

Перспективы выявления идентификационных показателей состояния посевов по аэрокосмическим снимкам и специализированным полевым исследованиям

В. П. Якушев, В. В. Якушев, С. Ю. Блохина, Ю. И. Блохин, Д. А. Матвеев

*Агрофизический научно-исследовательский институт
Санкт-Петербург, 195220, Россия
E-mails: vyakushev@agrophys.ru, sblokhina@agrophys.ru*

Представлена концептуальная схема научно-методической и технологической инфраструктуры проведения комплексных исследований по использованию данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в управлении производственным процессом сельскохозяйственных культур. Эффективность развития методов дистанционной диагностики посевов зависит от выявления идентификационных оптических показателей, характеризующих физиологическое состояние посевов. Разработана методология исследований, включающая проведение специализированных полевых опытов с тестовыми площадками, на которых физически создаются различные условия возделывания сельскохозяйственных культур, и сопряжённый дистанционный мониторинг с использованием мульти- и гиперспектральной аппаратуры, установленной на беспилотных летательных аппаратах. Создан инструментальный интерфейс реализации геопространственной базы данных для систематизации, хранения и обеспечения доступа к разнородной информации. Приведены результаты по выявлению различных корреляционных связей и закономерностей между оптическими показателями и изучаемым интервалом изменений доз удобрений и норм высева семян на тестовых площадках. В работе приведено обоснование возможности размещения на тестовых площадках беспроводных сенсорных сетей для измерения гидротермических характеристик почвы и параметров окружающей среды с целью валидации математических моделей в задачах прогноза и оперативного контроля за ростом и развитием посевов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, прецизионные полевые опыты, тестовые площадки, идентификационные показатели состояния посевов, инфраструктура проведения исследований

Одобрена к печати: 25.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-113-127

Перспективы совершенствования информационного обеспечения современных систем земледелия тесно связаны с развитием методов и средств точного земледелия (ТЗ) (Якушев и др., 2021a; Finger et al., 2019). Для планирования и выполнения прецизионных агроприемов необходима разнородная информация о пространственном распределении показателей плодородия и продуктивности сельскохозяйственных земель и посевов, которая формируется в значительной мере с помощью методологии и инструментария ТЗ (Якушев, Якушев, 2018; Mittermayer et al., 2021). Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в настоящее время практически незаменимы для получения объективной информации о состоянии сельскохозяйственных земель и посевов, выявления различных отклонений в их развитии, а также прогнозирования возможных потерь урожая из-за неблагоприятных (стрессовых) факторов (Lu B. et al., 2020). Это стало возможным благодаря стремительному развитию спутниковых систем ДЗЗ, существенному повышению качества и разнообразия получаемых данных, а также появлению множества новых и более эффективных методов обработки таких данных (Денисов и др., 2021; Лупян и др., 2018; Романов, Романов, 2021).

В силу возрастающей доступности и возможности глобального масштаба наблюдения аэрокосмические данные ДЗЗ — эффективный, безальтернативный и масштабируемый ресурс в информационном обеспечении производства растениеводческой продукции. Интерпретация данных ДЗЗ позволяет проводить сплошную непрерывную оценку состояния посевов и идентифицировать морфофизиологические изменения растений (Данилов и др.,

2020). Радиация, отражённая листьями и другими фитоэлементами, потенциально содержит полные сведения о биохимическом составе, физиологическом состоянии растений и позволяет по оптическим показателям оценить реакцию посева на действия различных стрессоров (Fu et al., 2020; Gitelson et al., 2020; Lu R. et al., 2020) и сделать прогноз динамики продуктивности на конкретном поле (Gasol et al., 2019).

Однако процесс интерпретации данных ДЗЗ сложен и пока малоэффективен в задачах управления непосредственно продукционным процессом (Gitelson et al., 2020). Необходимы новые методы исследования корреляционных связей дистанционно и контактно измеренных оптических характеристик посевов и выявления функциональных закономерностей между ними и динамикой изменяемых неуправляемых (почвенные характеристики, метеорологические данные, характеристики рельефа) и управляемых (дозы удобрений, нормы высева семян, нормы полива и др.) факторов продуктивности.

Для формирования таких проблемно-ориентированных сведений целесообразно разрабатывать научно-методическую и технологическую инфраструктуру планирования и проведения комплексных исследований сопряжённой дистанционной и наземной диагностики, мониторинга и оценки состояния посевов в основные фазы развития, физически моделируя различные условия возделывания растений в полевых условиях (Якушев и др., 2019).

Цель настоящей работы — систематизировать методологические подходы и представить концептуальную схему проведения комплексных исследований, направленных на расширение возможностей по использованию данных ДЗЗ в информационном обеспечении современных систем земледелия с обсуждением некоторых полученных результатов, а также перспективы использования беспроводных сенсорных сетей (БСС) и математических моделей в опытах с тестовыми площадками для оперативного контроля и прогноза за изменениями неуправляемых факторов, влияющих на рост и развитие посевов.

Объекты и методологические основы организации полевых исследований

Объектами исследования служили посевы зерновых культур (озимая и яровая пшеница, ячмень) на опытных полях севооборотов биополигона Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института (АФИ) (Ленинградская обл., 59° 34' с. ш., 30° 08' в. д.). Природно-климатические условия биополигона площадью 538 га хорошо изучены (Шпанев, 2019). Почвенный покров, представленный дерново-подзолистыми почвами, является типичным для пахотных земель Ленинградской обл. и всего Северо-Западного региона. Электронная почвенная карта полигона в масштабе 1:10 000 построена по результатам почвенного обследования 2005 г., заложено и описано 347 разрезов глубиной от 1 до 1,5 м. Агрохимическое обследование опытных полей осуществлено с помощью разработанного в АФИ мобильного комплекса с навигационным и геоинформационным обеспечением. Площадь элементарных участков для отбора средней пробы составляла 1 га. Анализ почвенных проб показал, что содержание общего азота в почве опытных полей полигона варьировалось от 0,15 до 0,41 %, фосфора — от 160 до 720 мг/кг. Содержание калия в почве также было высоким и составляло от 169 до 367 мг/кг, содержание гумуса — 3,6–5,6 %. По величине рН почвы полигона относятся к группе слабокислых или близки к нейтральным. Детальное описание результатов почвенного обследования земель полигона и мониторинг изменений тех или иных показателей поддерживаются с помощью геоинформационного модуля ГИС-АФИ (Якушев и др., 2020а).

Полигон оснащён измерительным оборудованием, средствами аэрозондирования и роботизированной сельскохозяйственной техникой. С 2006 г. на биополигоне проводятся комплексные многолетние полевые исследования по изучению отклика урожайности на вносимые ресурсы (удобрения, средства защиты растений, мелиоранты), включая работы по поиску алгоритмов применения данных ДЗЗ, для улучшения реального управления сельскохозяйственными ресурсами.

На протяжении почти 200 лет учёные-аграрии полагались на рандомизированные агрономические полевые опыты на небольших участках для получения данных, необходимых для оценки реакции урожая на вносимые ресурсы (Bullock, Bullock, 2000; Heady, Pesek, 1954; Spillman, 1923; Stauber et al., 1975; Tumusiime et al., 2011). Проведение мелкоделяночных опытов остаётся основным методом получения таких данных, которые концептуально подразделяются на четыре категории: данные урожайности y ; характеристики поля x (почвенные и топографические параметры), пространственно варьирующие в пределах поля, но не сильно изменяющиеся во времени; метеоданные c , варьирующие во времени и незначительно — в пространстве в пределах поля, и управляемые агрономические ресурсы z (нормы внесения удобрений, нормы высева, сроки полива). Урожайность является результатом естественного процесса, описываемого функцией, которая зависит от управляемых производственных ресурсов, неуправляемых характеристик поля и метеоданных: $y = f(x, c, z)$.

Поскольку характеристики поля изменяются в пространстве, реакция урожайности на управляемые вносимые ресурсы будет варьироваться между участками в пределах поля. Однако большинство рекомендаций по дифференцированному внесению удобрений основано на использовании тех же методов и калибровок, которые разработаны для равномерного внесения, так как основаны на результатах полевых экспериментов, которые обычно планируются на таких участках, которые представляются репрезентативными для конкретного географического региона, и такие модели обычно представляют собой очень упрощённые версии истинной функции отклика урожая. В случае с азотными удобрениями такое упрощение привело к широкому использованию урожайности в качестве косвенного показателя для оценки состояния посева, несмотря на то что многие исследования подтверждают слабую корреляционную зависимость между урожайностью и экономически оптимальными нормами внесения удобрений (Bachmaier, Gandorfer, 2009; Rodriguez et al., 2019; Scharf et al., 2006). Необходимы знания временной стабильности пространственной изменчивости реакции посевов сельскохозяйственных культур на каждое вводимое воздействие, что недостаточно изучено в научной литературе (Trevisan et al., 2021). Большинство исследований сосредоточено только на временной стабильности пространственной изменчивости урожайности, которая хорошо коррелирует с метеоданными каждого вегетационного сезона (Maestrini, Basso, 2018). Без адекватной оценки урожайности и разнообразия данных сложно осуществить оптимальный выбор производственных ресурсов и эффективно управлять производством сельскохозяйственных культур.

Каким бы впечатляющим ни был существующий в настоящее время объём аэрокосмических снимков, различных характеристик посевов и почв, которые являются сельскохозяйственными «большими данными», ценность этих данных может быть значительно увеличена, если понять, как урожайность изменяется при изменении характеристик поля. Такие изменения можно оценить только в том случае, если данные наземных и дистанционных измерений анализируются вместе и являются взаимодополняющими; т.е. увеличение количества одних данных увеличивает ценность других.

На *рисунке* (см. с. 116) представлена концептуальная схема научно-методической инфраструктуры выявления идентификационных показателей для оценки состояния посевов на основе сопряжённых дистанционных и наземных исследований. Для формирования такой информации разработана методология организации и проведения прецизионных экспериментов с использованием тестовых площадок и сопряжённых дистанционных исследований с использованием беспилотных летательных аппаратов (Митрофанова и др., 2016; Якушев и др., 2010а; Якушев и др., 2011). Тестовые площадки — это небольшие участки поля, площадь которых составляет от 10 до 100 м² в зависимости от задачи исследования, используемого инструментария и сельскохозяйственной техники. На тестовых площадках физически создаются различные условия возделывания сельскохозяйственных культур (в случае невозможности или нецелесообразности реализации данных условий на всей площади опытного поля). По этой причине территория для закладки тестовых площадок выбирается на основе сложившегося на опытном поле распределения агрохимических показателей с целью минимизировать влияние любой почвенной неоднородности, кроме моделируемой.



Концептуальная схема выявления идентификационных показателей оценки состояния посевов на основе сопряжённых дистанционных и наземных исследований

Так, например, тестовые площадки для оценки эффективности применения различных агроприемов оперативного прецизионного управления азотным режимом зерновых культур — это участки поля с различными дозами азотных удобрений. Для растений создаются различные, но известные условия азотного питания, охватывающие весь спектр доз от 0 до избыточной нормы внесения. Растения, размещённые на тестовых участках площадью от 10 до 25 м², хорошо различаются на аэрокосмических снимках, что позволяет определить значения оптических показателей по каждой тестовой площадке и построить калибровочную функцию связи показателей с дозами азотных удобрений. На основе полученных данных разработан автоматизированный метод расчёта оптимальной потребности посевов в азоте на каждом участке сельскохозяйственного поля (Митрофанова и др., 2016). Данный подход обеспечивает оперативное решение задачи пространственно-дифференцированного внесения азотных удобрений без использования дополнительного измерительного оборудования, что

существенно снижает стоимость производства и может эффективно применяться в прецизионном возделывании зерновых культур на всей территории России (Матвеевко и др., 2019). Тестовые площадки играют роль источника опорной информации и своеобразных эталонов для выявления различных связей и закономерностей между оптическими показателями и изучаемым интервалом изменений управляемых факторов продуктивности сельскохозяйственных культур. Определение оптических показателей основано на расчёте индексов отражения, представляющих собой те или иные комбинации (формулы) фиксируемых величин отражения радиации от посевов или почвы в различных спектрах электромагнитного излучения.

Полученные в одни и те же сроки и на одних и тех же участках поля данные необходимы для совершенствования методик диагностики и увеличения их точности, сравнительного анализа, выявления критериев и идентификационных показателей, характеризующих состояние посевов. Для систематизации, хранения и обеспечения доступа к разнородной информации разработана структура и создан инструментальный интерфейс реализации геопространственной базы данных (Митрофанов и др., 2021). Важно отметить, что в ходе проведения комплексных полевых исследований по направлению информационного и технологического обеспечения систем земледелия нового поколения предложенная инфраструктура совершенствуется путём разработки уточняющих методик для выявления идентификационных оптических показателей оценки состояния посевов в зависимости от специфики решаемых задач (Захарян, 2018; Конашенков, 2014; Конев, 2014; Лекомцев, 2015; Матвеевко, 2012; Якушев, 2013; Якушева, 2013; Якушев и др., 2017).

Одним из основных критериев оценки состояния посевов служит величина накопленной биомассы, которая может быть определена с помощью дистанционных методов. Наиболее распространённый показатель для оценки состояния посевов, на основании которого проводится косвенная оценка индекса листовой поверхности, поглощения света и потенциальной фотосинтетической активности, — нормализованный разностный вегетационный индекс (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — NDVI), который был предложен Дж. В. Раузом (Rouse et al., 1973). Поскольку NDVI реагирует на изменения растительного покрова в процессе роста и развития сельскохозяйственных культур, он часто используется для прогнозирования урожайности в первой половине вегетации (Bannari et al., 2008; Ji et al., 2021; Oppelt, Mauser, 2004; Pinter et al., 2003). При достижении проективного покрытия почвы 60 % и более невозможно достоверно оценить величину биомассы по NDVI, а также выявить участки посева, требующие внесения дополнительных удобрений. При дефиците азота и высокой норме высева семян интенсивность работы фотосинтетического аппарата растений снижается, а неблагоприятные условия вегетации приводят к уменьшению эффективности использования света в процессах фотосинтеза и угнетению роста растений. Индексы отражения, характеризующие активность фотосинтетического аппарата: содержание хлорофилла (ChlRI, *англ.* Chlorophyll Reflection Index), фотохимическую активность фотосинтетического аппарата (PRI, *англ.* Photochemical Activity Index), содержание воды (WRI, *англ.* Water Ratio Index), антоцианов (ARI, *англ.* Anthocyanins Reflection Index) и флавоноидов (FRI, *англ.* Flavonoids Content Index), — перспективны для диагностики физиологического состояния посевов зерновых культур для случаев, когда видимые симптомы торможения роста и развития отсутствуют (Якушев и др., 2010б; Kanash, Osipov, 2009; Yakushev, Kanash, 2011). Зависимость некоторых из этих индексов от густоты посева и доз азотных удобрений изучалась в условиях полевого опыта с яровой пшеницей в сравнении с индексом NDVI (Якушев и др., 2022). На шести тестовых площадках площадью по 100 м² доза азотных удобрений варьировала от 0 до 200 кг/га с шагом 40 кг/га. Для создания посева разной густоты каждую тестовую площадку делили на два участка площадью по 50 м², на одном из которых высевали по 500, а на другом — по 600 штук семян на квадратный метр. Вегетационные индексы рассчитывали с помощью спектральных характеристик диффузного отражения листьев, которое определялось с помощью контактного оптоволоконного спектрометра HR 2000 фирмы Ocean Insight (США). Данный прибор успешно использовался ранее в опытах по изучению изменений оптических характеристик сельскохозяйственных растений при дефиците азота и воды в контролируемых условиях (Якушев и др., 2020б).

Полученные результаты свидетельствуют, что существует зависимость оптических характеристик растительного покрова, сформированного яровой пшеницей, от густоты стояния растений и в наибольшей степени — от дозы внесённых удобрений. Установлено, что на ранних этапах развития растений, пока сформированный ими растительный покров остаётся разомкнутым, NDVI позволяет достаточно точно диагностировать степень обеспеченности растений азотом и выявить участки поля, на которых растения хуже развиты. Однако по мере развития растений и формирования сомкнутого растительного покрова (фаза развития посева — «выход в трубку») данный индекс не даёт надёжных результатов. В то же время тесная линейная корреляционная связь между дозой внесённых азотных удобрений, нетто-продуктивностью и значениями индексов ChlRI, PRI, ARI, FRI, WRI сохраняется до поздних стадий развития посева (фазы развития — «колошение» и «цветение»). Важно отметить, что именно в эти фазы развития посева («колошение» и «цветение») наиболее эффективны азотные подкормки. Сравнение результатов, полученных дистанционно и с помощью контактного сенсора, позволяет сделать вывод, что индексы ChlRI, PRI, ARI, FRI, WRI могут быть успешно применены для выявления участков посева, в которых сложился дефицит азотного питания при формировании сомкнутого растительного покрова.

Беспроводные сенсорные системы и математические модели в опытах с тестовыми площадками

Агроэкосистема является сложнейшим объектом изучения с многочисленными функциональными связями. Методология и техника опытного дела в агрономии связана с уникальным природным явлением — продукционным процессом культурных растений. Повышение эффективности управления производством растениеводческой продукции требует понимания и прогнозирования характеристик сельскохозяйственных культур при самых разных условиях окружающей среды. Объекты исследования являются настолько сложными, что переносить методы, разработанные применительно к другим научным приложениям, невозможно. Агрономический опыт не только не воспроизводится в другой почвенно-климатической зоне, но и результаты меняются год от года. Можно утверждать, что агрономический полевой опыт не является экспериментом в том смысле, который вкладывается в это понятие в других отраслях науки, и при проведении необходимо учитывать как сложность самого объекта, так и условия реализации опыта (Полуэктов и др., 1999; Якушев, 2016).

В этой связи для решения основной задачи экспериментальной агрономии — выявления природно-антропогенных закономерностей функционирования агроэкосистем — необходим мониторинг текущего состояния всех её компонентов: почвы, растений, метеоусловий, а также прогноз изменения неуправляемых факторов продуктивности. Информационно-измерительные системы (ИИС) на основе беспроводных датчиков для оперативного сбора данных играют ключевую роль как в качестве дополнения к дистанционному зондированию, так и в качестве основного источника данных, характеризующих метеорологические и почвенные условия, в которых развиваются посевы, а также для оценки потенциальных рисков поражения посевов (Блохин и др., 2019). Учитывая, что основной целью ТЗ представляется понимание пространственной и временной изменчивости сельскохозяйственных культур, распространение беспроводных сенсорных сетей (БСС), произошедшее в последние годы, можно рассматривать как возможность увеличить детализацию и количество полученных данных (Блохин и др., 2020). БСС, встроенные в мониторинговые системы измерения основных параметров почвы и окружающей среды, также являются перспективным направлением применения технологий интернета вещей в интеллектуальной земледелии (Блохина, Блохин, 2020; Placidi et al., 2021).

Сбор данных зависит от аппаратных и программных решений, определяющих выбор датчиков, а также возможностей обработки и передачи данных с помощью определённого протокола связи. Сельскохозяйственные поля, как правило, расположены на обширных территориях, и необходимо обеспечить передачу данных на большие расстояния, часто при отсут-

ствии покрытия сетей 2G/3G/4G и доступного электроснабжения. Благодаря достижениям в области коммуникационных технологий различные типы беспроводных сетей (например, 5G, LoRa, NB-IoT, Sigfox, ZigBee и WiFi) используют для передачи данных в режиме реального времени, обеспечивая лучшее покрытие, плотность соединения и пропускную способность.

Разработка ИИС для мониторинга — сложная комплексная задача. Учитывая суровые условия эксплуатации, многочисленные решения «сделай сам», представленные активным онлайн-сообществом, доступные способы питания в полевых условиях и различные протоколы связи, каждое решение для бесконтактного мониторинга можно считать уникальным. Огромное количество как коммерческих, так и открытых аппаратных решений, а также разнообразие доступных датчиков позволяют создавать адаптированную под конкретные задачи модульную структуру сенсорных узлов БСС (Савин, Блохин, 2022). Многие из разработанных ИИС протестированы только в лабораторных условиях, и их ещё предстоит доработать и испытать в полевых условиях (Voggero, Zabalo, 2020; Morais et al., 2021; Rodríguez-Robles et al., 2020).

По результатам оценки технических возможностей современных БСС в сельском хозяйстве, преимуществ и недостатков использования различных датчиков температурно-влажностного режима в полевых условиях с учётом влияния растительного покрова, различных климатических условий, применения сельскохозяйственной техники и прочих факторов, влияющих на размещение и функционирование устройств в полевых условиях, была разработана ИИС, включающая сеть сенсорных узлов и базовую станцию, оснащённую метеодатчиками (Якушев и др., 2021а, б).

Информационно-измерительная система на основе БСС с помощью специального аппаратного и программного обеспечения, разработанного для каждого типа сенсорного узла, адаптирует процесс сбора разнородных данных с возможностью использования различных протоколов связи и обеспечивает высокую степень детализации по времени и, таким образом, лучше описывает пространственную изменчивость, на которую обычно направлена практика точного земледелия.

Главным инструментом прогностической составляющей мониторинга являются динамические модели роста и развития растений, в которых на количественной и балансовой основе описываются все основные изменения, происходящие на сельскохозяйственном поле (Медведев, Черяев, 2020; Полуэктов и др., 2011; Якушев и др., 2020в). В каждую модель включён программный модуль расчёта динамики почвенной влаги и температуры. При наличии достоверной агрометеорологической информации за определённый период можно составить достаточно точный краткосрочный прогноз запасов влаги в почвенном профиле и получить вероятностные характеристики распределения ожидаемого урожая на тестовых площадках.

Размещение автономных информационно-измерительных систем в составе БСС на тестовых площадках (и опытных полях в целом) для определения пространственно-временной динамики гидротермических свойств почвы и параметров окружающей среды с передачей измеряемой информации в центр обработки данных существенно повысит уровень достоверности такого прогноза. Данное утверждение базируется на возможности сравнивать расчётные характеристики динамики почвенной влаги и температуры, полученные с помощью математической модели, и измеренные параметры. В случае несовпадения результатов сравнения можно осуществить анализ и обнаружить ошибку в алгоритме или (и) корректности входных данных. Учитывая, что сенсорные узлы БСС с определённым пользователем дискретным шагом, но непрерывно, передают в центр обработки данных фактическую картину гидротермического состояния почвы на тестовых участках, вероятность разобраться с причиной различия измеренных и вычисленных характеристик существенно возрастает.

Заключение

Из приведённых выше примеров следует, что в специализированных опытах на тестовых площадках моделируются лишь некоторые управляемые факторы продуктивности (дозы удобрений и нормы высева семян). С помощью сенсорных сетей открывается возможность

инструментального контроля в режиме реального времени за динамикой гидротермического состояния почвы и параметрами окружающей среды на тестовых площадках. Получаемая с помощью БСС информация необходима для увеличения точности диагностики, выявления критериев и идентификационных показателей состояния посевов по данным ДЗЗ, что существенно повышает возможности рассмотренной инфраструктуры обеспечения исследований. При этом возрастает актуальность использования динамических математических моделей прогноза ожидаемого пространственного распределения влажности почвы и урожайности на сельскохозяйственном поле. Данная прогностическая информация полезна для оптимального управления поливами на орошаемых землях, а также для определения сроков и доз внесения удобрений, мелиорантов и средств защиты растений.

Представленная в работе инфраструктура призвана показать, как можно проводить рандомизированные полевые агрономические исследования для получения разнообразных данных, чтобы в полной мере использовать преимущества важной экономической взаимодополняемости между всеми категориями данных. Объединение такой методологии с машинным обучением и другими передовыми аналитическими методами открывает новые возможности проведения исследований на тестовых участках и внедрения полученных результатов.

Литература

1. Блохин Ю. И., Белов А. В., Блохина С. Ю. Комплексная система контроля влажности почвы и локальных метеоусловий для интерпретации данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 87–95. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-87-95.
2. Блохин Ю. И., Якушев В. В., Блохина С. Ю., Петрушин А. Ф., Митрофанова О. А., Митрофанов Е. П., Двирник А. В. Современные решения для формирования опорной информации с целью повышения точности определения агрофизических свойств почвы по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 164–178. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-164-178.
3. Блохина С. Ю., Блохин И. Ю. Интеллектуальное земледелие на основе интернета вещей // Земледелие. 2020. № 7. С. 7–15. DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10702.
4. Данилов Р. Ю., Кремнева О. Ю., Исмаилов В. Я., Третьяков В. А., Ризванов А. А., Кривошеин В. В., Пачкин А. А. Общая методика и результаты наземных гиперспектральных исследований сезонного изменения отражательных свойств посевов сельскохозяйственных культур и отдельных видов сорных растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 113–127.
5. Денисов П. В., Середа И. И., Трошко К. А., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Толпин В. А. Возможности и опыт оперативного дистанционного мониторинга состояния озимых культур на территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 171–185. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185.
6. Захарян Ю. Г. Оценка эффективности адаптации агротехнологических решений к пространственно-временной неоднородности сельскохозяйственных земель: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб.: АФИ, 2018. 50 с.
7. Конашенков А. А. Научное обоснование систем удобрения для прецизионного применения в условиях Северо-Запада России: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб.: АФИ, 2014. 41 с.
8. Конев А. В. Автоматизация применения и методика совершенствования способов определения доз удобрений в системе точного земледелия: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб.: АФИ, 2014. 23 с.
9. Лекомцев П. В. Научно-методическое обеспечение управления продукционным процессом яровой пшеницы в системе точного земледелия: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб.: АФИ, 2015. 48 с.
10. Лупян Е. А., Бурцев М. А., Прошин А. А., Кобец Д. А. Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 53–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
11. Матвеев 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.
12. Матвеев Д. А., Якушев В. В., Якушев В. П. Прецизионное управление азотным режимом яровой пшеницы на основе дистанционного зондирования посевов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 79–86. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-79-86.

13. *Медведев С. А., Черяев А. С.* Перспективы создания универсального сервиса удаленных ансамблевых расчетов динамических моделей производственного процесса культурных растений // *Агрофизика*. 2020. № 3. С. 45–52. DOI: 10.25695/AGRPH.2020.03.07.
14. *Митрофанов Е. П., Митрофанова О. А., Петрушин А. Ф.* Экспериментальные данные для решения задач точного земледелия. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2021620305. Рег. 19.02.2021.
15. *Митрофанова О. А., Буре В. М., Канаиш Е. В.* Математический модуль для автоматизации колориметрического метода оценки обеспеченности растений азотом // *Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2016. № 1. С. 85–91.
16. *Полужтов Р. А., Смоляр Э. И., Якушев В. П.* Концепция опытного дела и развитие современных методов исследований в агрономии и агрофизике // *Вестн. Российской акад. с.-х. наук*. 1999. № 2. С. 15–17.
17. *Полужтов Р. А., Топаж А. Г., Терлеев В. В., Бакаленко Б. И., Полужтов М. А., Кобылянский С. Г.* AGROTOOL, V.4 — программа для поливариантного расчета динамики производственного процесса сельскохозяйственных растений. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011611819. Рег. 13.01.2011.
18. *Романов А. А., Романов А. А.* Системный анализ подходов к созданию бизнес-услуг на основе космической информации // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 4. С. 9–24. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-9-24.
19. *Савин И. Ю., Блохин Ю. И.* Об оптимизации размещения сети датчиков интернета вещей на пахотных угодьях // *Бюл. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева*. 2022. Вып. 110. С. 22–50. DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-22-50.
20. *Шпанев А. М.* Экспериментальная база для дистанционного зондирования фитосанитарного состояния агроэкосистем на Северо-Западе РФ // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 3. С. 61–68. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-61-68.
21. *Якушев В. В.* Информационно-технологические основы прецизионного производства растениеводческой продукции: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб.: АФИ, 2013. 367 с.
22. *Якушев В. В.* Точное земледелие: теория и практика. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2016. 364 с.
23. *Якушев В. В., Конев А. В., Матвеев Д. А., Якушева О. И.* Прецизионные эксперименты в информационном обеспечении систем земледелия // *Вестн. российской с.-х. науки*. 2011. № 3. С. 11–13.
24. *Якушев В. П., Якушев В. В.* Перспективы «умного сельского хозяйства» в России // *Вестн. Российской акад. наук*. 2018. № 9. Т. 88. С. 773–784. DOI: 10.31857/S086958730001690-7.
25. *Якушев В. П., Канаиш Е. В., Буре В. М.* (2010а) Теоретические и методические основы выделения однородных технологических зон для дифференцированного применения средств химизации по оптическим характеристикам посева. СПб.: АФИ, 2010. 60 с.
26. *Якушев В. П., Канаиш Е. В., Осипов Ю. А., Якушев В. В., Лекомцев П. В., Воронаев В. В.* (2010б) Оптические критерии при контактной и дистанционной диагностике состояния посевов // *Сельскохозяйственная биология*. 2010. № 3. С. 94–101.
27. *Якушев В. П., Лекомцев П. В., Воронаев В. В., Конев А. В., Первак Т. С.* Дифференцированное применение средств химизации при выращивании яровой пшеницы // *Вестн. российской с.-х. науки*. 2017. № 4. С. 13–17.
28. *Якушев В. П., Дубенок Н. Н., Лупян Е. А.* Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 3. С. 11–23. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23.
29. *Якушев В. П., Якушев В. В., Матвеев Д. А.* (2020а) Интеллектуальные системы поддержки технологических решений в точном земледелии // *Земледелие*. 2020. № 1. С. 33–37. DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10109.
30. *Якушев В. П., Петрушин А. Ф., Матвеев Д. А., Блохина С. Ю., Канаиш Е. В., Якушев В. В.* (2020б) Новый метод количественной оценки внутриполевой изменчивости по оптическим характеристикам посевов для точного земледелия // *Вестн. российской с.-х. науки*. 2020. № 2. С. 4–10. DOI: 10.30850/vrsn/2020/2/4-10.
31. *Якушев В. П., Якушев В. В., Баденко В. Л., Матвеев Д. А., Чесноков Ю. В.* (2020в) Оперативное и долгосрочное прогнозирование продуктивности посевов на основе массовых расчетов имитационной модели агроэкосистемы в геоинформационной среде (обзор) // *Сельскохозяйственная биология*. 2020. Т. 55. № 3. С. 451–467. DOI: 10.15389/agrobiology.2020.3.451rus.
32. *Якушев В. П., Якушев В. В., Блохина С. Ю., Блохин Ю. И., Матвеев Д. А.* (2021а) Информационное обеспечение современных систем земледелия в России // *Вестн. Российской акад. наук*. 2021. Т. 91. № 8. С. 755–768. DOI: 10.31857/S0869587321080090.
33. *Якушев В. П., Якушев В. В., Блохина С. Ю., Блохин Ю. И., Матвеев Д. А.* (2021б) Перспективы оперативной пространственной оценки водообеспеченности сельскохозяйственных территорий на

- основе сопряженного использования математических моделей, дистанционных и наземных измерений // Плодородие. 2021. № 3. С. 108–116. DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.21.
34. Якушев В. П., Канаеш Е. В., Русаков Д. В., Якушев В. В., Блохина С. Ю., Петрушин А. Ф., Блохин Ю. И., Митрофанова О. А., Митрофанов Е. П. Корреляционные зависимости между вегетационными индексами, урожаем зерна и оптическими характеристиками листьев пшеницы при разном содержании в почве азота и густоте посева // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57. № 1. С. 98–112. DOI: 10.15389/agrobiology.2022.1.98rus.
 35. Якушева О. И. Влияние внутрипольной почвенной неоднородности и уровня интенсификации агротехнологий на урожайность яровой пшеницы: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб.: АФИ, 2013. 24 с.
 36. Bachmaier M., Gandorfer M. A conceptual framework for judging the precision agriculture hypothesis with regard to site-specific nitrogen application // Precision Agriculture. 2009. V. 10. No. 2. P. 95–110. DOI: 10.1007/s11119-008-9069-x.
 37. Bannari A., Khurshid S. K., Staenz K., Schwatz J. Potential of Hyperion EO-1 hyperspectral data for wheat crop chlorophyll content extraction in precision agriculture // Canadian J. Remote Sensing. Special Issue on Hyperspectral Remote Sensing. 2008. V. 34. No. 1. P. 139–157. DOI: 10.5589/m08-001.
 38. Borrero J. D., Zabalo A. An autonomous wireless device for real-time monitoring of water needs // Sensors. 2020. V. 20. Art. No. 2078. 16 p. DOI: 10.3390/s20072078.
 39. Bullock D. S., Bullock D. G. From agronomic research to farm management guidelines: a primer on the economics of information and precision technology // Precision Agriculture. 2000. V. 2. No. 1. P. 71–101. DOI: 10.1023/A:1009988617622.
 40. Finger R., Swinton S., El Bennid N., Walter A. Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment // Annual Review of Resource Economics. 2019. V. 11. P. 313–335. DOI: 10.1146/annurev-resource-100518-093929.
 41. Fu P., Meacham-Hensold K., Guan K., Wu J., Bernacchi C. Estimating photosynthetic traits from reflectance spectra: a synthesis of spectral indices, numerical inversion, and partial least square regression // Plant, Cell and Environment. 2020. V. 43. No. 5. P. 1241–1258. DOI: 10.1111/pce.13718.
 42. Gaso D. V., Berger A. G., Ciganda V. S. Predicting wheat grain yield and spatial variability at field scale using a simple regression or a crop model in conjunction with Landsat images // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. V. 159. P. 75–83. DOI: 10.1016/j.compag.2019.02.026.
 43. Gitelson A., Solovchenko A., Viña A. Foliar absorption coefficient derived from reflectance spectra: a gauge of the efficiency of in situ light-capture by different pigment groups // J. Plant Physiology. 2020. V. 254. P. 153277. DOI: 10.1016/j.jplph.2020.153277.
 44. Heady E. O., Pesek J. A fertilizer production surface with specification of economic optima for corn grown on calcareous Ida silt loam // American J. Agricultural Economics. 1954. V. 36. No. 3. P. 466–482. DOI: 10.2307/1233014.
 45. Ji Z., Pan Y., Zhu X., Wang J., Li Q. Prediction of crop yield using phenological information extracted from remote sensing vegetation index // Sensors. 2021. V. 21. No. 4. Art. No. 1406. 16 p. DOI: 10.3390/s21041406.
 46. Kanash E. V., Osipov J. A. Optical signals of oxidative stress in crops physiological state diagnostics // Proc. 7th European Conf. Precision Agriculture (ECPA 2009) / eds. E. J. van Henten, D. Goense, C. Lokhorst. Wageningen, 2009. P. 81–88.
 47. Lu B., Dao P. D., Liu J., He Y., Shang J. Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 16. Art. No. 2659. 44 p. DOI: 10.3390/rs12162659.
 48. Lu R., Van Beers R., Saeyns W., Li C., Cen H. Measurement of optical properties of fruits and vegetables: a review // Postharvest Biology and Technology. 2020. V. 159. P. 111003. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2019.111003.
 49. Maestrini B., Basso B. Drivers of within-field spatial and temporal variability of crop yield across the US Midwest // Scientific Reports. 2018. V. 8. No. 1. P. 1–9. DOI: 10.1038/s41598-018-32779-3.
 50. Mittermayer M., Gilg A., Mairl F. X., Nätischer L., Hülsbergen K. J. Site-specific nitrogen balances based on spatially variable soil and plant properties // Precision Agriculture. 2021. V. 22. No. 5. P. 1416–1436. DOI: 10.1007/s11119-021-09789-9.
 51. Morais R., Mendes J., Silva R., Silva N., Sousa J., Peres E. A versatile, low-power and low-cost IoT device for field data gathering in precision agriculture practices // Agriculture. 2021. V. 11. Art. No. 619. 16 p. DOI: 10.3390/agriculture11070619.
 52. Oppelt N., Mauser W. Hyperspectral monitoring of physiological parameters of wheat during a vegetation period using AVIS data // Intern. J. Remote Sensing. 2004. V. 25. No. 1. P. 145–159. DOI: 10.1080/0143116031000115300.
 53. Pinter P. J. Jr., Hatfield J. L., Schepers J. S., Barnes E. M., Moran M. S., Daughtry C. S. T., Upchurch Dan R. Remote Sensing for crop management // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2003. V. 69. No. 6. P. 647–664. DOI: 0099-1112/03/6906-647\$3.00/0.

54. *Placidi P., Morbidelli R., Fortunati D., Papini N., Gobbi F., Scorzoni A.* Monitoring soil and ambient parameters in the IoT precision agriculture scenario: an original modeling approach dedicated to low-cost soil water content sensors // *Sensors*. 2021. V. 21. No. 15. Art. No. 5110. DOI: 10.3390/s21155110.
55. *Rodriguez D. G. P., Bullock D. S., Boerngen M. A.* The origins, implications, and consequences of yield-based nitrogen fertilizer management // *Agronomy J.* 2019. V. 111. No. 2. P. 725–735. DOI: 10.2134/ agronj2018.07.0479.
56. *Rodríguez-Robles J., Martin A., Martin S., Ruipérez-Valiente J. A., Castro M.* Autonomous sensor network for rural agriculture environments, low cost, and energy self-charge // *Sustainability*. 2020. V. 12. Art. No. 5913. 17 p. DOI: 10.3390/su12155913.
57. *Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symp. V. 1. Washington, DC: NASA, 1973. P. 309–317.
58. *Scharf P. C., Kitchen N. R., Sudduth K. A., Davis J. G.* Spatially variable corn yield is a weak predictor of optimal nitrogen rate // *Soil Science Society of America J.* 2006. V. 70. No. 6. P. 2154–2160. DOI: 10.2136/ sssaj2005.0244.
59. *Spillman W. J.* Application of the law of diminishing returns to some fertilizer and feed data // *American J. Agricultural Economics*. 1923. V. 5. No. 1. P. 36–52. DOI: 10.2307/1230266.
60. *Stauber M. S., Burt O. R., Linse F.* An economic evaluation of nitrogen fertilization of grasses when carry-over is significant // *American J. Agricultural Economics*. 1975. V. 57. No. 3. P. 463–471. DOI: 10.2307/1238409.
61. *Trevisan R. G., Bullock D. S., Martin N. F.* Spatial variability of crop responses to agronomic inputs in on-farm precision experimentation // *Precision Agriculture*. 2021. V. 22. No. 2. P. 342–363. DOI: 10.1007/ s11119-020-09720-8.
62. *Tumusiime E., Brorsen B. W., Mosali J., Johnson J., Locke J., Biermacher J.* Determining optimal levels of nitrogen fertilizer using random parameter models // *J. Agricultural and Applied Economics*. 2011. V. 43. No. 4. P. 541–552. DOI: 10.1017/S1074070800000067.
63. *Yakushev V. P., Kanash E. V.* Evaluation of plants nitrogen status by colorimetric characteristics of crop canopy presented in digital images // *Proc. 8th European Conf. Precision Agriculture / ed. J. V. Stafford*. Prague, 2011. P. 341–345.

Prospects for revealing identification indicators of crop canopy based on aerospace imagery and field precision experimentation

V. P. Yakushev, V. V. Yakushev, S. Yu. Blokhina, Yu. I. Blokhin, D. A. Matveenko

Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia
E-mails: vyakushev@agrophys.ru, sblokhina@agrophys.ru

This paper lays out a conceptual framework for the methodological and technological infrastructure for conducting experimental studies based on remote sensing data in the crop production management. The effectiveness of the development of methods for remote diagnostics of crops depends on revealing the identifying optical indicators characterizing the physiological state of crops. A research methodology has been developed to conduct specialized field experiments with test plots where various conditions for growing crops are physically created, along with conjugated remote monitoring using multispectral and hyperspectral instruments installed on unmanned aerial vehicles. To systematize, store and provide access to heterogeneous information, the instrumental interface for the implementation of a geospatial database was developed. The results of revealing correlations between optical indices and the rate of applied nitrogen fertilizer and seeding rates are presented. The paper provides a rationale for placing wireless sensor networks on test plots for measuring soil hydrothermal characteristics and ambient environment parameters for the validation of mathematical models in the tasks of operational control and forecasting of crop growth and development.

Keywords: remote sensing, field precision experimentation, test plots, identifying optical indicators of crops, infrastructure of experimental studies

Accepted: 25.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-113-127

References

1. Blokhin Yu. I., Belov A. V., Blokhina S. Yu., Integrated system for control of soil moisture and local weather conditions for remote sensing data interpretation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 87–95 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-87-95.
2. Blokhin Yu. I., Yakushev V. V., Blokhina S. Yu., Petrushin A. F., Mitrofanova O. A., Mitrofanov E. P., Dvirnik A. V., New solutions for the reference data formation to improve the accuracy of the agrophysical soil properties determination from satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 164–178 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-164-178.
3. Blokhina S. Yu., Blokhin Yu. I., A smart farming concept based on the internet of things, *Zemledelie*, 2020, No. 7, pp. 7–15 (in Russian), DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10702.
4. Danilov R. Yu., Kremneva O. Yu., Ismailov V. Ya., Tretyakov V. A., Rizvanov A. A., Krivoshein V. V., Pachkin A. A., General methods and results of ground hyperspectral studies of seasonal changes in the reflective properties of crops and certain types of weeds, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 113–127 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-113-127.
5. Denisov P. V., Sereda I. I., Troshko K. A., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Opportunities and experience of operational remote monitoring of winter crops condition in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 171–185 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185.
6. Zakharyan Yu. G., *Otsenka effektivnosti adaptatsii agrotekhnologicheskikh reshenii k prostranstvenno-vremennoi neodnorodnosti sel'skokhozyaistvennykh zemel': Avtoref. diss. dokt. s.-kh. nauk* (Evaluation of the effectiveness of adaptation of agrotechnological solutions to the spatial and temporal heterogeneity of agricultural lands, Ext. abstract Doct. agricult. sci. thesis), Saint Petersburg: AFI, 2018, 50 p. (in Russian).
7. Konashenkov A. A., *Nauchnoe obosnovanie sistem udobreniya dlya pretsizionnogo primeneniya v usloviyakh Severo-Zapada Rossii: Avtoref. diss. dokt. s.-kh. nauk* (Scientific substantiation of fertilizer systems for precision application in the conditions of the North-West of Russia, Ext. abstract Doct. agricult. sci. thesis), Saint Petersburg: AFI, 2014, 41 p. (in Russian).
8. Konev A. V., *Avtomatizatsiya primeneniya i metodika sovershenstvovaniya sposobov opredeleniya doz udobrenii v sisteme tochnogo zemledeliya: Avtoref. diss. kand. s.-kh. nauk* (Automation of application and methods for improving methods for determining fertilizer doses in the precision farming system, Ext. abstract Cand. agricult. sci. thesis), Saint Petersburg: AFI, 2014, 23 p. (in Russian).
9. Lekomtsev P. V., *Nauchno-metodicheskoe obespechenie upravleniya produktsionnym protsessom yarovoi pshe-nitsy v sisteme tochnogo zemledeliya: Avtoref. diss. dokt. biol. nauk* (Scientific and methodological support for the control of the production process of spring wheat in the system of precision farming, Ext. abstract Doct. biol. sci. thesis), Saint Petersburg: AFI, 2015, 48 p. (in Russian).
10. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kobets D. A., Evolution of remote monitoring information systems development concepts, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 53–66 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
11. Matveenko D. A., *Differentsirovannoe vnesenie azotnykh udobrenii na osnove otsenki opticheskikh kharakteristik posevov yarovoi pshe-nitsy: Avtoref. diss. kand. s.-kh. nauk* (Differentiated application of nitrogen fertilizers based on the assessment of the optical characteristics of spring wheat crops, Ext. abstract Cand. agricult. sci. thesis), Saint Petersburg: AFI, 2012, 21 p. (in Russian).
12. Matveenko D. A., Yakushev V. V., Yakushev V. P., Precision management of the nitrogen status of spring wheat crops based on remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 79–86 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-79-86.
13. Medvedev S. A., Cheryaev A. S., Prospects for creating universal service for remote ensemble calculations of dynamic models of cultivated plant production process, *Agrofizika*, 2020, No. 3, pp. 45–52 (in Russian), DOI: 10.25695/AGRPH.2020.03.07.
14. Mitrofanov E. P., Mitrofanova O. A., Petrushin A. F., *Eksperimental'nye dannye dlya resheniya zadach tochnogo zemledeliya* (Experimental data for solving problems of precision farming), Certificate of state registration of database No. 2021620305 (RU), Reg. 19.02.2021 (in Russian).

15. Mitrofanova O. A., Bure V. M., Kanash E. V., Math module to automate the colorimetric method for estimating nitrogen status of plants, *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya*, 2016, No. 1, pp. 85–91 (in Russian).
16. Poluektov R. A., Smolyar E. I., Yakushev V. P., The concept of experimental work and the development of modern research methods in agronomy and agrophysics, *Vestnik Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*, 1999, No. 2, pp. 15–17 (in Russian).
17. Poluektov R. A., Topazh A. G., Terleev V. V., Bakalenko B. I., Poluektov M. A., Kobylanskii S. G., *AGROTOOL, V.4 — programma dlya polivariantnogo rascheta dinamiki produktsionnogo protsessa sel'skokhozyaistvennykh rastenii* (AGROTOOL, V.4 — program for polyvariant calculation of the dynamics of the production process of agricultural plants), Certificate of state registration of software No. 2011611819 (RU), Reg. 13.01.2011 (in Russian).
18. Romanov A. A., Romanov A. A., System analysis of approaches to creating business services based on space information, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 9–24 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-9-24.
19. Savin I. Yu., Blokhin Yu. I., On optimizing the deployment of an internet of things sensor network for soil and crop monitoring on arable plots, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, Vol. 110, pp. 22–50 (in Russian), DOI: 10.19047/0136-1694-2022-110-22-50.
20. Shpanev A. M., Experimental basis for remote sensing of phytosanitary condition of agroecosystems in the North-West of the Russian Federation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 61–68 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-61-68.
21. Yakushev V. V., *Informatsionno-tehnologicheskie osnovy pretsizionnogo proizvodstva rasteniyevodcheskoi produktsii: Avtoref. diss. dokt. s.-kh. nauk* (Information and technological foundations of precision production of crop products, Ext. abstract Cand. agricult. sci. thesis), Saint Petersburg: AFI, 2013, 367 p. (in Russian).
22. Yakushev V. V., *Tochnoe zemledelie: teoriya i praktika* (Precision farming: theory and practice), Saint Petersburg: FGBNU AFI, 2016, 364 p. (in Russian).
23. Yakushev V. V., Konev A. B., Matveenko D. A., Yakusheva O. I., Precision experiments in information support of farming systems, *Vestnik rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 2011, No. 3, pp. 11–13 (in Russian).
24. Yakushev V. P., Yakushev V. V., Prospects for “smart agriculture” in Russia, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2018, Vol. 88, No. 5, pp. 330–340, DOI: 10.1134/S1019331618040135.
25. Yakushev V. P., Kanash E. V., Bure V. M. (2010a), *Teoreticheskie i metodicheskie osnovy vydeleniya odnorodnykh tekhnologicheskikh zon dlya differentsirovannogo primeneniya sredstv khimizatsii po opticheskim kharakteristikam poseva* (Theoretical and methodological foundations for the allocation of homogeneous technological zones for the differentiated use of chemicals according to the optical characteristics of sowing), Saint Petersburg: AFI, 2010, 60 p. (in Russian).
26. Yakushev V. P., Kanash E. V., Osipov Yu. A., Yakushev V. V., Lekomtsev P. V., Voropaev V. V. (2010b), Optical criteria during contact and distant measurements sowing state of wheat and photosynthesis effectiveness on the background of deficit of mineral nutrition, *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 2010, No. 3, pp. 94–101 (in Russian).
27. Yakushev V. P., Lekomtsev P. V., Voropaev V. V., Konev A. V., Pervak T. S., Discriminatory application of the chemicals under the spring wheat cultivation, *Vestnik rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 2017, No. 4, pp. 13–17 (in Russian).
28. Yakushev V. P., Dubenok N. N., Loupian E. A., Earth remote sensing technologies for agriculture: application experience and development prospects, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 11–23 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23.
29. Yakushev V. P., Yakushev V. V., Matveenko D. A. (2020a), Intelligent systems for technology decision support in precision agriculture, *Zemledelie*, 2020, No. 1, pp. 33–37 (in Russian), DOI: 10.24411/0044-3913-2020-10109.
30. Yakushev V. P., Petrushin A. F., Matveenko D. A., Blokhina S. Yu., Kanash E. V., Yakushev V. V. (2020b), New method of quantity estimation of intra field variability by optical characteristics of sowings for precision farming, *Vestnik rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 2020, No. 2, pp. 4–10 (in Russian), DOI: 10.30850/vrsn/2020/2/4-10.
31. Yakushev V. P., Yakushev V. V., Badenko V. L., Matveenko D. A., Chesnokov Yu. V. (2020c), Operative and long-term forecasting of crop productivity based on mass calculations of the agroecosystem simulation model in geoinformation environment, *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 2020, Vol. 55, No. 3, pp. 451–467 (in Russian), DOI: 10.15389/agrobiology.2020.3.451rus.
32. Yakushev V. P., Yakushev V. V., Blokhina S. Yu., Blokhin Yu. I., Matveenko D. A. (2021a), Information support for modern agricultural systems in Russia, *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2021, Vol. 91, No. 8, pp. 755–768 (in Russian), DOI: 10.31857/S0869587321080090.
33. Yakushev V. P., Yakushev V. V., Blokhina S. Yu., Blokhin Yu. I., Matveenko D. A. (2021b), Prospects for the operational spatial assessment of the water availability of agricultural areas based on integrated appli-

- cation of mathematical models, remote and ground measurements, *Plodorodie*, 2021, No. 3, pp. 108–116 (in Russian), DOI: 10.25680/S19948603.2021.120.21.
34. Yakushev V. P., Kanash E. V., Rusakov D. V., Yakushev V. V., Blokhina S. Yu., Petrushin A. F., Blokhin Yu. I., Mitrofanova O. A., Mitrofanov E. P., Correlation dependences between crop reflection indices, grain yield and optical characteristics of wheat leaves at different nitrogen level and seeding density, *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 2022, Vol. 57, No. 1, pp. 98–112 (in Russian), DOI: 10.15389/agrobiology.2022.1.98rus.
 35. Yakusheva O. I., *Vliyaniye vnutripol'noi pochvennoi neodnorodnosti i urovnya intensivatsii agrotekhnologii na urozhainost' yarovoi pshenitsy: Avtoref. diss. kand. s.-kh. nauk* (Influence of intra-field soil heterogeneity and the level of intensification of agricultural technologies on the yield of spring wheat, Ext. abstract Cand. agricult. sci. thesis), Saint Petersburg: AFI, 2013, 24 p. (in Russian).
 36. Bachmaier M., Gandorfer M., A conceptual framework for judging the precision agriculture hypothesis with regard to site-specific nitrogen application, *Precision Agriculture*, 2009, Vol. 10, No. 2, pp. 95–110, DOI: 10.1007/s11119-008-9069-x.
 37. Bannari A., Khurshid S. K., Staenz K., Schwatz J., Potential of Hyperion EO-1 hyperspectral data for wheat crop chlorophyll content extraction in precision agriculture, *Canadian J. Remote Sensing, Special Issue on Hyperspectral Remote Sensing*, 2008, Vol. 34, No. 1, pp. 139–157, DOI: 10.5589/m08-001.
 38. Borrero J. D., Zabalo A., An autonomous wireless device for real-time monitoring of water needs, *Sensors*, 2020, Vol. 20, Art. No. 2078, 16 p., DOI: 10.3390/s20072078.
 39. Bullock D. S., Bullock D. G., From agronomic research to farm management guidelines: a primer on the economics of information and precision technology, *Precision Agriculture*, 2000, Vol. 2, No. 1, pp. 71–101, DOI: 10.1023/A:1009988617622.
 40. Finger R., Swinton S., El Bennis N., Walter A., Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment, *Annual Review of Resource Economics*, 2019, Vol. 11, pp. 313–335, DOI: 10.1146/annurev-resource-100518-093929.
 41. Fu P., Meacham-Hensold K., Guan K., Wu J., Bernacchi C., Estimating photosynthetic traits from reflectance spectra: a synthesis of spectral indices, numerical inversion, and partial least square regression, *Plant, Cell and Environment*, 2020, Vol. 43, No. 5, pp. 1241–1258, DOI: 10.1111/pce.13718.
 42. Gaso D. V., Berger A. G., Ciganda V. S., Predicting wheat grain yield and spatial variability at field scale using a simple regression or a crop model in conjunction with Landsat images, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, Vol. 159, pp. 75–83, DOI: 10.1016/j.compag.2019.02.026.
 43. Gitelson A., Solovchenko A., Viña A., Foliar absorption coefficient derived from reflectance spectra: A gauge of the efficiency of in situ light-capture by different pigment groups, *J. Plant Physiology*, 2020, Vol. 254, p. 153277, DOI: 10.1016/j.jplph.2020.153277.
 44. Heady E. O., Pesek J., A fertilizer production surface with specification of economic optima for corn grown on calcareous Ida silt loam, *American J. Agricultural Economics*, 1954, Vol. 36, No. 3, pp. 466–482, DOI: 10.2307/1233014.
 45. Ji Z., Pan Y., Zhu X., Wang J., Li Q., Prediction of crop yield using phenological information extracted from remote sensing vegetation index, *Sensors*, 2021, Vol. 21, No. 4, Art. No. 1406, 16 p., DOI: 10.3390/s21041406.
 46. Kanash E. V., Osipov J. A., Optical signals of oxidative stress in crops physiological state diagnostics, *Proc. 7th European Conf. Precision Agriculture (ECPA 2009)*, E.J. van Henten, D. Goense, C. Lokhorst (eds.), Wageningen, 2009, pp. 81–88.
 47. Lu B., Dao P. D., Liu J., He Y., Shang J., Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 16, Art. No. 2659, 44 p., DOI: 10.3390/rs12162659.
 48. Lu R., Van Beers R., Saeys W., Li C., Cen H., Measurement of optical properties of fruits and vegetables: a review, *Postharvest Biology and Technology*, 2020, Vol. 159, p. 111003, DOI: 10.1016/j.postharvbio.2019.111003.
 49. Maestrini B., Basso B., Drivers of within-field spatial and temporal variability of crop yield across the US Midwest, *Scientific Reports*, 2018, Vol. 8, No. 1, pp. 1–9, DOI: 10.1038/s41598-018-32779-3.
 50. Mittermayer M., Gilg A., Mair F. X., Nätscher L., Hülsbergen K. J., Site-specific nitrogen balances based on spatially variable soil and plant properties, *Precision Agriculture*, 2021, Vol. 22, No. 5, pp. 1416–1436, DOI: 10.1007/s11119-021-09789-9.
 51. Morais R., Mendes J., Silva R., Silva N., Sousa J., Peres E., A versatile, low-power and low-cost IoT device for field data gathering in precision agriculture practices, *Agriculture*, 2021, Vol. 11, Art. No. 619, 16 p., DOI: 10.3390/agriculture11070619.
 52. Oppelt N., Mauser W., Hyperspectral monitoring of physiological parameters of wheat during a vegetation period using AVIS data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2004, Vol. 25, No. 1, pp. 145–159, DOI: 10.1080/0143116031000115300.

53. Pinter P.J. Jr., Hatfield J.L., Schepers J.S., Barnes E.M., Moran M.S., Daughtry C.S.T., Upchurch Dan R., Remote sensing for crop management, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, Vol. 69, No. 6, pp. 647–664, DOI: 0099-1112/03/6906-647\$3.00/0.
54. Placidi P., Morbidelli R., Fortunati D., Papini N., Gobbi F., Scorzoni A., Monitoring soil and ambient parameters in the IoT precision agriculture scenario: an original modeling approach dedicated to low-cost soil water content sensors, *Sensors*, 2021, Vol. 21, No. 15, Art. No. 5110, DOI: 10.3390/s21155110.
55. Rodriguez D.G.P., Bullock D.S., Boerngen M.A., The origins, implications, and consequences of yield-based nitrogen fertilizer management, *Agronomy J.*, 2019, Vol. 111, No. 2, pp. 725–735, DOI: 10.2134/ agronj2018.07.0479.
56. Rodríguez-Robles J., Martin A., Martin S., Ruipérez-Valiente J.A., Castro M., Autonomous sensor network for rural agriculture environments, low cost, and energy self-charge, *Sustainability*, 2020, Vol. 12, Art. No. 5913, 17 p., DOI:10.3390/su12155913.
57. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, In: *3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symp.*, Vol. 1, Washington, DC: NASA, 1973, pp. 309–317.
58. Scharf P.C., Kitchen N.R., Sudduth K.A., Davis J.G., Spatially variable corn yield is a weak predictor of optimal nitrogen rate, *Soil Science Society of America J.*, 2006, Vol. 70, No. 6, pp. 2154–2160, DOI: 10.2136/sssaj2005.0244.
59. Spillman W.J., Application of the law of diminishing returns to some fertilizer and feed data, *American J. Agricultural Economics*, 1923, Vol. 5, No. 1, pp. 36–52, DOI: 10.2307/1230266.
60. Stauber M.S., Burt O.R., Linse F., An economic evaluation of nitrogen fertilization of grasses when carry-over is significant, *American J. Agricultural Economics*, 1975, Vol. 57, No. 3, pp. 463–471, DOI: 10.2307/1238409.
61. Trevisan R.G., Bullock D.S., Martin N.F., Spatial variability of crop responses to agronomic inputs in on-farm precision experimentation, *Precision Agriculture*, 2021, Vol. 22, No. 2, pp. 342–363, DOI:10.1007/s11119-020-09720-8.
62. Tumusiime E., Brorsen B.W., Mosali J., Johnson J., Locke J., Biermacher J., Determining optimal levels of nitrogen fertilizer using random parameter models, *J. Agricultural and Applied Economics*, 2011, Vol. 43, No. 4, pp. 541–552, DOI: 10.1017/S1074070800000067.
63. Yakushev V.P., Kanash E.V., Evaluation of plants nitrogen status by colorimetric characteristics of crop canopy presented in digital images, *Proc. 8th European Conf. Precision Agriculture*, J.V. Stafford (ed.), Prague, 2011, pp. 341–345.