

На правах рукописи

Матвеевко Дмитрий Александрович

**ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЕ ВНЕСЕНИЕ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ
НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОСЕВОВ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ**

Специальность 06.01.03 – агрофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Агрофизический научно-исследовательский институт Россельхозакадемии»

Научный руководитель: кандидат биологических наук
Лекомцев Петр Валентинович

Официальные оппоненты: Осипов Анатолий Иванович
доктор сельскохозяйственных наук, профессор
Агрофизический НИИ, руководитель отдела

Иванов Михаил Васильевич
доктор сельскохозяйственных наук, профессор
АОУ ВПО «ЛГУ имени А.С. Пушкина»,
заведующий кафедрой

Ведущая организация: ФГОУ ВПО СПбГАУ

Защита диссертации состоится «__» _____ 2012 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 006.001.01 при ГНУ Агрофизический научно-исследовательский институт Россельхозакадемии по адресу:

195220 Санкт-Петербург, Гражданский пр-т, д. 14

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Агрофизического научно-исследовательского института

Автореферат разослан «__» ____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор биологических наук

Е.В. Канаш

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Уменьшение объемов вносимых минеральных удобрений в целом и азотных в частности, а также необходимость снижения агроэкологической нагрузки на сельскохозяйственное поле вызывают необходимость поиска новых методов их использования. Оптимизация агропроизводства и его адаптация к неблагоприятным климатическим условиям требует применения современных дистанционных методов мониторинга состояния посевов. Методы диагностики состояния растений без разрушения их тканей используются в сельскохозяйственной науке более трех десятилетий, однако они пока характеризуются невысокой разрешающей способностью и требуют больших экономических затрат. В этой связи перспективными приемами мониторинга посевов для принятия решений по оптимизации продукционного процесса растений представляются методы, основанные на регистрации оптических характеристик отраженной от листьев радиации.

Цель работы заключается в разработке научно-методологических основ дифференцированного внесения азотных удобрений в период вегетации на основе оптических характеристик посевов и оценке их влияния на формирование урожая и качества зерна яровой пшеницы.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие **задачи**:

1. Разработать методику дифференцированного внесения азотных удобрений в режиме реального времени (on-line) с использованием оптического N-сенсора;
2. Разработать методические основы дистанционного мониторинга посевов по их оптическим характеристикам;
3. Разработать метод выделения однородных зон и информационную технологию формирования карт-заданий для дифференцированного внесения азотных удобрений в режиме предварительного планирования (off-line) по результатам дешифровки аэрофотоснимков;
4. Провести комплексную оценку разработанных методик дифференцированного внесения азотных удобрений в период вегетации в посевах яровой пшеницы;
5. Оценить эффективность приемов прецизионного дифференцированного внесения азотных удобрений при выращивании яровой пшеницы.

Научная новизна. Впервые разработаны и в полевых условиях апробированы технологии ресурсосберегающего дифференцированного внесения азотных удобрений на основе оптических характеристик посевов яровой пшеницы. Разработана методика закладки тестовых площадок как инструмента калибровки N-сенсора и управления азотным питанием на заданном сельскохозяйственном поле. Предложен метод выделения однородных зон по результатам дешифровки аэрофотоснимков посевов

пшеницы для создания карт-заданий по дифференцированному применению азотных подкормок в период вегетации в системе точного земледелия.

Практическая значимость. Разработанные технологии дифференцированного внесения азотных удобрений существенно повышают урожайность зерна яровой пшеницы по сравнению с традиционным методом внесения, снижают риск недобора урожая от колебаний погодных условий, обеспечивая его стабильность. Дифференцированное внесение существенно сокращает дозы азотных удобрений (до 25-30%), стоимость которых составляет одну из основных статей затрат производства сельскохозяйственной продукции, и одновременно способствует решению проблемы агроэкологической устойчивости посевов; улучшает качество получаемой продукции, а именно: позволяют получать зерно с повышенным содержанием сырого белка.

Апробация работы. Работа выполнена в рамках проводимых Агрофизическим институтом (АФИ) исследований по базовым научно-техническим программам Россельхозакадемии: «Разработать методы и приемы управления продукционным процессом посевов в условиях пространственно-временной неоднородности среды обитания растений с целью повышения адаптивности агротехнологий к условиям окружающей среды и обеспечения высокой продуктивности агроценозов» (2006 - 2010 гг.) и «Усовершенствовать теоретические основы и разработать информационно-технологическую базу прецизионного управления продуктивностью посевов в естественных и регулируемых условиях среды с использованием новых приборов, оборудования, программно-аппаратных средств» (2011 г.), а также в ходе выполнения научно-исследовательских работ по государственному контракту с Правительством Ленинградской области «Создание стационарной сети агрополигонов в Ленинградской области и осуществления комплексного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения» (2008 – 2011 гг.).

Основные положения работы представлены на Всероссийских и международных конференциях «Ресурсосберегающее земледелие на рубеже XXI в.», (МГУ, Москва, 2009); «Интенсификация и оптимизация продукционного процесса сельскохозяйственных растений» (Орел, 2009); «Математические модели и информационные технологии в сельскохозяйственной биологии: итоги и перспективы» (Санкт-Петербург, 2010); «Автоматизация и информационное обеспечение производственных процессов в сельском хозяйстве» (Углич, 2010). Материалы исследований доложены автором и обсуждались на семинарах, отчетных сессиях и координационных совещаниях АФИ.

Разработанные технологии дифференцированного внесения азотных удобрений апробировались на опытных полях Меньковского полигона АФИ. Полученные в процессе исследований результаты по расширению информационно-технологических основ прецизионного производства зерна в условиях Северо-Запада России включены в

инновационный фонд достижений Агрофизического НИИ и демонстрировались на международных специализированных выставках «Золотая осень» и «Агрорусь», где были отмечены золотой медалью.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, включенных в «Перечень российских рецензируемых научных журналов ...».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы, включающего 133 источника (из них 23 иностранных) и 11 приложений. Работа изложена на 163 страницах, содержит 44 таблицы и 15 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Состояние и задачи оптимизации азотного питания зерновых культур в адаптивно-ландшафтных системах земледелия (АЛСЗ)

В главе представлен обзор современного состояния и перспектив применения азотных удобрений, а также их влияния на урожайность и качество зерновых культур. Проведен анализ регулирования азотного режима традиционными методами и с применением технологий точного земледелия. Рассмотрены теоретические основы оценки физиологического состояния посевов на основании данных дистанционного зондирования, приведены наиболее используемые вегетационные индексы. Формулируются проблемы, которые обсуждаются в следующих главах диссертации.

Важнейшим условием формирования высоких урожаев сельскохозяйственных культур хорошего качества (в том числе и яровой пшеницы) является оптимизация минерального питания, прежде всего азотного. Оптимизация азотного питания пшеницы позволяет практически во всех земледельческих зонах получать высококачественную продукцию. Одной из важнейших технологических операций в системе точного земледелия является дифференцированное внесение азотных удобрений с учетом мелкомасштабной неоднородности в пределах поля. При этом используются две стратегии внесения: в режиме реального времени (on-line) и в режиме предварительного планирования (off-line).

Глава 2. Объекты, методология и приемы управления азотным режимом яровой пшеницы в системе точного земледелия

В качестве объекта исследования выбран районированный в Ленинградской области сорт яровой пшеницы Эстер. Исследования проводились на полях Меньковского полигона АФИ в полевом севообороте. Предшественник - картофель: в 2009 г. на поле площадью 33,5 га, в 2010 г. – 7,5 га, в 2011 г. – 12 га. Дифференцированное внесение азотных удобрений осуществлялось с использованием современной техники и

проводилось распределителем агрохимикатов Amazone ZA-M с использованием Hydro-N-сенсора фирмы Yara. Учет урожая проводился сплошным комбайнированием дифференцированно комбайном Claas D130 + АСТ с фиксацией в ходе движения его величины и соответствующих координат на том или ином участке опытного поля.

В сравнении со среднемноголетними данными, весенне-летние периоды вегетации 2009 - 2011 гг. можно характеризовать как избыточно увлажненные с неравномерным выпадением осадков. В 2009 г. ГТК за период «посев-уборка» составил 3,9; в 2010 г. – 2,6 и в 2011 г. – 2,8. В то же время в 2009 г. растения испытывали недостаток влаги в период «посев-кущение», в 2010 г. – в периоды «посев-кущение» и «цветение-уборка» (в период налива зерна), а в 2011 г. - в период цветения. Таким образом, во все годы проведения исследований складывающиеся погодные условия весенне-летних периодов вегетации не благоприятствовали формированию высокого уровня урожая яровой пшеницы.

Для проведения исследований была реализована схема сравнительных полевых опытов, которая включала следующие варианты:

1. «Экстенсивный» (контроль) – удобрения не вносили, урожайность культуры зависит только от свойств почвы;
2. «Высокоинтенсивный» (ВИ) - предпосевное внесение азотных удобрений и подкормки осуществлялись традиционным методом одной дозой, рассчитанной с учетом агрохимических показателей на получение запланированного максимального урожая (Ефимов В.Н., Донских И.Н., Сеницын Г.И. 1984);
3. «Точное внесение» - осуществлялось дифференцированное внесение минеральных удобрений – как основного, так и азотных подкормок в период вегетации.

Предпосевное внесение минеральных удобрений (включая азотные на третьем варианте) проводилось по предварительно созданным картам-заданиям (режим off-line) на основе регулярной сетки отбора почвенных образцов по всей площади, где осуществлялась технология «Точное внесение» (вар. 3). Рассматриваемые карты-задания строились по выделенным контурам неоднородности с использованием данных агрохимического анализа соответствующих почвенных образцов.

Подкормки на вариантах 2 и 3 проводились три раза за сезон: в фазы кущения, выхода в трубку и цветения. В основе дифференцированного внесения подкормок в варианте 3 использовались разработанные в процессе исследований четыре методических подхода, в дальнейшем обозначенных как ТЗ 1, ТЗ 2, ТЗ 3 и ТЗ 4. Два из них (ТЗ 1 и ТЗ 2) заключались в выполнении подкормок в режиме on-line с помощью оптического прибора N-сенсор, который по ходу движения трактора определяет потребность культур в азоте по интенсивности окраски листьев и регулирует дозу вносимых удобрений. При этом настройка N-сенсора осуществлялась на основании калибровоч-

ных данных, полученных с помощью портативного прибора N-тестера непосредственно как на посевах пшеницы, так и на тестовых площадках. Еще два разработанных методических подхода (ТЗ 3 и ТЗ 4) заключаются во внесении азотных подкормок по заранее созданным картам-заданиям на основе аэрофотоснимков (off-line). Рассмотрим специфические особенности режимов off-line и on-line более подробно.

Режим предварительного планирования (off-line)

Реализация технологического приема в рассматриваемом режиме обязательно предполагает предварительную компоновку информации в виде электронной карты-задания. Формирование карты-задания осуществляется следующим образом. С помощью мобильного комплекса, оснащенного бортовым компьютером с навигационным и геоинформационным программным обеспечением, создается электронный образ сельскохозяйственного объекта, на котором планируется выполнение заданного технологического приема. После этого выполняется сбор необходимой атрибутивной информации (для этого проводятся необходимые агрохимические, агрофизические, фитосанитарные и другие обследования) с точной привязкой регистрируемых данных к фиксированным участкам их получения внутри поля. На следующем шаге полученная на этапе сбора информация обрабатывается на стационарном компьютере. Для заданного технологического приема по определенным алгоритмам (моделям) производится расчет уровня технологического воздействия для каждого имеющегося в базе данных однородного участка поля. При этом создается массив информации, где для каждого однородного участка внутри поля с фиксированным геометрическим образом устанавливаются те или иные уровни технологического воздействия (дозы удобрений и других химических и биологических средств, нормы высева семян и т.п.), которые должны быть осуществлены при реализации заданного приема в поле. Сформированный таким образом массив информации и является электронной картой-заданием на выполнение технологического приема, которая записывается на мобильный технический носитель, например, на чип-карту.

На этапе реализации технологического приема в поле чип-карта вводится в бортовой компьютер, смонтированный на тракторе, который оснащен навигационным оборудованием и соответствующим агрегатом, который способен автоматически менять по команде уровень технологического воздействия на заданном участке поля в ходе движения. Бортовой компьютер с помощью специализированного программного обеспечения постоянно производит оперативное определение места нахождения агрегата, а по информации, записанной на чип-карте, определяется уровень технологического воздействия (например: доза удобрений) на данном участке поля с последующей выработкой управляющей команды и обеспечивается синхронный контроль ее выполнения.

Режим реального времени (on-line)

Вместе с тем, для реализации оперативных решений в точном земледелии уже нашел практическое применение специальный режим – режим on-line. Для его реализации в бортовой компьютер вводится карта агротехнических требований для заданного приема. Карта агротребований представляет собой таблицу, которая определяет взаимосвязь между сигналом, полученным от датчика, установленного на технике, например, на комбайне или тракторе, и нормой технологического воздействия на поле. На этапе выполнения технологического приема в режиме “on-line” бортовой компьютер с помощью специального программного обеспечения осуществляет: а) оперативное управление датчиками, которые определяют состояние среды обитания, б) выработку управленческого решения на основе карты агротребований и измерительных сигналов, полученных в ходе движения, в) контроль реализации этого приема.

Для агрохимической характеристики почвы отбирались образцы на глубину пахотного слоя и проводилось определение кислотности (рН солевой вытяжки) потенциометрическим методом согласно ГОСТ 26483–85; содержание органического вещества методом Тюрина в модификации ЦИНАО с фотоколориметрическим окончанием (ГОСТ 26213–91); содержание подвижных форм фосфора и калия (по Кирсанову) (ГОСТ 26207-91); гидролитическая кислотность по Каппену (ГОСТ 26212-91); сумма поглощенных оснований - по Каппену – Гильковицу (ГОСТ 27821-88).

В фазу кущения, выхода в трубку, цветения и полной спелости (за 1 - 2 дня до уборки) со всех вариантов отбирались образцы растений для определения накопления биомассы и расчета физиолого-агрохимических показателей, от которых зависит содержание белка в зерне. В образцах растений, отобранных в фазу полной спелости, определялись основные элементы структуры урожая. В растениях и зерне пшеницы определялись согласно ГОСТ 10846-91 общий азот по Къельдалю, сырой белок - расчетным методом с применением коэффициента 5.7 для злаковой (пшеница). Содержание сырой клейковины в зерне и ее качество определялись по ГОСТ 13586.1-68; масса 1000 зерен - по ГОСТ 10842–76; натура - по ГОСТ 10840–64. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных и расчет корреляционных зависимостей проводились с использованием пакетов программ "Stat" (М.ВИУА, 1991).

Глава 3. Разработка и апробация прецизионных методов управления азотным питанием яровой пшеницы в период вегетации

В комплект оборудования по дифференцированному внесению удобрений и агрохимикатов наряду с распределителем удобрений GPS-приемником и бортовым компьютером входит N-сенсор – оптический прибор, позволяющий оптимизировать внесение минеральных удобрений при азотных подкормках растений. N-сенсор уста-

навливается на крыше трактора и в ходе выполнения операции с помощью датчиков улавливает отраженный от листовой поверхности свет и посылает соответствующий сигнал на бортовой компьютер, который, в зависимости от интенсивности окраски листьев, повышает или снижает норму внесения азотных удобрений.



Рис 1. Схема дифференцированного внесения азотных удобрений с помощью N-сенсора

На рис. 1 схематично изображен процесс дифференцированного внесения азотных удобрений в режиме on-line с помощью N-сенсора. Определяющим элементом в работе N-сенсора являются так называемые калибровочные таблицы, которые специально разрабатываются экспериментальным путём для каждого сорта с помощью портативного контактного прибора N-тестера и лабораторных исследований. Данные калибровочной таблицы отражают показания N-тестера по заданному сорту определенной культуры в ту или иную фенологическую фазу его развития и дозу азота в действующем веществе, необходимую для растения в данный момент. Стоит отметить, что разработка таких таблиц требует значительных затрат, но является обязательным условием для возможности работы N-сенсора. В работе предложены два разработанных метода калибровки N-сенсора. Рассмотрим их более подробно.

Калибровка N-сенсора с помощью портативного тестера непосредственно на посевах (вариант ТЗ 1)

При наступлении фенологической фазы развития растений пшеницы (и других с.-х. культур), на которую была запланирована очередная азотная подкормка, в соответствии с инструкцией по эксплуатации прибора по диагонали анализируемого участка поля проводились измерения N-тестером на полностью развившихся листьях верхнего яруса. Показания прибора фиксировались, а отобранные растения доставлялись в аккредитованную агроэкологическую лабораторию АФИ, где определялось содержание общего азота в каждом образце. По результатам лабораторного анализа определялась потребность в азоте и составлялась калибровочная таблица (табл. 1). Затем

N-сенсор калибровался на контрольном участке. Для этого отмерялся участок поля около 50 м длиной. Трактор с включенным N-сенсором и бортовым компьютером в режиме калибровки проходил контрольный участок, а затем с каждой стороны колеи и вдоль всего участка производилось измерение N-тестером. Полученное значение сверялось с калибровочной таблицей. Таким образом определялась доза азота в действующем веществе, которую необходимо внести на данном участке, после чего полученная величина дозы азота вводилось в бортовой компьютер.

Таблица 1. Фрагмент калибровочной таблицы, разработанной с помощью N-тестера для пшеницы сорта Эстер в период кущения, 2009 г.

Показания N-тестера	Потребность в азоте, кг д.в./га	Показания N-тестера	Потребность в азоте, кг д.в./га
496	52	640	28
544	44	688	20
592	36	736	12
616	32	760	8

В результате бортовой компьютер ставил в соответствие дозу, которую необходимо внести на контрольном участке, показателям, полученным с датчиков N-сенсора на указанном участке при данных условиях освещенности. Калибровать сенсор необходимо перед каждой подкормкой, чтобы наиболее точно оценить пространственную неоднородность состояния растений по полю и выявить участки посева, требующие подкормки и дозу удобрений при ее проведении. После калибровки агрегат выезжал в поле для выполнения подкормки.

Калибровка N-сенсора с помощью тестовых площадок (вариант ТЗ 2)

Апробация описанной выше методики калибровки N-сенсора показала, что измерение N-тестером достаточно больших массивов полей яровой пшеницы (и других с.-х. культур) по диагонали не отражает объективной картины состояния всего посева. Для более корректной калибровки N-сенсора, а также для оперативного получения информации о состоянии посевов с 2008 г. на полях Меньковского полигона ГНУ АФИ закладывались тестовые площадки. Тестовые площадки – это участки поля с внесенными до посева различными дозами азотных удобрений. Максимальная доза удобрений соответствует дозе азота, вносимого в производственном посеве в течение всего периода вегетации для получения запланированного уровня урожая. Таким образом, на тестовых площадках моделируется весь спектр условий азотного питания растений пшеницы: от дефицита, до близкого к оптимальному. Перед подкормкой на тестовых площадках проводились измерения N-тестером. Затем, как и в варианте ТЗ 1, разрабатывалась калибровочная таблица, по которой калибровался N-сенсор.

Закладка тестовых площадок позволила определять как верхний предел вносимой дозы азотных удобрений (соответствует оптимальному содержанию азота в почве для получения запланированного урожая), так и нижний предел содержания азота в

растениях, ниже которого проведение азотных подкормок нецелесообразно по экономическим причинам (внесение удобрений не даст выхода урожая запланированного уровня). Эти два значения можно также вводить в бортовой компьютер при калибровке N-сенсора, обоснованно ограничивая диапазон вносимой дозы азота при проведении подкормки. Этим достигается существенная экономия азотных удобрений.

Место для закладки тестовых площадок выбирается на основании агрохимического обследования с учетом того, чтобы минимизировать влияние почвенной неоднородности. Размер тестовых площадок должен соответствовать целям их использования. При дистанционной оценке состояния посевов и выделении технологических зон для внесения удобрений и других агрохимикатов (гербицидов, фунгицидов и др.) площадь тестовых площадок должна быть достаточной для того, чтобы провести их идентификацию, а также включать в себя все возможные соотношения растительного сообщества и условия их произрастания, и выполнить все необходимые измерения оптических характеристик растительного покрова в пределах каждой площадки. Разработанные таким образом для определенной культуры и сорта, а также для наиболее важной фенологической фазы (кущение, трубкование, колошение, цветение) калибровочные таблицы (табл. 2) в дальнейшем позволяют достаточно точно и оперативно калибровать N-сенсор прямо в поле и исключить этап трудоемкого и дорогого биохимического определения концентрации хлорофилла и азота в лабораторных условиях.

Таблица 2. Фрагмент калибровочной таблицы, разработанной с помощью тестовых площадок для пшеницы сорта Эстер в фазу трубкования, 2009 г.

Доза внесенного азота, кг д.в./га	Показания N-тестера	Потребность в азоте, кг д.в./га	Доза внесенного азота, кг д.в./га	Показания N-тестера	Потребность в азоте, кг д.в./га
0	412	54	30	520	34
0	421	53	50	528	21
0	435	52	50	543	20
30	501	36	70	559	12
30	513	35	70	604	10

В 2010 г. на тестовых площадках вносились возрастающие дозы азотного удобрения в интервале от 0 до 210 кг/га с шагом 30 кг/га д.в. Площадь тестовых площадок в 2010 г. была увеличена до 200 м² для лучшей их идентификации на аэрофотоснимках. В 2011 г. применялись тестовые полосы, на которых разбрасывателем удобрений Amazone ZA-M вносились дозы азота 60, 90, 120, 150 и 180 кг/га д.в.

Выделение однородных зон и формирование карт-заданий с использованием автоматической классификации (вариант ТЗ 3)

Следующие два способа дифференцированного применения азотных подкормок, обозначенные в дальнейшем ТЗ 3 и ТЗ 4, выполняются в режиме off-line по зара-

нее разработанным картам-заданиям, которые создаются на основе дешифрованных аэрофотоснимков посевов яровой пшеницы (и других с.-х. культур), полученных в ходе дистанционного мониторинга. Аэрофотосъемка проводится перед очередной азотной подкормкой с помощью разработанного в АФИ радиоуправляемого беспилотного летающего комплекса, оснащенного специализированной фотоаппаратурой (Якушев, 2007). Процесс обработки полученных снимков начинается с их привязки к глобальной системе позиционирования (GPS). В ходе геопривязки устанавливается взаимное соответствие между точками на снимке и аналогичными точками, расположенными на поле. Геопривязка снимков при проведении исследований выполнялась с помощью программы ERDAS Imagine. При этом использовались электронные контуры полей и точки геопривязки, полученные на этапе подготовки. После геопривязки выполняется дешифровка снимка. Под дешифровкой понимается процесс разбиения множества пикселей на конечное число классов, основанный на соответствующих значениях оптических показателей пикселя снимка. В результате получаем карту поля, разбитую на однородные по оптическим характеристикам ареалы. Варианты ТЗ 3 и ТЗ 4 различаются методами дешифрирования аэрофотоснимков. В варианте ТЗ 3 дешифрирование производится автоматически, а в варианте ТЗ 4 – с использованием эталонов, которые в рассматриваемом случае представлены тестовыми площадками.

На следующем шаге генерируются технологические карты для внесения азотных удобрений. Каждый однородный участок поля, выделенный при дешифрировании снимков, разбивается на более мелкие элементарные участки, представляющие собой квадрат со стороной, равной ширине захвата сельскохозяйственной техники, для которой формируется карта-задание. Затем с помощью разработанного в АФИ специального программного обеспечения производится расчет дозы азотного удобрения для каждого такого элементарного участка. При этом создается массив информации, где для каждого однородного участка внутри поля с фиксированным геометрическим образом устанавливается доза азота, которая должна быть внесена при реализации заданного приема в поле. Сформированный таким образом массив информации и является электронной картой-заданием на выполнение данного технологического приема, которая записывается на мобильный технический носитель, например на чип-карту. Пример карты-задания на внесение удобрений приведен на рис. 2.

На этапе реализации технологического приема в поле чип-карта вводится в бортовой компьютер, смонтированный на движителе (тракторе), и задание активируется. После указания содержания азота во вносимом удобрении, а также выполнения калибровки по сыпучести удобрения техника выезжает в поле для выполнения операции (внесения удобрений). Движитель, как уже было указано ранее, оснащен навигационным оборудованием и распределителем удобрений, который способен автомати-

чески менять по команде дозу вносимого удобрения на заданном участке поля в ходе движения. Бортовой компьютер с помощью специализированного программного обеспечения постоянно производит оперативное определение места нахождения агрегата, а по информации, записанной на чип-карте, определяется доза азотной подкормки на данном участке поля с последующей выработкой управляющей команды и обеспечивается синхронный контроль ее выполнения. На чип-карту также записываются результаты выполнения задания: количество внесенного удобрения, обработанная площадь, ее координаты дата и время выполнения.

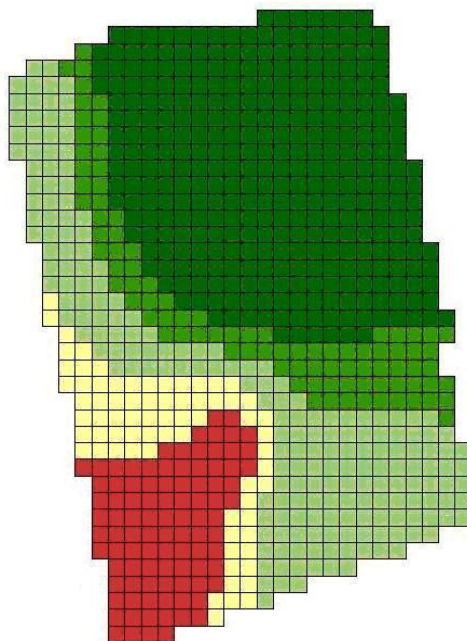


Рис. 2. Сгенерированная карта-задание для дифференцированного внесения удобрений

Выделение однородных зон и формирования карт-заданий с использованием классификации по тестовым площадкам (ТЗ 4)

При проведении исследований использовался еще один способ дешифрирования аэрофотоснимков: с использованием программы ERDAS Imagine, - классификация по эталонам. Эталонами служили оптические характеристики тестовых площадок (рис. 3). Процесс дешифрирования в данном случае можно разделить на два основных этапа: создание набора эталонов и непосредственно дешифрирование. Дешифрирование выполняется посредством сравнения оптических характеристик эталонных фотоизображений и выделенных однородных участков на снимке. В результате классификации создаются площадные векторные объекты (полигоны) с определенными атрибутивными данными. Как показали исследования, наиболее корректно характеризующие состояние посевов результаты могут быть получены при дешифрировании по эталонам за счет получения более полной информации о состоянии посева. Пример различий при автоматическом дешифрировании и дешифрировании по эталонам

представлен на рис. 4. При классификации с использованием эталонов нижняя часть снимка дешифрована более детально, чем при автоматической классификации.

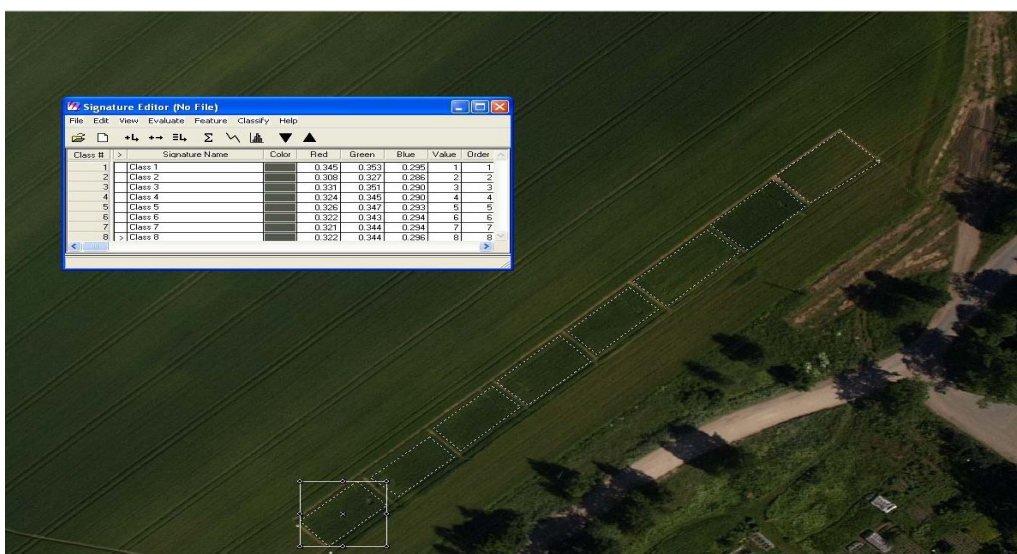


Рис. 3. Выделение сигнатур по тестовым площадкам при дешифровке аэрофотоснимков

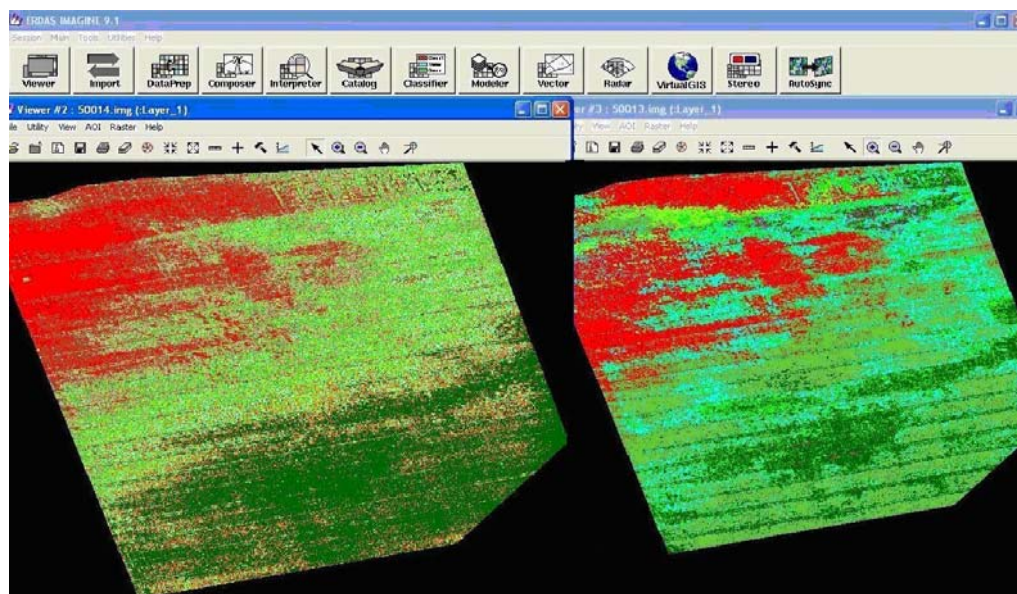


Рис. 4. Аэрофотоснимки после автоматического (слева) и с использованием эталонов дешифрования (справа)

Получение и дешифрование снимков посева позволяет оценить оптические характеристики его различных участков и выделить области (зоны), требующие выполнения различных технологических мероприятий с целью оптимизации продукционного процесса растений. С помощью этого оптического метода можно выявить неоднородности почвы, очаги сорной растительности, участки полегания растений и их площадь, оценить необходимость удобрения или применения иных средств химизации, динамику всходов и другие показатели состояния посевов. Поскольку в результате классификации аэрофотоснимка по оптическим характеристикам тестовых пло-

щадок каждый участок поля приводится в соответствие с конкретной тестовой площадкой, агрохимические свойства почвы и состояние растений на которой известны, агроном может на основании данных с тестовых площадок проводить дифференцированные агрохимические операции на всем поле.

Глава 4. Оценка эффективности приемов точного земледелия по оптимизации азотного питания яровой пшеницы

Влияние изучаемых методов оптимизации азотного питания на урожайность и показатели структуры урожая яровой пшеницы

В табл. 3 приведены данные по урожайности зерна яровой пшеницы сорта Эстер, полученные в годы проведения исследований, по различным приемам точного земледелия **ТЗ 1 - ТЗ 4** в сравнении с «Контролем» и «ВИ» вариантами. Применение удобрений, независимо от способа их внесения, достоверно увеличивало урожайность зерна. Минимальная урожайность во все годы проведения исследований отмечена в контрольном варианте, и в среднем за три года составила 25,0 ц/га. Дифференцированное внесение азота, независимо от года проведения опыта и методического подхода к его применению, достоверно увеличивало урожайность по сравнению со сплошным внесением (вар. **ВИ**) на 2,0 – 9,4 ц/га или на 6 - 26%. Независимо от года проведения опыта, максимальная урожайность среди вариантов дифференцированного внесения отмечена в варианте **ТЗ 4** (45,1), минимальная - в варианте **ТЗ 1** (37,7 ц/га).

Таблица 3. Урожайность зерна яровой пшеницы, ц/га

Вариант внесения удобрений	Год			Среднее (А)
	2009	2010	2011	
Контроль	28,4	22,5	24,1	25,0
ВИ	46,9	29,7	30,5	35,7
ТЗ-1	45,5	29,5	38,3	37,7
ТЗ-2	53,3	27,7	37,5	39,5
ТЗ-3	43,1	32,1	41,2	38,8
ТЗ-4	47,8	40,9	46,6	45,1
Среднее (В)	44,2	30,4	36,4	37,0
Р (%) – 1,81 НСР ₀₅ В = 1,1 НСР ₀₅ (AB) = 1,9 НСР ₀₅ А = 0,8				

Наибольшее влияние в формировании урожая зерна яровой пшеницы сорта Эстер оказал фактор «Вариант» - внесение удобрений - 45,93 %. Вторым по значимости фактором были погодные условия (фактор «Год» – 39,55 %) и наименьшее влияние в формировании урожая оказало взаимодействие факторов «Год»-«Вариант» (13,39 %).

Как известно, урожайность зерновых культур определяется несколькими компонентами: числом продуктивных стеблей на единице площади, числом зерен в колосе и массой зерновки. Анализ структуры урожая пшеницы показал (рис. 5), что дифференцированное внесение азота, независимо от года проведения опыта и методиче-

ского подхода, улучшало все показатели структуры урожая, за исключением общего количества растений на единице площади, на которое дифференцированное внесение существенного влияния не оказывало. Таким образом, увеличение урожайности зерна в вариантах с дифференцированным внесением азотных удобрений связано с увеличением коэффициента продуктивной кустистости, количества зерен в колосе и, соответственно, массы зерна с 1 колоса. При этом получено более выполненное зерно с большей массой 1000 зерен. Следует отметить, что по всем показателям структуры урожая выделяется вариант **ТЗ 4** с дифференцированным внесением азотных удобрений по карте-заданию, созданной на основе классификации аэрофотоснимков посевов по оптическим характеристикам тестовых площадок.

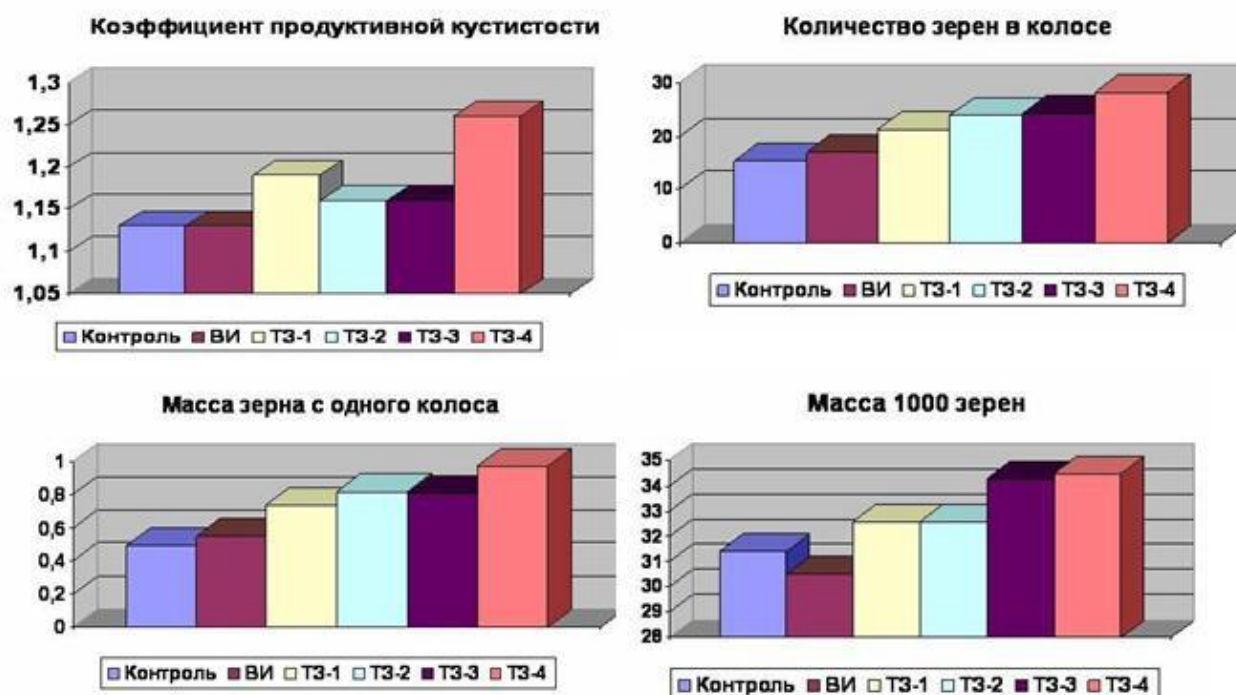


Рис. 5. Изменение показателей структуры урожая (сред. за 2009 - 2011 гг.)

Динамика накопления биомассы и содержания азота по фазам вегетации

Наблюдения за динамикой формирования биомассы растений пшеницы по фазам вегетации показали (рис. 6), что с возрастом растений, независимо от варианта, ее величина повышается. Так, в период «кущение – трубкование» нарастание биомассы составило 57,9%; за период «трубкование – цветение» биомасса увеличилась в 2,5 раза; в целом за период «кущение – цветение» она возросла в 3,9 раза. Независимо от фазы вегетации и года проведения исследований, внесение удобрений достоверно увеличивало биомассу на 8,2 - 51,8 %. Дифференцированное внесение удобрений увеличивало накопление сухой биомассы по сравнению с вариантом ВИ. Так, в фазу кущения ее прирост составил 9 - 41%, в фазу трубкования 3,8 - 8,3 % (варианты **ТЗ 1** и **ТЗ 4**) и в фазу цветения 33 - 67%. Максимальные величины биомассы в фазу кущения отмечены в варианте **ТЗ 1**, в остальные фазы вегетации - в варианте **ТЗ 4**.

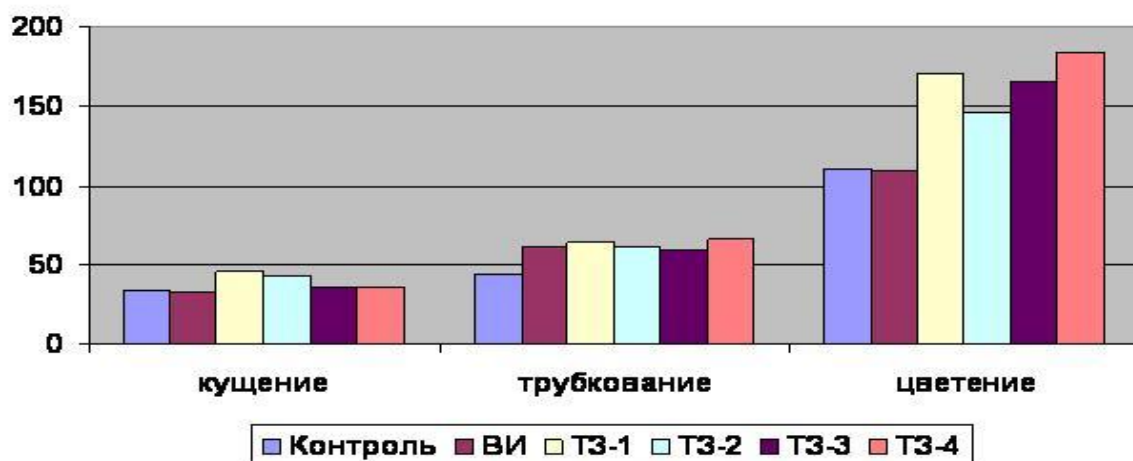


Рис.6. Накопление сухой надземной биомассы по фазам вегетации, г с.в. / 100 растений (сред. за 2009-2011 гг.)

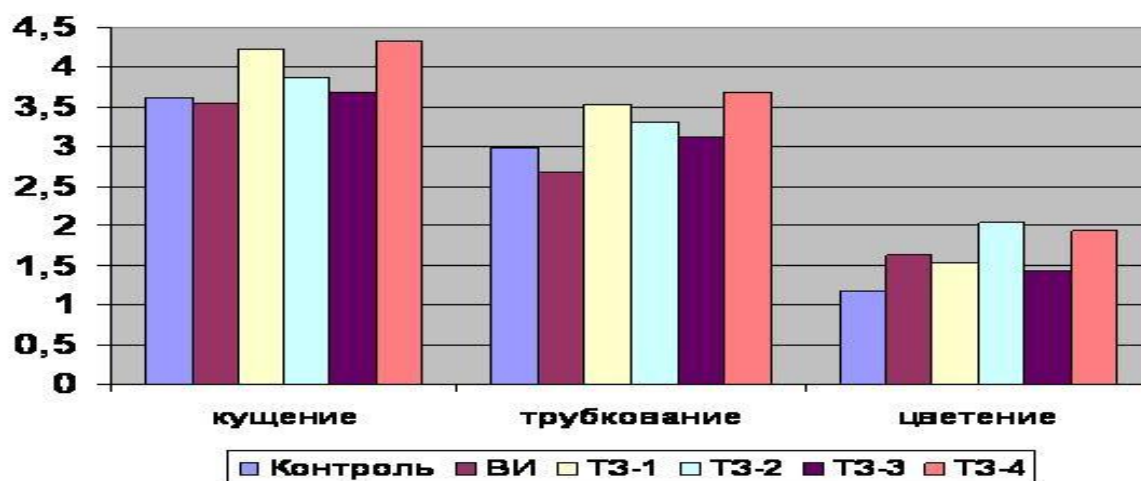


Рис. 7. Содержание общего азота в растениях по фазам вегетации, % (сред. за 2009 - 2011 гг.)

Внесение азотных удобрений, независимо от года проведения исследований и фазы вегетации, увеличивало содержание общего азота в растениях яровой пшеницы на 0,7 - 27,7 % (рис. 7). Исключение составляет вариант ВИ, где была отмечена тенденция к снижению содержания общего азота в сравнении с контрольным вариантом в фазы кущения и трубкования. Независимо от методического подхода, дифференцированное внесение азотных удобрений достоверно увеличивало содержание общего азота в растениях яровой пшеницы по сравнению с экстенсивной (контроль) и зональной технологией (вариант ВИ) в годы проведения исследований на 5,4 - 27,7 % и 4,6 - 26,7 % соответственно. Максимальное содержание общего азота в растениях, независимо от фазы вегетации, отмечено в варианте ТЗ 4.

Содержание сырого белка в зерне пшеницы

Известно, что важнейшими показателями, определяющими пригодность зерна яровой пшеницы для хлебопечения, является содержание в зерне сырого белка, сырой клейковины и ее качество. Считается, что количество клейковинных белков в зерне

пшеницы на 70% зависит от условий возделывания, а их качество в такой же мере определяется генотипом (сортовыми особенностями).

Анализ содержания сырого белка в зерне пшеницы показал (рис. 8), что при дифференцированном внесении азотных удобрений в период вегетации его содержание в зерне было выше, чем при сплошном внесении на 9,6 - 23,6%. Наибольшее содержание белка в годы исследований было отмечено в варианте **ТЗ 4**. Следует отметить, что, согласно ГОСТ 52554-2006 «Пшеница. Технические условия» в варианте **ТЗ 4** во все годы было получено зерно, соответствующее по содержанию сырого белка I классу качества (не менее 14,5%), а в 2011 г. зерно такого качества было получено на всех вариантах с дифференцированным внесением азотных удобрений.

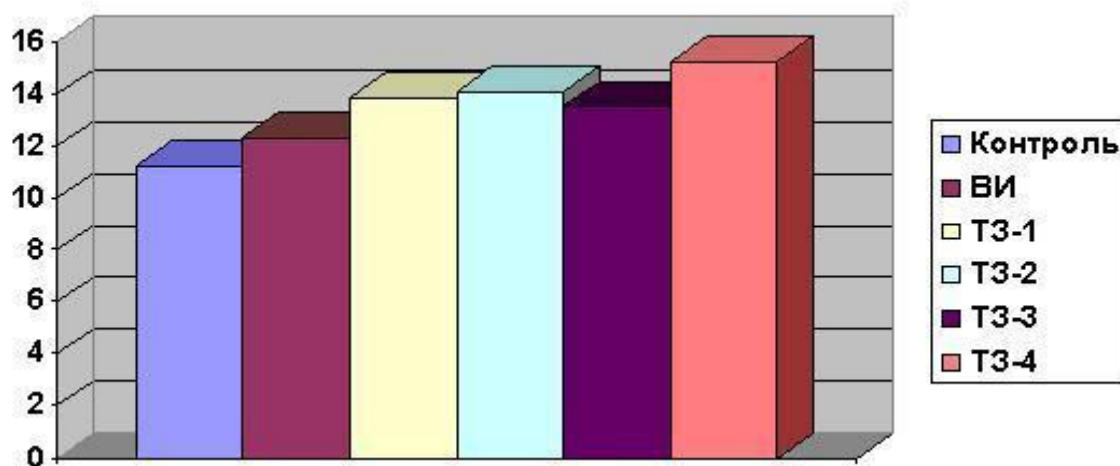


Рис. 8. Содержание сырого белка в зерне пшеницы, % с.в. (сред. за 2009 - 2011) гг.)

Физиолого-биохимические показатели, определяющие накопление белка в зерне

Известно, что белок в зерне пшеницы синтезируется в результате оттока (реутилизации) азотистых веществ из вегетативных органов, накопленных в них к началу цветения и за счет потребления азота корневой системой в период налива и созревания зерна. Расчет величин факторов, определяющих накопление белка в зерне, в основу которых положен принцип изменения содержания азота в вегетативной массе в фазу цветения, в зерне и соломе в фазу полной спелости показал, что дифференцированное внесение удобрений увеличивало абсолютную величину реутилизации азотистых веществ из вегетативных органов в зерно в сравнении в варианте **ВИ** на 31,2 - 86,4% (рис. 9). Следует отметить, что наибольшая величина данного показателя (2,33 г / 100 растений) отмечена при дифференцированном внесении азотных удобрений в период вегетации по картам-заданиям, созданным на основе дешифрирования аэрофотоснимков по оптическим характеристикам тестовых площадок (**ТЗ 4**). Аналогичное явление отмечается и по изменению абсолютной величины поглощения азота корневой системой в период налива зерна, где в трех из четырех вариантов с дифференцированным применением азотных удобрений величина данного показателя воз-

растала в 1,55 - 2,7 раза. Исключение составлял вариант **ТЗ 1**, где отмечена минимальная величина поглощения азота корневой системой среди вариантов **ТЗ**.

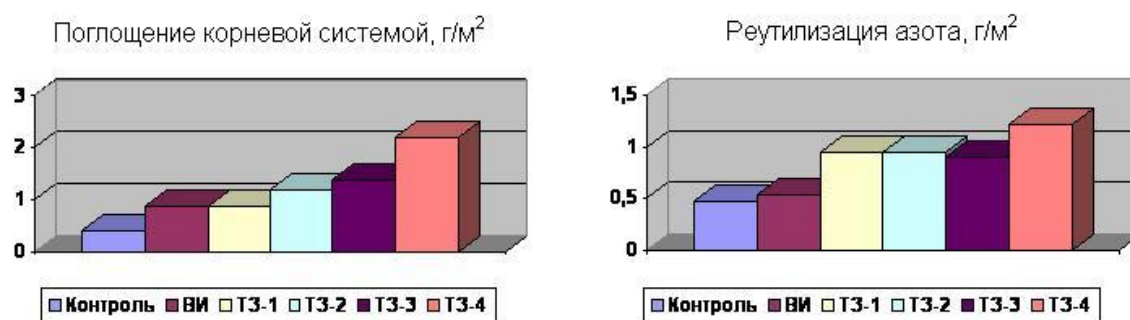


Рис. 9. Факторы, определяющие накопление белка в зерне яровой пшеницы (сред. за 2009 - 2011 гг.)

Таким образом, увеличение содержания сырого белка в зерне яровой пшеницы при внесении азотных удобрений, независимо от метода оптимизации азотного питания обусловлено возрастанием абсолютной величины реутилизации и увеличением потребления азота корневой системой в период формирования и налива зерна.

Основной физиологической причиной, определяющей уровень накопления белка в зерне, является количество азотистого вещества, приходящееся на единицу массы зерна, или "Показатель обеспеченности зерна азотом" - Поз. N (Павлов, 1984). Его определение показало, что внесение удобрений увеличивало показатель обеспеченности зерна азотом, при этом наибольшая его величина была отмечена в варианте **ТЗ 4** (рис. 10). Так, по сравнению с контролем, использование зональной технологии возделывания яровой пшеницы (вар. ВИ) увеличивало Поз. N на 12,4%. Дифференцированное внесение удобрений, в свою очередь, увеличивало Поз. N в сравнении с зональной технологией на 3,3 - 23,8%. Исключение составил вариант **ТЗ 2**, где отмечена тенденция к снижению величины Поз. N в сравнении с вариантом ВИ.

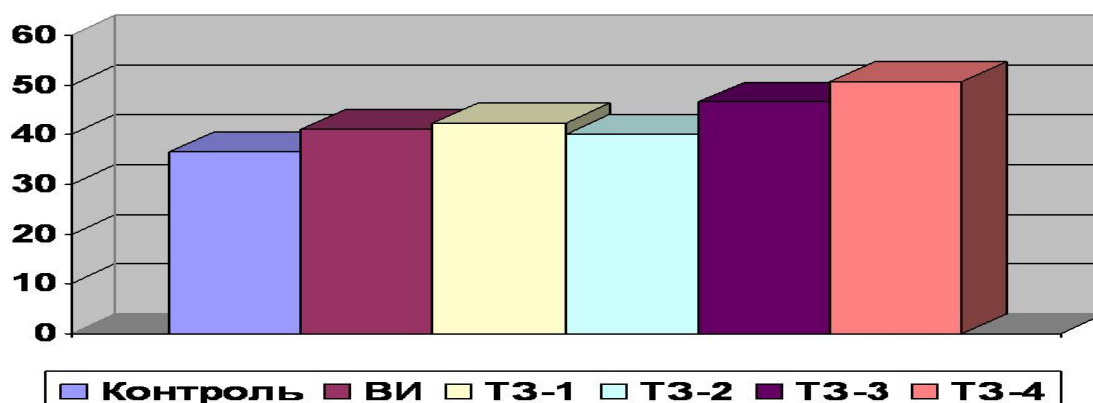


Рис. 10. Поз. N, мг/г (спел. 2009 - 2011 гг.)

Экономическая эффективность изучаемых технологий

Как известно, важной частью оценки любой технологии сельскохозяйственного производства является ее экономическая эффективность. Для учета влияния сельско-

хозяйственной технологии на производственный процесс достаточно расчета величины возмещения постоянных производственных издержек (**ВППИ**), которые определяются разностью между стоимостью реализованной продукции и величиной переменных издержек. **ВППИ** = стоимость реализованной продукции - величина переменных издержек. Постоянные издержки - это издержки, которые остаются на прежнем уровне с изменением объемов производства (амортизационные отчисления, аренда зданий и сооружений, оплата управленческого персонала и т. п.). Переменные издержки – это издержки, величина которых находится в непосредственной зависимости от объемов производства, качества и номенклатуры производимой продукции. К ним относятся издержки на удобрения, посевной материал, средства защиты растений, издержки на топливо, электроэнергию, сырье и т. п. Они зависят от изменения объемов производства (Точное сельское хозяйство, 2009).

Таблица 4. Структура производственных показателей, руб./га (сред. за 2009-2011 гг.)

Показатель	Контроль	ВИ	ТЗ 1	ТЗ 2	ТЗ 3	ТЗ 4
Стоимость удобрений	-	3043,00	2472,73	2253,47	2191,26	2122,26
Стоимость семян	2258,67	2258,67	2258,67	2258,67	2258,67	2258,67
Урожай, ц/га	25,0	35,7	37,7	39,5	38,8	45,1
Цена реализации	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	5,0
Выручка	10000	14280	15080	15800	15520	24805
ВППИ	7741,33	8978,33	10348,6	11287,86	11070,07	20424,07
Доход к контролю	-	1237,00	2607,27	3546,53	3328,74	12682,74
Доход к варианту ВИ	-	-	1370,27	2309,53	2091,74	11445,74

Для оценки эффективности изучаемых технологий было принято решение воспользоваться данной оценкой. Как видно из табл. 4, максимальные затраты на применение азотных удобрений при производстве зерна яровой пшеницы отмечены при возделывании ее по высокоинтенсивной технологии (вар. ВИ), где удобрения вносились одной дозой на всю посевную площадь. Среди технологий дифференцированного внесения азотных удобрений наиболее экономичным характеризовался вариант **ТЗ 4**, в котором расходы на удобрения составили 2122 руб. / га. Следует отметить, что, по сравнению с вариантом ВИ, дифференцированное внесение азотных удобрений снижает затраты, связанные с их приобретением на 19 - 30%.

В то же время, как было показано выше, дифференцированное внесение азотных удобрений увеличивало урожайность по сравнению с вариантом ВИ на 6 - 26%, а максимальная урожайность отмечена в варианте **ТЗ 4**. В этом же варианте на протяжении всех лет проведения полевого опыта было получено зерно с наиболее высоким содержанием белка (более 14,5% - I класс), что отразилось и на цене его реализации.

Расчет величины возмещения постоянных производственных издержек (**ВППИ**) показал, что наиболее экономически эффективным являлся вариант **ТЗ 4** с внесением

азотных удобрений по карте-заданию, сформированной в результате классификации аэрофотоснимков посева по оптическим характеристикам тестовых площадок. По сравнению с вариантом ВИ, дифференцированное внесение удобрений увеличивало величину ВППИ в 1,2 – 2,3 раза.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Дифференцированное внесение азотных удобрений, независимо от гидротермических условий вегетационного периода и методического подхода оптимизации азотного питания растений яровой пшеницы, достоверно увеличивало урожайность по сравнению с вариантом ВИ на 6 - 26%, что связано с улучшением большинства показателей структуры урожая.
2. Дифференцированное внесение азотных удобрений, независимо от года проведения исследований, увеличивало накопление сухой биомассы растений яровой пшеницы в сравнении с вариантом ВИ в фазу кущения на 9 - 41%, в фазу трубкования - 3,8 – 8,3% и в фазу цветения на 33 - 67%.
3. Дифференцированное внесение азотных удобрений достоверно увеличивало содержание общего азота в растениях яровой пшеницы по фазам вегетации в сравнении с вариантом ВИ на 4,6 - 26,7; в основной продукции (зерно) на 13,7 - 28,8, в побочной (солома) – на 5,9 - 39,2 %.
4. Независимо от методического подхода по оптимизации доз, дифференцированное внесение азотных удобрений повышало содержание сырого белка в зерне в сравнении с вариантом ВИ на 9,6 – 23,6%.
5. Дифференцированное внесение азотных удобрений во все годы проведения исследований увеличивало абсолютную величину реутилизации азота по сравнению с вариантом ВИ на 31,2 - 86,4%, а также абсолютную величину поглощения азота корневой системой в период формирования и налива зерна в 1,55 - 2,70 раза и показатель обеспеченности зерна азотом (Поз. N) на 3,3 - 23,8%.
6. По сравнению с вариантом ВИ, дифференцированное внесение азотных удобрений снижало затраты, связанные с их приобретением на 19 - 30% и повышало величину возмещения постоянных производственных издержек (ВППИ) в 1,2 – 2,3 раза.
7. Среди всех изучаемых вариантов оптимизации азотного питания растений в период вегетации наиболее эффективен вариант, где азотные удобрения вносились по картам-заданиям, созданным на основе дешифровки аэрофотоснимков посевов с использованием тестовых площадок. Средняя урожайность за годы исследований на данном варианте составила 45,1 ц/га, на нем же были отмечены самые высокие показатели структуры урожая. В этом же варианте в течение всех лет проведения полевого опыта было получено зерно яровой пшеницы, соответствующее по содержанию сырого белка I классу качества.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК

1. В.В. Якушев, А.В. Конев, Д.А. Матвеев, О.И. Якушева Прецизионные эксперименты в информационном обеспечении систем земледелия // Вестник РАСХН, 2011. № 3. С. 11 - 13.
2. П.В. Лекомцев, Д.А. Матвеев Оптимизация внесения азотных подкормок по оптическим характеристикам посевов яровой пшеницы // Известия СПбГАУ, 2011. № 24. С. 62 - 67.
3. П. А. Суханов, В.В. Якушев, А.В. Конев, Д.А. Матвеев. Региональный мониторинг земель сельскохозяйственного назначения на основе сети стационарных полигонов // Агрохимический вестник, 2011. № 3 С. 14 - 16.

Другие публикации

1. С.Г. Слинчук, В.А. Ланцов, П.В. Лекомцев, В.В. Якушев, А.Ф. Петрушин, Д.А. Матвеев Опыт использования данных аэрофотосъемки с радиоуправляемого комплекса при проведении технологической операции подкормки зерновых культур / Продукционный процесс растений: теория и практика эффективного и ресурсосберегающего управления / Труды Всероссийской конференции с международным участием (СПб, 1-3 июля 2009 г.). - СПб.: ГНУ АФИ Россельхозакадемии, 2009. С. 178 - 179.
2. Е.В. Канаш, Ю.А. Осипов, П.В. Лекомцев, Д.А. Матвеев Колориметрические характеристики растений, их связь с продуктивностью и применение при диагностике фитоценозов / Сборник докладов международной научно-практической конференции «Интенсификация и оптимизация продукционного процесса сельскохозяйственных растений». - Орел: ФГОУ ВПО «Орловский ГАУ», 2009.
3. В.В. Воропаев, П.В. Лекомцев, Д.А. Матвеев, А.Ф. Петрушин, С.Г. Слинчук, В.В. Якушев, В.П. Якушев Опыт применения элементов точного земледелия в северо-западном регионе РФ / Сборник статей международной научно-практической конференции «Ресурсосберегающее земледелие на рубеже XXI века». - М.: МГУ, 2009.
4. В.В. Воропаев, Е.В. Воропаева, А.А. Комаров, П.В. Лекомцев, Д.А. Матвеев, В.В. Якушев. Факторы управления продуктивностью посевов в интенсивных технологиях / Материалы III Международной ассамблеи «ЗЕМЛЯ И УРОЖАЙ». Каталог Петербургского химического форума. - СПб., 2009. С. 157 - 159.
5. В.П. Якушев, В.В. Воропаев, А.В. Конев, П.В. Лекомцев, Д.А. Матвеев, А.Ф. Петрушин, В.В. Якушев. Использование тестовых площадок и данных аэрофотосъемки для выделения зон однородностей в системе точного земледелия / Материалы XI Международной научно-практической конференции «Автоматизация и информационное обеспечение производственных процессов в сельском хозяйстве». - Углич, 2010.
6. Д.А. Матвеев, В.В. Воропаев, А.В. Конев, П.В. Лекомцев, А.Ф. Петрушин, В.В. Якушев. Использование тестовых площадок для контактной и дистанционной регистрации оптических характеристик растений и определения доз азотных подкормок в системе точного земледелия / Материалы координационного совещания Агрофизического института. 25-26 марта 2010 г. Санкт-Петербург: АФИ, 2010. С. 45 - 50.

7. А.В. Конев, Д.А. Матвеев, А.Ф. Петрушин, В.В. Якушев. Компьютерная программа с пространственной привязкой расчетных доз удобрений по заданному сельскохозяйственному полю и автоматическим формированием карт-заданий в системе точного земледелия / Материалы координационного совещания Агрофизического института. 25-26 марта 2010 г. - Санкт-Петербург: АФИ, 2010. С.38-44.
8. Е.В. Канаш, В.В. Воропаев, А.В. Конев, П.В. Лекомцев, Д.А. Матвеев, Ю.А. Осипов, А.Ф. Петрушин, В.В. Якушев. База данных и информационное обеспечение для выделения неоднородных по оптическим характеристикам участков посева и дифференцированного внесения средств химизации / Материалы Всероссийской конференции (с международным участием) «Математические модели и информационные технологии в сельскохозяйственной биологии: итоги и перспективы». 14-15 октября 2010 г. - Санкт-Петербург: АФИ, 2010. С. 288.
9. В.П. Якушев, Е.В. Канаш, А.В. Конев, С.Н. Ковтюх, П.В. Лекомцев, Д.А. Матвеев, А.Ф. Петрушин, В.В. Якушев, В.М. Буре, Ю.А. Осипов, Д.В. Русаков. Теоретические и методические основы выделения однородных технологических зон для дифференцированного применения средств химизации по оптическим характеристикам посева (Практическое пособие). - СПб.: АФИ, 2010. 59 с.
10. В.Ф. Дричко, Д.Н. Юзмухаметов, П.В. Лекомцев, Ю.В. Хомяков, Д.А. Матвеев, В.Е. Вертебный. Нарастание биомассы растений пшеницы сорта Красноуфимская-100 и Эстер и содержание хлорофилла в листьях в течение вегетации в условиях полевого опыта / Материалы научной сессии Агрофизического института. «Современное состояние агрофизики и ее задачи». - СПб.: АФИ, 2011. С. 148.
11. В.Г. Сурин, К.Г. Моисеев, Н.А. Лыкова, П.В. Лекомцев, М.Н. Рысев, Д.А. Матвеев, Е.Г. Маглыш. Методика выполнения измерений для оперативной диагностики уровня азотного питания и физиологического состояния растений в посевах активным дистанционным тестером АДТ (МВИ - АДТ). - СПб.: АФИ, 2011. 24 с.
12. Lekomtsev P.V., Voropaev V.V., Matveenko D.A., Kovtiukh S.N. Using spectral characteristics to make nitrogen recommendations for spring wheat / Papers presented at the 8 European Federation for Information Technology in Agriculture. - Prague, P. 692 - 693.