

УДК 004.89

## СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССАМИ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Пугин А.М., Сaitова Г.А., Габдуллина Э.Р.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа,  
e-mail: gabdullina.er@ugatu.su

Статья посвящена разработке системы, предназначенной для поддержки принятия решений по управлению процессами точного земледелия в сельском хозяйстве. Использование цифровых технологий при реализации точного земледелия позволяет накапливать информацию о результатах дистанционного мониторинга с наземных датчиков, спутниковых снимков, аэрофотосъемок с беспилотных летательных аппаратов. Цифровые технологии позволяют накапливать данные лабораторной диагностики (почвенной, листовой). С одной стороны, появление большого количества разнородных данных о состоянии полей повышает информированность агронома, но, с другой стороны, возникают трудности анализа этих данных и принятия решений по управлению продуктивностью посевов. Для решения данной проблемы разрабатывается система поддержки принятия решений по управлению процессами точного земледелия с использованием цифровых технологий. Представлена структура системы, состоящая из подсистем мониторинга и принятия решений. Дано подробное описание каждой из подсистем. Данная система позволит формировать рекомендации для поддержки принятия решений агронома на основе методов машинного обучения, строить производственные карты заданий по внесению препаратов (удобрений и средств защиты растений), рассчитывать необходимые объемы и стоимость препаратов. Важной особенностью разрабатываемой системы является возможность встраивания правил поддержки принятия решений в бизнес-процессы агрохозяйств, использующих подход точного земледелия, что позволяет агрономам принять обоснованные и оперативные решения и сделать технологию возделывания сельскохозяйственных культур более эффективной и экономически выгодной.

**Ключевые слова:** цифровые технологии, дистанционный мониторинг, точное земледелие, система поддержки принятия решений

## DECISION SUPPORT SYSTEM FOR THE CONTROL OF PRECISION FARMING PROCESSES USING DIGITAL TECHNOLOGIES

Pugin A.M., Saitova G.A., Gabdullina E.R.

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, e-mail: gabdullina.er@ugatu.su

The article is devoted to the development of a system designed to support decision-making on the precision farming processes control in agriculture. The use of digital technologies in the implementation of precision farming makes it possible to accumulate information about the results of remote monitoring from ground sensors, satellite images, and aerial photography from unmanned aerial vehicles. Digital technologies make it possible to accumulate laboratory diagnostic data (soil, leaf). On the one hand, the emergence of a large amount of heterogeneous data on the state of the fields increases the awareness of the agronomist, but on the other hand, there are difficulties in analyzing these data and making decisions on crop productivity management. To solve this problem, a decision support system for controlling precision farming processes using digital technologies is being developed. The structure of the system, consisting of subsystems for monitoring and decision making, is presented. A detailed description of each of the subsystems is given. This system will make it possible to form recommendations to support the decision-making of an agronomist based on machine learning methods, build production maps of tasks for the application of drugs (fertilizers and plant protection products), calculate the required volumes and cost of drugs. An important feature of the developed system is the possibility of embedding decision support rules in the business processes of agricultural enterprises using the precision farming approach, which allows agronomists to make informed and prompt decisions and make crop cultivation technology more efficient and cost-effective.

**Keywords:** digital technologies, remote monitoring, precision farming, decision support system

В настоящее время в отрасли сельского хозяйства активно развиваются информационные технологии. Согласно аналитическим данным, мировой рынок программного обеспечения для точного земледелия в течение 2022–2027 гг. будет иметь среднегодовой темп роста 14% [1]. Столь высокий темп роста данной отрасли народного хозяйства напрямую связан с растущим использованием цифровых технологий в области точного земледелия.

Для повышения эффективности возделывания сельскохозяйственных культур

разрабатывается система поддержки принятия решений по управлению процессами точного земледелия с использованием цифровых технологий, предназначенная для формирования рекомендаций агрономам фермерских хозяйств.

### Материалы и методы исследования

Внедрение цифровых технологий осуществляется на всех этапах реализации системы точного земледелия: 1) на этапе сбора информации о хозяйстве, поле, культуре возделывания; 2) на этапе анализа информа-

ции и принятия решений; 3) на этапе выполнения решений в виде проведения соответствующих агротехнологических операций.

На этапе сбора информации в режиме реального времени применяются технологии дистанционного мониторинга различных сельскохозяйственных объектов. Технологии с наземными датчиками используются для передачи информации о содержании органических веществ, солей, влаги и т.д. в почве. Спутниковые технологии применяются для космической съемки крупных сельскохозяйственных объектов с большими площадями, в том числе имеющими труднодоступные и опасные участки. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), включающие устройства с фиксированным крылом (самолетного типа) и с вращающимся крылом (вертолетного типа, или квадрокоптеры), используются для аэрофотосъемки посевов с высокой степенью детализации на высотах от нескольких сотен метров до нескольких сантиметров: полученную информацию обрабатывают и преобразовывают в необходимые виды и формы для дальнейшего применения [2]. Спутниковые и авиационные технологии реализуют технологии дистанционного зондирования земель (ДЗЗ).

На этапе анализа информации по полученным аэрофотоснимкам создают не только точные цифровые карты полей в виде ортофотопланов, которые представляют собой план местности на точной геодезической основе, но и карты состояния посевов, позволяющие оценивать состояние растительности сельхозугодий. Применение ДЗЗ основывается на технологии мультиспектральной фотосъемки на определенных частотах электромагнитного спектра для захвата видимых и невидимых изображений растительности, характерным признаком состояния которой является спектральная отражательная способность, проявляющаяся в больших различиях в отражении излучения разных длин волн: в красной области спектра (0,6–0,7 мкм) расположен максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом растений, а в инфракрасной области (0,7–1,0 мкм) находится область наибольшего отражения клеточных структур листа.

Свойства отражающей способности растительности используются для получения вегетационных индексов, количество которых достигает около 150. Одним из наиболее известных является нормализованный относительный индекс растительности *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*), или вегетационный индекс, показывающий наличие и состояние раститель-

ности (относительную биомассу), вычисляемый по формуле:  $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ , где *NIR* – отражение в ближней инфракрасной области спектра; *RED* – отражение в красной области спектра. *NDVI* – это стандартизированный индекс, или числовой показатель качества и количества растительности [3–6].

На этапе выполнения решений результаты анализа в виде электронных карт заданий по проведению полевых работ передаются аграриям для установки на бортовые компьютеры сельскохозяйственной техники.

Для поддержки сельхозпроизводителей разработано большое число программных приложений, которые предназначены для управления сельхозпредприятием и в основном работают либо как простые информационные системы регистрации, сбора, хранения информации и формирования отчетов для отдельных небольших хозяйств, либо как громоздкие информационно-аналитические системы для крупных агропредприятий. Однако такие системы, хотя и значительно облегчают управление агропредприятиями, не позволяют в полной мере решить задачи специалистов-агрономов, которые должны оценивать состояние большого количества полей сельхозкультур по множеству различных показателей, полученных на основе цифровых технологий [5].

Российскими и зарубежными учеными разрабатываются информационно-аналитические и интеллектуальные системы, предназначенные для эффективной работы агропредприятий. Широко известны такие информационно-аналитические системы, как Агросигнал, ГИС Панорама АГРО, комплект программ «АРМ агронома», АГРО-СОФТ, SkyScout, OneSoil, Cropio, АО «Геомир», ЦПС: Агроуправление, Поле-Плюс, которые на основе инструментов цифровизации сельского хозяйства обеспечивают регистрацию, сбор, анализ и формирование отчетов по различным направлениям деятельности агропредприятий.

Значительно меньше существует разработок систем поддержки принятия решений в процессах управления посевами. Одной из таких разработок является программа *Adapt-N*, созданная в Корнельском университете компанией *Agronomic Technology Corp*, которая строит модели погоды, почвы для обеспечения азота и при этом строит продукционные правила «если – то». Несмотря на то, что существующие системы предназначены для управления агропредприятиями с помощью цифровых технологий и накопления больших массивов данных, при этом, однако, эти системы не выполняют роль системы поддержки

принятия решений по повышению продуктивности посевов.

При сравнительном анализе технико-экономических характеристик информационно-аналитических систем было выявлено:

1) большинство представленных на рынке информационно-аналитических систем являются зарубежными разработками, что увеличивает долю риска их использования;

2) существующие системы предназначены для управления крупными агропредприятиями с помощью цифровых технологий и накопления больших массивов данных, поэтому имеют сложный пользовательский интерфейс, излишне громоздкий для агронома небольшого фермерского хозяйства;

3) существующие системы не осуществляют поддержки принятия решений для агрономов сельхозпредприятий по управлению как продуктивностью посевов, так и процессами точного земледелия с использованием цифровых технологий в целом.

#### *Разработка системы поддержки принятия решений*

Для решения данной проблемы разрабатывается система поддержки принятия решений (СППР) по управлению процессами точного земледелия с использованием цифровых технологий, которая представляет собой сложную систему, включающую реализацию всех трех этапов точного земледелия.

Элементы цифровизации СППР, представленные на рис. 1, включают элементы сбора данных с помощью технологий дистанционного мониторинга (датчики, спутники, БПЛА), которые передаются в центр накопления и обработки данных для оптимизации решений

делей, описывающих сельскохозяйственные объекты.

Советующая аналитическая система необходима для анализа и сопоставления большого объема разнородной информации и выдаче рекомендаций по соблюдению технологий возделывания культур, срокам внесения удобрений, срокам мониторинга для выявления дефицитов микроэлементов и т.д. Разработка СППР осуществляется на основе методов искусственного интеллекта и технологий *Big Data* [8], технологий построения цифровых моделей полей и технологий ДЗЗ.

Структура СППР по управлению процессами точного земледелия с использованием цифровых технологий (рис. 2) включает две подсистемы.

Первая подсистема СППР соответствует этапу сбора информации при реализации системы точного земледелия с помощью системы мониторинга. Структура подсистемы мониторинга имеет 6 подсистем:

1) подсистема формирования истории поля представляет собой электронный аналог полевого журнала, который обычно ведет агроном. Данная подсистема СППР позволяет создавать истории полей на основе накопленной информации о возделываемой культуре, метеословиях, состоянию поля, о количестве и качестве семян, вносимых удобрениях, пестицидах, об урожайности поля и т.д.;

2) подсистема «сенсорные датчики» накапливает данные, переданные с датчиков метеорологического мониторинга (температуры, влажности почвы, воздуха), измерения свойств растений и травостоев, определения засоренности, пораженности болезнями и вредителями и др., установленных на полях;



*Рис. 1. Элементы цифровизации системы поддержки принятия решений с использованием дистанционных технологий*



*Рис. 2. Структура СППР по управлению процессами точного земледелия с использованием цифровых технологий*

3) в подсистеме «результаты анализа почвы» накапливаются данные агрохимического обследования почвы для агрохимической и эколого-токсикологической оценки сельхозугодий: содержание гумуса (определяется плодородие почвы), степень кислотности, засоленности, содержание фосфора, калия, азота, микроэлементов и др.;

4) подсистема «технология возделывания» содержит записи об агротехнологических методах и приемах возделывания сельхозугодий – обработки семян, посадки, различных подкормок, обработок, внесения удобрений и препаратов для питания растений, пестицидов для уничтожения вредителей, десикантов для ускорения созревания растений и т.д. В данной подсистеме хранятся записи о состоянии посевов в различные фенологические фазы роста растений, например в случае пшеницы – в фазах кушения стебля и образования флагового листа;

5) в подсистеме «результаты дистанционного мониторинга полей NDVI» хранятся значения величин вегетационных индексов, измеренные либо в установленные фенологические фазы роста посевов, либо при появлении проблемных зон на полях; при этом фиксируются либо средние значения вегетационных индексов по полю, либо строятся частотные таблицы значений индексов;

6) подсистема «результаты листовой диагностики Фитоскан» включает данные, полученные с помощью полевой лаборатории «Фитоскан», позволяющей определить

физиологическое состояние растений; выявить дисбаланс макро-, мезо- и микроэлементов; определить возможные потери продуктивности растений; подобрать удобрения для внекорневой подкормки, максимально отвечающие потребностям растений в конкретных почвенно-климатических условиях при нормальном уровне физиологических процессов.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Подсистема принятия решений СППР необходима для формирования решений по различным аспектам точного земледелия; содержательно решения представлены в двух формах.

Первый вид решений – это рекомендации в виде продукционных правил «если – то», которые формируются как на основе накопленных данных с помощью методов машинного обучения, так и с помощью экспертных знаний в области агрохимических исследований. Рекомендации предназначены для поддержки принятия решений агронома по севообороту, технологии возделывания, дифференцированному внесению удобрений с целью достижения плановой урожайности посевов.

Второй вид решений строится с помощью специальных программных модулей:

1) программный модуль «карты заданий» необходим для построения карт для дифференцированного внесения семян или удобрений, загружаемых на бортовые

компьютеры сельхозтехники. Карты производственных заданий строятся на основе карт продуктивности полей за несколько лет, карт заданных вегетационных индексов;

2) программный модуль «выбор и расчет количества препаратов» представляет собой калькулятор для расчета общего количества необходимых удобрений, пестицидов или биопрепаратов и их общей стоимости на основе карт продуктивности полей за несколько лет или карт определенных вегетационных индексов.

Важной особенностью разрабатываемой СППР является возможность встраивания правил поддержки принятия решений в бизнес-процессы агрохозяйств, использующих подход точного земледелия, что позволяет агрономам принять обоснованные и оперативные решения, которые позволят сделать технологию возделывания сельскохозяйственных культур более эффективной и экономически выгодной за счет повышения урожайности и оптимального использования удобрений и вносимых препаратов.

### Заключение

Функциональные возможности СППР по управлению процессами точного земледелия с использованием цифровых технологий позволяют:

– сохранять данные о состоянии окружающей среды, данные ДЗЗ, полученные с использованием космических спутников и БПЛА, данные о результатах агрохимического анализа почвы и листовой диагностики;

– создавать базу знаний на основе анализа ретроспективных данных о результатах возделывания сельскохозяйственных культур с использованием технологий *Big Data*;

– формировать рекомендации для поддержки принятия решений агронома; строить производственные карты заданий по внесению препаратов, рассчитывать общее количество необходимых препаратов и их стоимость.

Таким образом, разрабатываемая СППР позволит обеспечить не только цифровизацию технологических процессов возделывания сельскохозяйственных культур

при внедрении технологий точного земледелия, но и на основе методов машинного обучения формировать рекомендации, предназначенные для оперативного принятия решений по управлению продуктивностью посевов.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-08-00796 «Интеллектуальное управление промышленным комплексом как динамическим многоагентным объектом на основе методов когнитивного моделирования и машинного обучения».*

### Список литературы

1. Материалы отчета аналитической компании Mordor Intelligence «Рынок программного обеспечения для точного земледелия: рост, тенденции, влияние COVID-19 и прогнозы (2022–2027 гг.)». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/precision-farming-market> (дата обращения: 19.05.2022).
2. Труфляк Е.В., Курченко Н.Ю., Тенекоев А.А., Якушев В.В. Точное сельское хозяйство: учебник для вузов / под ред. Е.В. Труфляка. СПб.: Лань, 2021. 512 с.
3. Panda S.S., Ames D.P., Panigrahi S. Application of Vegetation Indices for Agricultural Crop Yield Prediction Using Neural Network Techniques. Remote Sensing. 2010. No. 2. P. 673–696. DOI: 10.3390/rs2030673.
4. Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Application of vegetation indexes to assess the condition of crops. Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii. 2020. Vol. 14. No. 2. P. 4–11. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-4-11.
5. Подлипов В.В., Щедрин В.Н., Бабичев А.Н., Васильев С.М., Бланк В.А. Экспериментальное определение влажности почвы по гиперспектральным изображениям // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 5. С. 877–884. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-42-5-877-884.
6. Буховец А.Г., Семин Е.А., Костенко Е.И., Яблонская С.И. Моделирование динамики вегетационного индекса NDVI озимой пшеницы в условиях ЦФО // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 2 (57). С. 186–199. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2018.2.186.
7. Сaitova Г.А., Габдуллина Э.Р., Гайнетдинова Е.К. Информационные технологии при анализе и контроле состояния посевов в сельскохозяйственной отрасли // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2022): труды Международной научно-технической конференции / Под ред. С.А. Прохорова. Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2022. С. 440–443.
8. Saitova G., Elizarova A. Intelligent Data Processing and Analysis During the Engine Test // 8th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS) 2020. Proceedings of the 8th scientific conference on information technologies for intelligent decision making support (ITIDS 2020) 174. P. 167–171. DOI: 10.2991/aisr.k.201029.032.