



Применение БПЛА для мониторинга и ухода за посевами зерновых культур

Виктор Валентинович Альт^{1,2},
 доктор технических наук, профессор,
 академик Российской академии наук,
 e-mail: victoryalt@yandex.ru;
Алексей Алексеевич Солошенко^{1,2},
 младший научный сотрудник,
 e-mail:alex.typeface@gmail.com;
Светлана Павловна Исакова¹,
 старший научный сотрудник,
 e-mail:isakova.s.p@yandex.ru;

Олег Федорович Савченко¹,
 кандидат технических наук,
 ведущий научный сотрудник,
 e-mail:sof-oleg46@yandex.ru;
Олег Владимирович Елкин¹,
 кандидат технических наук,
 ведущий научный сотрудник,
 e-mail:Oleg348@yandex.ru

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Краснообск, Новосибирская область, Российская Федерация;

²Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

Реферат. Отметили, что традиционные методы наблюдения за посевами относятся к трудоемким, затратным по времени и стоимости, а применение спутниковых снимков ограничивается погодными условиями, низким разрешением и большим интервалом между съемками. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет оперативно проводить мониторинг, своевременно обнаруживать отклонения и нарушения в развитии растений. (*Цель исследования*) Разработать информационную модель оперативного мониторинга с применением БПЛА и поддержки принятия решений. (*Материалы и методы*) К ключевым операциям ухода за посевами относятся дифференцированное опрыскивание с учетом карты обрабатываемых зон, точечное и зональное внесение удобрений по значениям индексов NDVI/NDRE, выявление болезней и вредителей, а также прогнозирование урожайности на основе статистической обработки временных рядов. Проведен системный и контент-анализ существующих материалов. Учитывая значительный объем и разнообразие данных, получаемых с БПЛА, особенно при производстве зерновых культур, обосновали выбор метода информационного моделирования. (*Результаты и обсуждение*) Выделены преимущества и недостатки применения БПЛА в сельском хозяйстве. Показали, что большой объем разнообразной информации с БПЛА необходимо собирать, систематизировать и качественно обрабатывать. Предложена схема информационной модели оперативного мониторинга посевов и поддержки принятия решений в точном земледелии на основе данных с БПЛА. В схеме предусмотрены блоки получения и предварительной обработки данных, вычислительный модуль для выполнения математического анализа с применением методов моделирования, машинного обучения и экспертной системы для выдачи рекомендаций по проведению агротехнических мероприятий. (*Выходы*) Обосновали, что внедрение БПЛА при грамотной организации процесса позволит снизить затраты на ресурсы топлива, воды, удобрений и пестицидов. Кроме этого, применение БПЛА будет способствовать повышению урожайности и эффективности использования трудовых ресурсов за счет точного мониторинга, автоматизации и оптимизации агротехнических мероприятий.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, мониторинг, получение и обработка данных, информационная модель, растениеводство, уход за посевами.

Для цитирования: Альт В.В., Солошенко А.А., Исакова С.П., Савченко О.Ф., Елкин О.В. Применение БПЛА для мониторинга и ухода за посевами зерновых культур // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19. N4. С. 49-56. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-49-56. EDN: VWQHJC.

Scientific article

Use of UAVs in Agriculture for Monitoring and Management of Cereal Crops

Viktor V. Alt^{1,2},
 Dr.Sc.(Eng.), professor,
 member of the Russian Academy of Sciences,
 e-mail: victoryalt@yandex.ru;

Aleksei A. Soloshenko^{1,2},
 junior researcher,
 e-mail: alex.typeface@gmail.com;

Svetlana P. Isakova¹,
 senior researcher,
 e-mail: isakova.s.p@yandex.ru;
Oleg F. Savchenko¹,
 Ph.D.(Eng.), leading researcher,
 e-mail: sof-oleg46@yandex.ru;

Oleg V. Elkin¹,
 Ph.D.(Eng.), leading researcher,
 e-mail: Oleg348@yandex.ru

¹Siberian Federal Scientific Centre of Agro Biotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russian Federation;

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. Traditional crop monitoring methods are labor-intensive, time-consuming, and costly, while satellite imagery is constrained by dependence on weather conditions, low spatial resolution, and infrequent revisit times. In contrast, unmanned aerial vehicles (UAVs) offer rapid, high-resolution monitoring that enables the timely detection of anomalies and disruptions in crop development. (*Research purpose*) To develop an information model for real-time crop monitoring and decision support based on data collected by unmanned aerial vehicles (UAVs). (*Materials and methods*) Data obtained from UAVs support key crop management operations, including variable-rate spraying based on treatment zone maps, site-specific and zonal fertilization guided by the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Normalized Difference Red Edge Index (NDRE), early detection of diseases and pests, and yield forecasting through statistical analysis of time series. A systematic content analysis of existing literature was conducted. Given the large volume and diversity of associated with UAV application in agriculture, particularly in cereal crop production, an appropriate information modeling approach was identified and substantiated. (*Results and discussion*) The advantages and limitations of UAV use were identified. It was shown that UAV-based agricultural monitoring generates vast and diverse datasets that require systematic collection, structuring, and efficient processing. The study substantiates and proposes an information model scheme for real-time crop monitoring and decision support in precision agriculture. The model includes modules for data collection and preprocessing, a computational module for mathematical analysis incorporating modeling and machine learning, and an expert system that generates recommendations for agro-technical interventions. (*Conclusions*) The study demonstrates that the effective integration of UAVs into crop management processes can reduce the consumption of fuel, water, fertilizers, and pesticides. Additionally, the use of UAVs increases yield potential and improves labor efficiency by enabling precise monitoring, automation, and optimization of agro-technical operations.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), monitoring, information model, crop production, crop management.

For citation: Alt V.V., Soloshenko A.A., Isakova S.P., Savchenko O.F., Elkin O.V. Use of UAVs in agriculture for monitoring and management of cereal crops. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 49-56 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-49-56. EDN: VWQHJC.

В области систем точного земледелия постоянно разрабатываются и совершенствуются новые аппаратные средства для мониторинга посевов, хранения и анализа данных, а также для выполнения технологических операций по уходу за растениями. Аэрофотосъемка с использованием БПЛА – наиболее простой инструментальный и действенный метод получения точных данных о контуре и площади полей, состоянии почв и растений. Оснащение БПЛА соответствующими программно-аппаратными средствами дает возможность собрать информацию о изучаемом объекте, создать ортофотоплан, 3D-модель рельефа, карту высот и т.д. Контроль процессов в растениеводстве позволяет своевременно принимать решения по их корректировке [1-3].

В США, странах Европы, Бразилии, Аргентине технологии с применением БПЛА широко внедряются в агросекторе, однако активнее всего в Китае, который занимает лидирующие позиции по произ-

водству дронов. В России также проводятся работы по внедрению БПЛА в сельскохозяйственное производство [4]. Среди фирм, предоставляющих услуги в сфере применения агродронов, можно выделить: ООО «Агро Технологии» (Ростов-на-Дону), ООО «Совзонд» (Москва), ООО «ХиЗаРа» (Барнаул), ООО «АгроДронГрупп» (Сколково), ГК «Геоскан» (Санкт-Петербург, Екатеринбург), «Беспилот Агро» (Воронеж), ООО «Агродрон-62» (Рязань), AgroScout и Flyseeagro (Краснодар), «BBC-Агро» (Калужская область) и ряд других. Следует отметить, что, несмотря на появление в последнее время множества компаний-разработчиков, запчасти для БПЛА часто используются импортные [5].

В сибирском регионе услуги по агромониторингу предоставляют ряд компаний. Например, ГК «Смотрим с неба» (Томск) организовала школу управления агродронами и поставила на рынок уже 300 дронов собственного производства (<https://smotrimsneba.ru/> дата обращения: 07.08.2025).

Лаборатория беспилотных авиационных систем (БАС) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) на Международном форуме «Технопром-2023» демонстрировала свою модель БПЛА «НТ-30 Агро» (<https://форумтехнопром.рф/> дата обращения: 07.08.2025). Компания «Умные дроны» (Новосибирск) разработала разведывательный агродрон со встроенным модулем машинного обучения (<https://smotrimsneba.ru/> 07.08.2025). Несколько компаний предлагают услуги ухода за посевами. Например, ООО «Агро-Сибирь» (Алтайский край) осуществляет демо-практику обработки подсолнечника агродронами XAG [6]. Компания «Галекс» (Алтайский край) предоставляет услуги по обработке с помощью БПЛА подсолнечника на площади 300 га (www.galex.ru/news/7786/ дата обращения: 07.08.2025).

Дроны делятся на два класса: самолетного типа (с неподвижным крылом) и мультироторные (коптеры). БПЛА самолетного типа могут облететь за один полет территорию примерно в 10 раз большую, чем коптеры. Однако при высокой скорости снижается разрешающая способность камер и ухудшается качество снимков [7].

БПЛА используется для проведения нескольких ключевых операций ухода за посевами.

Дифференцированное опрыскивание. БПЛА, оснащенные системами точного дозирования и мультиспектральными или RGB-камерами, способны выполнять операции внесения пестицидов и гербицидов по картам навигации с учетом плотности растительности и наличия вредителей [8]. При оптимальных параметрах полета (высота 1,5-2,5 м, скорость 2-4 м/с) [9, 10] достигается равномерное распределение капель на всех уровнях растительного покрова, что обеспечивает контролируемую плотность осаждения (например, 46-54 капли/см²) [11] и высокую эффективность борьбы с вредителями (до 92% контроля через 7-10 дней) [12].

Точечное и зональное внесение удобрений. БПЛА самолетного типа и мультироторные, оборудованные баками для жидких или гранулированных агрохимикатов, осуществляют целенаправленное внесение удобрений. По данным аэросъемки и вычисленным вегетационным индексам (NDVI, NDRE) формируются карты предписаний, согласно которым обрабатываются только проблемные зоны, что снижает расход удобрений до 30% без потери урожайности [13].

Мониторинг и уход за сельскохозяйственными культурами. Внедрение БПЛА для этих целей является значимым этапом технологического прогресса. Традиционные методы наблюдения за развитием растений трудоемкие и затратные, например обследование полей агрономами по нормативным маршрутам передвижения. Исполь-

зование спутниковых снимков из-за неблагоприятных погодных условий, низкого пространственного разрешения и большого интервала до повторного посещения затрудняет своевременный и детальный мониторинг.

При оценке всхожести сельскохозяйственных культур и оперативного мониторинга состояния посевов с помощью БПЛА возможно в течение нескольких часов обследовать посевы, выявить проблемные участки всходов и спланировать необходимые работы. После первичного обследования и оперативно принятых мер можно проводить дальнейшие наблюдения для контроля качества выполнения этих работ и фиксировать изменения в состоянии посевных культур.

Мониторинг болезней и вредителей сельскохозяйственных культур с применением дронов широко распространен. На основе данных с БПЛА, оснащенного мультиспектральными и RGB-датчиками, выявляются сорняки, болезни и наличие вредителей растений в полях. В результате обработки данных с использованием совокупности цифровых технологий определяются территории и количество химикатов для борьбы с обнаруженными заражениями [14]. При этом достаточно выявить очаги заражения и с БПЛА дифференцированно выполнить эту операцию. Аналогично согласно алгоритму технологического процесса осуществляется дифференцированное внесение удобрений и ускорителей роста растений, что позволяет существенно снизить затраты на выращивание сельхозпродукции [15].

Прогнозирование урожайности. По изображениям с мультикоптерных дронов участков полей с помощью передовых информационных технологий – методов искусственного интеллекта, когнитивного моделирования, моделирования на основе искусственных нейронных сетей, а также классификации изображений и распознавания образов можно непосредственно оценить и спрогнозировать уровень продуктивности агрокультур [16].

БПЛА, оснащенные мультиспектральными камерами с высокой четкостью изображения, позволяют точно определять проблемные участки поля. БПЛА оборудуются также различными датчиками, системами спутниковой навигации, малогабаритными бортовыми компьютерами. С точки зрения эффективности использования БПЛА особое значение имеет наличие развитого прикладного программного обеспечения, основанного на интеграции современных информационных технологий. В связи с накоплением большого количества разнообразной информации, которую нужно целенаправленно собирать, систематизировать и качественно обрабатывать, очевидна целесообразность формирования информационной модели.

Цель исследования. Разработать информационную модель процесса оперативного мониторинга и поддержки принятия решений в рамках системы точного земледелия при выполнении технологических операций с применением БПЛА.

Материалы и методы. В исследовании использовался комплекс методов, включающий информационные и аналитические подходы, системный анализ, а также контент-анализ материалов о применении БПЛА. С учетом значительного объема и разнообразия данных был обоснован выбор метода информационного моделирования.

Информационная модель представляет собой структурированное описание существенных свойств объекта и взаимосвязей. Модель формализована в соответствии с поставленной целью исследования и зафиксирована на информационном носителе. Данный подход позволяет обеспечить точность и воспроизводимость результатов, а также способ-

ствует их интеграции в существующие информационные системы [17].

Результаты и обсуждение. Рассмотрены преимущества и недостатки применяемых в настоящее время БПЛА (*таблица*), отмеченные также в работах других авторов [18, 19]. Окончательный вывод о использовании БПЛА в тех или иных операциях должен принимать производитель продукции по предложению инженеров и агрономов с учетом результатов мониторинга и средств ухода за посевами.

Установлено также, что вегетационные индексы на стадиях выметывания и появления колоса последовательно предсказывают потенциал урожайности зерновых. Для оценки урожайности пшеницы наиболее важной оказалась фаза выметывания. Это указывает на то, что не все стадии роста одинаково информативны для прогнозирования урожайности. Таким образом, сосредоточение сбора данных на

Таблица

Table

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАКТИ ПРИМЕНЕНИЯ БПЛА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ
BENEFITS AND LIMITATIONS OF UAV USE IN AGRICULTURE

Преимущества	Недостатки
Повышение эффективности: <ul style="list-style-type: none"> автоматизация задач, таких как мониторинг и уход за посевами, значительно сокращает время и трудозатраты; дроны могут обрабатывать сотни гектаров в день; маневренность позволяет работать в труднодоступных местах; автономность полетов дает возможность минимизировать человеческие ошибки 	Технические ограничения: <ul style="list-style-type: none"> ограниченная продолжительность полета (20-40 мин), малая грузоподъемность, а также чувствительность к погодным условиям снижают эффективность операций; сильный ветер или осадки могут не только прервать работу, но и повредить технику; из-за частой замены батарей прерывается рабочий процесс, особенно на больших полях (актуально для малогабаритных БПЛА и мультироторов)
Переход к системе точного земледелия: <ul style="list-style-type: none"> высокоточное дозирование и распыление удобрений и пестицидов сокращают расход химикатов до 30% и минимизирует их воздействие на окружающую среду; благодаря GPS/GNSS навигации и возможности регулировать размер капель обеспечивается равномерное покрытие. Это дает экономию средств и снижает химический сток в водоемы и почву 	Экологические и социальные аспекты: <ul style="list-style-type: none"> шумовое загрязнение окружающей среды, оказывающее влияние на дикую природу; электронные отходы от отработанных батарей; сопротивление со стороны фермеров к переходу на новые технологии является важным негативным фактором; демографические барьеры и отсутствие цифрового образования могут замедлять внедрение технологий в некоторых регионах
Улучшенный мониторинг: <ul style="list-style-type: none"> мультиспектральные, гиперспектральные и тепловизионные сенсоры выявляют проблемы (болезни, вредителей, засуху) на ранних стадиях, до их визуального обнаружения; сбор данных в реальном времени позволяет переходить от реактивного к проактивному управлению, предотвращая потери урожая; дроны также используются для мониторинга состояния пастбищ и здоровья скота 	Риски безопасности: <ul style="list-style-type: none"> столкновения, падения и физические травмы БПЛА, а также уязвимость к кибератакам (взлом, спуфинг GPS) требуют комплексных мер защиты; кибератаки могут привести к краже данных или потере контроля над аппаратом, что критично для ведения точного земледелия; необходимость обеспечения физической безопасности операторов и окружающих людей представляет собой серьезную проблему
Экономические выгоды: <ul style="list-style-type: none"> снижение затрат на топливо, рабочую силу, химикаты, повышение урожайности позволяют сократить срок окупаемости инвестиций (<i>ROI</i>) до 1,5–3 лет для крупных предприятий (без учета скрытых издержек); стоимость обработки гектара с помощью дрона значительно ниже по сравнению с традиционными методами; сокращение потерь урожая из-за отсутствия вытаптывания животными вносит свой вклад в повышение общей рентабельности 	Высокие затраты: <ul style="list-style-type: none"> первоначальная стоимость дронов (~780 тыс. руб.– 4,674 млн руб.), ПО и комплектующих, а также расходы на обслуживание и замену батарей являются барьером для многих хозяйств; стоимость одной батареи может достигать ~235 тыс. руб., а ее жизненный цикл ограничен 2-3 годами; ежегодные затраты на обслуживание могут составлять 10-15% от первоначальной стоимости дрона
Экология и безопасность: <ul style="list-style-type: none"> снижение химического загрязнения, уплотнения почвы и выбросов углерода; минимизируется контакт работников с вредными пестицидами; отсутствие тяжелой техники позволяет сохранить структуру почвы и биоразнообразие, в том числе полезных насекомых-опылителей; снижение рисков для здоровья фермеров как важное социальное преимущество 	Правовое регулирование и контроль: <ul style="list-style-type: none"> сложное, постоянно меняющееся законодательство в области учета и контроля использования беспилотных гражданских воздушных судов; необходимость получения лицензий и ограничения на полеты (высота, зоны) создают юридические трудности

критических фенологических окнах позволяет получать наиболее точные и своевременные прогнозы урожайности, оптимизировать принятие решений по уборке, тем самым повышать эффективность использования информационных материалов [20].

Проведен всесторонний анализ функциональных возможностей использования БПЛА в производстве зерновых культур, а также различных информационных технологий, обеспечивающих целенаправленный сбор, систематизацию и обработку данных, сопровождающих технологические процессы. На основе полученных результатов разработана

схема информационной модели мониторинга и поддержки принятия решений с применением БПЛА. Данная схема представлена на *рисунке*.

Исходным пунктом модели является объект, т.е. поле или участок, для которого определяются ключевые атрибуты: размер/площадь, состав почвы, культура (растение), агроклиматические условия и используемый парк техники. Эти параметры являются исходными для всех последующих действий и анализа.

Данные об объекте поступают из различных источников: беспилотных летательных аппаратов; спутников; наземных датчиков; метеостанций; их архивных

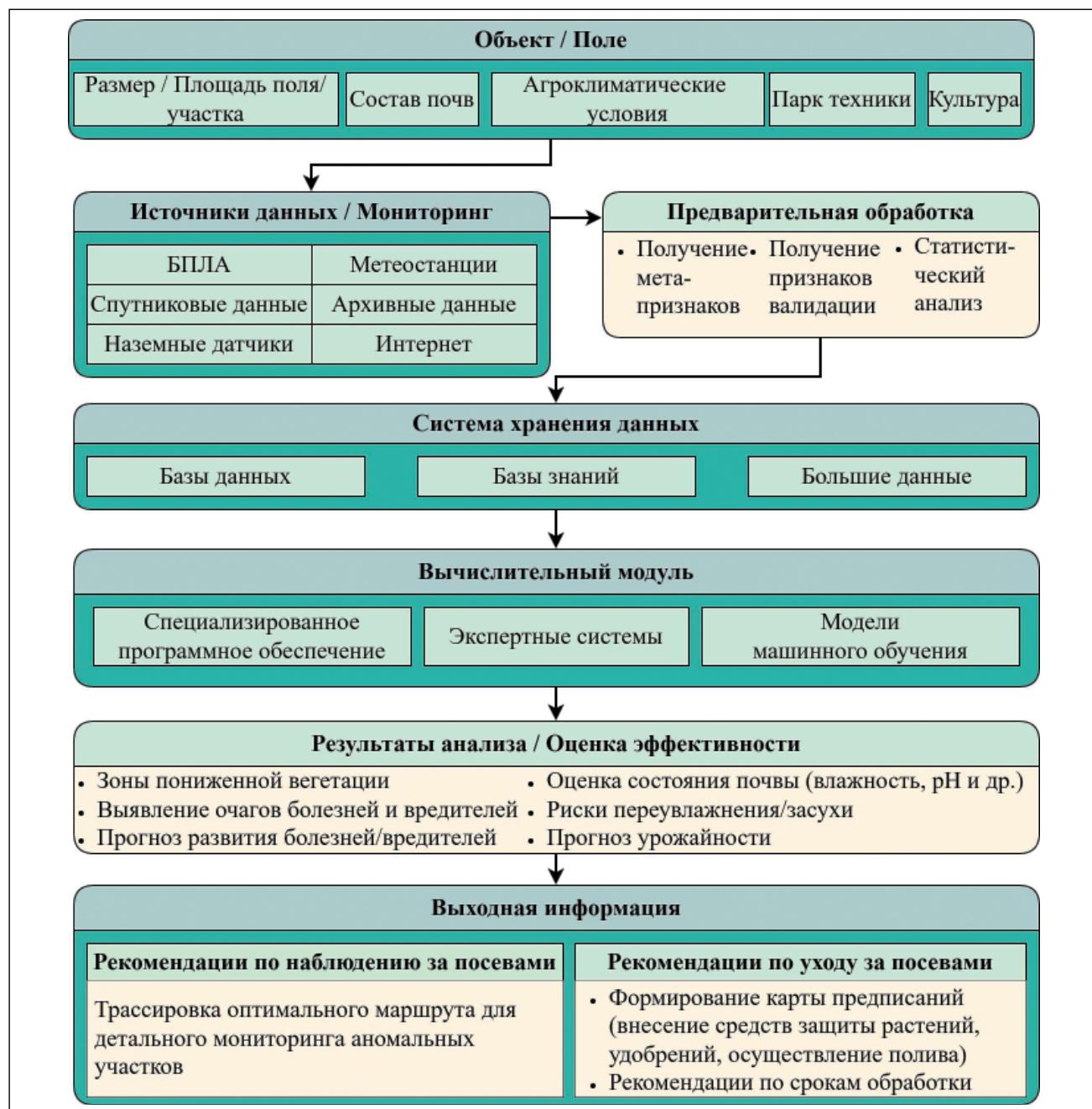


Рисунок. Схема информационной модели оперативного мониторинга и поддержки принятия решений на основе данных с БПЛА

Figure. Schematic representation of an information model for UAV-based operational monitoring and decision support

данных; Интернета. Каждый источник предоставляет уникальные пространственные, климатические или исторические сведения о поле и состоянии посевов.

Информация проходит этап предварительной обработки, которая включает:

- получение метапризнаков из визуально-графической информации (ширина и высота, количество пикселей на дюйм, время и географические координаты съемки);

- валидацию данных (получение признаков и приведение к единообразному виду согласно стандартизации данных);

- извлечение признаков (получение данных с объекта для их сохранения в Системе хранения данных).

Обработанные сведения накапливаются в хранилище различными методами хранения для эффективного использования элементами вычислительного модуля:

- базы данных (количественные данные с датчиков, метеостанций, архивные данные);

- базы знаний (информация, поступающая из Интернета);

- большие данные (датасеты, формирующиеся с помощью БПЛА и спутниковых данных).

Этим обеспечивается централизованный доступ к дальнейшим вычислениям и анализу.

Ключевой этап обработки данных осуществляется в вычислительном модуле и включает работу:

- специализированного программного обеспечения (готовые программные решения, модели и алгоритмы для анализа и прогнозирования);

- моделей машинного обучения (обработка данных, создание и тестирование прогнозных моделей);

- экспертных систем (использование знаний и логик агрономов, интеграция правил и факторов, влияющих на принимаемые решения).

На выходе модели формируются результаты анализа/оценка эффективности в виде следующих данных:

- зоны пониженной вегетации и карты повторного обследования;

- карты предписаний (СЗР, удобрения, полив и др.);

- выявление очагов болезней и вредителей;

- прогноз развития болезней, вредителей и рисков (в том числе погодных);

- оценка состояния почвы, уровня питания, густоты посевов;

- рекомендации по срокам и способам обработки;

- прогноз урожайности и анализ динамики изменений и т.д.

По результатам анализа формируется выходная информация. Если требуется дополнительный мониторинг аномальных участков, то предлагается оптимальный маршрут облета для точечного наблюдения только таких участков. При необходимости ухода за посевами формируются карты предписаний (внесе-

ние средств защиты растений, удобрений, осуществление полива) и рекомендации по срокам обработки.

Полученные данные предназначены для обеспечения информационной поддержки при принятии решений конечным пользователем. На основе анализа и интерпретации этих данных пользователь формирует стратегию агротехнических мероприятий по уходу за посевами.

Таким образом, в информационной модели оперативного мониторинга и поддержки принятия решений на основе данных с БПЛА показан сквозной поток информации от сбора и первичной обработки данных до получения аналитических и прогнозистических результатов для оперативного принятия научно-обоснованных решений при выполнении технологических операций.

Выводы. Проведен анализ, выявлены преимущества и недостатки применения БПЛА при мониторинге и уходе за посевами.

Показана возможность перехода к более точному ведению земледелия как можно большего количества хозяйств за счет получения с помощью БПЛА непосредственно визуально информацию в режиме реального времени с охватом больших площадей, оценивать воздействие природных факторов на различные культуры, выявлять отклонения и нарушения в развитии растений, проводить обработку посевов, а также осуществлять своевременную оценку качества выполненных работ.

Разработана схема информационной модели оперативного мониторинга посевов и поддержки принятия решений в точном земледелии на основе данных с БПЛА. Схема состоит из блоков получения данных, их предварительной обработки и вычислительного модуля, включающего математический анализ с применением моделирования, машинного обучения и экспертной системы.

Внедрение БПЛА в технологические операции сельскохозяйственного производства при грамотной организации процесса позволит снизить затраты на ресурсы топлива, воды, удобрений и пестицидов. Это способствует повышению урожайности и эффективности использования трудовых ресурсов за счет точного мониторинга, автоматизации и оптимизации агротехнических мероприятий. Кроме того, применение БПЛА позволит улучшить конкурентоспособность растениеводческого хозяйства.

В дальнейшем планируется усовершенствование информационной модели, в том числе ее внедрение и тестирование в реальных условиях для оценки эффективности и корректности обработки данных и обратной связи, а также совершенствование алгоритмов машинного обучения и экспертных систем (включая глубокое обучение) для повышения точности прогнозов урожайности, выявления болезней и вредителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хабарина Д.С., Тишанинов И.А. Анализ применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) различного типа в сельском хозяйстве // *Наука без границ*. 2021. N4 (56). С. 78-83.
2. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К., Захарова Н.И. Развитие систем управления полетом и средств аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 11-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
3. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К. История развития систем управления беспилотных воздушных судов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N3. С. 4-15. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
4. Старовойтов С.И., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Личман Г.И. Технические системы цифрового контроля качества обработки почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. N14(1). С. 16-21. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21.
5. Урасова А.А., Глезман Л.В., Федосеева С.С. Применение беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве РФ: оценка региональной популярности потребительских предпочтений // *Экономика региона*. 2023. Т. 19(4). С. 1146-1160. DOI: 10.17059/ekon.reg.2023-4-15.
6. Ковалев А.С., Литвинов А.А. Опыт фунгицидной обработки подсолнечника агродронами XAG в ООО «Агро-Сибирь» // *Аграрная политика*. 2025. Т. 1. N2. 44-47.
7. Zhang R., Hewitt A., Li L. et al. Editorial: advanced technologies of UAV application in crop pest, disease and weed control. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. 1-3. DOI: 10.3389/fpls.2023.1253841.
8. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Перспективы развития методов и технических средств защиты сельскохозяйственных растений // *Агронженерия*. 2021. N1(101). С. 26-35. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
9. Meng Ya., Zhong W., Liu Yu et al. Droplet distribution of an autonomous UAV-based sprayer in Citrus Tree Canopy. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2203. 2. DOI: 10.1088/1742-6596/2203/1/012022.
10. Lan Y., Qian S., Chen S. et al. Influence of the downwash wind field of plant protection UAV on droplet deposition distribution characteristics at different flight heights. *Agronomy*. 2021. Vol. 11(12), 2399. 1-13. DOI: 10.3390/agronomy15010159.
11. Gibbs J., Peters T.M., Heck L.P. Comparison of droplet size, coverage, and drift potential from UAV application methods and ground application methods on row crops. *Trans ASABE*. 2021. Vol. 64(3). 819-828. DOI: 10.13031/trans.14121.
12. Subramanian K.S., Pazhanivelan S., Srinivasan G. et al. Drones in insect pest management. *Frontiers in Agronomy*. 2021. Vol. 3. 1-12. DOI: 10.3389/fagro.2021.640885.
13. Guebsi R., Mami S., Chokmani K. Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges. *Drones*. 2024. Vol. 8(11). 686. 1-30. DOI: 10.3390/drones8110686.
14. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В., Курбанов Р.К. Технические средства для химической защиты растений: состояние и перспективы развития // *Агронженерия*. 2022. Т. 24. N3. С. 12-18. DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-12-18.
15. Бершицкий Ю.И., Сайфетдинов А.Р., Максименко А.А., Елфимов Д.А. Экономическая эффективность применения беспилотных летательных аппаратов как элемента цифровизации растениеводства // *Вестник Академии знаний*. 2024. Т. 2(61). С. 66-69. EDN: DDRCKH.
16. Raj M., Harshini N.B., Gupta Sh. et al. Leveraging precision agriculture techniques using UAVs and emerging disruptive technologies. *Energy Nexus*. 2024. Vol. 14. 1-25. DOI: 10.1016/j.nexus.2024.100300.
17. Ядровская М.В. К вопросу о компьютерном моделировании. *Advanced Engineering Research*. 2020. Т. 20. N3. С. 332-345. DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-3-332-345.
18. Салаев Б.К., Серёгин А.А., Эвнев В.А. и др. Анализ применения беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // *Вестник аграрной науки Дона*. 2022. Т. 15(4). С. 29-44. DOI: 10.55618/20756704_2022_15_4_29-44.
19. Makam S., Komatineni Bh.K., Meena S.S., Meena U. Unmanned aerial vehicles (UAVs): an adoptable technology for precise and smart farming. *Discover Internet of Things*. 2024. Vol. 4. N12. 1-30. DOI: 10.1007/s43926-024-00066-5.
20. Liu Ji., Wang W., Li Ju. et al. UAV remote sensing technology for wheat growth monitoring in precision agriculture: comparison of data quality and growth parameter inversion. *Agronomy*. 2025. Vol. 15(1), 159. 1-24. DOI: 10.3390/agronomy15010159.

REFERENCES

1. Habarina D.S., Tishaninov I.A. Analysis of the use of various types of unmanned aerial vehicles (UAVs) in agriculture. *Science Without Borders*. 2021. N4(56). 78-83 (In Russian).
2. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Evolution of flight control systems and aerial photography in unmanned agricultural aircraft. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 11-19 (In Russian). DOI:10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
3. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K. History of unmanned air-
- craft flight controller development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N3. 4-15 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
4. Starovoytov S.I., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., Lichman G.I. Technical systems for digital soil quality control. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. N14(1). 16-21 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21.
5. Urasova A.A., Glezman L.V., Fedoseeva S.S. The use of agricultural unmanned aerial vehicles in the Russian

- Federation: assessment of consumer preferences. *Economy of Regions*. 2023. N19(4). 1146-1160 (In Russian). DOI: 10.17059/ekon.reg.2023-4-15.
6. Kovalev A.S., Litvinov A.A. The experience of fungicidal treatment of sunflower with XAG agrodrons in Agro-Siberia LLC. *Agrarian Policy*. 2025. Vol. 2. 44-47 (In Russian).
 7. Zhang R., Hewitt A., Li L. et al. Editorial: advanced technologies of UAV application in crop pest, disease and weed control. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. 1-3 (In English). DOI: 10.3389/fpls.2023.1253841.
 8. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin A.V. Development prospects for methods and technical means of farm crop protection. *Agricultural Engineering*. 2021. N1 (101). 26-35 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
 9. Meng Ya., Zhong W., Liu Yu et al. Droplet distribution of an autonomous UAV-based sprayer in Citrus Tree Canopy. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2203. 2 (In English). DOI: 10.1088/1742-6596/2203/1/012022.
 10. Lan Y., Qian S., Chen S. et al. Influence of the downwash wind field of plant protection UAV on droplet deposition distribution characteristics at different flight heights. *Agronomy*. 2021. Vol. 11(12). 2399. 1-13 (In English). DOI: 10.3390/agronomy11122399.
 11. Gibbs J., Peters T.M., Heck L.P. Comparison of droplet size, coverage, and drift potential from UAV application methods and ground application methods on row crops. *Trans ASABE*. 2021. Vol. 64(3). 819-828 (In English). DOI: 10.13031/trans.14121.
 12. Subramanian K.S., Pazhanivelan S., Srinivasan G. et al. Drones in insect pest management. *Frontiers in Agronomy*. 2021. Vol. 3. 1-12 (In English). DOI: 10.3389/fagro.2021.640885.
 13. Guebsi R., Mami S., Chokmani K. Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, tech-
 - nologies, and challenges. *Drones*. 2024. Vol. 8(11). 686. 1-30 (In English). DOI: 10.3390/drones8110686.
 14. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin A.V., Kurbanov R.K. Technical means for chemical protection of plants: current state and development prospects. *Agricultural Engineering*. 2022. N24(3). 12-18 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2022-3-12-18.
 15. Bershtitsky Yu.I., Saifetdinov A.R., Maksimenko A.A., Elfimov D.A. Economic efficiency of using unmanned aerial vehicles as an element of digitalization of crop production. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2024. Vol. 2(61). 66-69 (In Russian). EDN: DDRCKH.
 16. Raj M., Harshini N.B., Gupta Sh. et al. Leveraging precision agriculture techniques using UAVs and emerging disruptive technologies. *EnergyNexus*. 2024. Vol. 14. 1-25 (In English). DOI: 10.1016/j.nexus.2024.100300.
 17. Yadrovskaya M.V. Revisiting computer modeling. *Advanced Engineering Research*. 2020. Vol. 20. N3. 332-345 (In Russian). DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-3-332-345.
 18. Salaev B.K., Seregin A.A., Eviev V.A. et al. Analysis of using unmanned aerial vehicles in agriculture. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2022. N15-4(60). 29-44 (In Russian). DOI: 10.55618/20756704_2022_15_4_29-44.
 19. Makam S., Komatineni Bh.K., Meena S.S., Meena U. Unmanned aerial vehicles (UAVs): an adoptable technology for precise and smart farming. *Discover Internet of Things*. 2024. Vol. 4. N12. 1-30 (In English). DOI: 10.1007/s43926-024-00066-5.
 20. Liu J., Wang W., Li Ju. et al. UAV remote sensing technology for wheat growth monitoring in precision agriculture: comparison of data quality and growth parameter inversion. *Agronomy*. 2025. Vol. 15(1). 159. 1-24 (In English). DOI: 10.3390/agronomy15010159.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Альт В.В. – постановка задачи, научное руководство, окончательное одобрение текста статьи;

Солошенко А.А. – сбор и обработка данных, литературный анализ, подготовка текста;

Исакова С.П. – редактирование текста, теоретический анализ, подготовка статьи;

Савченко О.Ф. – теоретический анализ;

Елкин О.В. – редактирование текста.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Alt V.V. – problem formulation, scientific supervision, final approval of the manuscript;

Soloshenko A.A. – data collection and processing, literature review, manuscript preparation;

Isakova S.P. – theoretical analysis, text editing, manuscript preparation;

Savchenko O.F. – theoretical analysis;

Elkin O.V. – manuscript editing.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

23.09.2025
25.11.2025