементы и урожай. Калининград: ОГУП «Калининградское кн. изд-во», 2000. 276 с.
124. Панников В.Д., Минеев В.Г. Почва, климат, удобрение и урожай. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
125. Пейве Я.В. Агрохимия и биохимия микроэлементов. М.: Наука, 1980. 430 с.
126. Петербургский А.В. Значение калийных удобрений в повышении урожая. М.: Знание, 1953. 31 с.
127. Петербургский А.В., Антонова З.Г., Николов Б.В. Физиологическая роль меди и молибдена в развитии бобовых культур. В сб. Биол. роль молибдена. М.: Наука, 1972. С. 40-57.
128. Петин Н.С., Молотковский Ю.Г., Федоров П.С. Роль цинка в повышении жароустойчивости растений. Докл. АН СССР, 1963. Т.159. № 5. С. 1210-1212.
129. Полевой В.В. Физиология растений. М.: Высшая школа, 1989. 464 с.
130. Полякова Л.Л. О метаболизме серы в растениях. В сб. Серное питание и продуктивность растений. Киев: Наукова думка, 1983. С. 30-45.
131. Пospelова И.Н. Поведение цинка в системе почва–растение на территории Алтайского Приобья и эффективность цинковых удобрений под яровую пшеницу на фоне фосфорных удобрений. Дисс....канд. с-х. наук, 2001. 221 с.
132. Прокошев В.В., Дерюгин И.П. Калий и калийные удобрения. М.: Ледум, 2000. 185 с.

133. Протасова Н.А., Щербаков А.П. Микроэлементы (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Cu, Co, Ti, Zr, Ga, Be, Sr, Ba, B, I, Mo) в черноземах и серых лесных почвах Центрального Черноземья. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2003. 368 с.
134. Прошкин В.А. Модель прогноза прибавки урожайности картофеля при применении фосфорных удобрений // Агрохимия. 2014. № 7. С.17-26.
135. Прянишников Д.Н. Избранные сочинения, в 3-х т. М.: Колос, 1965. 767 с.
136. Ринькис Г.Я. Оптимизация минерального питания. Рига: Зинатне, 1972. 352 с.
137. Родионова В.Н. Влияние микроэлементов (Zn, Se, Cr) на продуктивность и качество яровой пшеницы и фасоли. Дисс.... канд. б. наук, 2001. 139 с.
138. Романенков В.А, Сиротенко О.Д., Рухович Д.И., Романенко И.А, Шевцова Л.К., Королева П.В. Прогноз динамики запасов органического углерода пахотных земель Европейской территории России. М.: ВНИИА, 2009. 96 с.
139. Руденко А.И. В сб.: Засухи СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай. М.: Гидрометиздат, 1958
140. Рузавин Ю.Н., Убугунов Л.Л., Битлуев А.С., Мангатаев Ц.Д. Эффективность калийных удобрений при выращивании картофеля в сухостепной зоне Забайкалья // Агрохимия. 2009. №11. С.32-36.
141. Самотоенко А.С. Влияние микроэлементов и серы на урожайность и качество озимой пшеницы в условиях типичного и обыкновенного чернозёмов Воронежской области. Дисс.... канд. с-х. наук, 2011. 116 с.
142. Селен. Гигиенические критерии состояния окружающей среды. Всемирная организация здравоохранения. Женева, 1989. 272 с.
143. Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата. // Труды по сел.-хоз. метеорологии. 1928. Вып. 20. С.165-177.

144. Семенов В.М. Слагаемые эффективности азотных удобрений в системе почва–растение и критерии их количественной оценки // *Агрохимия*. 1999. № 5. С. 25-32.
145. Серегина И.И. Влияние селена на продуктивность и вынос азота удобрений и почвы растениями яровой пшеницы // *Агрохимия*. 2008а. № 8. С.20-25.
146. Серегина И.И. Продуктивность и адаптивная способность сельскохозяйственных культур при применении микроэлементов и регуляторов роста. Автореф. дисс.... д. б. наук, 2008б.
147. Серегина И.И., Осипова Л.В., Ниловская Н.Т. Влияние азотного питания и цинка на рост, развитие и продуктивность яровой пшеницы // *Агрохимия*. 2004. №3. С.21-24.
148. Складорова М.А. Диагностика и оптимизация цинкового питания кукурузы на лугово-черноземной почве Западной Сибири. Дисс.... канд. с-х. наук, 2008. 175 с.
149. Славина Т.П., Иванова Р.И. О зависимости между содержанием различных форм азота в серых лесных почвах Томского Приобья и урожаем яровой пшеницы // *Агрохимия*. 1976. № 8. С.18-23.
150. Слуцкая Л.Д. Сера как удобрение // *Агрохимия*. 1972. № 1. С.130-148.
151. Справочник картофелевода. Под редакцией Замотаева А.И. М.: Агропромиздат, 1987. 351 с.
152. Стребков И.М. Основные закономерности взаимодействия факторов в системе «почва–удобрение–погода–урожай» на дерново-подзолистых почвах Центрального района НЧЗ. Автореф. дисс... канд.с-х. наук. 1990. 18 с.
153. Сырцев А.И. Влияние длительного применения удобрений на продуктивность севооборота и плодородие дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Московской области. Дисс....канд. с-х. наук, 2006. 113 с.

154. Сырый Н.М., Мамонтова Е.Г. Содержание серы в мощных черноземах Харьковщины и эффективность серосодержащих удобрений // Тр. Харьковского СХИ, 1973. Т.189.
155. Сычев В.Г., Ефремов Е.Н., Романенков В.А. Итоги и перспективы развития агрохимии // Проблемы агрохимии и экологии. 2013. № 4. С. 11-16.
156. Тамман А.И. Картофель. М.: Сельхозгиз, 1944. 31 с.
157. Терентьева М.В., Дорожкина Л.Н. Содержание микроэлементов в различных частях картофеля по фазам развития // Агрохимия. 1967. №2. С.67-72.
158. Терехова Л.М. Эффективность применения возрастающих норм удобрений в полевом севообороте на серых лесных почвах. Дисс....канд. с.-х наук, 1980. 187 с.
159. Тихонов Н.И., Бычков В.А. Влияние длительного применения удобрений на количество белка и содержание незаменимых аминокислот в клубнях картофеля // Агрохимия. 1969. № 4. С. 18-23.
160. Толстоусов В.П. Удобрения и качество урожая. 2-е изд-е. М.: Агропромиздат, 1987. 191 с.
161. Томаровский А.А. Микроэлементы в почвах и система микроудобрений для различных культур в условиях умеренно-засушливой колючей степи Алтайского края. Дисс.... канд. с.-х. наук, 1999. 171 с.
162. Торшин С.П., Ягодин Б.А., Удельнова Т.М., Забродина И.Ю. Накопление селена овощными культурами и яровым рапсом при удобрении селеном // Агрохимия. 1995. № 9. С.40-47.
163. Торшин С.П., Удельнова Т.М., Ягодин Б.А. Биогеохимия и агрохимия селена и методы устранения селенодефицита в пищевых продуктах и кормах // Агрохимия. 1996 а. №8–9. С. 127-144.
164. Торшин С.П., Ягодин Б.А., Удельнова Т.М., Голубкина Н.А., Дудецкий А.А. Влияние микроэлементов Se, Zn, Mo при разной обеспеченности почвы макроэлементами и серой на содержание Se в растениях яровой пшеницы и рапса // Агрохимия. 1996 б. № 5. С. 54-65.

165. Третьяков Н.Н., Кошкин Е.И., Макрушин Н.М. Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений. Под ред. Третьякова. 2-е изд. М.: КолосС, 2005. 656 с.
166. Убугунов Л.Л., Меркушева М.Г., Будаев Б.Х. Влияние возрастающих доз азотных удобрений на продуктивность, качество, сохранность картофеля и динамику нитратного и аммонийного азота в орошаемых каштановых почвах Забайкалья // Агрохимия. 2003. №7. С.32-44.
167. Убугунов Л.Л., Меркушева М.Г., Будаев Б.Х. Влияние фосфорных удобрений на динамику содержания подвижного фосфора в орошаемой каштановой почве Западного Забайкалья, продуктивность, качество и сохранность картофеля // Агрохимия. 2004. №2. С.40-51.
168. Убугунов Л.Л., Меркушева М.Г., Будаев Б.Х. Влияние возрастающих доз калийных удобрений на урожайность, качество, сохранность картофеля и динамику содержания обменного калия в орошаемых каштановых почвах Западного Забайкалья // Агрохимия. 2005. №3. С.44-54.
169. Уоллес А. Поглощение растениями питательных веществ из растворов. М.: Колос, 1966. 280 с.
170. Урусевская И.С., Мешалкина Ю.Л., Хохлова О.С. Географо-генетические особенности гумусового состояния серых лесных почв // Почвоведение. 2000. №11. С.1377-1390.
171. Усков И.Б., Державин Л.М. Эффективность удобрений и продуктивность земледелия при глобальном изменении климата // Плодородие. 2008. № 2. С. 7-9.
172. Федотова Л.С. Условия минерального питания, продуктивность и качество картофеля // Агрохимия. 2003. №2. С.31-36.
173. Физиология сельскохозяйственных растений. Т.ХІІ. Под ред. Потапова Н.Г. М.: Из-во Московского университета, 1971.
174. Фомина О.Г. Серное питание растений на дерново-подзолистой почве Подмосковья. Дисс...канд.б.наук. 1982. 140 с.

175. Фомина О.Г., Чернухина А.П., Янишевский Ф.В. Влияние нитрофоски азотно-сульфатной и нитрофоски на урожай и поступление серы в растения на дерново-подзолистой почве // *Агрохимия*. 1979. № 9. С.71-78.
176. Хисамутдинова В.И. Изменения в дыхательном метаболизме озимой пшеницы в период подготовки к зиме при внесении цинка. В сб. Биологическая роль микроэлементов и их применение в сельском хозяйстве и медицине. Л., 1970. Т.1. 376 с.
177. Хлыстовский А.Д., Касицкий Ю.И. Последствие фосфора, оптимальные фосфатные уровни в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве и применение фосфорных удобрений // *Агрохимия*. 1987. № 5. С.10-15.
178. Хоменко А.Д. Серное питание и продуктивность растений. В сб. Серное питание и продуктивность растений. Киев: Наукова думка, 1983. С.5-30.
179. Церлинг В.В. Диагностика питания сельскохозяйственных культур. Справочник. М.: Агропромиздат, 1990. 240 с.
180. Церлинг В.В., Ерофеев А.А. Динамика поступления серы и вынос ее разными культурами в зависимости от уровня обеспеченности серой // *Агрохимия*. 1974. №3. С.79-88.
181. Чернова Л.М., Хоменко А.Д. Диагностика и способы регуляции серного питания растений. В кн.: Пути регуляции процессов и способы корневого питания растений. Киев, 1983. С.117-139.
182. Чернова Л.М. Власенко Н.Е., Шевченко Л.А. Серное питание и продуктивность картофеля в условиях полесья УССР. В сб. Серное питание и продуктивность растений. Киев: Наукова думка, 1983. С.136–142.
183. Чухина О.В., Жуков Ю.П. Урожайность и качество клубней картофеля при применении удобрений в Вологодской области // *Агрохимия*. 2014. № 6. С.29-34.
184. Шафран С.А. Влияние типа почв и содержания в них подвижных фосфатов на эффективность фосфорных удобрений // *Агрохимия*. 2015. №3. С.26-33.

185. Шафран С.А., Козеичева Е.С., Швыркина С.В. Эффективность применения азотных удобрений под картофель в Нечерноземной зоне на почвах с различными агрохимическими свойствами // Агрохимия. 2015. № 2. С. 23-32.
186. Шевякова Н.И. Метаболизм серы в растениях. М.: Наука, 1979. 207 с.
187. Шеуджен А.Х. Биогеохимия и агрохимия селена. Научный журнал КубГАУ, 2013. № 92 (08).
188. Шеуджен А.Х. Биогеохимия. Майкоп: ГУРИПП «Адыгея», 2003. 1028 с.
189. Шкель М.П., Андрюнина Р.Д., Жукова И.А. Влияние серосодержащих удобрений на плодородие почвы и урожай полевых культур // Агрохимия. 1979. № 12. С. 30-31.
190. Школьник М.Я. Микроэлементы в жизни растений. Л.: Наука, 1974. 324 с.
191. Школьник М.Я., Парибок Т.А., Давыдов В.Н. Физиологическая роль цинка у растений // Агрохимия. 1967. №5. С.133-139.
192. Шпаар Д., Быкин А., Дрегер Д. и др. Картофель. Минск: ЧУП «Орех», 2004. 465 с.
193. Шубина О.И. Влияние селенита натрия на рост, фотосинтетические показатели, продуктивность яровой пшеницы и накопление в ней селена на черноземе бескарбонатном в Восточном Забайкалье. Дисс...канд. б. наук, 2013. 132 с.
194. Эффективность отдельных видов минеральных удобрений под сельскохозяйственные культуры для почв Российской Федерации (нормативы). М.: ФГНУ Росинформагротех, 2003. 288 с.
195. Ягодин Б.А., Смирнов А.В., Петербургский А.В. Агрохимия. Под ред. Ягодина Б.А. М.: Агропромиздат, 1989. 639 с.
196. Якушкина Н.И., Бахтенко Е.Ю. Физиология растений. М.: Владос, 2004. 464 с.

197. Agarwala S.C., Sharma C.P., Farooq S., Chatterjee C. Effect of molybdenum deficiency on the growth and metabolism of corn plants raised in sand culture // Canadian Journal of Botany Can. J. Bot., 1978. V. 56. P. 1905–1908.
198. Biddulph O., Biddulph S., Cory R., Knootz H. Circulation patterns for phosphorus, sulfur and calcium in the bean plant. – Plant physiol., 1958, 33, № 4. P.293-300.
199. Bowen G.D., Zapata F. Efficiency in uptake and use of nitrogen by plants // Stable isotopes in plant nutrition, soil fertility and environmental studies. Vienna: IAEA, 1991. P.349-362.
200. Broun T.A., Shrift A. Selenium: toxicity and tolerance in higher plants // Biol. Rev., 1982. V. 57. Part 1. P. 59-84.
201. Brown P.H., Cakmak I., Zhang O. Form and function of zinc in plants. // Zinc in soil and plants /Ed. A.D. Robson. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1993. Chap. 7. P. 93-106.
202. Bushnell J. Growth response from restricting the oxygen at roots of young potato plants // American Potato Journal., 1956.V. 33. № 8. P. 242-248.
203. Cramer M.D., Hawkins H.J., Verboom G.A. The importance of nutritional regulation of plant water flux // Oecologia, 2009. V. 161. № 1. P. 15-24.
204. Dhillon S.K., Dhillon K.S. Pools of selenium in some Indian soil at field capacity and submerged moisture regimes // Australian Journal of Soil Research. 2004. V. 42. P.247-257.
205. Djanaguiraman M., Durga Devi D., Shanker A.K., Sheeba J.A., Bangarusamy U. Selenium — an antioxidative protectant in soybean during senescence // Plant and Soil, 2005. V. 272. P. 77-86.
206. FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. [http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E, 07.08.2015].
207. Gupta U., Veinot R. Response of crops to sulfur greenhouse conditions. // Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 1974. V. 38. № 5. P. 785-788.
208. He M., Dijkstra F.A. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: a metaanalysis // New Phytologist, 2014. V. 204. № 4. P. 924-931.

209. Jones R.W., Abbott A.J., Hewitt E.J., James D.M., Best G.R. Nitrate reductase activity and growth in Paul's scarlet rose suspension cultures in relation to nitrogen source and molybdenum // *Planta*, 1976. V. 133. P.27-34.
210. Lacourciere G.M., Stadtman T.C. Utilization of selenocysteine as a source of selenium for selenophosphat biosynthesis // *Biofactors*, 2001. V.14. P.69-74.
211. Lambers H., Chapin F.S., Pons T.L. Plant Water Relations. In: *Plant physiological ecology*. New York: Springer-Verlag, 2008. P. 163-223.
212. Levander O.A. Selenium. Trace elements in human and nutrition. 5 ed./ Ed. W. Merts. Acad. Press, Inc. 1986. V.2. P. 209-266.
213. Marschner P. Mineral plant nutrition of higher plants. Academic Press, 2012.
214. Mikkelsen R.L., Page A.L., Bingham F.T. Factors affecting selenium accumulation by agricultural crops species // *Selenium in agriculture and the Environment*. N 23 /Ed. L.W. Jacobs. Madison: SSSA Special Publ., 1989. P. 65-94.
215. Miller E.R., Lei X., Ullrey D.E. Trace elements in animal nutrition // *Micronutrients in Agriculture 2nd Edn. Series № 4* / Eds J.J. Mortvedt, F.R. Cox, L.M. Shuman, R.M. Welch. Madison: SSSA, 1991. P. 593-662.
216. Novoselov S. V., Rao M., Onoshoko N.V. et al. Selenoproteins and selenocysteine insertion system in the model plant cell system, *Chlamydomonas reinhardtii* // *EMBO J*. 2002. V. 21. P. 3681-3693.
217. Pais I. Criteria of essentiality beneficiality and toxicity of chemical elements // *Acta alimentaria*. Budapest. 1992. V. 21. № 2. P.145-152.
218. Rani N., Dhillon K.S., Dillon S.K. Critical levels of selenium in different crops grown in an alkaline silty loam soil treated with selenite-Se // *Plant and Soil*, 2005. V. 277. P. 367-374.
219. Roupael Y., Cardarelli M., Schwarz D., Franken P., Colla G. Effects of drought on nutrient uptake and assimilation in vegetable crops. In: *Plant responses to drought stress*. Aroca R (ed.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. P. 171-195.

220. Sardans J., Peñuelas J. The role of plants in the effects of global change on nutrient availability and stoichiometry in the plant-soil system // *Plant Physiology*, 2012. V. 160. № 4. P. 1741-1761.
221. Scherer H.W. Sulfur in soils // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2009. V. 172. P.326-335.
222. Seppänen M., Turakainen M., Hartikainen H. Selenium effects on oxidative stress in potato. // *Plant Science*, 2003. V.165. P. 311-319.
223. Sigel A., Sigel H. Molybdenum and tungsten. Their roles in biological processes // *Metal ions in biological systems*. New York: Marcel Dekker, 2002.
224. Unkles S.E., Wang R., Wang Y., Glass A.D.M., Crawford N.M., Kinghorn J.R. Nitrate reductase activity is required for nitrate uptake into fungal but not plant cells // *J. Biol. Chem.*, 2004. V. 279. P. 28182-28196.
225. Van Campen D.R. Trace elements in human nutrition // *Micronutrients in Agriculture*. 2nd Edn. Series № 4 / Eds J.J. Mortvedt, F.R. Cox, L.M. Shuman, R.M. Welch. Madison: SSSA, 1991. P. 663-701.
226. Wang-Pruski G., Zeebarth B.J., Leclerc Y., Arsenault W.J., Botha E.J., Moorehead S., Ronis D. Effect of Soil Type and Nutrient Management on Potato After-Cooking Darkening // *American Journal of Potato Research*, 2007, 84: 291-299.
227. Waraich E.A., Ahmad R., Ashraf M.Y. Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants // *Australian Journal of Crop Science*, 2011. V. 5. № 6. P. 764-777.
228. White P.J., Broadley M.R. Biofortifying crops with essential mineral elements // *Trends Plant Sci.*, 2005. V. 10. P. 586-593.