

Моделирование автономных квадрокоптеров в типовых задачах агропромышленного сектора

С.А.К. Диане¹, А.А. Андропова², Н.Н. Дудка², Н.С. Молев², Д.Д. Душков²

¹Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Аннотация – Стремительный рост темпов производства мультироторных беспилотных летательных аппаратов, сопровождаемый непрерывным развитием технологий управления и обработки информации, создает перспективы для применения подобных устройств в широком спектре сельскохозяйственных задач. В настоящем исследовании анализируются подходы к моделированию автономных квадрокоптеров в задачах осмотра открытой местности, технических сооружений, садовых участков, а также для обработки посевных культур. Дана концептуализация процесса, относящегося к формированию иерархии моделей квадрокоптера и внешней среды. Предложена математическая формализация и методика комплексного исследования компьютерных моделей летательных аппаратов. Приводятся результаты модельных экспериментов.

Ключевые слова – Автономный квадрокоптер, цифровое сельское хозяйство, осмотр местности, геоботанический мониторинг, обработка растений.

I. ВВЕДЕНИЕ

За четверть века активного развития направления, связанного с разработкой и применением небольших по своим размерам и массе мультироторных летательных аппаратов, стало очевидно, что спектр их применения достаточно широк. В этой связи, актуальной представляется проблема конкретизации путей возможного использования автономных квадрокоптеров и моделирования типовых задач, решаемых многофункциональными мультироторными беспилотными летательными аппаратами (БПЛА).

Разрешение данных вопросов представляется важным для интенсификации развития цифрового сельского хозяйства (ЦСХ) – сферы промышленности, традиционно востребованной в большинстве стран мира и вышедшей на качественно новый уровень с появлением малогабаритных измерительных приборов, микропроцессорных плат, средств навигации и связи.

А. Перспективы применения БПЛА в ЦСХ

Многогранность агропромышленного сектора (АПК) – присущая ему по причине разнообразия потребностей общества в продукции растениеводства и

животноводства, усиленная недетерминированностью природной среды, а также историческими аспектами становления данной отрасли – позволяет выделить десятки задач, допускающих автоматизацию с применением БПЛА. Укрупненная группировка данных задач народного хозяйства может быть сформирована по нескольким направлениям (Рис. 1):

1. осмотр местности и произрастающих на ней посевных культур;
2. осмотр древесно-кустарниковых растений на садовых участках;
3. аэрозольная обработка растений и точечное внесение удобрений;
4. мониторинг пастбищ крупного рогатого скота и оценка состояния животных;
5. осмотр технологических площадок и инфраструктурных сооружений;
6. курьерская доставка продукции в пункты розничной торговли.

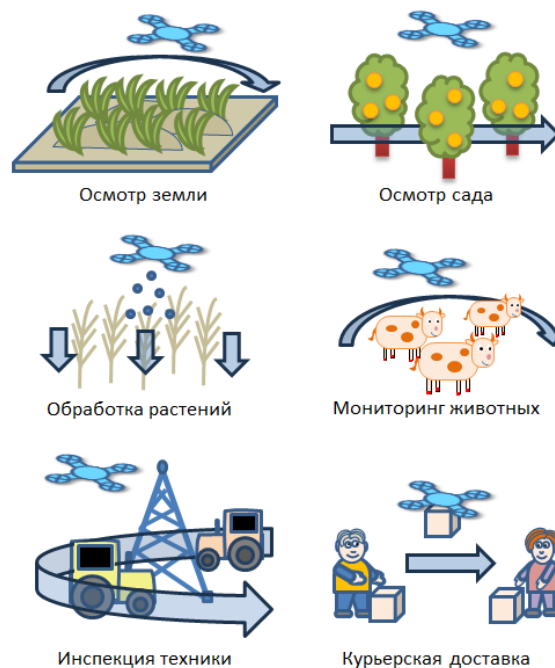


Рис. 1. Задачи АПК, решаемые с применением БПЛА.

В. Нормативно-правовое обеспечение ЦСХ

В обозначенных направлениях проводятся научные исследования и коммерческие разработки, как в России, так и за рубежом. Кроме того, основные технологические процессы отрасли регламентируются на законодательном и нормативном уровне. В частности, задача №1 осмотра сельхозземель и произрастающих на них посевных культур конкретизирована в постановлении [1] Правительства РФ от 5 марта 2021 г. N 325 «Об утверждении Положения о формировании планов проведения почвенных, геоботанических и других обследований земель сельскохозяйственного назначения, а также о проведении таких обследований».

Задача №2 осмотра и оценки фитосанитарного состояния плодовых деревьев уточняется в стандарте [2] ГОСТ Р 59653-2021 «Материал посадочный плодовых и ягодных культур. Технические условия».

Пути решения задачи №3 обработки почв и растений обозначены в приказе [3] Минсельхоза России от 14.04.2023 N 388 «Об утверждении видов мероприятий, связанных с воспроизводством плодородия земель сельскохозяйственного назначения, и порядка определения стоимости их проведения», а также в федеральном законе [4] от 19 июля 1997 г. N 109-ФЗ «О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами».

Специфика задачи №4, связанная с выпасом и мониторингом состояния крупного рогатого скота, раскрывается в приказе [5] Министерства сельского хозяйства РФ от 21 октября 2020 г. N 622 «Об утверждении Ветеринарных правил содержания крупного рогатого скота в целях его воспроизводства, выращивания и реализации».

При решении задачи №5 инспекции техники и условий ее применения целесообразно принимать во внимание постановление [6] Правительства РФ от 01.08.2016 N 740 «Об определении функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования».

И, наконец, задача №6 должна эффективно решаться с учетом стандарта [7] – ГОСТ Р 70760–2023 «Торговля. Услуги доставки товаров розничным покупателям. Общие требования».

Отметим, что автоматизация решения вышеперечисленных задач возможна с применением роботизированных мультитрольных систем, в частности, квадрокоптеров. Требования к системам такого рода представлены в стандарте [8] – ГОСТ Р 60.6.0.1-2021 «Роботы и робототехнические устройства. Сервисные мобильные роботы. Уровни автономности. Термины и определения».

В состав автономного квадрокоптера, безусловно, должна входить видеочамера и бортовой вычислитель, способные производить визуальную детекцию или сегментацию целевых объектов. В ряде случаев

необходимо оснащать квадрокоптер дополнительными исполнительными механизмами для поворота видеочамеры, сброса агрохимикатов, захвата транспортируемых грузов и т.д.

С. Научные исследования БПЛА для задач ЦСХ

Одной из наиболее важных задач в настройке и применении мультитрольных БПЛА, хорошо описанной в отечественной литературе, традиционно является планирование маршрутов их движения и обработка полученных траекторий в режиме позиционного управления летательным аппаратом [9]. Система управления подобными аппаратами строится по иерархической схеме, обеспечивающей стабилизацию углов ориентации квадрокоптера и достижение требуемых декартовых координат.

В современных работах зарубежных исследователей углубленно рассмотрены вопросы практического использования беспилотных летательных аппаратов для мониторинга территорий, технических сооружений, а также обработки растений.

В исследовании [10] предложены графовые алгоритмы планирования маршрутов БПЛА для эффективного осмотра интересующих участков местности, представленных в полигональном формате. В работе [11] рассматривается задача совместного размещения дронов на местности и планирования их полетных заданий для обеспечения требуемой зоны покрытия в рамках концепции капсульных аэропортов.

Работа [12] посвящена более сложной задаче – планированию маршрута дрона при распылении агрохимикатов, когда необходимо учитывать не только кинематику полета БПЛА, но и аэродинамику частиц воздушно-капельной смеси.

Обзор различных конструкций БПЛА для решения задачи автоматического опрыскивания растений приведен в работе [13]. Там же даны экономические обоснования применимости летательных аппаратов.

Следует отметить, что задачи обработки местности требуют организации развитого информационного обеспечения БПЛА-исполнителя. В состав информации, анализируемой на борту БПЛА, входят команды оператора, навигационные данные, изображения с бортовой видеочамеры. Важно подчеркнуть факт существования видеочамер, работающих как в видимом световом диапазоне, так и камер мультиспектрального типа, охватывающих инфракрасную область. Последние позволяют бесконтактным способом оценивать влажность почвы, как описано в работе [14].

Анализ видеоинформации, получаемой БПЛА в видимом диапазоне, также достаточно эффективен в задачах мониторинга технологических процессов сельского хозяйства и смежных отраслей [15]. Визуальный анализ применяется для инспекции состояния зданий [16, 17], инфраструктурных сооружений [18], оценки значимых событий в поле

зрения автономных дронов [19]. Так, с применением нейросетевых технологий детекции оценивается урожайность ягод на ветвях кустарниковых насаждений [20]. Аналогичным нейросетевым образом, авторы работы [21] реализуют эффективное обнаружение скота на пастбище.

Ряд исследований рассматривает вопросы группового управления дронами. Так, например, авторы работы [22] решают проблему маршрутизации нескольких дронов с учетом их станций подзарядки и обмена грузами, что актуально для развития транспортно-логистической инфраструктуры фермерских хозяйств.

Проведенный краткий обзор показывает растущий интерес к автоматизации процессов АПК с применением БПЛА, от мониторинга местности до обработки растений и анализа технического состояния инженерных сооружений.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наиболее важной научной задачей в настоящем исследовании является разработка методики комплексного моделирования БПЛА (в частности квадрокоптерного типа), которая допускала бы вариацию особенностей постановки прикладной задачи ЦСХ и критериев оценивания полученных результатов.

Систематизация потенциально решаемых задач и выделение ключевых метрик эффективности БПЛА также входят в перечень рассматриваемых авторами научных вопросов.

Отметим, что проблема комплексного моделирования БПЛА связана с необходимостью рассматривать как сам летательный аппарат, так и технологический процесс, в котором он задействован, а также внешнюю среду его функционирования, учитывающую всевозможные факторы природного и техногенного характера.

Процесс моделирования может быть достаточно протяженным во времени и выполняться в рамках синергетического взаимодействия заказчика работ и инженера-исполнителя, как показано на Рис. 2.



Рис. 2. Концепция формирования иерархии моделей БПЛА.

В рамках предлагаемого системного подхода к описанию моделируемых технологических процессов можно сформировать таблицу, конкретизирующую

перечень решаемых авторским коллективом научно-технических задач (Табл. I).

ТАБЛИЦА I
ПРИМЕРЫ ФОРМАЛИЗОВАННОГО ОПИСАНИЯ ЗАДАЧ АПК

№	Описание моделируемых задач	
	Задача	Технологический процесс
1	Оценка урожайности плодовых культур	Движение группы автономных квадрокоптеров по садовому участку с остановкой в опорных точках местности и подсчетом наблюдаемых плодов
	Критерии эффективности	
	Оперативность осмотра, полнота осмотра, правильность определения плодов	
2	Аэрозольная обработка растений	Движение квадрокоптера над участком произрастания посевных культур, а также проведение соотнесенной с их видом пестицидной и гербицидной аэрозольной обработки
	Критерии эффективности	
	Оперативность обработки, полнота обработки, прецизионность обработки	
3	Осмотр с/х техники	Движение квадрокоптера над местностью для ее картографирования, нейросетевое детектирование объектов, возврат к местам расположения с/х техники для детального осмотра
	Критерии эффективности	
	Оперативность осмотра, правильность классификации техники, правильность локализации техники	
4	Инспекция технического состояния зданий	Движение квадрокоптера по выбранному маршруту вблизи здания, нейросетевое детектирование повреждений и оценка степени износа
	Критерии эффективности	
	Оперативность осмотра, полнота осмотра, правильность детекции повреждений, прецизионность оценки износа	

Схожесть технологических процессов, отраженных в данной таблице, позволяет говорить о возможности их формализованного описания, алгоритмизации и последующего моделирования с применением современных программных сред.

III. ТЕОРИЯ

Пусть математическая модель квадрокоптера определяется набором статических и динамических параметров: $M = \{M_s, M_d\}$.

Статические параметры включают информацию о массе БПЛА, моментах инерции, геометрии дрона, параметрах камеры (в т.ч. о точке крепления, зоне видимости и т.д.) и параметрах инструментального оснащения: $M_s = \{m, I, G, P_c, P_i\}$.

Динамические параметры включают информацию о пространственном положении и углах ориентации корпуса БПЛА в каждый момент времени: $M_d(t) = \{x_i, y_i, z_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i\}$.

Наряду с параметрами квадрокоптера определим параметры среды $M_e = \{o_1, \dots, o_{N1}\}$, отражающие наличие и свойства ее значимых объектов.

Также зададим параметры технологического процесса $M_p = \{r_1, \dots, r_{N2}\}$, описывающие правила и целевые критерии, по которым БПЛА взаимодействует с объектами внешней среды.

Тогда шаг имитационного моделирования системы БПЛА-среда может быть описан следующим образом:

$$M_d(t+1) = F(M_d(t), M_s, M_e, M_p),$$

где F – это суперпозиция законов управления квадрокоптером и факторов влияния внешней среды.

Обобщенная методика моделирования БПЛА согласно предложенной схеме приведена на Рис. 3.

В данной методике следует выделить 4 основных этапа, укрупненных относительно базовых операций:

1. этап формализации решаемой задачи;
2. этап разработки компьютерных моделей;
3. этап разработки алгоритмического обеспечения;
4. этап экспериментальной верификации.



Рис. 3. Методика комплексного исследования БПЛА.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В целях подтверждения теоретических положений, относящихся к методике моделирования БПЛА, были разработаны компьютерные модели автономных квадрокоптеров и проведены комплексные экспериментальные исследования по оценке их применимости в тех или иных технологических процессах с применением программных сред Pygame, CoppeliaSim EDU.

В качестве отправной точки для разработки были использованы данные, приведенные в Табл. I. Фрагменты моделирования БПЛА квадрокоптерного типа представлены на Рис. 4.

Стоит отметить, что формат отображения компьютерной модели может варьироваться. Так, при моделировании группы дронов целесообразно

абстрагироваться от специфики трехмерной среды и перейти к планарной проекции ключевых объектов сцены. В то же время при рассмотрении одиночных дронов вопросы исследования их окружения приобретают дополнительный интерес. Возникает потребность в более тщательной визуализации для расчета целевых показателей прикладной задачи.

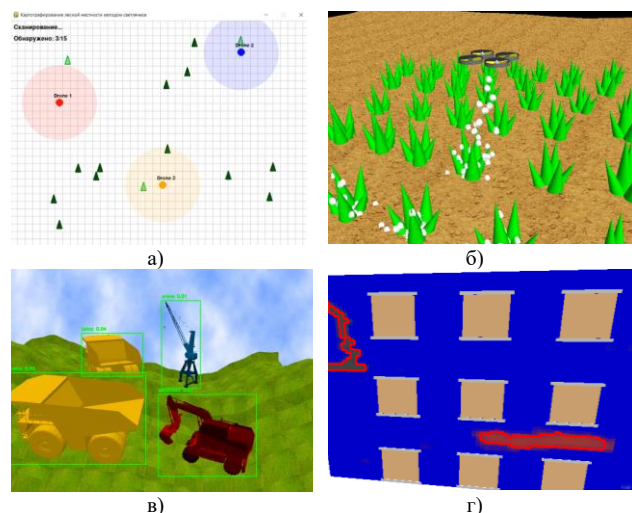


Рис. 4. Моделирование некоторых задач, решаемых автономными квадрокоптерами: а) осмотр сада группой дронов; б) аэрозольная обработка растений; в) осмотр техники; г) инспекция состояния зданий.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты в части концептуализации процесса формирования иерархии компьютерных моделей весьма значимы для организации оперативной проектной работы по созданию симуляционных сред при наладке технологических процессов АПК.

Результаты проведенного согласно выработанной методике виртуального моделирования четырех прикладных задач ЦСХ носят предварительный характер, но, тем не менее, в достаточной степени отражают значимость вопросов планирования траекторий движения БПЛА, визуального анализа его внешней обстановки, управления исполнительными подсистемами дрона при обработке растений.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно заключить, что на сегодняшний день в достаточной степени сформировалась нормативно-правовая база, регламентирующая перечень работ, выполняемых фермерскими хозяйствами и критерии к качеству данных работ. Кроме того, мировым научно-техническим сообществом накоплен существенный задел в области конструирования БПЛА. Подобное положение дел существенно упрощает автоматизацию технологических процессов АПК.

Предложенная авторами методика комплексного исследования способов применения БПЛА с привлечением средств компьютерного моделирования обосновывает возможность синергетического взаимодействия заказчика работ в сфере ЦСХ и инженера-исполнителя при синтезе плана решения задачи, а также непосредственно помогает в создании эффективных алгоритмов управления и обработки информации на борту автономных квадрокоптеров.

Дальнейшее развитие предложенного подхода возможно как в направлении углубленного рассмотрения каждой из перечисленных задач АПК, так и в направлении разработки алгоритмов поддержки принятия решений при выборе квазиоптимальных параметров компьютерной модели автономного квадрокоптера.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Постановление Правительства РФ от 5 марта 2021 г. N 325 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/400424658>, свободный (дата обращения: 22.06.2025).
- [2] Материал посадочный плодовых и ягодных культур. Технические условия: ГОСТ Р 59653-2021: национальный стандарт РФ: дата введения 2021-08-26.
- [3] Приказ Минсельхоза России от 14.04.2023 N 388 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minselkhoza-rossii-ot-14042023-n-388-ob-utverzhenii>, свободный (дата обращения: 22.06.2025).
- [4] Федеральный закон от 19 июля 1997 г. N 109-ФЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/11900732/>, свободный (дата обращения: 22.06.2025).
- [5] Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 21 октября 2020 г. N 622 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/74832099/>, свободный (дата обращения: 22.06.2025).
- [6] Постановление Правительства РФ от 01 августа 2016 г. N 740 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/71459762>, свободный (дата обращения: 22.06.2025).
- [7] Торговля. Услуги доставки товаров розничным покупателям. Общие требования: ГОСТ Р 70760—2023: национальный стандарт РФ: дата введения 2023-12-01.
- [8] Роботы и робототехнические устройства. Сервисные мобильные роботы. Уровни автономности. Термины и определения: ГОСТ Р 60.6.0.1-2021: национальный стандарт РФ: дата введения 2021-05-20.
- [9] О.В. Рогозин, И.С. Пенской, “Метод траекторного управления мультироторным беспилотным летательным аппаратом в задаче следования за объектом,” Образовательные технологии, №. 4, С. 92-110, 2019.
- [10] N. Hwang, J. Kim and P. Jung, “Rule-Based Multiple Coverage Path Planning Algorithm for Scanning a Region of Interest,” *Drones*, vol. 9 (5), pp. 371, 2025.
- [11] W. Sun, Z. Luo, K. Huang and J. Shi, “Joint Deployment and Coverage Path Planning for Capsule Airports with Multiple Drones,” *Drones*, vol. 7 (7), pp. 457, 2023.
- [12] E.V. Vazquez-Carmona, J.I. Vasquez-Gomez, J.C.H. Lozada and M. Antonio-Cruz, “Coverage path planning for spraying drones,” *arXiv:2105.08743*, pp. 1-36, 2021.
- [13] N.R. Gatkhal, S.M. Nalawade, G.B. Bhanage, R.K. Sahni, A.A. Walunj, P.B. Kadam and M. Ali, “Review of UAVs for efficient agrochemical spray application,” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 18 (1), pp. 1-9, 2025.
- [14] S.M.Z. Younis and J. Iqbal, “Estimation of soil moisture using multispectral and FTIR techniques,” *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, vol. 18, pp. 151-161, 2015.
- [15] S.K. Nagendran and M.A.M. Ismail, “Application of UAV photogrammetry for quarry monitoring,” *Warta Geologi*, vol. 46 (2), pp. 76-81, 2020.
- [16] N.A. Idris, M. Kaamin, A.S. Sarif, M.S.M. Nawawi, H.M. Noh, M. Mokhtar and A.A. Kadir, “High-Rise Building Inspection by Using Unmanned Aerial Vehicles,” *Construction Technologies and Architecture*, vol. 4, pp. 195, 2023.
- [17] S. Alizadehsalehi, I. Yitmen, T. Celik and D. Arditi, “The effectiveness of an integrated BIM/UAV model in managing safety on construction sites,” *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 26 (4), pp. 829-844, 2018.
- [18] Y. Li, Z. Li, Y. Liu, G. Sheng and X. Jiang, “Pin Bolt State Identification Using Cascaded Object Detection Networks,” *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, pp. 813945, 2022.
- [19] P.Y. Ingle, Y. Kim and Y. Kim, “DVS: A Drone Video Synopsis towards Storing and Analyzing Drone Surveillance Data in Smart Cities,” *Systems*, vol. 10 (5), pp. 170, 2022.
- [20] H.D. Nguyen, B. McHenry, T. Nguyen, H. Zappone, A. Thompson, C. Tran, A. Segrest and L. Tonon, “Accurate Crop Yield Estimation of Blueberries using Deep Learning and Smart Drones,” *arXiv:2501.02344v1*, pp. 1-30, 2025.
- [21] R. Aburasain, E.A. Edirisinghe and A. Albatay, “Drone-Based Cattle Detection Using Deep Neural Networks,” *Intelligent Systems and Applications (IntelliSys 2020)*, pp. 598-611, 2021.
- [22] P. Murugaiyan and S. Vijayakumar, “A Solution to Drone Routing Problems using Docking Stations for Pickup and Delivery Services,” *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2675 (1), pp. 1-19, 2021.

Информация об авторах

Диане Секу Абдель Кадер, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории №90 Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия, e-mail: diane1990@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8690-6422

Андропова Алина Александровна, магистрант МИРЭА – Российского технологического университета, Москва, Россия, e-mail: andronova.a.a@edu.mirea.ru

Дудка Николай Николаевич, бакалавр МИРЭА – Российского технологического университета, Москва, Россия, e-mail: dudka.n.n@edu.mirea.ru

Молев Никита Сергеевич, бакалавр МИРЭА – Российского технологического университета, Москва, Россия, e-mail: molev.n.s@edu.mirea.ru

Душков Даниил Дмитриевич, бакалавр МИРЭА – Российского технологического университета, Москва, Россия, e-mail: dushkov.d.d@edu.mirea.ru

Modeling of autonomous quadcopters in typical tasks of the agro-industrial sector

S.A.K. Diane¹, A.A. Andronova², N.N. Dudka²,
N.S. Molev², D.D. Dushkov²

¹*V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia*

Abstract – The rapid growth in the production of multirotor unmanned aerial vehicles, accompanied by the continuous development of control and information processing technologies, creates prospects for the use of such devices in a wide range of agricultural tasks. This study analyzes approaches to modeling autonomous quadrocopters in the tasks of inspecting agricultural fields and gardens, technical structures, as well as for processing crops. We give a conceptualization of the process related to the formation of a hierarchy of models, which account for quadrocopter and its external environment. A mathematical formalization and a methodology for a comprehensive study of such computer models of are proposed. The results of virtual experiments are also presented.

Keywords – Autonomous quadrocopter, digital agriculture, area monitoring, geobotanical monitoring, plant treatment.

References

- [1] Decree of the Government of the Russian Federation No. 325 dated March 5, 2021 (In Russ.) [Electronic resource]. – Access mode: <https://base.garant.ru/400424658>, free (accessed: 06/22/2025).
- [2] Planting material for fruit and berry crops. Technical specifications: GOST R 59653-2021: national standard of the Russian Federation: date of introduction 2021-08-26.
- [3] Order of the Ministry of Agriculture of Russia dated 04/14/2023 N 388 (In Russ.) [Electronic resource]. – Access mode: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minselkhoza-rossii-ot-14042023-n-388-ob-utverzhenii>, free (accessed: 06/22/2025).
- [4] Federal Law No. 109-FZ of July 19, 1997 (In Russ.) [Electronic resource]. – Access mode: <https://base.garant.ru/11900732>, free (accessed: 06/22/2025).
- [5] Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated October 21, 2020 No. 622 (In Russ.)
- [6] Electronic resource]. – Access mode: <https://base.garant.ru/74832099>, free (accessed: 06/22/2025). Decree of the Government of the Russian Federation No. 740 dated August 01, 2016 (In Russ.) [Electronic resource]. – Access mode: <https://base.garant.ru/71459762>, free (accessed: 06/22/2025).
- [7] Trade. Goods delivery services to retail customers. General requirements: GOST R 70760-2023: national standard of the Russian Federation: date of introduction 2023-12-01. (In Russ.)
- [8] Robots and robotic devices. Mobile service robots. Levels of autonomy. Terms and definitions: GOST R 60.6.0.1-2021: national standard of the Russian Federation: date of introduction 2021-05-20. (In Russ.)
- [9] O.V. Rogozin, I.S. Penzky, “The method of trajectory control of a multirotor unmanned aerial vehicle in the task of following an object,” Educational Technologies, No. 4, pp. 92-110, 2019. (In Russ.)
- [10] N. Hwang, J. Kim and P. Jung, “Rule-Based Multiple Coverage Path Planning Algorithm for Scanning a Region of Interest,” Drones, vol. 9 (5), pp. 371, 2025.
- [11] W. Sun, Z. Luo, K. Huang and J. Shi, “Joint Deployment and Coverage Path Planning for Capsule Airports with Multiple Drones,” Drones, vol. 7 (7), pp. 457, 2023.
- [12] E.V. Vazquez-Carmona, J.I. Vasquez-Gomez, J.C.H. Lozada and M. Antonio-Cruz, “Coverage path planning for spraying drones,” arXiv:2105.08743, pp. 1-36, 2021.
- [13] N.R. Gatkhal, S.M. Nalawade, G.B. Bhanage, R.K. Sahni, A.A. Walunj, P.B. Kadam and M. Ali, “Review of UAVs for efficient agrochemical spray application,” International Journal of Agricultural and Biological Engineering, vol. 18 (1), pp. 1-9, 2025.
- [14] S.M.Z. Younis and J. Iqbal, “Estimation of soil moisture using multispectral and FTIR techniques,” The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, vol. 18, pp. 151-161, 2015.
- [15] S.K. Nagendran and M.A.M. Ismail, “Application of UAV photogrammetry for quarry monitoring,” Warta Geologi, vol. 46 (2), pp. 76-81, 2020.
- [16] N.A. Idris, M. Kaamin, A.S. Sarif, M.S.M. Nawawi, H.M. Noh, M. Mokhtar and A.A. Kadir, “High-Rise Building Inspection by Using Unmanned Aerial Vehicles,” Construction Technologies and Architecture, vol. 4, pp. 195, 2023.
- [17] S. Alizadehsalehi, I. Yitmen, T. Celik and D. Arditi, “The effectiveness of an integrated BIM/UAV model in managing safety on construction sites,” International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, vol. 26 (4), pp. 829-844, 2018.
- [18] Y. Li, Z. Li, Y. Liu, G. Sheng and X. Jiang, “Pin Bolt State Identification Using Cascaded Object Detection Networks,” Frontiers in Energy Research, vol. 10, pp. 813945, 2022.
- [19] P.Y. Ingle, Y. Kim and Y. Kim, “DVS: A Drone Video Synopsis towards Storing and Analyzing Drone Surveillance Data in Smart Cities,” Systems, vol. 10 (5), pp. 170, 2022.
- [20] H.D. Nguyen, B. McHenry, T. Nguyen, H. Zappone, A. Thompson, C. Tran, A. Segrest and L. Tonon, “Accurate Crop Yield Estimation of Blueberries using Deep Learning and Smart Drones,” arXiv:2501.02344v1, pp. 1-30, 2025.
- [21] R. Aburasain, E.A. Edirisinghe and A. Albatay, “Drone-Based Cattle Detection Using Deep Neural Networks,” Intelligent Systems and Applications (IntelliSys 2020), pp. 598-611, 2021.
- [22] P. Murugaiyan and S. Vijayakumar, “A Solution to Drone Routing Problems using Docking Stations for Pickup and Delivery Services,” Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, vol. 2675 (1), pp. 1-19, 2021.