

УДК 004.942; 631.3

<https://www.doi.org/10.47813/nto.5.2024.2003>

EDN [HXEMHX](#)

Опыт роевого применения БПЛА в сфере автономного земледелия

Д.И. Ковалев^{1,2}, Е.В. Туева¹, Д.С. Покусаев^{3*}

¹Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

²Национальный исследовательский университет "Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства", Ташкент, Узбекистан

³Федеральный исследовательский центр Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия

*E-mail: gololmraz228@gmail.com

Аннотация. В статье анализируется современный опыт роевого применения БПЛА в сфере автономного земледелия. Сельскохозяйственные БПЛА являются неотъемлемыми компонентами систем автоматизации, разрабатываемых для автономного земледелия, и широко применяются на различных этапах эксплуатации благодаря своей точности, высокой эффективности, экологической устойчивости и простоте эксплуатации. Роевое применение БПЛА охватывает четыре основных этапа сельскохозяйственного производства (выращивание, посадка, управление и сбор урожая). Целесообразно выполнять анализ применения роя БПЛА на каждом из перечисленных этапов, оценивая опыт реализации передовых технологий роевого применения БПЛА в сфере автономного земледелия. Опыт применения и уровень развития технологии роя БПЛА в автономном сельском хозяйстве позволяет выявить пути повышения производительности роя, масштабируемости и темпов внедрения в современных условиях.

Ключевые слова: Роевое применение БПЛА, автономное сельское хозяйство, передовые технологии, темпы внедрения.

Experience of swarm application of UAVs in the field of autonomous agriculture

D.I. Kovalev^{1,2}, E.V. Tueva¹, D.S. Pokusaev^{3*}

¹Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

²National Research University "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers", Tashkent, Uzbekistan

³Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Krasnoyarsk, Russia

*E-mail: gololmraz228@gmail.com

Abstract. The article analyzes the current experience of swarm application of UAVs in the field of autonomous agriculture. Agricultural UAVs are integral components of automation systems developed for autonomous agriculture and are widely used at various stages of operation due to their accuracy, high efficiency, environmental sustainability and ease of operation. Swarm application of UAVs covers four main stages of agricultural production (growing, planting, management and harvesting). It is advisable to analyze the application of a UAV swarm at each of these stages, assessing the experience of implementing advanced technologies of swarm application of UAVs in the field of autonomous agriculture. The experience of application and the level of development of UAV swarm technology in autonomous agriculture allows us to identify ways to improve swarm performance, scalability and the pace of implementation in modern conditions.

Keywords: UAV swarm application, autonomous agriculture, advanced technologies, implementation rates.

1. Введение

Автономные фермы характеризуют этап передового сельскохозяйственного развития в сфере автономного земледелия, воплощая объединение информационных технологий последнего поколения, интеллектуальной техники и прогрессивных методов ведения сельского хозяйства [1-6]. В отличие от традиционных хозяйств, такие автономные фермы используют целый спектр датчиков, автоматизированных систем и аналитики данных для реализации полностью автоматизированного и интеллектуального управления, что в результате значительно сокращает затраты на рабочую силу [7-10]. Главной целью разработки таких компонентов автономного земледелия является совершенствование процессов сельскохозяйственного производства на основе роботизированной интеллектуальной сельскохозяйственной техники [11-13].

В сфере автономного земледелия агротехнологические операции при возделывании различных сельскохозяйственных культур охватывают ряд транспортно-технологических циклов (ТТЦ), выполняемых на протяжении всего процесса выращивания, от посева до сбора урожая. Совокупность ТТЦ составляет основную фазу всех автономных сельскохозяйственных операций. В настоящее время к основным операциям, в рамках реализации которых применяются роевые системы БПЛА, относят: контроль орошения, идентификацию сорняков, идентификацию и борьбу с вредителями, а также обследование состояния сельскохозяйственных культур в случае поражения различными болезнями.

Сельскохозяйственный БПЛА – это важный компонент интеллектуальной сельскохозяйственной техники, который отличается точной работой, высокой эффективностью, экологической устойчивостью, простотой эксплуатации и высокой степенью автоматизации [14-17]. На текущем этапе своего развития БПЛА нашли широкое применение в различных эксплуатационных аспектах в сфере автономного земледелия. Эти приложения включают мониторинг и управление посевами [18-20], точное опрыскивание [21-23], автоматическое обнаружение поражений посевов, а также картирование посевов и оценку урожайности [24-26]. Однако существующий уровень технологического развития БПЛА обладает рядом ограничений с точки зрения полезной нагрузки и дальности полета [27-29]. В частности, возникают такие проблемы, как частая необходимость замены батарей и заправки жидкости во время выполнения операций

ТТЦ для каждого БПЛА в группе [30]. Это приводит к снижению эффективности эксплуатации и повышению трудоемкости. Следовательно, для повышения эффективности эксплуатации требуются стратегии, выходящие за рамки простого увеличения грузоподъемности и производительности отдельных БПЛА. Современная тенденция в сфере автономного земледелия предполагает развертывание роев БПЛА для совместного проведения транспортно-технологических операций, тем самым расширяя зону эксплуатации БПЛА территориально и, следовательно, обеспечивая повышение эффективности эксплуатации БПЛА [31, 32]. В последнее время системы кооперативной работы роев БПЛА появились как потенциальное средство повышения эффективности точного земледелия, что требует дальнейшего изучения полученного опыта и результатов экспериментов [33, 34].

2. Материалы и методы

В данной работе опыт роевого применения БПЛА в сфере автономного земледелия оценивался по таким источникам, как базы данных Google Scholar, ScienceDirect, Elibrary (РИНЦ), Scopus, IEEE Xplorer и Wiley. Объектами рассмотрения были методы совместной навигации нескольких БПЛА, в первую очередь, опубликованные в статьях за последнее десятилетие. Материал исследований по технологии роевого применения БПЛА отражает четыре основных этапа сельскохозяйственного производства: выращивание, посадка, управление и сбор урожая. Обобщение технологий выполняется с учетом информации о типе управления роем БПЛА на одном из сельскохозяйственных этапов, на котором они применялись, с оценкой технологических плюсов и минусов, а также возникающих технических проблем в процессе эксплуатации группы БПЛА. Следует отметить, что сопоставление различных парадигм управления с различными эксплуатационными особенностями, присущими каждой сельскохозяйственной фазе, может быть проведено только на основе экспериментальных результатов (серии опытов, описанных авторами), чтобы определить, какие методы являются более перспективными на различных этапах сельскохозяйственного производства. Используется классификация технологий роевого применения БПЛА по отдельным типам на основе технических параметров применяемых БПЛА, что позволяет оценить их потенциал в сценариях беспилотного земледелия.

3. Результаты применения БПЛА на различных фазах ТТЦ

Посевная фаза ТТЦ при автономных сельскохозяйственных операциях имеет решающее значение в автономном земледелии, поскольку плотность и однородность посевных операций напрямую влияют на прорастание семян и будущий урожай [35-37]. Такой тип БПЛА, как беспилотные вертолеты, учитывая их компактные размеры, гибкую маневренность и способность перемещаться по запрограммированным траекториям полета, обеспечивают заметные преимущества, особенно в местностях, характеризующихся гористым ландшафтом, небольшими участками и значительными перепадами высот. На таких территориях традиционная, более крупная наземная посевная техника может испытывать трудности с перемещением и автономной навигацией. В настоящее время реализация стратегий посева, в которых используются БПЛА, является развивающейся областью исследований, с потенциалом значительного повышения точности и эффективности операций по посадке сельскохозяйственных культур, особенно в условиях сложных сельскохозяйственных ландшафтов.

Один из реализованных ТТЦ БПЛА для опрыскивания растений рассмотрен в [1, 38]. Авторами предложена технология для полевого опрыскивания на базе двух БПЛА. Конструкция опрыскивателя позволяет реализовать принцип работы, который заключается в одновременном подключении баков с химикатами двух БПЛА к одной распылительной штанге. БПЛА работают синхронно, перемещая распылительную штангу, тем самым увеличивая рабочую зону и объем распыления за одно применение. Однако, следует учесть, что полезная грузоподъемность БПЛА ограничена и расстояние между двумя БПЛА определяется размерными характеристиками распылительной штанги. В этом случае точность и синхронность перемещения обоих БПЛА в одном направлении обеспечивается за счет реализации режимов визуальной совместной навигации или коммуникационной навигации и может удовлетворить требованиям реализации ТТЦ для данных агротехнологических операций.

Отметим работу [39], в которой рассматривается несколько проблем, связанных с операциями по распылению пестицидов, выполняемых роями БПЛА. К этим проблемам относятся:

- несоответствие (несовместимость) оборудования;
- нечеткие границы полей и участков обработки;

- снос капель при распылении с помощью БПЛА;
- различный уровень квалификации операторов БПЛА при групповом управлении роем.

Одним из способов решения указанных проблем было создание математической модели для гетерогенной системы роя БПЛА, используемого для защиты урожая. На основе этой модели был предложен оптимальный метод распределения задач по распылению пестицидов для роя БПЛА, участвующего в операциях ТТЦ по защите урожая. Подтверждение адекватности модели осуществлялось в ходе испытаний беспилотной авиационной системы (БАС) из пяти распылительных БПЛА. Эффективность данного метода по оптимальному распределению задач между БПЛА подтверждена в ходе выполнения реальных операций ТТЦ по распылению пестицидов.

На рисунке 1 представлен проект Китайской компании Eavision, которая запустила рой дронов в Бразилии. Китайская компания представила сельскохозяйственный БПЛА модели EA-30X-Pro. Данная модель способна работать в комплекте до трех устройств с одним оператором. Тройной набор устройств увеличивает в три раза производительность одного БПЛА, составляющую 22,5 га в час, и достигает более 60 га, обрабатываемых всего за один час.



Рисунок 1. Роевое применение БПЛА EA-30X-Pro компании Eavision (источник: <https://bossagro.kz/>).

Рассмотрим некоторые передовые практики роевого применения БПЛА в процессе сбора урожая. Автоматизация процесса сбора урожая на автономных фермах действительно является критически важным компонентом ТТЦ. Здесь очевиден потенциал для значительного повышения производительности, снижения затрат на рабочую силу и обеспечения качества и урожайности сельскохозяйственных культур [40]. Технология роевого применения БПЛА может внести значительный вклад в процесс сбора урожая в сфере автономного земледелия, обеспечивая эффективную и точную уборку, а также эффективно снижая потери урожая. Эта технология является перспективной и, вероятно, в будущем вытеснит традиционные методы сбора урожая, расширяя возможности точного (интеллектуального) автоматизированного земледелия [41, 42].

Выделяется два основных направления по применению роевых технологий БПЛА в процессе сбора урожая:

- 1) прогнозирование и оценка урожайности;
- 2) автоматизированный сбор.

Прогнозирование урожайности имеет первостепенное значение для фермеров, поскольку оно облегчает принятие обоснованных решений, связанных со страхованием урожая, требованиями к хранению, составлением бюджета денежных потоков и распределением ресурсов, таких как удобрения, вода и т.д. В соответствии с известными методами измерения сельскохозяйственных угодий, картирования и полевого осмотра прогнозирование и оценка урожайности проводится путем установки различных сенсорных устройств на БПЛА для выполнения дистанционного зондирования сельскохозяйственных угодий с малой высоты. Собранные данные дистанционного зондирования анализируются для оценки урожайности. Отметим, что в настоящее время существует ограниченное количество исследований, применяющих технологию роя БПЛА для оценки урожайности. В [43] предлагается один из возможных подходов к оценке урожайности цитрусовых на основе БПЛА. Этот подход использует методы автоматической обработки изображений для обнаружения, подсчета и оценки размера цитрусовых на отдельных деревьях на основе методов глубокого обучения. Экспериментальные данные позволяют определить погрешность аппроксимации, которая составила не более 4,53% со стандартным отклонением 0,97 кг. Эксперимент выполнялся на 20 цитрусовых деревьях. Это подтверждает эффективность

предложенного алгоритма. В работе [44] предлагается модель прогнозирования урожайности хлопка. Модель использовала многовременные, с высоким разрешением, видимые и многоспектральные изображения дистанционного зондирования БПЛА. Для процесса прогнозирования использовались байесовская регуляризованная нейронная сеть BP и модель семантической сегментации ENVINet-5. Модель была проверена с помощью реальных полевых экспериментов, подтвердивших ее осуществимость для прогнозирования урожайности.

В [45] предлагается оригинальная модель кооперативного назначения задач на основе роя БПЛА, применяемого для сбора урожая на территории фруктовых садов. Предложенный эвристический кооперативный метод позволяет обеспечить кратчайшее расстояние перемещения БПЛА, что является ключевым показателем при решении поставленных перед роем задач. Базовая производительность алгоритма была проверена с помощью имитационных экспериментов.

Также отмечается, что в 2023 году компания Tevel Aerobotics Technologies (Израиль) разработала систему сбора урожая для фруктовых садов, основанную на БАС из роя БПЛА. Система состоит из наземных объектов автономного земледелия и роя БПЛА. Эти компоненты обмениваются друг с другом информацией о местоположении в реальном времени. Затем они анализируют и определяют местоположение фруктов с помощью систем визуализации. После успешной локализации осуществляется сбор урожая с размещением на борту БПЛА. Показано, что данная система значительно повышает эффективность сбора урожая и стала одним из новых направлений развития в области беспилотного земледелия [46].

4. Заключение

Рассматривая применение технологии роя БПЛА в контексте автономного земледелия, отметим, что существующие методы управления роем БПЛА обладают как сильными, так и слабыми сторонами при различных подходах. Во многом это зависит от уровня текущих приложений роевой технологии применения БПЛА в рамках четырех основных процессов, присущих беспилотному земледелию: выращивание, посадка, управление и сбор урожая.

За счет повышения интеллектуализации управления БПЛА расширяется сфера применения роевых технологий БПЛА при правильном построении соответствующих

аппаратных и программных инфраструктур [47-49]. При этом решение практических проблем роевого применения БПЛА в сфере автономного земледелия требует их рассмотрения с нескольких точек зрения. Целью перспективных работ является предоставление потенциальных решений для надежного развития роевых технологий БПЛА путем изучения трех конкретных аспектов:

- повышение автономности, интеллектуальности и отказоустойчивости роев БПЛА;
- создание комплексной модели для анализа и принятия решений на структурных объектах автономного земледелия (умных фермах);
- дальнейшая интеграция системы интеллектуальных сельскохозяйственных технологий и сельскохозяйственного Интернета вещей.

Таким образом, повышая интеллект и автономность роевого применения БПЛА, разрабатывая интегрированную модель для анализа данных и принятия решений в автономном земледелии, используя интегрированную систему интеллектуальных сельскохозяйственных технологий в контексте Интернета вещей, можно значительно усовершенствовать интеллектуальные компоненты умных ферм, включая БПЛА, что даст новые перспективы для будущего развития автономного сельского хозяйства.

Список литературы

1. Ming R. Comparative Analysis of Different UAV Swarm Control Methods on Unmanned Farms / R. Ming, R. Jiang, H. Luo, T. Lai, E. Guo, Z. Zhou // *Agronomy*. – 2023. – 13(10). – P. 2499. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102499>
2. Ковалев И.В. Возможности использования инновационных космических технологий в прогрессивном растениеводстве / И.В. Ковалев, Н.В. Титовская, С.Н. Титовский // Проблемы современной аграрной науки: Материалы международной научной конференции, Красноярск, 15 октября 2019 года / Ответственные за выпуск: Валентина Леонидовна Бопп, Жанна Николаевна Шмелева. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2019. – С. 200-204.
3. Yablokova A. Environmental safety problems of swarm use of UAVs in precision agriculture / A. Yablokova, D. Kovalev, I. Kovalev et al. // *E3S Web of Conferences*. – 2024. – Vol. 471. – P. 04018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447104018>

4. Kovalev I.V. Productivity analysis of agricultural UAVs by field crop spraying / I. V. Kovalev, D. I. Kovalev, K. D. Astanakulov et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2023. – Vol. 1284, No. 1. – P. 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1284/1/012026>
5. Zhang Y. Research on Evolutionary Impetus and Path of Unmanned Farm / Y. Zhang, L. Liu, D. Li, M. Niu // Shandong Agric. Sci. – 2020. – Vol. 52. – P. 160-166.
6. Wu H. Cognitive WSN Control Optimization for Unmanned Farms Under the Two-Layer Game / H. Wu, X. Han, H. Zhu // IEEE Sens. J. – 2022. – Vol. 22. – P. 1775-1785.
7. Kovalev I. Digitalization of UAV transport and technological cycles in smart agriculture / I. Kovalev, D. Kovalev, K. Astanakulov et al. // e3s web of conferences: VIII International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023), Krasnoyarsk, 29–31 March 2023. – Vol. 390. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2023. – P. 03014. – DOI 10.1051/e3sconf/202339003014.
8. Карцан И.Н. Проблемы анализа и синтеза структур сложных систем сетевого взаимодействия наземных пунктов управления космическими аппаратами / И.Н. Карцан, И.В. Ковалев, С.В. Ефремова // Решетневские чтения. – 2017. – Т. 1. – С. 390-391.
9. Kovalev I.V. Model of the reliability analysis of the distributed computer systems with architecture "client-server" / I.V. Kovalev, P.V. Zelenkov, M.V. Karaseva et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: XVII International Scientific Conference "Reshetnev Readings", Krasnoyarsk, 12–14 November 2014. – Vol. 70. – Krasnoyarsk: Institute of Physics Publishing, 2015. – P. 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/70/1/012009>
10. Kartsan I.N. Applying filtering for determining the angular orientation of spinning objects during interference / I.N. Kartsan, A.E. Goncharov, P.V. Zelenkov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, 11–15 April 2016. – Vol. 155. – Krasnoyarsk: Institute of Physics Publishing, 2016. – P. 012020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/155/1/012020>
11. Li D. System Analysis and Development Prospect of Unmanned Farming / D. Li, L. Zhen // J. Agric. Mach. – 2020. – Vol. 51. – P. 1–12.

12. T. Wang. From Smart Farming towards Unmanned Farms: A New Mode of Agricultural Production / T. Wang, X. Xu, C. Wang, Z. Li, D. Li // Agriculture. – 2021. – Vol. 11. – P. 145.
13. Kovalev I.V. Analysis of the current situation and development trend of the international cargo UAVs market / I.V. Kovalev, A.A. Voroshilova, M.V. Karaseva // Journal of Physics: Conference Series : International Scientific Conference "Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019", Krasnoyarsk, 25–27 September 2019 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. Vol. 1399. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. – P. 55095. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/5/055095>
14. Li. D. System Analysis and Development Prospect of Unmanned Farming / D. Li, L. Zhen // J. Agric. Mach. – 2020. – Vol. 51. – P. 1-12.
15. Wang T. From Smart Farming towards Unmanned Farms: A New Mode of Agricultural Production / T. Wang, X. Xu, C. Wang, Z. Li, D. Li. // Agriculture. – 2021. – Vol. 11. – P. 145.
16. Ковалев И.В. К вопросу формирования блочно-модульной структуры системы управления беспилотных летательных объектов / И.В. Ковалев, В.В. Лосев, М.В. Сарамуд и др. // Современные инновации, системы и технологии. – 2021. – Т. 1, № 3. – С. 54-71. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2021-1-3-48-64>
17. Saramud M.V. Software interfaces and decision block for the execution environment of multi-version software in real-time operating systems / M.V. Saramud, I.V. Kovalev, V.V. Losev, M.O. Petrosyan // International Journal on Information Technologies and Security. – 2018. – Vol. 10, No. 1. – P. 25-34.
18. Cuaran J. Crop Monitoring using Unmanned Aerial Vehicles: A Review / J. Cuaran, J. Leon // Agric. Rev. – 2021. – Vol. 42. – P. 121-132.
19. Amarasingam N. A review of UAV platforms, sensors, and applications for monitoring of sugarcane crops / N. Amarasingam, Ashan Salgadoe, K. Powell, L.F. Gonzalez, S. Natarajan // Remote Sens. Appl. Soc. Environ. – 2022. – Vol. 26. – P. 100712.
20. Yuronen Y.P. The concept of creation of information system for environmental monitoring based on modern GIS-technologies and earth remote sensing data / Y.P. Yuronen, E.A. Yuronen, V.V. Ivanov et al. // IOP Conference Series: Materials Science and

- Engineering: International Scientific and Research Conference on Topical Issues in Aeronautics and Astronautics (Dedicated to the 55th Anniversary from the Foundation of SibSAU), Krasnoyarsk, 06–10 April 2015. Vol. 94. – Krasnoyarsk: Institute of Physics Publishing, 2015. – P. 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/94/1/012023>.
21. Song C. Variable-rate control system for UAV-based granular fertilizer spreader / C. Song; Z. Zhou; Y. Zang; L. Zhao; W. Yang; X. Luo; R. Jiang; R. Ming; Y. Zang; L. Zi et al. // *Comput. Electron. Agric.* – 2021. – Vol. 180. – P. 105832.
22. Wang G. Field evaluation of spray drift and environmental impact using an agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer / G. Wang, Y. Han, X. Li, J. Andaloro, P. Chen, W.C. Hoffmann, X. Han, S. Chen, Y. Lan. // *Sci. Total Environ.* – 2020. – Vol. 737. – P. 139793.
23. Kovalev I.V. GERT analysis of UAV transport technological cycles when used in precision agriculture / I.V. Kovalev, D.I. Kovalev, A.A. Voroshilova et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* – 2022. – Vol. 1076, No. 1. – P. 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012055>
24. Bah M.D. CRoWNet: Deep Network for Crop Row Detection in UAV Images / M.D. Bah, A. Hafiane, R. Canals // *IEEE Access.* – 2020. – Vol. 8. – P. 5189-5200.
25. Niu B. HSI-TransUNet: A transformer based semantic segmentation model for crop mapping from UAV hyperspectral imagery / B. Niu, Q. Feng, B. Chen, C. Ou, Y. Liu, J. Yang // *Comput. Electron. Agric.* – 2022. – Vol. 201. – P. 107297.
26. Kovalev I.V. Analysis of system parameters in a microprocessor performance model of a swarm of agricultural spraying UAVs / I.V. Kovalev, D.I. Kovalev, K.D. Astanakulov et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* – 2023. – Vol. 1284, No. 1. – P. 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1284/1/012030>
27. Ковалев И.В. Использование метода роя частиц для формирования состава мультиверсионного программного обеспечения / И. В. Ковалев, Е.В. Соловьев, Д.И. Ковалев и др. // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.* – 2013. – № 3. – С. 1-6.
28. Ju C. Multiple UAV Systems for Agricultural Applications: Control, Implementation, and Evaluation / C. Ju, H. Son // *Electronics.* – 2018. – Vol. 7. – P 162.
29. Русаков М.А. Многоэтапный анализ архитектурной надежности в сложных информационно-управляющих системах: специальность 05.13.01 "Системный

- анализ, управление и обработка информации (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Русаков Михаил Александрович. – Красноярск, 2005. – 168 с.
30. Engel E.A. Intelligent control system of autonomous objects / E.A. Engel, N.E. Engel, I.V. Kovalev et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 5th International Workshop on Mathematical Models and their Applications 2016, IWMMMA 2016, Krasnoyarsk, 07–09 November 2016. – Vol. 173. – Krasnoyarsk: Institute of Physics Publishing, 2017. – P. 012024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/173/1/012024>
 31. Wu W. Unmanned Aerial Vehicle Swarm-Enabled Edge Computing: Potentials, Promising Technologies, and Challenges / W. Wu; F. Zhou, B. Wang, Q. Wu; C. Dong, R.Q. Hu // IEEE Wirel. Commun. – 2022. – Vol. 29. – P. 78-85.
 32. Kovalev I. Cost-effectiveness analysis of the implementation of transport and technological cycles in the swarm use of agricultural UAVs / I. Kovalev, D. Kovalev, K. Astanakulov et al. // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 471. – P. 04017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447104017>
 33. Ming R. Optical Tracking System for Multi-UAV Clustering / R. Ming, Z. Zhou, X. Luo, W. Liu, Z. Le, C. Song, R. Jiang, Y. Zang // IEEE Sens. J. – 2021. – Vol. 21. – P. 19382-19394.
 34. Ming R. Laser tracking leader-follower automatic cooperative navigation system for UAVs / R. Ming, Z. Zhou, Z. Lyu, X. Luo, L. Zi, C. Song, Y. Zang, W. Liu, R. Jiang // Int. J. Agric. Biol. Eng. – 2022. – Vol. 15. – P. 165-176.
 35. I. Kovalev. Conceptual basis for digitalization of specifications of transport and technological cycles of agricultural UAVs / D. Kovalev, K. Astanakulov et al. // E3S Web of Conferences: II International Conference on Environmental Technologies and Engineering for Sustainable Development (ETESD-II 2023), Tashkent, 13–15 September 2023. – Vol. 443. – Tashkent: EDP Sciences, 2023. – P. 06014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344306014>
 36. Ковалев И.В. Мультиверсионный метод повышения программной надежности информационно-телекоммуникационных технологий в корпоративных структурах / И.В. Ковалев, Р.В. Юнусов // Телекоммуникации и информатизация образования. – 2003. – № 2. – С. 50-55.

37. Ковалев И.В. Анализ средств спецификации транспортно-технологических циклов БПЛА в умном сельском хозяйстве / И.В. Ковалев, Д.И. Ковалев, В.А. Подоплелова, М.Ф. Иконникова // Системы управления и информационные технологии. – 2023. – № 2(92). – С. 80-85.
38. Hegde A. Multi-UAV Distributed Control for Load Transportation in Precision Agriculture / A. Hegde, D. Ghose // In Proceedings of the AIAA SciTech 2020 Forum, Orlando, FL, USA, 6–10 January 2020.
39. Li Y. Optimal spraying task assignment problem in crop protection with multi-UAV systems and its order irrelevant enumeration solution / Y. Li, Y. Xu, X. Xue, X. Liu, X. Liu // Biosyst. Eng. – 2022. – Vol. 214. – P. 177-192.
40. Kovalev D.I., Astanakulov K.D., Kovalev I.V. Analysis of technologies for using the CE20 UAV as part of unmanned aerial plant protection systems / D.I. Kovalev, K.D. Astanakulov, I.V. Kovalev // Modern Innovations, Systems and Technologies. – 2024. – Vol. 4(1). – P. 0301-0311. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2024-4-1-0301-0311>
41. Mikhailov I.R. Methods of remote sensing of the earth in the forest industry / I.R. Mikhailov, N.A. Abramov, S.N. Dolmatov // Modern Innovations, Systems and Technologies. – 2023. – Vol. 3(3). – P. 0301-0310. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-3-0301-0310>
42. Kovalev D.I. Review of system parameter specifications for microprocessor performance analysis of UAV swarm applications / D.I. Kovalev // Modern Innovations, Systems and Technologies. – 2024. – Vol. 4(3). – P. 0101-0120. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2024-4-3-0101-0120>
43. Apolo-Apolo O.E. Deep learning techniques for estimation of the yield and size of citrus fruits using a UAV / O.E. Apolo-Apolo, J. Martínez-Guanter, G. Egea, P. Raja, M. Pérez-Ruiz // Eur. J. Agron. – 2020. – Vol. 115. – P. 126030
44. Xu W. Cotton yield estimation model based on machine learning using time series UAV remote sensing data / W. Xu, P. Chen, Y. Zhan, S. Chen, L. Zhang, Y. Lan // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. – 2021. – Vol. 104. – P. 102511.
45. Liu W. Multi-UAV Cooperative Task Assignment Based on Orchard Picking Algorithm / W. Liu, X. Zheng, H. Garg // Int. J. Comput. Int. Syst. – 2021. – Vol. 14. – P. 1461.
46. Technologies T.A. Enter A New Era of Harvesting with Tevel’s Flying Autonomous Robots. <https://www.tevel-tech.com/> (accessed on 10 October 2024).

47. Kovalev D.I. Use of UAV in precision farming: a review of Agras MG-1S octocopter test results / D.I. Kovalev, K.D. Astanakulov, E.V. Tueva // Informatics. Economics. Management. – 2024. – Vol. 3(3). – P. 0201-0214.
<https://doi.org/10.47813/2782-5280-2024-3-3-0201-0214>
48. Losev V.V. Overview of promising projects in the field of sustainable territorial development and global cyber-physical systems / V.V. Losev, D.I. Kovalev, A.A. Voroshilova, E.V. Tueva // Informatics. Economics. Management. – 2023. – Vol. 2(2). – P. 0401-0413. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2023-2-2-0401-0413>
49. Kovalev D.I. GERT-analysis of transport technological cycles of unmanned aerial vehicles / D.I. Kovalev // Informatics. Economics. Management. – 2022. – Vol. 1(1). – P. 0110-0120. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0110-0120>