

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ В РОССИИ

© 2021 г. В. П. Якушев<sup>a,\*</sup>, В. В. Якушев<sup>a,\*\*</sup>, С. Ю. Блохина<sup>a,\*\*\*</sup>,  
Ю. И. Блохин<sup>a,\*\*\*\*</sup>, Д. А. Матвеев<sup>a,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> *Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*

\*E-mail: vyakushev@agrophys.ru

\*\*E-mail: mail@agrophys.com

\*\*\*E-mail: sblokhina@agrophys.ru

\*\*\*\*E-mail: blohin3k4@gmail.com

\*\*\*\*\*E-mail: dmatveenko@agrophys.ru

Поступила в редакцию 29.03.2021 г.

После доработки 30.04.2021 г.

Принята к публикации 19.05.2021 г.

Эффективность производства растениеводческой продукции определяется не только техническим и ресурсным оснащением хозяйствующих субъектов, но и уровнем информационного обеспечения при проектировании адаптивно-ландшафтных систем земледелия, формировании пакета агротехнологий и их оптимальной реализации в полевых условиях, включая агроприёмы точного земледелия. В статье осуществлён анализ современного состояния проблемы информационного обеспечения земледельческой отрасли. Отмечается его несовершенство, которое не позволяет повсеместно обеспечить получение высоких урожаев, возможных в конкретных почвенно-климатических условиях, и воспроизводство почвенного плодородия. Авторы обосновывают перспективы совершенствования информационного обеспечения сельскохозяйственного производства, которые тесно связаны с развитием инфраструктуры сопряжённого дистанционного и наземного мониторинга и оценки состояния сельскохозяйственных земель и посевов. Разработаны и апробированы новые методы обработки и интерпретации спутниковой информации, созданы прототипы наземных мобильных и стационарных измерительных систем сбора данных, характеризующих состояние посевов и среды их обитания, подчёркивается роль математических моделей в задаче управления производственным процессом сельскохозяйственных культур. Рассмотрена применяемая авторами концептуальная схема управления исследованиями в данном направлении и возможность системного использования перспективных методов и соответствующих результатов в производстве.

*Ключевые слова:* адаптивно-ландшафтные системы земледелия, точное земледелие, интеллектуальные системы поддержки принятия решений, электронная карта-задание, дистанционное зондирование Земли, оптические характеристики посевов, электронная карта урожайности, мобильные и стационарные измерительные системы, беспроводные сенсорные сети, электронная карта пространственного распределения физических показателей почвы, программно-аппаратные средства, интернет вещей.

DOI: 10.31857/S0869587321080090

В соответствии с утверждённой Правительством РФ Программой фундаментальных иссле-

ЯКУШЕВ Виктор Петрович – академик РАН, руководитель отдела моделирования адаптивных агротехнологий ФГБНУ АФИ. ЯКУШЕВ Вячеслав Викторович – член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией информационного обеспечения точного земледелия ФГБНУ АФИ. БЛОХИНА Светлана Юрьевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник ФГБНУ АФИ. БЛОХИН Юрий Игоревич – научный сотрудник ФГБНУ АФИ. МАТВЕЕНКО Дмитрий Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник ФГБНУ АФИ.

дований на период 2021–2030 гг. усилия современной сельскохозяйственной науки должны быть нацелены на всемерное научное обеспечение успешной реализации Доктрины продовольственной безопасности РФ в рамках приоритетного направления Стратегии научно-технологического развития РФ до 2035 г., предусматривающего переход к высокопродуктивному агрохозяйству нового технологического уклада [1, 2]. Производство растениеводческой продукции (зерна, картофеля, овощей, фруктов, кормов для животных и рыбодводства) – основа всего сельскохозяйственного производства в агропромышленном комплексе

(АПК). Эта деятельность осуществляется в рамках той или иной системы земледелия.

Земледелие представляет собой сложную многоуровневую систему, функционирующую под открытым небом, на что в разное время обращали внимание такие выдающиеся учёные, как Ю. Либих [3], Д.И. Менделеев [4], А.Ф. Иоффе [5]. Занятие земледелием – основное условие развития человечества, в истории которого имели место несколько революционных преобразований, изменивших облик цивилизации. Первое из них произошло около 8 тыс. лет назад, когда люди впервые перешли от собирательства к сознательному выращиванию культур и оседлому образу жизни.

Системы земледелия (СЗ) прошли многовековой путь от самых примитивных до современных адаптивных форм, в которых реализуется концепция “умного сельского хозяйства”. Вплоть до начала XX в. производство растениеводческой продукции опиралось главным образом на передаваемый из уст в уста и накапливаемый эмпирический опыт земледельца, способного разделить земли на лучшие и худшие, а сельскохозяйственные культуры – на требовательные к определённым условиям и нетребовательные. С развитием культурного земледелия постепенно повышался уровень научного, технологического и информационного обеспечения производства растениеводческой продукции. Во второй половине минувшего столетия накопленный опыт уже включал весьма глубокое и объективное представление о роли эффективности плодородия почв, их генезисе, возможности и многообразии средств управления плодородием и продукционным процессом агроценозов, мелиоративным и фитосанитарным состоянием земель. В настоящее время совершенствование СЗ связано с развитием теории проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия (АЛСЗ) [6, 7]. В соответствии с современными представлениями АЛСЗ включает три основных блока (подсистемы): организация территории хозяйства (землеустройства); пространственное определение структуры и границ посевных площадей (севообороты); проектирование адаптивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур (технологии), предусматривающих подбор подходящих культур и сортов, удобрений, средств защиты растений, приёмов обработки почвы с учётом природного и производственно-ресурсного потенциала в заданных условиях [8].

Методология АЛСЗ направлена на управление режимами агроландшафта, которое позволяет разрешить компромисс между получением планируемого количества и качества продукции растениеводства и экологической устойчивостью агроэкосистем. Такой компромисс достигается с

помощью биологически и экономически обоснованных севооборотов, генерации и последующей реализации адаптивных агротехнологий различной интенсивности. Причём чем выше уровень интенсификации агротехнологий (экстенсивные, нормальные, интенсивные, технологии точного земледелия), тем более совершенным должно быть информационное обеспечение, предусматривающее качественный рост объёма пространственно-атрибутивных данных в управлении производством.

**Задачи, состояние информационного обеспечения АЛСЗ и перспективы его совершенствования с помощью методов и средств точного земледелия.** В нашей стране объективно существует значительное разнообразие природно-географических условий, включая сочетание климатических факторов, форм рельефа, растений и почв, что в совокупности обуславливает весьма существенную территориально-пространственную неоднородность сельскохозяйственных земель. В связи с этим информационное обеспечение отрасли земледелия предусматривает его дифференциацию по соответствующим уровням (федеральный, региональный и локальный) [8]. На федеральном уровне определяется земельная, экономическая, экологическая, технологическая, техническая и научная политика государства по отношению к АПК страны. Информационное обеспечение отрасли на региональном уровне направлено на создание типовых моделей адаптивно-ландшафтного земледелия, которые должны быть репрезентативными по отношению к основным природно-сельскохозяйственным и агроэкологическим зонам, подзонам и провинциям, выделяемым в пределах данного региона.

Информационное обеспечение на локальном уровне базируется на типовых моделях регионального земледелия и данных, характеризующих почвенно-климатические, материально-технические и другие условия конкретного хозяйства. Весьма актуальными при проектировании АЛСЗ для конкретного хозяйства являются вопросы получения обширной пространственно-атрибутивной разнородной информации для агроэкологической оценки земель, а также классификации их по типам и продуктивности для различных сельскохозяйственных культур. Данная информация необходима для биологического обоснования и построения границ внутривоспроизводственных севооборотов. В целом на уровне конкретного хозяйства информационное наполнение должно обеспечить ежегодное взаимосвязанное решение следующих технологических и управленческих задач: выбор структуры и объёмов производства растениеводческой продукции; определение структуры севооборотов и подбора соответствующих культур и сортов с оптимальным размещением их по полям хозяйства; проектирование пакета

технологий, адаптированных к природным и хозяйственным условиям; оценку возможной их дифференциации по уровням интенсификации производства в зависимости от ресурсного потенциала, включая планирование прецизионных агроприёмов точного земледелия (ТЗ); разработку плана оперативного реагирования на управление производственным процессом сельскохозяйственных культур по всему циклу рекомендованных технологических операций на предстоящий сезон вегетации.

Совокупность указанных задач составляет ядро АЛСЗ для заданных условий на текущий год. В ходе роста и развития сельскохозяйственных культур необходимо регулярно проводить мониторинг состояния посевов, выполнять и по необходимости корректировать оперативный план управления производством растениеводческой продукции, осуществляя оптимизацию приёмов и способов обработки почв, норм внесения удобрений, средств защиты растений от сорняков, вредителей и болезней с определением сроков и регламентов их проведения в зависимости от сложившейся и ожидаемой метеорологической и хозяйственно-экономической обстановки. Информационное обеспечение на локальном уровне является несовершенным и характеризуется недостаточным объёмом и качеством. Особенно это касается материалов почвенных обследований Агрохимслужбы, проводимых, как правило, по устаревшим методикам.

Информационное обеспечение отрасли земледелия в нашей стране приобрело характер системы с середины 1960-х годов, когда были сформированы специализированные службы по агроклиматическому, почвенно-экологическому, агрохимическому, фитосанитарному, селекционно-семеноводческому мониторингу. В то время это было существенным шагом в развитии систем земледелия. Тем не менее в большинстве хозяйств России решения по управлению производством растениеводческой продукции продолжают приниматься в условиях весьма ограниченной информации, что не позволяет повсеместно обеспечить внедрение ресурсосберегающих технологий земледелия, получение принципиально возможных урожаев в конкретных почвенно-климатических условиях, а также воспроизводство почвенного плодородия. По имеющимся оценкам, севообороты нарушены на площади более 70 млн га (89% посевной площади) [7, 9]. А система севооборотов в современных условиях — это тот самый резерв, который не требует затрат, но чрезвычайно эффективен при условии оптимальной организации структуры посевных площадей. В настоящее время этот вопрос должен заново решаться почти в каждом хозяйстве.

Перспективы совершенствования информационного обеспечения отрасли земледелия на локальном уровне прежде всего связаны с развитием методов и средств точного земледелия. Наряду с реализацией прецизионных агроприёмов непосредственно в поле, методология и инструментарий точного земледелия позволяет использовать физико-технические и программные средства сбора и обработки разнородной информации, необходимой для построения и реализации АЛСЗ. Данное обстоятельство открывает возможности для более широкого применения методов и средств ТЗ и их совершенствования с целью получения объективной информации о пространственном распределении показателей плодородия и продуктивности. Например, разработанная и апробированная Агрофизическим НИИ (АФИ) методика почвенных обследований [10] базируется на возможностях современных мобильных информационно-измерительных систем, оснащённых навигационным оборудованием и специализированным программным обеспечением, позволяющим выделять границы варьирования агрохимических и агрофизических параметров почв на конкретных сельскохозяйственных полях. До появления технологий ТЗ подобные почвенные обследования проводились вручную и без точной привязки к местности. Такой подход, как правило, не может обеспечить повторного отбора проб в тех же точках, что и при предыдущем обследовании, а информация, полученная таким способом, скорее всего не отражает реальную динамику изменения почвенных показателей, что приводит к неверной интерпретации материалов почвенного обследования.

Основное преимущество новой методики заключается в точной привязке координат изучаемых полей и точек отбора почвенных проб, а также в удобном техническом обеспечении и автоматизации процесса почвенного обследования в целом. Вместе с тем при апробации данного метода в производственных условиях выяснилось, что для отбора почвенных (а также растительных) образцов в поле, их последующих лабораторных исследований, анализа и интерпретации полученных данных необходимы существенные временные и финансовые затраты. У производителей растениеводческой продукции возникает множество вопросов: сколько образцов следует отбирать, с какой площади, с каким шагом, в какой степени пространственное варьирование будет учтено при выбранной схеме пробоотбора и определении в лаборатории показателей почвенного плодородия и продуктивности посевов. Кроме этого, рассматриваемый метод имеет принципиальный недостаток, который заключается в том, что все выводы делаются на основе значений варьирующих показателей состояния почвы или посева, полученных в результате, как правило,



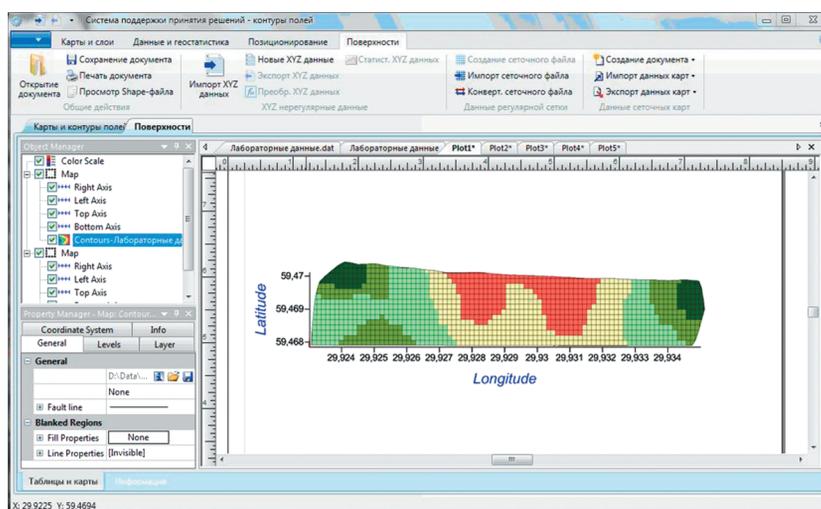


Рис. 2. Электронная карта-задание на дифференцированное внесение удобрений

ных методов информационного обеспечения для последующего их применения в проектировании и реализации АЛСЗ. С этой целью формируется и постоянно обновляется разнородная пространственно-атрибутивная информация, характеризующая состояние посевов и среды их обитания на опытных полях полигона АФИ (538 га). Сбор данных производится с помощью разработанных институтом мобильных и стационарных измерительных систем, включая специальную аппаратуру, устанавливаемую на беспилотных летательных аппаратах. Спутниковые данные предоставляются Центром коллективного пользования Института космических исследований РАН, который обеспечивает доступ к предварительно обработанной информации из постоянно пополняющихся архивов. Накапливаемые данные с полей полигона обрабатываются, после чего производится оценка пригодности соответствующих результатов для дальнейшего использования при проектировании и реализации АЛСЗ. Апробация перспективных методов и подходов в производственных условиях осуществляется на предприятиях Ассоциации «Ленплодоовощ» (членом которой АФИ является с 2012 г.). Сформированная таким образом база данных с производственных полей уже пригодна для генерации плановых адаптивных агротехнологий с помощью созданного в АФИ прототипа интеллектуальной системы поддержки технологических решений в точном земледелии [11]. При помощи геоинформационного модуля ГИС-АФИ, являющегося составной частью прототипа, генерируются электронные карты-задания (рис. 2) для оперативной реализации в полевых условиях прецизионных приёмов внесения удобрений и средств защиты растений.

Важно отметить, что представленные на рисунке 1 методы апробированы и уже сегодня могут широко применяться в проектировании основных подсистем АЛСЗ (землеустройство, севообороты, технологии). Аэрокосмические снимки и их интерпретация с привязкой к конкретной сельскохозяйственной территории – удобный картографический материал для проведения землеустроительных работ, определения границ севооборотов, проведения мониторинга и оценки состояния почв и посевов. Вместе с тем обширный информационный ресурс, формируемый благодаря этим методам, позволяет коренным образом изменить методологию проектирования агротехнологий различной интенсивности, включая прецизионные ресурсосберегающие агроприёмы, и в целом способствует переходу на новый технологический уровень производства растениеводческой продукции в России. Неизменным остаётся принцип опережающего и компенсационного внесения удобрений и средств защиты растений (самых дорогих ресурсов): их следует вносить как можно меньше, однако в необходимом объёме. Поэтому перед сельскохозяйственной наукой остро стоит вопрос о совершенствовании научного обоснования доз вносимых удобрений и средств защиты растений, их дифференцированного внесения с учётом внутриполевой изменчивости показателей продуктивности и фитосанитарного состояния посевов. Данный факт едва ли не в наибольшей степени определяет необходимость и перспективность перехода к технологиям ТЗ в нашей стране.

**Перспективные методы и средства в информационном обеспечении и управлении современным земледелием.** Прецизионные технологии – мировой тренд адаптации производства растениеводческой продукции к внутриполевой изменчивости

условий формирования урожаев. Обоснованное планирование и последующая дифференциация технологических воздействий в современных системах земледелия находятся в непосредственной зависимости от степени внутритролевой неоднородности [12]. Задача создания надёжных и доступных методов обнаружения такой неоднородности, определения степени её интенсивности и пространственного распределения на сельскохозяйственных полях является ключевой в деле управления производством растениеводческой продукции в системе ТЗ. Перспективный масштабируемый ресурс для информационного обеспечения решения указанной задачи – данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [13], интерпретация которых позволяет проводить сплошную непрерывную оценку состояния посевов и среды их обитания с одновременным охватом значительных площадей, что практически невозможно при наземных исследованиях.

В силу значительной территории нашей страны и возрастающей доступности аэрокосмических данных такому подходу в информационном обеспечении современного земледелия альтернативы нет. В специальном выпуске журнала Института космических исследований РАН “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”, вышедшем в 2019 г., представлены работы, посвящённые таким направлениям, как решение задач мониторинга и оценки состояния сельскохозяйственных земель и посевов, в том числе задач точного земледелия; построение и использование современных систем дистанционного мониторинга [14–18]. Основой для большинства публикаций стали лучшие доклады, представленные на II Всероссийской научной конференции “Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве” (АФИ, 26–28 сентября 2018 г., <http://agrophys.ru/node/332>) и XVI Всероссийской открытой конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” (ИКИ РАН, 12–16 ноября 2018 г., <http://conf.rse.geosmis.ru>). Анализ публикаций показывает, что аэрокосмические данные ДЗЗ, наземные измерительные системы и математические модели уже сегодня дают возможность существенно повысить качество и масштабы информационного обеспечения сельского хозяйства, мониторинга крупных природных объектов и явлений (земельные кадастры, леса, водоёмы, пожары, наводнения). Вместе с тем отсутствие надёжных методов интерпретации спутниковых данных не позволяет использовать их непосредственно при управлении производственным процессом сельскохозяйственных культур.

**Методы обработки и интерпретация спутниковых данных ДЗЗ.** Учёными АФИ предложено два новых метода. Один из них предполагает исполь-

зование вариограммного анализа спутниковых снимков, а другой основан на комплексной оценке динамики изменения оптических показателей различных индексов отражения, вычисленных по гиперспектральным снимкам. Для реализации геостатистического подхода создан и апробирован инструментарий построения по данным ДЗЗ эмпирических вариограмм и их аппроксимаций, функционально описывающих статистическую структуру пространственно варьирующих показателей состояния почвы или посева на сельскохозяйственном поле. Изучена перспектива автоматизации данного процесса. Вариограммный анализ является эффективным методом, позволяющим охарактеризовать структуру пространственной изменчивости данных, и широко применяется для анализа пространственной неоднородности значений поверхностного отражения [19–21] и улучшения классификации изображений [22, 23]. Необходимо отметить, что использование геостатистических методов анализа спутниковых данных позволяет существенно увеличить масштабы информационного обеспечения технологий точного земледелия. В России практически нет работ по использованию вариограммного анализа данных ДЗЗ.

Оптимальным для вариограммного анализа спутниковых снимков представляется использование возможностей статистического языка программирования R совместно с широким графическим потенциалом языка Python. По параметрам нормированной вариограммной функции разработан алгоритм оценки перспективности внедрения на заданном сельскохозяйственном поле технологий точного земледелия. Результаты получены с помощью предложенной методологии применения вариограммного анализа для целей точного земледелия [24]. В рамках данной методологии пространственная неоднородность сельскохозяйственного поля представлена в виде геостатистической модели, состоящей из трёх компонентов (макро-, мезо- и микро-), каждому из которых в соответствии с его частотными свойствами даётся определённая физическая интерпретация. При этом теоретически установлено, что при существенном вкладе мезокомпонента во внутритролевую неоднородность на ограниченной сельскохозяйственной территории целесообразно оценивать переход к технологиям точного земледелия на основании нагет-дисперсии, величина которой в нормированной вариограммной функции варьируется от нуля до единицы. Эффективность вариограммного анализа подтверждена сравнительными вычислительными экспериментами [25]. За основу взяты эмпирические вариограммы, построенные по аэрокосмическим снимкам объектов исследования. В частности, с использованием спутниковых данных по двум произвольно выбранным полям конкретно-

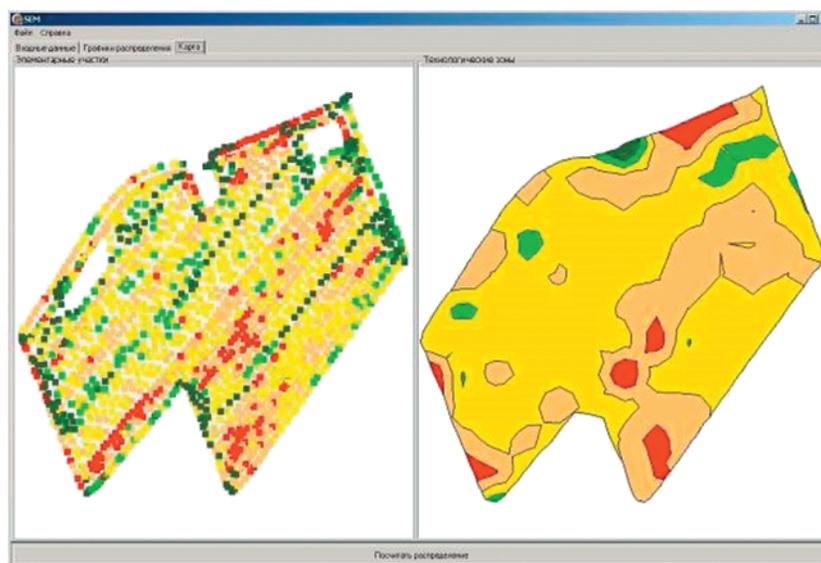


Рис. 3. Визуальное представление исходных данных (слева) и результатов их распределения на однородные кластеры (справа)

го хозяйства был проведён вычислительный эксперимент по проверке перспективности применения на них прецизионных технологий внесения агрохимикатов. Оценка осуществлена на основе расчёта вегетационного индекса NDVI и сравнительного анализа значений нагетт-дисперсий их теоретических моделей, полученных путём аппроксимации соответствующих экспериментальных вариограмм.

Существенный интерес при решении задач информационного обеспечения земледелия представляют методы анализа и интерпретации материалов гиперспектрального дистанционного зондирования поверхности Земли. Гиперспектральное изображение отличается от мультиспектрального непрерывностью, диапазоном и спектральным разрешением, что позволяет выполнять одновременно вычисление значений нескольких вегетационных индексов, характеризующих один и тот же объект в разных спектральных диапазонах [26]. В АФИ разработана методика определения спектральных диапазонов и соответствующих индексов, которые помогают выявить признаки дефицита азота и воды на самых ранних этапах, когда внешние симптомы азотного голодания ещё отсутствуют. В ходе экспериментальных исследований моделировались различные стрессовые условия, а затем определялись спектральные диапазоны оптических характеристик растений, в которых наблюдалась наибольшая корреляционная зависимость между значениями отражательной способности и длиной волны. В результате был получен конкретный перечень индексов отражения и набор количественных показателей по каждому критерию

для оценки физиологического состояния пшеницы при оптимальных условиях и дефиците азота и воды. Также был разработан базовый алгоритм обнаружения и выделения границ внутривидовой неоднородности, основанный на использовании гиперспектральных снимков сельскохозяйственных полей и оптических критериев (индексов отражения), характеризующих специфические и неспецифические особенности спектральных показателей посева при воздействии различных стрессоров [27]. Для кластеризации оптических показателей на сельскохозяйственных полях по каждому критерию используется программа, апробированная при выделении зон однородностей по электронным картам урожайности, которые мы рассмотрим ниже.

**Электронные карты урожайности.** Карты урожайности формируются автоматически с помощью уборочной техники, оборудованной мониторами и специальными датчиками, с привязкой урожайности к глобальной системе координат. На рисунке 3 (слева) приведён пример электронной карты, полученной на полигоне АФИ при помощи зернового комбайна Class Dominator. Электронная карта урожайности состоит из совокупности небольших элементарных участков, площадь ( $S$ ) которых при уборке рассчитывается по формуле:  $S = L \times (V \times \Delta T)$ , где  $L$  – ширина захвата жатки, м;  $V$  – скорость движения комбайна, м/с;  $\Delta T$  – временная величина, характеризующая частоту регистрации местоположения комбайна на поле в процессе уборки, с. В приведённом примере (рис. 3) величинам  $L$ ,  $V$ ,  $\Delta T$  соответствуют значения 4.27 м 1.3 м/с и 5.0 с. Следовательно, в момент уборки через каждые пять секунд автома-

тически регистрируются глобальные координаты центра каждого элементарного участка (площадью около 28 м<sup>2</sup>) и величина фактически полученного на нём урожая.

Укомплектование обычно используемых в России комбайнов оборудованием для получения точных электронных карт продуктивности зерновых культур не представляет принципиальной сложности, но может существенно повысить информационную составляющую проектирования и реализации АЛСЗ. Наличие электронной карты урожайности позволяет характеризовать поле не по одному параметру – средней его урожайности, а по большим числовым массивам – урожайности отдельных участков с чётким указанием их координат. Благодаря этому можно будет более точно оценивать продуктивность на каждом конкретном поле и определять влияющие на неё факторы, а также сравнивать поля между собой, опираясь не на мнимую гипотетическую среднюю урожайность, а на вполне конкретные распределения урожайности по полям. Пространственное распределение урожайности имеет особое значение, поскольку не существует более объективного показателя неоднородности сельскохозяйственного поля по плодородию, чем карта, демонстрирующая количественную интегральную оценку продукционного процесса в конкретном году. Подобная информация открывает возможности для разработки автоматизированной системы выделения на сельскохозяйственном поле однородных по продуктивности зон.

Рассмотрим задачу кластеризации сельскохозяйственного поля по данным урожайности. Предположим, что всё поле можно условно разделить на пять кластеров (пять зон однородности). Первый кластер соответствует очень благоприятным для произрастания данной культуры условиям, второй – включает участки с хорошими условиями, третий – соответствует в целом удовлетворительным условиям, четвёртый – включает зоны, неблагоприятные для произрастания культуры, наконец, пятый кластер имеет в составе участки с очень плохими условиями. Конечно, в действительности для конкретного поля количество однородных зон может быть меньше пяти, а в идеальном случае поле в целом представляет собой однородную зону. Для решения задачи кластеризации используется подход на основе разделения смеси вероятностных распределений, в котором отдельные компоненты моделируются нормальными распределениями с различными параметрами. При этом математическое ожидание соответствует средней урожайности с участка внутри одной зоны, а дисперсия характеризует разброс внутри зоны однородности. Веса компонент указывают относительный размер соответствующего кластера (точнее, относительную долю участков, отнесённых к данной компоненте смеси).

Общая математическая модель смеси распределений, характеризующая урожайность на поле,

имеет вид:  $f(x) = \sum_{j=1}^k p_j \cdot f(x, \theta_j)$ , где  $k$  – число кластеров (зон однородности);  $f(x, \theta_j)$  – плотность нормального распределения (описывает закон распределения урожайности  $x$  внутри зоны однородности с номером  $j$ );  $\theta_j = (a_j, \sigma_j^2)$  – неизвестные параметры (математическое ожидание и дисперсия) распределения компоненты с номером  $j$ ;  $p_j$  – удельный вес зоны однородности (относительная доля наблюдений из данной зоны по отношению к общему числу наблюдений). В литературе по статистике имеются разнообразные алгоритмы решения задачи разделения смеси распределений. В целом можно отметить, что это довольно трудная статистическая задача, связанная с осуществлением сложных вычислений. В АФИ разработан алгоритм адаптивного вероятностного обучения, представляющий собой некоторую модификацию алгоритма SEM [28], и создана программа для автоматизированной кластеризации [29]. На рисунке 3 (в правой части окна) представлены результаты кластеризации исходной электронной карты урожайности (см. рис. 3, левая часть окна) в определённые программой зоны однородности по величине урожайности.

Достоинством рассматриваемой программы является отсутствие каких-либо априорных предположений о числе однородных зон (задаётся лишь верхняя граница числа однородных зон) и их локализации на поле. Также важно подчеркнуть, что данная программа используется, как уже было отмечено выше, для кластеризации оптических показателей, вычисленных по аэрокосмическим снимкам сельскохозяйственных полей. Функциональное расширение основано на одинаковой структурной организации и идентичности математических моделей смеси распределения исходных данных. Электронная карта вычисленных значений оптических показателей, например вегетационного индекса NDVI, состоит из большого числа пикселей (его размер – пространственное разрешение исходных аэрокосмических данных). Каждый пиксель является конкретным значением оптического показателя с точными координатами его локализации на поле, то есть такая же структура исходных данных характерна и для электронных карт урожайности на сельскохозяйственных полях. Важно отметить, что электронные карты урожайности объективно могут быть самым востребованным видом информации для прецизионного внесения удобрений в хозяйствах России, поскольку они избавляют от необходимости проводить сплошное агрохимическое обследование, требующее существенных затрат. Для поддержки производителей в АФИ разрабо-

тана прецизионная технология внесения минеральных удобрений на основе распределённых данных об урожайности на заданном поле.

**Имитационное динамическое и стохастическое моделирование и прогнозирование.** Важным сегментом информационного обеспечения современных систем земледелия являются имитационные динамические математические модели. Они позволяют получить ответ на вопросы о состоянии и прогнозе развитии агроэкосистем в условиях климатических изменений и проведения различных агротехнических мероприятий. В настоящее время для решения такого класса задач используются различные имитационные динамические модели. В работе [30] представлен обзор методических подходов прогнозирования продуктивности посевов на базе массовых расчётов в геоинформационной среде, которые можно использовать для обоснования систем земледелия. Из зарубежных отмечены модели MONICA (Германия) и WOFOST (Нидерланды). Из отечественных разработок одной из наиболее известных моделей в мире является система имитационного моделирования производственного процесса сельскохозяйственных культур AGROTOOL, созданная в АФИ.

Для вычислительных экспериментов с помощью AGROTOOL используется система поливариантного расчёта АРЕХ. Данная система позволяет запускать динамическую модель производственного процесса в пакетном режиме многократно с разными наборами данных, а потом сравнивать полученные результаты. Архитектура системы АРЕХ – плагинная, что принципиально позволяет подключать к ней новые динамические модели производственного процесса, созданные другими авторами, без изменения его исходного кода. Однако для ансамблевых экспериментов с другими моделями (используется один и тот же набор исходных данных) необходимо разработать соответствующую поддерживающую инфраструктуру. В отделе моделирования адаптивных агротехнологий АФИ создаётся новая версия системы АРЕХ и Web-сервер для её размещения, которые обеспечат реализацию логики поливариантных ансамблевых расчётов с различными моделями прогнозирования динамики производственного процесса сельскохозяйственных культур. На настоящий момент ряд задач, возникающих при разработке новой версии АРЕХ, уже решён. В частности, реализована поддержка формата AgMIP, который является международным стандартом входных и выходных данных для моделей производственного процесса сельскохозяйственных культур.

Другое перспективное направление информационного обеспечения систем земледелия нового поколения, наряду с рассмотренным выше имитационным динамическим моделированием аг-

роэкосистем, – стохастическое или вероятностно-статистическое моделирование. Стохастическое моделирование природных объектов и комплексов объективно представляет собой наиболее естественную научную методологию изучения природных, в том числе агробиологических, систем. Её суть заключается в том, что анализ накопленных наблюдений должен привести к разработке математических и компьютерных моделей вероятностного характера, позволяющих находить оптимальные решения или решения близкие к оптимальным в условиях стохастической неопределённости и изменчивости, связанной с пространственной и климатической неоднородностью, а также с глобальными изменениями климата. Вариабельность и изменчивость пространственных и временных агробиологических характеристик носит принципиальный характер. Наиболее естественный способ математического описания вариабельности и изменчивости – применение вероятностных распределений. Попытки заменить распределения некими усреднёнными характеристиками приводят к огрублению математических моделей, к потере точности и адекватности.

В современных условиях учёт пространственной и климатической неоднородности, глобальных климатических изменений приобрёл новый смысл в связи с возникновением и развитием точного земледелия. Стохастические модели в рамках ТЗ носят прикладной характер и предназначены прежде всего для оказания поддержки руководителю хозяйствующего субъекта при принятии управленческих решений. Нужно отметить, что в условиях глобальных изменений климата нередко встречаются аномально плохие годы: в частности, в Ленинградской области аномально плохими были последние годы (аномально холодными и аномально влажными). В начале каждого календарного года появляется агрометеорологическая информация, позволяющая с высокой степенью достоверности прогнозировать, каким будет текущий год для сельскохозяйственных культур в каждом отдельном хозяйстве или совокупности хозяйств (хорошим, средним, плохим или аномально плохим). Если прогнозируется аномально плохой или плохой год, а вероятность возникновения потерь окажется слишком высокой, может быть принято решение об отказе от возделывания той или иной сельскохозяйственной культуры в текущем году.

Возможность решения данной задачи состоит в следующем. Поскольку речь идёт о средней продуктивности в регионе, можно с высокой степенью надёжности считать, что каждая компонента в смеси распределений является нормальным распределением. Задача заключается в оценке параметров смеси по накопленной статистической информации о средней продуктивности культуры



Рис. 4. Мобильный комплекс для измерения в движении агрофизических характеристик пахотного слоя почвы на различных глубинах и фрагмент схемы расположения точек измерения

в данном регионе за прежние годы. Конечные смеси вероятностных распределений дают возможность принимать управленческие решения на основе вполне объективного научного подхода, который заключается в статистическом анализе средней продуктивности культуры за предыдущие годы и применении конечных смесей вероятностных распределений для формального математического описания совокупности ретроспективных числовых данных по средней продуктивности. Например, в работе [31] рассматривается алгоритм применения конечной смеси распределений для описания функции распределения продуктивности некоторой культуры. Предлагаемый подход позволяет объективно оценивать ожидаемый объём продукции в условиях плохого или аномально плохого года и принимать сложные управленческие решения на объективной научной основе.

**Методы получения, обработки и определения физических свойств почв с помощью мобильной измерительной системы.** Почва представляет собой сложную гетерогенную многофазную капиллярно-пористую систему. Для оперативного определения пространственной неоднородности физических свойств почвы на разных глубинах (поверхностном, пахотном и подпахотном слоях) весьма перспективно использование измерительных мультисенсорных мобильных комплексов, оснащённых набором датчиков, которые должны быть адаптированы к измерениям в движении. Среди физических параметров почвы наиболее важными для измерения являются электропроводность и диэлектрическая проницаемость как показатели засоленности, влагосодержания, объёмной плотности, механического состава, ёмкости катионного обмена и содержания органического вещества. Определение плотности и динамики уплотнения–разуплотнения почв можно осуществлять по показаниям датчика сопротивления горизонтальной пенетрации, а также диэлектрического или оптического датчиков с использованием эмпирических статистических моделей. При этом необходимо учитывать зависимость электропроводности почвы от давления

уплотнения, исходной плотности сложения, влажности и гранулометрического состава.

В АФИ для измерения комплексной диэлектрической проницаемости почвы, по которой определяются объёмная влажность и электропроводность, был разработан автогенераторный двухкомпонентный диэлькометрический преобразователь с ёмкостным датчиком. На его основе создан мобильный информационно-измерительный комплекс, обеспечивающий непрерывное измерение в движении и определение на ступенчато устанавливаемых глубинах (15, 20, 25, 30 или 35 см) основных агрофизических характеристик пахотного слоя почвы [32]. Апробация измерительного комплекса проводилась на полигоне АФИ в сцепке с трактором, оснащённым бортовым компьютером и GPS-приёмником (рис. 4). Измерения проводились посредством параллельных проходов по полю трактором. Периодичность записи данных составляла 1 с, что обеспечивало фиксацию измерений через каждый метр. Предварительно все датчики были проградуированы в лаборатории в диапазоне измеряемых величин. Для определения точности автоматически измеряемых величин осуществлялся ручной отбор образцов почвы с проведением их лабораторного анализа. В целом выполненные в 2019 г. полевые исследования показали, что созданный в АФИ мобильный измерительный комплекс для определения агрофизических характеристик почв позволяет быстро и надёжно собирать данные в автоматическом режиме и на этой основе строить

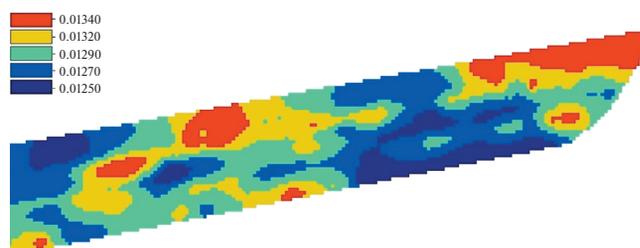


Рис. 5. Карта пространственного распределения электропроводности почвы на глубине 15 см

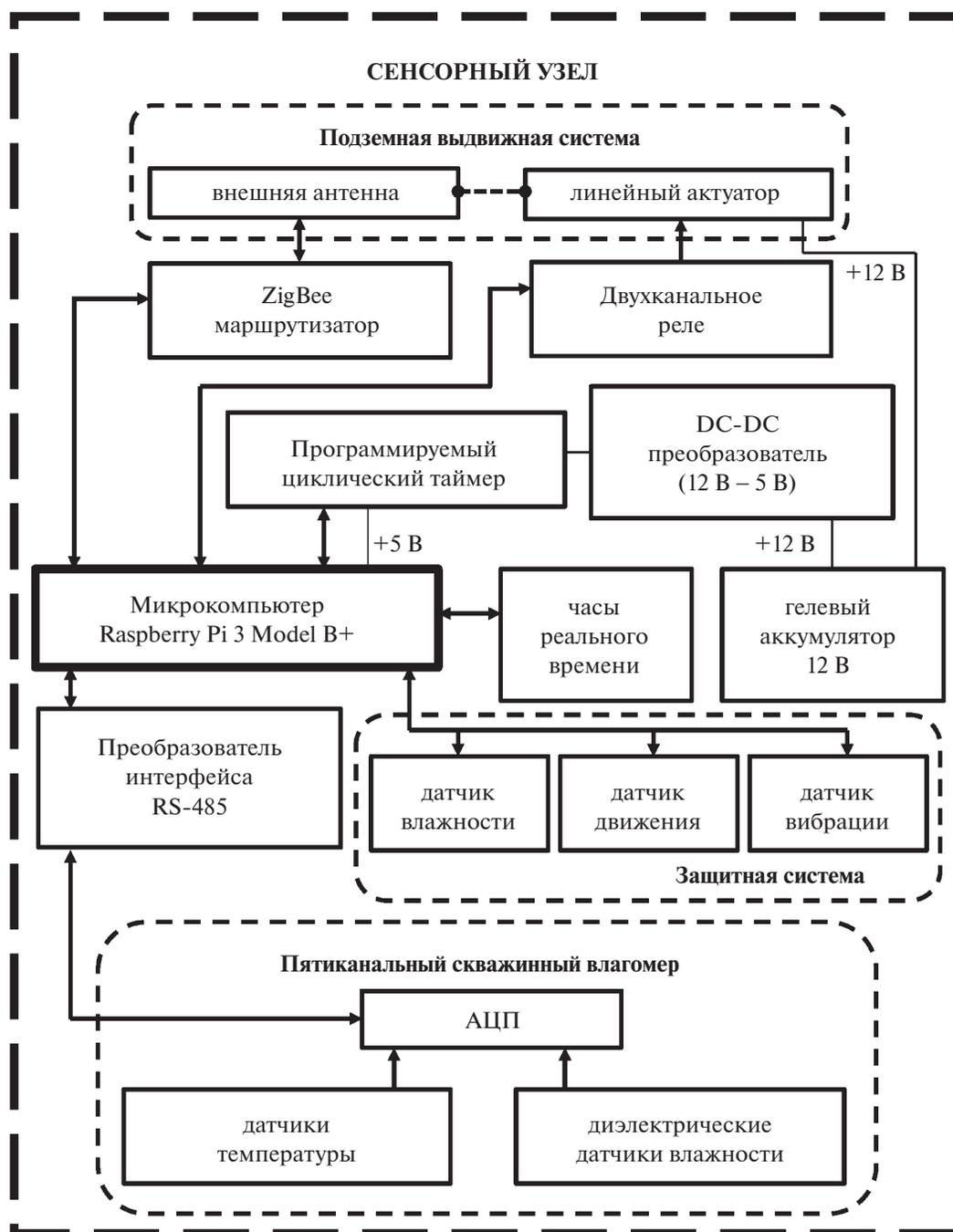


Рис. 6. Структура сенсорного узла БСС

электронные карты пространственного распределения таких характеристик на изучаемой сельскохозяйственной территории [33].

На рисунке 5 в качестве примера приведена электронная карта распределения электропроводности почвы на одном из участков полигона АФИ. В настоящее время данный комплекс используется в научных исследованиях, в будущем весьма перспективно его применение для решения следующих задач: измерения и картирования

температурно-влажностных режимов почв на сельскохозяйственных полях; электропроводности почв для выявления однородных по текстуре участков; сопротивления горизонтальной пенирации почв и динамики её изменения для расчёта нагрузок на рабочие органы сельскохозяйственных орудий, а также использования полученных мобильным комплексом сведений в качестве опорной наземной информации для интерпретации данных ДЗЗ.

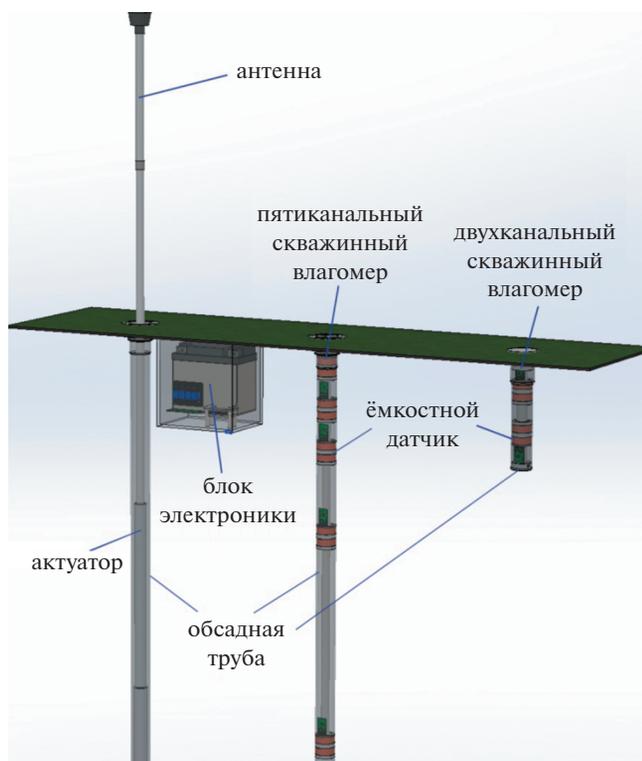


Рис. 7. Схема размещения сенсорного узла под поверхностью почвы

**Беспроводные сенсорные сети (БСС).** Одна из специфических особенностей информационного обеспечения современных систем производства растениеводческой продукции – необходимость существенной модернизации полевых исследований, основанной на использовании сети тестовых агроэкологических полигонов. Создание таких полигонов, оснащённых современными техническими средствами, будет способствовать коренному улучшению проведения полевых исследований по АЛСЗ и увеличению масштабов использования данных ДЗЗ для их целей [14]. На Заседании Бюро Отделения сельскохозяйственных наук РАН, состоявшемся в 2016 г. по инициативе вице-президента РАН, директора ИКИ РАН академика Л.М. Зелёного, была рассмотрена и одобрена инициатива создания сети специализированных тестовых полигонов для спутниковых наблюдений на базе НИИ сельскохозяйственного профиля зернопроизводящей зоны РФ. Усилиями сотрудников АФИ и ИКИ РАН были сформулированы общие требования к структуре и техническому обеспечению типового тестового полигона, разработаны унифицированные методики идентификации, калибровки, верификации и создано программно-аппаратное обеспечение для автоматизации сбора и первичной обработки опорной наземной информации. Уже в 2018 г. на полигоне АФИ (прототип тестового

полигона для сети подспутниковых наблюдений) была развёрнута и начала проходить испытания комплексная измерительная система, в состав которой вошли датчики, размещённые на полях полигона и функционирующие в течение вегетационного периода автономно в составе сенсорных узлов, объединённых в сеть. Беспроводная сенсорная сеть (БСС) представляет собой распределённую в пространстве на расстоянии от нескольких метров до нескольких километров сеть. Она обладает свойством самоорганизации множества сенсорных узлов, объединённых между собой посредством радиоканала, и использует датчики, включённые в состав узлов, для мониторинга различных процессов. В состав апробируемого прототипа измерительной системы, наряду с сенсорными узлами БСС, состоящими из датчиков температуры, пяти- и одноканальных скважинных и штыревых влагомеров, микропроцессорного блока, трансивера и антенны, входят: автоматическая семиканальная метеорологическая станция с интернет-каналом передачи данных на сервер, являющаяся базовой станцией для остальных сенсорных узлов БСС; сервер, на котором происходит сбор и первичная обработка данных, получаемых с базовой станции и приборов для маршрутного обследования опытных полей; беспилотный летательный аппарат для получения аэрофотоснимков. В ходе апробации была сформирована база разнородных данных, что способствовало существенному повышению уровня информационного обеспечения проводимых экспериментов по дифференцированному внесению удобрений. В то же время апробация позволила установить, что для проведения полевых работ на полигоне сенсорные узлы целесообразно размещать под поверхностью земли в составе беспроводной сенсорной сети.

На рисунке 6 показана структура сенсорного узла, предназначенного для размещения на поле под поверхностью земли в составе БСС и проведения с его помощью оперативного мониторинга влажности и температуры почвы с высоким временным разрешением [34]. Предложенная конфигурация позволяет скрыто устанавливать узел на поле под поверхностью земли (рис. 7), не опасаясь его повреждений наземной техникой и человеком, а с помощью выдвижной антенны осуществлять связь с другими узлами и координатором БСС, размещённым над поверхностью земли в удалении от поля.

В настоящее время ведутся работы по освоению новой технологии мониторинга физических свойств почвы с помощью БСС. Несмотря на потенциальные преимущества этой сети, некоторые проблемы всё же остаются нерешёнными. Главная из них заключается в обеспечении эффективной и надёжной радиосвязи между подпочвенными датчиками, поскольку подземная среда – да-

леко не идеальное место для размещения электронных устройств. Требуется более глубокая проработка и проверка функционирования всех компонентов в полевых условиях, что позволит повысить уровень информационного обеспечения экспериментальных исследований и разработок для управления современным земледелием.

Беспроводные сенсорные методы мониторинга основных свойств почв получили в последнее время мощный импульс развития благодаря возможности их применения в технологиях интернета вещей для интеллектуализации управления земледелием. Ожидание фундаментальных перемен в сельском хозяйстве в значительной степени связано с применением интернета вещей, облачных вычислений и когнитивных технологий. Перемены произойдут за счёт внедрения данных инструментов в существующие методы ведения сельского хозяйства для повышения эффективности производства и качества сельхозпродукции, а также улучшения жизни людей благодаря сокращению тяжёлого физического труда и монотонных операций. С 2017 г. реализуется план государственной научно-технической политики по внедрению технологий интернета вещей в агропромышленный комплекс. Использование указанных технологий в сельскохозяйственном производстве позволит решить проблемы передачи и анализа больших объёмов пространственно-неоднородных данных, получаемых с разной скоростью и из весьма разрозненных источников (стационарных датчиков, движущихся транспортных средств и навесного оборудования, спутников, веб-сервисов и т.д.), которые должны быть интегрированы в процесс принятия решений. По мере увеличения количества “умных” устройств и потоков информации пользователь при принятии решений всё больше будет ориентироваться на данные, получаемые в режиме реального времени. В результате применения технологий интернета вещей сельское хозяйство будет становиться более интеллектуальным, а управление им — осуществляться на основе разнородных данных, получаемых в режиме реального времени, а значит, снизится неопределённость, повысится эффективность и, как следствие, уменьшится негативное влияние на окружающую среду [35].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации до 2030 года. М., 2020.
2. Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 “О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации”. <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102416645>
3. *Либих Ю.* Химия в приложении к земледелию и физиологии растений. М.–Л.: Сельхозгиз, 1936.
4. *Менделеев Д.И.* Работы по сельскому хозяйству и лесоводству. М.: АН СССР, 1954.
5. Основы агрофизики / Под ред. А.Ф. Иоффе и И.Б. Ревута. М.: Физматгиз, 1959.
6. *Кирюшин В.И.* Задачи научно-инновационного обеспечения земледелия России // *Земледелие*. 2018. № 3. С. 3–8.
7. *Кирюшин В.И.* Актуальные проблемы и противоречия развития земледелия // *Земледелие*. 2019. № 3. С. 3–7.
8. *Кирюшин В.И.* Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирование агроландшафтов. М.: Колос, 2011.
9. *Иванов А.Л., Кирюшин В.И., Молчанов Э.Н. и др.* Анализ земельной реформы и агропромышленного производства за четверть века. Почвенно-экологические, институциональные и инфраструктурные аспекты модернизации. Земельная служба. Доклад для органов высшей исполнительной и законодательной власти. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2016. <https://yadi.sk/i/nw-JRC7pjzqQS2>
10. *Якушев В.П., Якушев В.В.* Перспективы “умного сельского хозяйства” в России // *Вестник РАН*. 2018. № 9. С. 773–784.
11. *Якушев В.П., Якушев В.В., Матвеев Д.А.* Интеллектуальные системы поддержки технологических решений в точном земледелии // *Земледелие*. 2020. № 1. С. 33–37.
12. *Tisseyre B., Leroux C.* How to measure and report within field variability: a review of common indicators and their sensitivity // *Precision Agriculture*. 2019. V. 9. P. 562–590. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9598-x>
13. *Лурия 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. № 3. С. 53–66.
14. *Якушев В.П., Дубенок Н.Н., Лурия Е.А.* Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019а. № 3. С. 11–23.
15. *Труфляк Е.В., Скубиев С.И., Цыбулевский В.В., Малашихин Н.В.* Дистанционный мониторинг посевов риса и алгоритм выявления неоднородностей // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. № 3. С. 110–124.
16. *Зейлигер А.М., Ермолаева О.С., Музылев Е.Л. и др.* Компьютерный анализ режимов водного стресса орошаемых агроценозов с использованием SWAP-модели, а также данных наземного и космического мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. № 3. С. 33–43.
17. *Музылев Е.Л., Старцева З.П., Зейлигер А.М. и др.* Использование спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности и метеороло-

- гических характеристиках при моделировании водного и теплового режимов большого сельскохозяйственного региона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. № 3. С. 44–60.
18. Павлюшин В.А., Лысов А.К. Фитосанитарная безопасность агроэкосистем и дистанционный фитосанитарный мониторинг в защите растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. № 3. С. 69–78.
  19. Balaguer-Beser A., Ruiz L. A., Hermosilla T., Recio J.A. Using semivariogram indices to analyse heterogeneity in spatial patterns in remotely sensed images // Computers and Geosciences. 2013. V. 50. P. 115–127.
  20. Lausch A., Pause M., Doktor D. et al. Monitoring and assessing of landscape heterogeneity at different scales // Environmental Monitoring and Assessment. 2013. V. 185. № 11. P. 9419–9434.
  21. Oliveira Silveira E.M., Mello J.M., Acerbi F.W.J. et al. Characterizing landscape spatial heterogeneity using semivariogram parameters derived from NDVI images // Cerne. 2017. V. 23. № 4. P. 413–422.
  22. Wu X., Peng J., Shan J. E., Cui W. Evaluation of semivariogram features for object-based image classification // Geo-spatial Information Science. 2015. V. 18. № 4. P. 159–170.
  23. Yue A., Zhang C., Yang J. et al. Texture extraction for object-oriented classification of high spatial resolution remotely sensed images using a semivariogram // Intern. J. Remote Sensing. 2013. V. 34. № 11. P. 3736–3759.
  24. Якушев В.П., Жуковский Е.Е., Кабанец А.Л. и др. Вариограммный анализ пространственной неоднородности сельскохозяйственных полей для целей точного земледелия. СПб.: АФИ, 2010.
  25. Якушев В.П., Буре В.М., Митрофанова О.А. и др. Оценка внутриполевой изменчивости посевов с помощью вариограммного анализа спутниковых данных для точного земледелия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. № 2. С. 114–122.
  26. Mulla D.J. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps // Biosystems Engineering. 2013. V. 114. № 4. P. 358–371.
  27. Якушев В.П., Матвеев Д.А., Петрушин А.Ф. и др. Новый метод количественной оценки внутриполевой изменчивости по оптическим характеристикам посевов для точного земледелия // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2020. № 2. С. 4–10.
  28. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности: справочное издание. М.: Финансы и статистика, 1989.
  29. Буре В.М., Петрушин А.Ф., Якушев В.В. Автоматизированная система стохастического выделения однородных технологических зон на сельскохозяйственном поле по данным урожайности. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008614663 от 29 сентября 2008 г.
  30. Якушев В.П., Якушев В.В., Баденко В.Л. и др. Оперативное и долгосрочное прогнозирование продуктивности посевов на основе массовых расчётов имитационной модели агроэкосистемы в геоинформационной среде (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2020. № 3. С. 451–467.
  31. Якушев В.В., Буре В.М., Якушев В.П. Стохастическое моделирование и оценка вероятности потерь продуктивности // Российская сельскохозяйственная наука. 2018. № 5. С. 77–80.
  32. Ананьев И.П., Зубец В.С., Белов А.В. и др. Мобильный комплекс для внутрипочвенного измерения и картирования агротехнологических характеристик пахотного слоя почвы // Информация и космос. 2015. № 2. С. 69–84.
  33. Блохин Ю.И., Белов А.В., Блохина С.Ю. Комплексная система контроля влажности почвы и локальных метеословий для интерпретации данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. № 3. С. 87–95.
  34. Блохин Ю.И., Якушев В.В., Блохина С.Ю. и др. 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. № 4. С. 164–178.
  35. Kour V.P., Arora S. Recent Developments of the IoT in Agriculture: A Survey // IEEE ACCESS. 2020. V. 8. P. 129924–129957.