

## ГЕОИНФОРМАТИКА

## Точное земледелие: опыт применения и потенциал развития

## Precision Agriculture technology: adoption and development

**Ключевые слова:** точное земледелие – precision agriculture; неоднородность почвенного покрова – soil variability; дифференцированное внесение удобрений – site-specific fertilizer application; оптические характеристики растений – optical characteristics of plants; аэрофотоснимки – aerial images.

Приведены результаты многолетнего опыта применения технологии точного земледелия и обсуждаются перспективы использования инновационных технологий в научных исследованиях и производственных условиях.

The results of long-term field experience of precision agriculture technology application are considered. Prospects of innovative technology implementation in scientific researches and technological conditions are discussed.

## ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на отдельные попытки технологического совершенствования в России господствует экстенсивное земледелие, существующее за счет эксплуатации естественного плодородия почв. Урожайность зерновых в стране составляет в среднем около 20 ц/га, в то время как в развитых государствах данный показатель достигает 60–80 ц/га. Следствием низкой культуры земледелия является беспрецедентное истощение почв, водная и ветровая эрозии, снижение конкурентоспособности как отрасли в целом, так и отдельных хозяйств – субъектов отечественного продовольственного рынка. Это, в свою очередь, приводит к оттоку трудоспособного населения из производственной сферы, деградации сельской инфраструктуры, снижению рентабельности сельскохозяйственного производства. Постоянно увеличивающийся диспаритет цен на сельскохозяйственную продукцию и используемые материально-технические ресурсы приводят к вымыванию финансовых средств из отрасли и лишению ее источников собственных инвестиций. В стране прекратилось расширенное сельскохозяйственное воспроиз-

## ЯКУШЕВ / YAKUSHEV V.

## Виктор Петрович

(Vyakushev@agrophys.ru)  
академик РАН,  
ГНУ Агрофизический НИИ Россельхозакадемии,  
директор.  
г. Санкт-Петербург

## ЛЕКОМЦЕВ / LEKOMTSEV P.

## Пётр Валентинович

(plekومتsev@agrophys.ru)  
кандидат биологических наук.  
Агрофизический НИИ,  
заведующий лабораторией экспериментальных исследований и мониторинга агросистем.  
г. Санкт-Петербург

## ПЕТРУШИН / PETRUSHIN A.

## Алексей Фёдорович

(apetrushin@agrophys.ru)  
кандидат технических наук.  
Агрофизический НИИ,  
заведующий сектором программных разработок.  
г. Санкт-Петербург

водство, ухудшилось использование пахотных земель, значительно возросла социальная напряженность в сельской местности.

Надежды на преобразование сельского хозяйства в России связываются в настоящее время с выполнением Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы, утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 14 июля 2012 г. № 717 (далее – Государственная программа).

Государственная программа предусматривает комплексное развитие всех отраслей и сфер деятельности АПК с учетом вступления России во Всемирную торговую организацию. Главной целью данного документа является обеспечение продовольственной независимости страны в заданных соответствующей Доктриной параметрах, воспроизводство и повышение эффективности исполь-

зования земельных и других ресурсов, а также экологизация производства.

Вместе с тем неадаптивность применяемых в сельском хозяйстве технологий производства растениеводческой продукции по использованию ресурсов, базирующихся на «уравнительных» принципах без учета пространственной и временной изменчивости факторов среды, непосредственно влияющих на продуктивность агроэкосистем, мешает в решении важнейших задач: устойчивого роста производства, самодостаточности, низкзатратности, ресурсо- и энергоэкономичности, природоохранности. Указанные проблемы лежат в основе экологического кризиса не только отечественного, но и мирового сельскохозяйственного производства.

Одним из наиболее эффективных методов решения проблем развития отрасли, ее гармонизации с другими сферами природопользовательского комплекса является применение прецизионных сельскохозяйственных технологий, так называемого точного земледелия, как комплексного средства управления природно-техногенными системами.

Впервые термин «точное земледелие» появился в начале 90-х годов XX-го столетия. В настоящее время в зарубежной литературе встречается несколько терминов для обозначения системы точного земледелия: «precision agriculture», «precision farming», «site-specific». В отечественной литературе помимо «точного земледелия» используются также понятия «координатное земледелие» и «прецизионное земледелие» [1].

Следует обратить внимание, что еще в 1955 г. на Всесоюзном совещании агрономов, зоотехников и биологов в Кремлевском дворце основатель Агрофизического института А.Ф. Иоффе сказал: «Недалеко то время, когда решающую роль в управлении сложнейшей отраслью человеческой деятельности будет играть электронный агроном, способный учесть множественность сложнейших зависимостей в сельском хозяйстве и предложить единственно правильное решение по оперативному управлению сельскохозяйственным предприятием».

Точное земледелие можно определить как совокупность технологических приемов, обеспечивающих дифференцированную обработку отдельных участков поля с учетом его неоднородности по плодородию, распространению вредителей, болезней и сорняков при рациональной дозировке воздействия с целью создания основы для экономически эффективного и экологически обоснованного землепользования [2, 3]. Развитие точного земледелия стало возможным

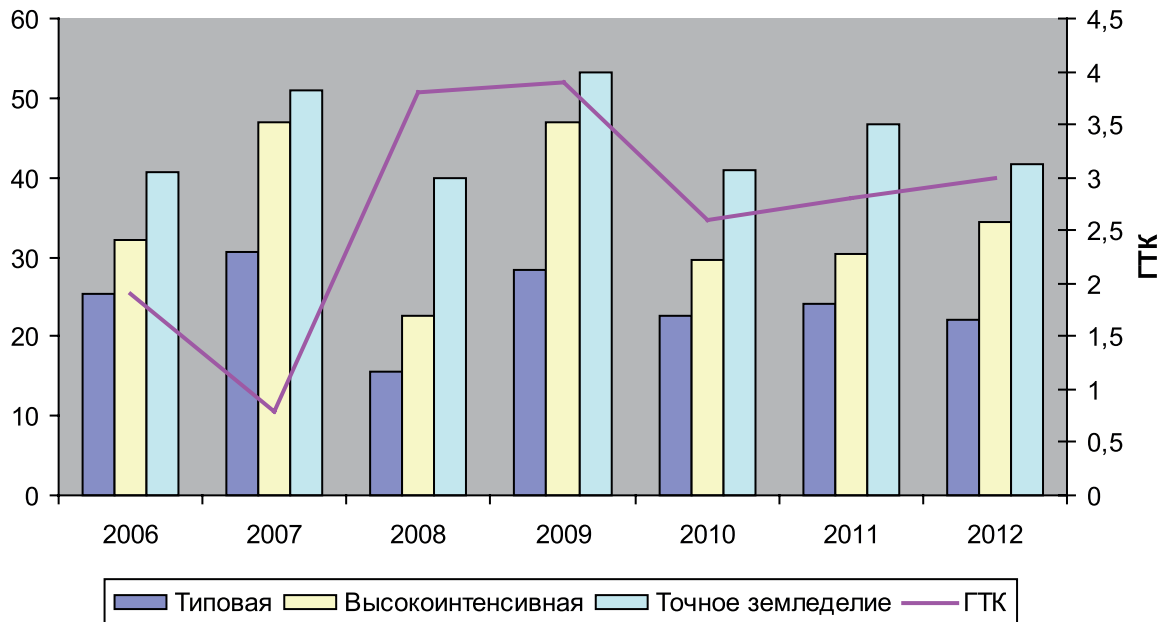
благодаря появлению программно-аппаратных средств, глобальной системы определения координат и геоинформационных систем (ГИС), а также сельскохозяйственных машин, способных проводить дифференцированную обработку поля. Как показывает практика, внедрение данной технологии обещает революционные преобразования в сельском хозяйстве, так как значительно повышает эффективность производства, улучшая производительность, рентабельность, качество продукции, охрану окружающей среды, что в конечном итоге поднимает не только культуру производства, но и способствует развитию сельских районов в целом. Далее будет кратко описан опыт применения точного земледелия в Агрофизическом институте (АФИ).

### ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ

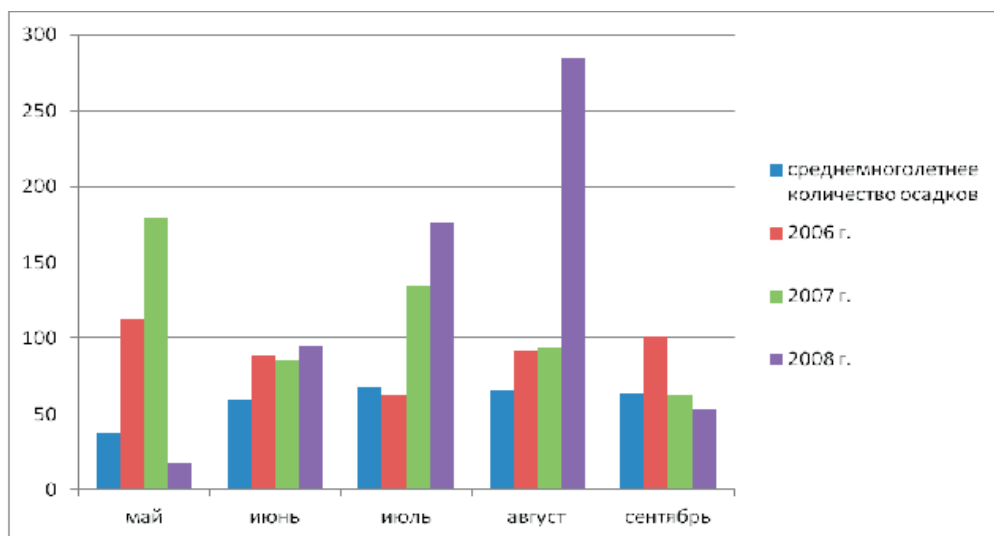
В АФИ накоплен более чем десятилетний опыт реализации агроприемов по технологии точного земледелия (ТЗ) для получения стабильно высоких и качественных урожаев яровой пшеницы с высоким содержанием сырого белка. Соответствующие исследования проводились на опытных полях Меньковского филиала АФИ ( $S = 538$  га). В ходе проведенных обследований на опытных полях Меньковского филиала АФИ был выделен следующий систематический список почв: дерново-слабоподзолистые без признаков переувлажнения; дерново-слабоподзолистые конкактно-глееватые супесчаные; дерново-слабоподзолистые слабоглееватые супесчаные; дерново-слабоподзолистые глееватые супесчаные; дерново-слабоподзолистые глеевые супесчаные. Всего было заложено и описано 347 разрезов глубиной от 1 до 1,5 метров. Агрохимическое обследование опытных полигонов проводилось с помощью разработанного в АФИ мобильного комплекса. Почвенные пробы отбирались с помощью автоматического пробоотборника. Опытные поля с помощью специализированного программного обеспечения (СПО) разбивались на элементарные участки площадью 1 га. Средняя проба отбиралась по диагонали данного участка. Производилось несколько уколов с фиксацией соответствующих координат. Отобранные почвенные образцы по каждой диагонали элементарного участка смешивались и передавались в аналитическую лабораторию. По результатам агрохимических анализов с помощью СПО производились расчеты доз удобрений по каждому элементарному участку. Тем самым создавалась база данных для дифференцированного внесения удобрений в системе точного земледелия.

В многолетнем опыте изучалось влияние неоднородности почвенного покрова на урожайность

**Урожайность яровой пшеницы, ц/га**



**Рис. 1.** Урожайность яровой пшеницы в 2006...2012 гг. проведения исследований



**Рис. 2.** Количество осадков, выпавших за вегетационный период в годы проведения исследований, мм

и качество яровой пшеницы, а также оценивалась сравнительная эффективность агротехнологий. На рис. 1 представлена сравнительная информация по полученной урожайности, включая вариант ТЗ, на фоне колебаний погодно-климатических условий (ГТК – гидротермический коэффициент, характеризующий тепло-влажностный режим конкретного года).

Выявлено, что при дифференцированном способе (вариант ТЗ) объемы внесения агрохимикатов и удобрений, а также соответствующие затраты на их приобретение сократились на 25...30 % по сравнению с применением высокоинтенсивной технологии в Ленинградской области [5]. Исследования были проведены с районированным в Ленинградской области сортом пшеницы "Ленинградская 97" (селекции ГНУ ЛНИИСХ Россельхозакадемии «Белогорка») при ее возделывании в чистом виде (норма высева 7,5 млн. всхожих зерен пшеницы, или 2,5 ц/га с учётом посевных качеств семян). Опытные поля ежегодно разбивались на делянки, соответствующие изучаемым вариантам. Ширина делянки составляла 18 м. Площадь делянки зависела от геометрических параметров опытных полей.

Любопытно отметить, что в 2006...2008 годы исследований наблюдались существенные различия в количестве и динамике выпавших осадков. На рис. 2 и 3 представлены гистограммы, характеризующие климатическое распределение, соответственно, количества осадков и температуры воздуха за указанный период. В сравнении со среднемноголетними данными (рис. 2) весенне-летний период вегетации 2006 г. характеризовался нормальным увлажнением и равномерным выпадением осадков; 2007 г. отличился низким значением гидротермического коэффициента периода вегетации; в 2008 г. в период «цветение – уборка» наблюдалось избыточное увлажнение – 230 мм.

Следует отметить, что за три года проведения исследований наиболее благоприятным по погодно-климатическим условиям для формирования урожая зерна яровой пшеницы оказался 2007 г. В период «посев – всходы» выпало достаточное количество осадков при оптимальной температуре для появления всходов растений. 2006 г. по погодно-климатическим условиям оказался наиболее схож со среднемноголетними данными. В 2008 г. температура воздуха в период вегетации была ниже, чем в остальные годы исследований (рис. 3), избыточное количество осадков, выпавших в июле – августе, привело к снижению уровня урожайности яровой пшеницы.

Другим аспектом применения точного земледелия в АФИ являются работы по изучению эффек-

тивности дифференцированного внесения азотных удобрений на основе оценки оптических характеристик посевов яровой пшеницы с использованием разработанных в институте ГИС-программ по обработке аэрофотоснимков, получаемых с помощью беспилотного летательного аппарата [12]. Возможность решения данной задачи обусловлена объективной связью между азотным статусом посевов, их оптическими показателями и колориметрическими характеристиками их цифровых изображений. Аэрофотосъемка в видимом и ИК-диапазоне позволяет создавать ортофотопланы полей высокой точности. По созданным ортофотопланам производится выделение однородных ареалов двумя способами: автоматической классификацией и классификацией по эталонам.

Первый способ основан на кластерном анализе, когда задается количество классов, близких по спектральным характеристикам. В основе классификации второго способа лежит создание набора однородных по спектральным характеристикам участков (эталонных участков) на аэрофотоснимке. В результате проведенной классификации создаются площадные векторные объекты (полигоны) с определенными спектральными (атрибутивными) данными. На основе векторных данных выделяются однородные ареалы и разрабатываются необходимые карты проведения технологических операций по подкормкам вегетирующих растений на остальной площади поля.

Важно отметить, что при анализе неоднородностей по данным аэрофотоснимков полей с большой площадью возникает проблема выделения соответствующих границ. По данным аэрофотоснимков возможно дешифрирование в автоматическом режиме, но данный метод дает только территориальное распределение неоднородностей без объяснения биологических (агро) причин разделения площади на некоторое число однородных участков, выделенных на основе коэффициентов спектральной яркости. Наличие тестовых площадок (эталонных участков) на поле позволяет проводить дешифрирование снимков с так называемым обучением, когда тестовые площадки используются как индексные изображения, тем самым с высоким процентом вероятности предполагаются однотипные изменения в процессе вегетации растений.

В соответствующем полевом опыте изучалось несколько технологий выращивания яровой пшеницы: экстенсивная (контроль), высокоинтенсивная и технология точного земледелия с различными вариантами проведения азотных подкормок (калибровка «Гидро-N-сенсора» проводилась по методике, предложенной производи-

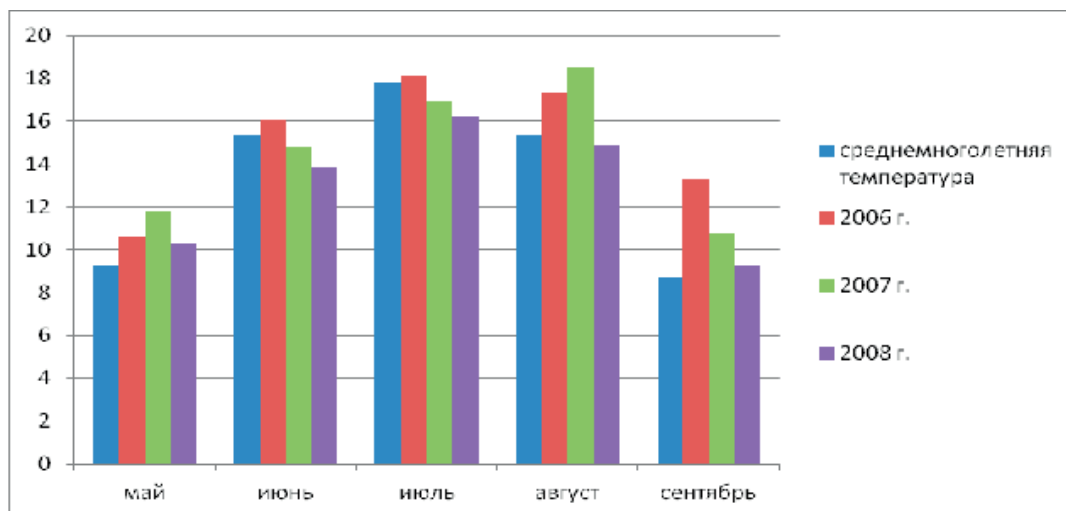


Рис. 3. Температура воздуха в годы проведения исследований

телем, и с использованием спектральных характеристик тестовых площадок). На каждом из полей в контрольном варианте были заложены тестовые площадки, на которых перед посевом вносились строго определенные дозы азотного удобрения и регулярно в течение вегетационного сезона контактными и дистанционными методами проводился мониторинг состояния растений и определение их спектральных характеристик. Применение данного подхода привело к увеличению урожайности пшеницы в варианте точного земледелия с использованием тестовых площадок на 20...27% по сравнению с другими вариантами опыта и повышению агрофизической и агрохимической эффективности азотных удобрений.

#### ПОТЕНЦИАЛ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРОИЗВОДСТВЕ

Потенциал и перспективы применения прецизионных технологий неразрывно связаны с методологией использования и развитием технических и программно-аппаратных средств, составляющих саму основу системы ТЗ. Так, методология использования глобальной системы позиционирования и новое поколение сельскохозяйственных машин создали условия для перехода от традиционного земледелия к прецизионному, или координатному. Основная задача навигационной системы — это определение координат нахождения сельскохозяйственной техники в поле и фиксирование границ зон внутривольной неоднородности [4]. Совершенствование имеющейся навигационной аппаратуры и повышение точности

определения местоположения обуславливают и перспективы развития систем точного земледелия. В настоящее время, например, достаточно сложно провести дифференцированный учет урожая в селекционных посевах с площадью делянки в несколько кв. метров, поскольку погрешность определения местоположения и применяемая методика учета урожая сводят на нет усилия селекционеров. В данном направлении определенный интерес должна вызвать возможность составления электронных карт распределений элементов питания и создания математического аппарата и соответствующих программ, позволяющих отслеживать изменения, происходящие при скрещивании родительских форм на различных уровнях минерального питания. Применение же сельскохозяйственных машин, с высокой точностью определяющих вес полученного урожая и место его уборки, окажет значительную помощь при первичном семеноводстве и при проведении сортоиспытаний, когда в силу пространственного размещения необходимо оценить роль нескольких сортов. Еще одним аспектом применения систем ТЗ является их использование при планировании и проведении многолетних многовариантных опытов с удобрениями. Наличие карт распределений питательных элементов по полю, карт урожайности основной и побочной продукции, а также карт распределения питательных элементов в продукции позволит более корректно подходить к планированию и проведению новых опытов с учетом последствий удобрений предшествующего опыта и сократит время перехода с одной многолетней схемы опыта к другой.

Таким образом, с развитием информационных технологий точного земледелия и использованием специальных датчиков, установленных на уборочной технике, а также бортовых компьютеров и приемников GPS в процессе уборки можно получать карты пространственно-распределенной урожайности в производственных условиях. Получение подобной информации позволяет характеризовать поле уже не по средней урожайности возделываемой культуры, а большему числовому массиву – урожайности на отдельных участках поля. Наличие такого массива данных позволяет при их анализе использовать методы оценки геостатистически распределенной урожайности на каждом конкретном поле, что было невозможно раньше. Геостатистические методы оценки позволяют использовать большие массивы данных и сравнивать между собой различные по продуктивности участки поля и поля в целом между собой, опираясь на вполне конкретное варьирование величины урожайности. Существенно возрастает при этом возможность детальной оценки характера и степени влияния на урожайность фактических почвенно-климатических, агрометеорологических и других аспектов, включая возможность получения интересующих показателей почвенной неоднородности. Новые информационные технологии и СПО позволяют проводить анализ и выявлять роль того или иного фактора, влияющего на урожайность, уточнить нормативы применения удобрений и мелиорантов, что открывает для производства новые горизонты познания и выявления закономерностей формирования урожая [6].

Проведенные исследования по точному земледелию в полевых условиях показали, что новый подход является надёжной информационно-методической основой для построения электронных тематических карт сельскохозяйственных угодий и последующей оценки влияния пространственной неоднородности структуры почвенного покрова на продуктивность сельскохозяйственных культур. Выявлено, что структура почвенного покрова, глубина залегания подстилающей породы оказывает достоверное влияние на урожайность зерна яровой пшеницы. Во все годы исследований на фоне внутривольной почвенной неоднородности технология «точного земледелия» существенно увеличивала урожайность зерна яровой пшеницы и обеспечивала экономию удобрений по сравнению с остальными вариантами технологий (см. рис. 1). Из этого следует, что совершенствование методов оценки неоднородности почвенного покрова важно не только для повышения эффективности опытного дела, но и для

масштабного применения новейших технологий управления производственным процессом сельскохозяйственных культур, требующих подробной информации о варьировании агрофизических и агрохимических показателей агроземов [7].

Значимость варьирования почвенных свойств определяется его влиянием на получаемую биомассу и химический состав возделываемых сельскохозяйственных культур. Поэтому при оценке неоднородности агрохимических показателей почвы необходимо устанавливать вариационно-статистические показатели параметров урожая для выявления наличия или отсутствия причинно-следственных связей: варьирование урожая – варьирование показателей плодородия. Для проведения подобного анализа авторами разработана методика оценки пространственной изменчивости агрохимических показателей почвы и параметров урожая на заданном поле [7, 8].

Проведенные исследования показали также, что существенный вклад в вариабельность биомассы растений пшеницы в пределах делянок вносит неоднородность посевного материала. При этом применение очень высоких доз азотных удобрений приводит к возрастанию пространственной изменчивости биомассы растений. Следовательно, с использованием современных технических возможностей ТЗ и ГИС-технологий возможна разработка методов управления уровнем продуктивности на производственных полях путем дифференциации нормы высева, снижения вариабельности скорости нарастания биомассы, а также за счет дифференциации посевного материала (например, крупности семян и т.д.).

В настоящее время для выделения вариабельности свойств растительного покрова и почвы на больших территориях используются данные дистанционного зондирования земли (ДДЗ). В основном, это измерение в оптическом, гиперспектральном и радиолокационном диапазонах. [10, 11]. Особенно широко применяются технологии, использующие спектральный анализ и измерение различий в отражении и абсорбции солнечного света растительной массой и почвой.

Рассмотренные выше результаты исследований показывают, что для работы со спектральной информацией целесообразно более широко использовать «индексные» изображения. На основе комбинации значений яркости в определенных каналах, информативных для выделения исследуемого объекта, и расчета по данным значениям «спектрального индекса» объекта строится изображение, соответствующее значению индекса в каждом пикселе, что и позволяет выделить исследуемый объект или оценить его состо-

яние. Многие исследователи указывают, что для физиологической оценки состояния посевов и среды их обитания наиболее эффективна съемка в инфракрасной области спектра. Для решения указанной задачи специалисты АФИ планируют применять метод дистанционного зондирования с использованием соответствующей съёмочной аппаратуры, размещённой на беспилотном летательном аппарате конструкции ЗАО «Институт телекоммуникаций» и космических снимков высокого разрешения, что позволит более оперативно получать информацию, необходимую для принятия решений по управлению производственным процессом. Закладка тестовых площадок и калибровка оптических характеристик растений на них обеспечит более корректную процедуру дешифрирования космических и аэрофотоснимков и их использование непосредственно в управлении производственным процессом посевов [13]. Данное направление работы перспективно при все более возрастающем росте ДДЗ Земли для внедрения новых технологических приемов ведения сельскохозяйственного производства по системе точного земледелия в промышленных масштабах, в первую очередь в южных регионах России на посевных площадях в десятки и сотни тысяч гектаров.

### Литература

1. Якушев, В.В. Информационно-технологические основы прецизионного производства растениеводческой продукции : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук / В.В. Якушев. – СПб., АФИ, 2013. – 50 с.
2. Дифференцированное управление посевами с учетом гетерогенности полей в рамках Precision Agriculture / Д. Шпаар [и др.] // Материалы Международной научно-практической конференции. – М., Издательство РГАУ-МСХА, 2008. – 180 с.
3. Буре В.М. Методология и программно-математический инструментарий информационного обеспечения точного земледелия : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.М. Буре. – СПб., АФИ, 2009. – 49 с.
4. Точное сельское хозяйство (Precision Agriculture) / Д. Шпаар [и др.]; под общ. ред. Д. Шпаара [и др.]. – СПб.; Пушкин, 2009. – 397 с.
5. Воропаев, В.В. Управление продуктивностью и качеством зерна яровой пшеницы на фоне почвенной неоднородности. Методическое и экспериментальное обеспечение адаптивно-ландшафтных систем земледелия. / В.В. Воропаев, П.В. Лекомцев, О.И. Якушева. – СПб., Изд-во ПИЯФ РАН, 2007. – 264 с.
6. Сорокина, Н.П. Структура почвенного покрова пахотных земель: типизация, картографирование, агроэкологическая оценка : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук / Н.П. Сорокина. – М., 2003. – 48 с.
7. Оценка неоднородности агрохимических показателей почвы и параметров урожая в полевом опыте / С.Е. Витковская [и др.] // Материалы координационного совещания Агрофизического института. – Санкт-Петербург, 25–26 марта 2009 г. – С. 89–91.
8. Витковская, С.Е. Оценка пространственной неоднородности агрохимических параметров почвы в пределах делянки полевого опыта / С.Е. Витковская, А.А. Изосимова, П.В. Лекомцев // Агрохимия. – 2010. – № 3. – С. 75–82.
9. Panten K.; Haneklaus S.; Rogasik J.; Schnug E. Predicting sugar beet yield variability using yield maps of combinable crops and the 'monitor pedocell' approach Landbauforschung Volkenrode. – Braunschweig, 2005. S.-H. 286. P. 65–70.
10. Yakushev V.P., Kanash E.V. Evaluation of wheat nitrogen status by colorimetric characteristics of crop canopy from digital images. Precision Agriculture 2011, edited by John V Stafford Ampthill, UK. Papers presented at the 8th European Conference on Precision Agriculture 2011 Prague, Czech Republic 11–14 July 2011, P. 341–351.
11. Оптические критерии при контактной и дистанционной диагностике состояния посевов / В.П. Якушев В.П. [и др.] // Сельскохозяйственная биология. – 2010. – № 3. – С. 94–101.
12. Лекомцев, П.В. Оптимизация внесения азотных подкормок по оптическим характеристикам посевов яровой пшеницы / П.В. Лекомцев, Д.А. Матвеев // Известия СПбГАУ. – 2011. – № 24. – С. 62–67.
13. Теоретические и методические основы выделения однородных технологических зон для дифференцированного применения средств химизации по оптическим характеристикам посева : практическое пособие / В.П. Якушев [и др.]. – СПб., 2010. – 59 с.