Прецизионное управление азотным режимом яровой пшеницы на основе дистанционного зондирования посевов

Д. А. Матвеенко, В. В. Якушев, В. П. Якушев

Агрофизический научно-исследовательский институт
Санкт-Петербург, 195220, Россия
E-mails: dmatveeenko@inbox.ru, mail@agrophys.com, vyakushev@agrophys.ru

Работа посвящена оценке эффективности применения различных агроприёмов оперативного прецизионного управления азотным режимом яровой пшеницы, основанных на проксимальном и аэрозондировании посевов. Выполнение агроприёмов на основе проксимального зондирования осуществлялось с использованием импортного оптического прибора N-сенсор, варианты выполнения различались способами его калибровки. Формирование и последующая реализация в полевых условиях агроприёмов на основе аэрозондирования предполагало предварительное выделение по аэрофотоснимкам посевов однородных технологических зон с последующей генерацией для каждой технологической зоны карты-задания на проведение азотных подкормок. Дешифрирование аэрофотоснимков проводилось по стандартной методике и на основе специализированных тестовых площадок, сформированных в поле перед посевом. Приведённые результаты многолетних полевых экспериментов свидетельствуют, что все способы дифференцированного внесения азотных удобрений не только обеспечивают получение более высокой урожайности и продукции лучшего качества в сравнении с традиционной высокоинтенсивной технологией, но и существенно сокращают расход удобрений, снижая антропогенное воздействие сельхозпроизводства на окружающую среду. Наиболее эффективным показал себя прецизионный агроприём проведения азотных подкормок по картам-заданиям, сгенерированным на основе аэрофотоснимков посевов, дешифрированных с использованием тестовых площадок. Данный подход позволяет выполнять пространственно-дифференцированное внесение азотных удобрений без покупки дорогостоящих импортных сенсоров, что существенно снижает стоимость возделывания яровой пшеницы, и может эффективно использоваться в прецизионном производстве зерновых культур.

Ключевые слова: точное земледелие, тестовые площадки, азотные подкормки, N-сенсор, аэрофотосъёмка, данные дистанционного зондирования, яровая пшеница

Одобрена к печати: 19.03.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-79-86

Одним из наиболее эффективных методов развития сельскохозяйственной отрасли является использование прецизионных технологий (или точного земледелия) как комплексного средства управления природно-техногенными системами. Особое место в точном земледелии занимает система применения в севообороте азотных удобрений. По сложившейся практике этот рычаг воздействия на почвенное плодородие является самым действенным, и поэтому ожидаемая эффективность дифференциации данного приёма также весьма высока (Точное..., 2009). Как показали проведённые в Агрофизическом институте (АФИ) исследования, азотным режимом питания сельскохозяйственных культур можно успешно управлять с использованием данных дистанционного зондирования на основе оценки оптических характеристик посевов. Решение указанной задачи обусловлено объективной связью между азотным статусом посевов и колориметрическими характеристиками их цифровых изображений (Якушев и др., 2015).

Объекты и методы

Объектом исследования были растения яровой пшеницы районированного в Ленинградской области сорта Эстер, возделываемого на опытных полях Меньковского филиала Агрофизического института, в вариантах, отличающихся способом и дозой внесения азотных удобрений.

Для выполнения некорневых азотных подкормок, которые проводились три раза за сезон: в фазы кущения, выхода в трубку и цветения, — применялись четыре методических подхода технологии точного земледелия, в дальнейшем обозначенных как варианты: ТЗ-1, ТЗ-2, ТЗ-3 и ТЗ-4. Перечисленные варианты сравнивались с контролем — высокоинтенсивным вариантом (ВИ), на котором азотные подкормки проводились одной сплошной дозой, рассчитанной с учётом агрохимических показателей на получение запланированного максимального урожая. Дифференцированное внесение удобрений в вариантах точного земледелия выполнялось с помощью трактора, агрегатируемого с распределителем твёрдых минеральных удобрений Amazone ZA-M 1500 и навесным опрыскивателем Amazone UF 800, оборудованного бортовым компьютером и приёмником GPS. Учёт урожая проводился сплошным методом с помощью комбайна Claas D130 + ACT с фиксацией в ходе движения его величины и соответствующих координат, где он получен. Для оценки результатов применяли параметрические и непараметрические методы статистического анализа данных, что позволило повысить надёжность и достоверность выводов (Буре, 2007).

Первые два прецизионных агроприёма, ТЗ-1 и ТЗ-2, выполнялись на основе *проксимального зондирования* посевов. Этот подход, известный в мировой литературе с 90-х гг. XX в., послужил началом для использования дистанционного зондирования в точном земледелии. В его основе лежит непрерывное измерение в режиме реального времени пространственной вариабельности состояния почвы и посева с использованием датчиков, установленных на тракторах. Сначала проксимальное зондирование применялось для определения почвенных показателей, а в дальнейшем его принципы стали использоваться для оценки состояния посевов и управления азотным режимом питания растений (Блохина, 2018).

В вариантах ТЗ-1 и ТЗ-2 пространственно-дифференцированное внесение азотных удобрений выполнялось в режиме онлайн с помощью прибора Hydro N-сенсор фирмы Yara (N-сенсор), который крепится на крыше трактора. Прибор оснащён четырьмя датчиками, улавливающими отражённую от листьев радиацию в инфракрасном диапазоне. Принцип действия N-сенсора заключается в измерении отражательной характеристики листа, величина которой коррелирует с содержанием хлорофилла. Оптические показатели от датчиков передаются для обработки на бортовой компьютер, где определяется необходимая доза азотных удобрений. Затем полученная информация поступает в контроллер, который управляет дозирующей системой распределителя минеральных удобрений или опрыскивателя. Перед проведением подкормок минеральными удобрениями с применением N-сенсора необходимо провести его калибровку, которая осуществляется в соответствии с инструкцией по использованию с помощью входящих в комплект поставки контактного прибора N-тестер и калибровочных таблиц. Таблицы разрабатываются для определённой культуры, сорта, фенологической фазы развития растений и приводят в соответствие показания N-тестера и дозу азота в действующем веществе, необходимую для внесения. Входящие в комплект поставки N-сенсора калибровочные таблицы разработаны для сортов зарубежной селекции и не позволяют корректно оценить потребность в азоте районированных в РФ сельскохозяйственных культур и сортов. Поэтому, чтобы использовать N-сенсор для пространственно-дифференцированного внесения удобрений, необходимо получить калибровочные таблицы для возделываемых сортов.

Агроприёмы ТЗ-1 и ТЗ-2 отличались способом калибровки N-сенсора. В варианте ТЗ-1 калибровка выполнялась следующим образом. При наступлении фенологической фазы развития растений, на которую была запланирована очередная азотная подкормка, 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. После этого отмерялся контрольный участок поля около 50 м длиной, вдоль которого выполнялось по 15 измерений N-тестером. Полученные значения, отображённые на экране N-тестера, соответствуют содержанию хлорофилла в условных единицах. Затем по калибровочной таблице определя-

ется доза азота в действующем веществе для каждого показания N-тестера. Для настройки N-сенсора требуется перевести бортовой компьютер трактора в режим «калибровка». В него нужно ввести полученные с помощью N-тестера показания содержания хлорофилла и соответствующие значения доз азота, а трактору с включённым N-сенсором необходимо пройти контрольный участок. Таким образом, бортовой компьютер определяет дозы для их внесения при выполнении операции на поле с показателями, которые получены от датчиков N-сенсора на контрольном участке при сложившихся погодных условиях. Осуществлять калибровку сенсора необходимо перед каждой подкормкой, чтобы наиболее точно оценить пространственную неоднородность состояния растений по полю и выявить участки посева, требующие подкормки, и дозу удобрений при её проведении.

Апробация описанной выше методики калибровки N-сенсора показала, что измерение N-тестером достаточно больших массивов полей яровой пшеницы по диагонали не отражает объективной картины состояния всего посева. Для более корректной калибровки N-сенсора, а также для оперативного получения информации о состоянии посевов закладывались тестовые площадки. Тестовые площадки — это участки поля с различными дозами азотных удобрений в диапазоне от нуля до максимальной величины, которые вносят с целью получения планируемой урожайности. В результате растения на тестовых площадках имеют различные, но известные условия азотного питания и, соответственно, отличаются по оптическим характеристикам. Таким образом, на тестовых площадках моделируется весь спектр условий азотного питания растений пшеницы: от дефицита до близкого к оптимальному (*рис. 1*). В этом случае калибровочная таблица разрабатывается по измеренным N-тестером на тестовых площадках значениям, а не по данным лабораторного анализа. Затем, как и в варианте ТЗ-1, калибруется N-сенсор. Технологический вариант проведения азотных подкормок с применением N-сенсора, откалиброванного с помощью тестовых площадок, был обозначен в исследованиях как ТЗ-2 (Лекомцев, Матвеенко, 2011; Матвеенко, 2012). На *рис. 2* представлен процесс азотной подкормки яровой пшеницы в вариантах ТЗ-1 и ТЗ-2 с помощью N-сенсора (режим онлайн).

Рис. 1. Поле пшеницы с тестовыми площадками (цифрами обозначены дозы азота, кг д. в./га)

Рис. 2. Азотная подкормка посевов на полигоне АФИ с помощью N-сенсора (режим онлайн)

Существенный недостаток применения N-сенсора — необходимость выполнения большого объёма калибровочных работ. Ограничением является также высокая стоимость прибора. В связи с целесообразностью поиска альтернативы были использованы дистанционные методы диагностики состояния посевов, основанные на получении снимков с помощью беспилотных летательных аппаратов и их дешифрировании (варианты: ТЗ-3, ТЗ-4). В этих вариантах азотные подкормки выполнялись в режиме офлайн по заранее созданным картам-заданиям на основе дешифрированных аэрофотоснимков посевов.

Для аэрофотосъёмки сельскохозяйственных посевов нами использовались беспилотный летательный аппарат (БПЛА) разработки и производства АФИ и квадрокоптер «Геоскан-401» производства группы компаний «Геоскан», позволяющие получать высококачественные

аэрофотоснимки высокого разрешения (25×25 см). На летательных аппаратах размещались цифровые камеры для получения аэрофотографий посевов в видимой и ближней инфракрасной (БИК) областях спектра электромагнитного излучения. Получаемые в результате облёта обследуемых сельскохозяйственных полей аэрофотоснимки высокого пространственного разрешения перед дешифрированием проходили предварительную обработку, в процессе которой снимки видимого и БИК диапазонов совмещали, затем ортокорректировали и привязывали к глобальной системе позиционирования. Дешифрирование аэрофотоснимка заключается в классификации пикселей изображения по их оптическим характеристикам. В результате классификации получали карту поля, разбитую на однородные по оптическим характеристикам ареалы.

Технологические варианты ТЗ-3 и ТЗ-4 отличаются способом дешифрирования снимков. В варианте ТЗ-3 дешифрирование выполнялось автоматически с помощью специального программного обеспечения, этот способ основан на кластерном анализе, когда задаётся количество классов, близких по спектральным характеристикам. Чтобы использовать данный подход для выработки рекомендаций по применению азотных подкормок, необходимо дополнительно отобрать образцы в каждой выделенной зоне неоднородности и выполнить лабораторные исследования (Якушев и др., 2010).

В варианте ТЗ-4 выделение технологических зон для пространственно-дифференцированного внесения азотных удобрений выполнялось с помощью аэрофотоснимков, где отображаются тестовые площадки с известной дозой внесённых азотных удобрений. Средние значения колориметрических (цветовых) характеристик посева на каждой из тестовых площадок являются эталонными. Посредством сравнения с ними характеристик остальных зон поля проводится оценка потребности растений в азоте. В частности, выделение участков поля, на которых необходимо внесение азотных удобрений, выполнялось с помощью созданного специалистами АФИ автоматизированного метода построения калибровочных кривых по колориметрическим характеристикам аэрофотографий посевов. Для этого цвет растительного покрова представляется единой величиной, условно названной обобщённой характеристикой цвета $C_{\Sigma Lab}$, которая рассчитывалась по разработанной в АФИ формуле:

$$C_{\Sigma Lab} = \alpha L + \beta_1 a + \beta_2 b,$$

где L — светлота; a — величина красной/зелёной составляющей; b — величина жёлтой/синей составляющей трёхмерной модели цветового пространства CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), или шкалы цвета CIELAB, принятой Международной комиссией по освещению в 1976 г.; $\alpha \geqslant 0$, $\beta_1 \geqslant 0$ и $\beta_2 \geqslant 0$ — эмпирически подбираемые компьютерной программой коэффициенты для каждого цифрового изображения посева, причём $\alpha + \beta_1 + \beta_2 = 1$. Основным критерием подбора коэффициентов α, β_1, β_2 является обеспечение максимально выраженной линейной связи между дозой азота на тестовых площадках и характеристикой цвета. Величины L, a и b, помимо прямого определения с помощью контактных сенсоров, можно устанавливать по цифровым изображениям аэрофотографий посевов в специальных программах, например в Photoshop CS4 Portable. Такой подход позволяет провести оценку обеспеченности растений азотом на любом участке поля. Это доступный, недорогостоящий и достаточно точный метод мониторинга посевов и оценки их потребности в азотном питании (Митрофанова и др., 2015).

Важно отметить, что для дешифрирования используются только те аэрофотоснимки, на которых чётко отображается всё поле с тестовыми площадками. В том случае, если площадь поля большая и его изображение целиком трудно получить на одном снимке, целесообразно заложить 2–3 набора тестовых площадок, которые следует расположить, например, на северной и южной сторонах поля. Равномерность освещения поля и отсутствие на нём теней от облаков было одним из основных требований при выборе снимка для дальнейшей работы с ним. Как показал опыт, для дешифрирования аэрофотоснимков нет необходимости закладывать большое число тестовых площадок. Обязательно должен быть представлен участок, в почву которого удобрения не вносили, участок с дозой удобрений, рассчитанной под планируемую урожайность (максимальная доза), и два участка с промежуточными дозами азота.

Рис. 3. Азотная подкормка посевов на полигоне АФИ без N-сенсора на основе карты-задания

Следует также подчеркнуть, что при генерации электронной карты-задания необходимо выполнить следующую работу. Каждый однородный участок поля, выделенный при дешифрировании снимков, разбивается на более мелкие элементарные участки, которые представляют собой квадрат со стороной, равной ширине захвата сельскохозяйственной техники, для которой формируется карта-задание. Затем с помощью специального программного обеспечения производится расчёт дозы азотного удобрения для каждого такого элементарного участка. При этом создаётся массив информации, где для каждого однородного участка внутри поля с фиксированным геометрическим образом устанавливается доза азота, которая должна быть внесена при реализации заданного приёма в поле. Сформированный таким образом массив информации является электронной картой-заданием на выполнение данного технологического приёма, которая записывается на мобильный технический носитель, например на чип-карту, и переносится в бортовой компьютер трактора (*рис. 3*) (Якушев, Якушев, 2018).

Результаты

Проведённые многолетние исследования показали высокую эффективность использования агроприёмов точного земледелия в сравнении с традиционной высокоинтенсивной технологией при выращивании яровой пшеницы (*табл. 1*). Дифференцированные подкормки растений азотом позволили существенно повысить продуктивность (в среднем на 22,7 %), снизить риск неурожайности от наблюдаемых в годы исследований колебаний погодных условий, обеспечивая стабильность функционирования сельскохозяйственного производства. Установлено в целом устойчивое снижение агрохимической нагрузки на окружающую среду (на 35–60 %), а также повышение окупаемости удобрений и средств защиты растений (в 1,5–1,7 раза). Экономический эффект от применения прецизионных технологий колеблется от 840 до 1460 руб. на 1 га (в ценах 2012 г.). Кроме того, дифференцированное внесение удобрений повышает качество получаемой продукции, а именно позволяет получать урожай зерна хлебопекарного класса при том, что традиционно в Ленинградской области пшеницу выращивают на фураж (Якушев и др., 2015).

В *табл. 2* приведены данные по урожайности зерна яровой пшеницы сорта Эстер за период 2009–2011 гг., полученные в вариантах с дифференцированным внесением азотных удобрений ТЗ-1–ТЗ-4, а также в высокоинтенсивном варианте. Независимо от года проведения опыта наиболее эффективными показали себя варианты, где калибровка осуществлялась по тестовым площадкам, а в среднем за годы исследований наиболее эффективным оказался вариант ТЗ-4. На данном варианте азотные удобрения вносились по картам-заданиям, созданным на основе дешифрирования аэрофотоснимков посевов с использованием тестовых площадок. Средняя урожайность за годы исследований на указанном варианте составила 45,1 ц/га.

Таблица 1. Результаты сравнительного опыта с яровой пшеницей за период 2006–2012 гг.

Показатели по опыту	Год исследований							
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Среднее
Высокоинтенсивная технология								
Урожайность, ц/га	32,2	47,0	22,5	46,9	29,7	30,5	34,3	34,7
Внесено азотных удобрений, кг д. в./га	110	110	110	110	110	110	110	110
Технология дифференцированного внесения								
Урожайность, ц/га	40,7	51,0	39,8	53,3	40,9	46,6	41,7	44,9
Внесено азотных удобрений, кг д. в./га	93	76	70	90	78	72	92	81,5
Экономия удобрений к ВИ технологии, %	15,5	30,9	36,4	18,2	29,1	34,5	16,3	25,9

Таблица 2. Урожайность зерна яровой пшеницы, ц/га

Вариант внесения удобрений	Год исследований			Среднее (А)
	2009	2010	2011	
Контроль (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)	47,3	32,0	38,8	39,3

При внедрении в хозяйствах технологий точного земледелия помимо общих издержек на их применение возникают дополнительные финансовые затраты, которые состоят из расходов на покупку сенсорных систем и техники, программного обеспечения, а также дополнительной потребности в рабочем времени. К сожалению, технология дифференцированных подкормок с применением азотных сенсоров требует немалых затрат. Средняя стоимость N-сенсора составляет на сегодняшний день 60 000 евро, а оснастить им нужно каждый трактор, используемый при проведении азотных подкормок. На сегодняшний день ситуация такова, что лишь крупные агрохолдинги могут позволить себе приобретение такой дорогой техники. При этом технология азотных подкормок на основе дешифрированных аэрофотоснимков посевов позволяет обойтись без использования довольно дорогих импортных азотных сенсоров проксимального зондирования и существенно сокращает издержки внедрения точного земледелия в хозяйства. Так, модифицированная модель используемого нами квадракоптера («Геоскан-201») стоит 26 000 евро, за одну рабочую смену с его помощью можно произвести аэрофотосъёмку площадью около 8000 га. Программное обеспечение, позволяющее выделять технологические зоны и генерировать карты-задания, стоит 1500 евро. Кроме того, весь технологический цикл выполняется полностью в автоматическом режиме и позволяет оперативно в течение одного дня оценить потребность посева в азотном питании и провести дифференцированную подкормку.

В заключение отметим, что в настоящее время создаются принципиально новые системы, обеспечивающие возможности применения более совершенных методов и технологий работы с данными современных спутниковых комплексов. В частности, специалистами Института космических исследований РАН создана уникальная научная установка Vega-Science (http://sci-vega.ru), входящая в состав ЦКП «ИКИ-мониторинг», которая предостав-

ляет распределённый доступ к многолетним ежедневно пополняющимся архивам информации, а также возможность для пользователей удалённой обработки и анализа спутниковых данных. В связи с этим представляется перспективным в дальнейшем использовать сервисы обработки спутниковых данных ИКИ РАН для выделения границ однородных технологических зон и последующего прецизионного проведения азотных подкормок с помощью методик, апробированных на проксимальном и аэрозондировании.

Литература

1. *Блохина С. Ю.* Применение дистанционного зондирования в точном земледелии // Вестн. Российской сельскохозяйственной науки. 2018. № 5. С. 10–16
2. *Буре В. М.* Методология статистического анализа опытных данных. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2007. 141 с.
3. *Лекомцев П. В.*, *Матвеенко Д. А.* Оптимизация внесения азотных подкормок по оптическим характеристикам посевов яровой пшеницы // Изв. СПбГАУ. 2011. № 24. С. 62–67.
4. *Матвеенко Д. А.* Дифференцированное внесение азотных удобрений на основе оценки оптических характеристик посевов яровой пшеницы: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб.: АФИ, 2012. 21 с.
5. *Митрофанова О. А.*, *Буре В. М.*, *Канаш Е. В.* Математический подход к автоматическому построению калибровочных кривых для оценки обеспеченности растений азотом по данным дистанционного зондирования // Материалы Всерос. науч. конф. с международным участием «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве». СПб.: АФИ, 2015. С. 134–137.
6. Точное сельское хозяйство (Precision Agriculture): учебно-практ. пособие / под общ. ред. Д. Шпаара, А. В. Захаренко, В. П. Якушева. СПб.; Пушкин, 2009. 397 с.
7. *Якушев В. П.*, *Якушев В. В.* Перспективы «умного сельского хозяйства» в России // Вестн. РАН. 2018. Т. 88. № 9. С. 773–784.
8. *Якушев В. П.*, *Канаш Е. В.*, *Конев А. В.*, *Ковтюх С. Н.*, *Лекомцев П. В.*, *Матвеенко Д. А.*, *Петрушин А. Ф.*, *Якушев В. В.*, *Буре В. М.*, *Осипов Ю. А.*, *Русаков Д. В.* Теоретические и методические основы выделения однородных технологических зон для дифференцированного применения средств химизации по оптическим характеристикам посева: практическое пособие. СПб.: Агрофиз. научно-исслед. ин-т, 2010. 59 с.
9. *Якушев В. П.*, *Лекомцев П. В.*, *Матвеенко Д. А.*, *Петрушин А. Ф.*, *Якушев В. В.* Применение дистанционного зондирования в системе точного земледелия // Вестн. сельскохозяйственной науки. 2015. № 1. С. 23–25.

Precision management of the nitrogen status of spring wheat crops based on remote sensing data

D. A. Matveenko, V. V. Yakushev, V. P. Yakushev

Agrophysical Research Institute, *Saint Petersburg 195220*, *Russia*
E-mails: dmatveeenko@inbox.ru, *mail@agrophys.com*, *vyakushev@agrophys.ru*

The paper presents the results of estimating the effectiveness of various agricultural methods for operational precision management of the spring wheat nitrogen status based on proximal and airborne remote sensing of crops. The implementation of agricultural methods based on proximal sensing was carried out using an imported optical N-sensor, the variants of implementation differed in the methods of its calibration. The formation and subsequent realization of agricultural methods based on airborne remote sensing in the field conditions suggested a preliminary delineation of homogeneous technological zones by aerial images of crops, followed by generation of a target-card for applying nitrogen fertilizers for each technological zone. The aerial images were interpreted using the standard method and on the basis of specialized test sites formed in the field before sowing. The results of long-term field experiments show that all methods of variable-rate application of nitrogen fertilizers not only provide

higher yield and better quality of production compared to traditional high-intensity technology, but also significantly reduce fertilizer inputs and the anthropogenic impact of crop production on the environment. The most effective proved to be a precision method of nitrogen dressing by the target-cards generated on the basis of aerial images of crops interpreted using the test sites. This approach provides the site-specific foliar fertilization of crops without the purchase of expensive imported sensors, that significantly reduces the cost of spring wheat cultivation and can be effectively used in the precision production of grain crops.

Keywords: precision agriculture, test site, nitrogen dressing, N-sensor, airborne remote sensing, remote sensing data, spring wheat

Accepted: 19.03.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-79-86

References

1. Blokhina S. Yu., Primenenie distantsionnogo zondirovaniya v tochnom zemledelii (Application of remote sensing in precision agriculture), *Vestnik Rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 2018, No. 5, pp. 10–16.
2. Bure V. M., *Metodologiya statisticheskogo analiza opytnykh dannykh* (Statistical analysis methodology of experimental data), Saint Petersburg: Izd. Sankt-Peterburgskogo universiteta, 2007, 141 p.
3. Lekomtsev P. V., Matveenko D. A., Optimizatsiya vneseniya azotnykh podkormok po opticheskim kharakteristikam posevov yarovoi pshenitsy (Nitrogen fertilizer optimization on the spring wheat optical characteristics), *Izvestiya SPbGAU*, 2011, No. 24, pp. 62–67.
4. Matveenko D. A., *Differentsirovannoe vnesenie azotnykh udobrenii na osnove otsenki opticheskikh kharakteristik posevov yarovoi pshenitsy: Avtoref. diss. kand. s.-kh. nauk* (Differentiated application of nitrogen fertilizers based on the assessment of spring wheat optical characteristics: Ext. abstract of Cand. agricult. sci. thesis), Saint Petersburg, AFI, 2012, 21 p.
5. Mitrofanova O. A., Bure V. M., Kanash E. V., Matematicheskii podkhod k avtomaticheskomu postroeniyu kalibrovochnykh krivykh dlya otsenki obespechennosti rastenii azotom po dannym distantsionnogo zondirovaniya (Mathematical approach to the calibration curves automatic construction for the plant availability assessment of nitrogen according to remote sensing data), *Primenenie sredstv distantsionnogo zondirovaniya Zemli v sel'skom khozyaistve* (Application of Remote Sensing of The Earth in Agriculture), Proc. All-Russia Science Conf., Saint Petersburg: FGBNU AFI, 2015, pp. 134–137.
6. *Tochnoe sel'skoe khozyaistvo* (Precision Agriculture), D. Shpaar, A. V. Zakharenko, V. P. Yakushev (eds.), Saint Petersburg, Pushkin, 2009, 397 p.
7. Yakushev V. P., Yakushev V. V., Perspektivy "umnogo sel'skogo khozyaistva" v Rossii (Prospects for "Smart agriculture" in Russia), *Vestnik RAN*, 2018, Vol. 88, No. 9, pp. 773–784.
8. Yakushev V. P., Kanash E. V., Konev A. V., Kovtyukh S. N., Lekomtsev P. V., Matveenko D. A., Petrushin A. F., Yakushev V. V., Bure V. M., Osipov Yu. A., Rusakov D. V., *Teoreticheskie i metodicheskie osnovy vydeleniya odnorodnykh tekhnologicheskikh zon dlya differentsirovannogo primeneniya sredstv khimizatsii po opticheskim kharakteristikam poseva* (Theoretical and methodological foundations of the homogeneous technological zones identification to chemicals differential use according to canopy optical characteristics), Saint Petersburg: Agrofizicheskii nauchno-issledovatel'skii institut, 2010, 59 p.
9. Yakushev V. P., Lekomtsev P. V., Matveenko D. A., Petrushin A. F., Yakushev V. V., Primenenie distantsionnogo zondirovaniya v sisteme tochnogo zemledeliya (Remote sensing application in the system of precision agriculture), *Vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 2015, No. 1, pp. 23–25.